

Опять о нём

Итак, спустя несколько лет, вернёмся к нашим баранам. Точнее, «покемонам». Неожиданно для меня, схема оказалась очень популярна. Появилось много последователей, собиравших оригинальную схему и экспериментирующих с другой элементной базой. Мне задают много вопросов по поводу модернизации оригинальной схемы, суть которых сводится к одному – как сделать что-то помощнее? Что ж, умоощнять так умоощнять. Был «покемон» на 4 ватта, значит, будем строить на 20.

Для начала несколько слов в дополнение к моей первой статье о том, как работает «покемон».

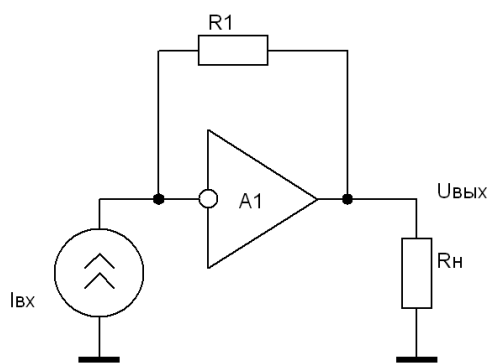
Четыре аксиомы.

1. Источник основных искажений в усилителе мощности – выходной каскад.
2. Искажения могут быть снижены при помощи ООС.
3. Для исключения возможности возникновения динамических искажений контур ООС должен охватывать как можно меньшее число каскадов.
4. Контур ООС должен быть максимально широкополосным (также для исключения динамических искажений).

Проанализировав все четыре пункта, делаем выводы:

- пренебрегаем искажениями входного каскада;
- применяем ООС только в выходном каскаде;
- исключаем из контура ООС трансформатор, как элемент с самой кривой и узкой АЧХ.

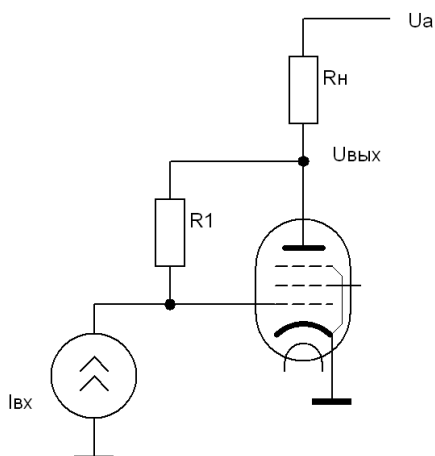
Из четырёх известных типов ООС выбираем параллельную обратную связь по напряжению, как наиболее удобную для реализации в выходном ламповом каскаде. По теории, для осуществления такого типа ООС источник сигнала должен иметь большое выходное сопротивление. Чем оно больше, тем глубже ООС.



На рисунке $A1$ – инвертирующий усилитель с бесконечно большим коэффициентом усиления по напряжению. Сигнал на вход усилителя подаётся с генератора тока (или источника тока, управляемого напряжением). Выходное напряжение $U_{вых} = - I_{вх} * R1$.

Входное и выходное сопротивление каскада при $K = \infty$ стремится к нулю.

Как это выглядит с лампой. Цепи смещения не показаны.



Чем выше крутизна лампы, тем ближе этот каскад к идеальному, тем ниже входное и выходное сопротивления, меньше искажения.

Входное сопротивление каскада $R_{вх} = R1 / (S * Rн)$;

выходное сопротивление $R_{вых} = 1 / S$;

где S – крутизна.

Как видим, выходное сопротивление такое же, как у катодного повторителя – минимально возможное для лампового каскада с местной ООС. Так же очевидно, что выгоднее всего применять лампы с большой крутизной характеристики.

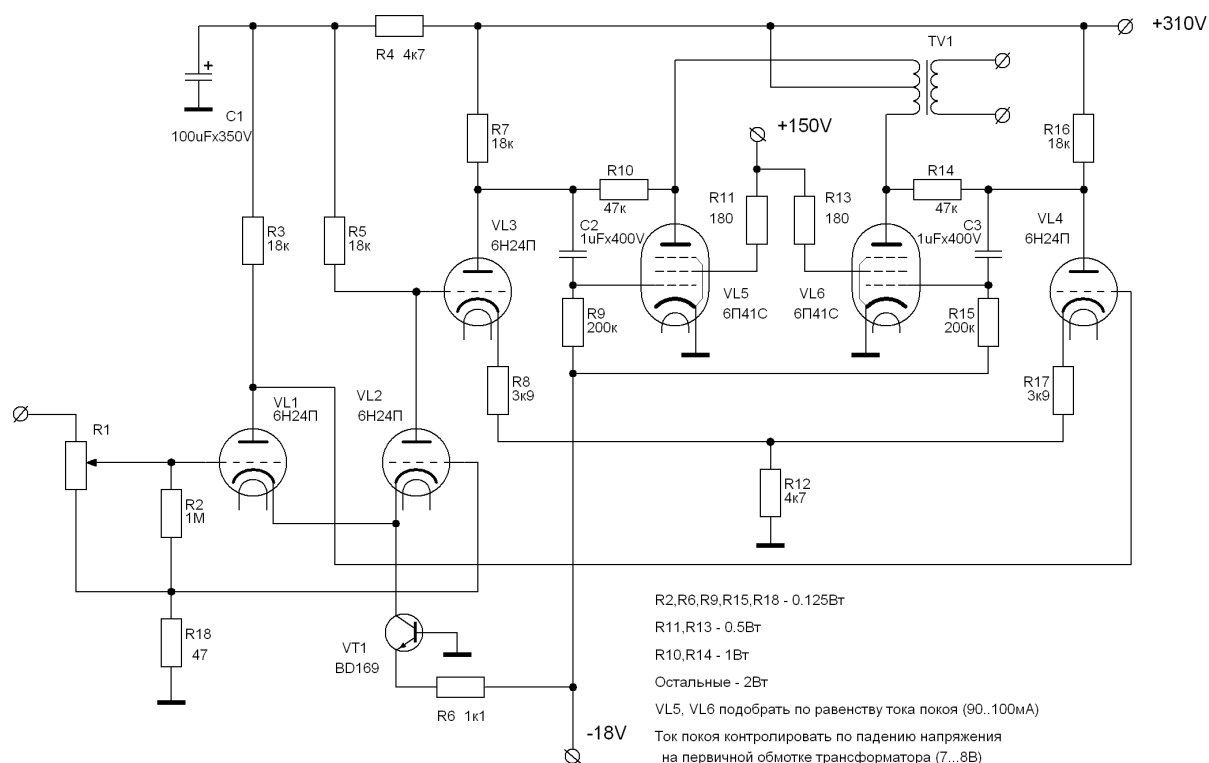
Хватит теории, переходим к практике. Василий Боднар из Ростова-на-Дону попросил меня разработать схему двухтактного усилителя специально для его серии тороидальных трансформаторов. И особым пожеланием было применение ламп 6П41С.

Отлично. Выбор лампы как нельзя лучше соответствует покемоновской идеологии (тетрод с высокой крутизной) и поставленной задаче – усилитель мощностью 20 ватт. Сразу хочу сделать несколько заявлений, чтобы отсечь множество возможных вопросов типа «а почему».

Во-первых, выходной каскад должен работать в чистейшем классе «А». Никаких «АВ» или «В». Когда «покемон» был однотактным, всем было понятно, почему так. Теперь, когда он стал двухтактным, объясняю – ни в коем случае нельзя допускать отсечки анодного тока выходных ламп. В момент отсечки происходит обрыв цепи местной ООС и на сетку лампы действует напряжение, наведённое через трансформаторную связь между половинами первичной обмотки с другого плеча выходного каскада. И это напряжение будет сильно искажено индуктивностью рассеяния. А мы уже договорились исключить трансформатор из контура ООС настолько, насколько это вообще возможно. Для достижения чистого класса «А» и выходной мощности 20 ватт 6П41С придётся не по-детски раскошегарить. Анодный ток 100мА при анодном напряжении 300 вольт – вот необходимый режим. Конечно, 30 ватт на аноде – это намного больше, чем указано в справочнике, но в справочнике указан режим для работы в строчной развёртке. В аудиоусилителе 6П41С такой режим держит вполне нормально. Напряжение на экранной сетке выбираем равным половине анодного питания, по моей давней традиции обращения со «строчными» тетрами.

Во-вторых – никаких автосмещений в выходном каскаде. Просто потому, что их там не должно быть. Я потратил массу своего времени, чтобы прийти к этой аксиоме. Кто мне не верит – может потратить своё время, а я эту тему для себя закрыл.

Смотрим схему.



Входной каскад, он же фазоинвертор, выполнен в виде дифференциального каскада с источником тока в катодах. Такая схема позволяет добиться замечательной балансировки фазоинвертора без всяких обратных связей и настройки.

Следом за ним идёт каскад, представляющий собой источник тока, управляемый напряжением. Крутизна преобразования напряжение-ток задаётся величиной резисторов R8 и R17. Таким образом, чувствительность усилителя можно изменять в широких пределах изменением соотношения резисторов R8, R12, R17. При выбранных значениях чувствительность составляет около 1.5В (ампл). Чтобы поднять её в два раза, нужно взять R8=R17=2кОм, R12=6.2кОм.

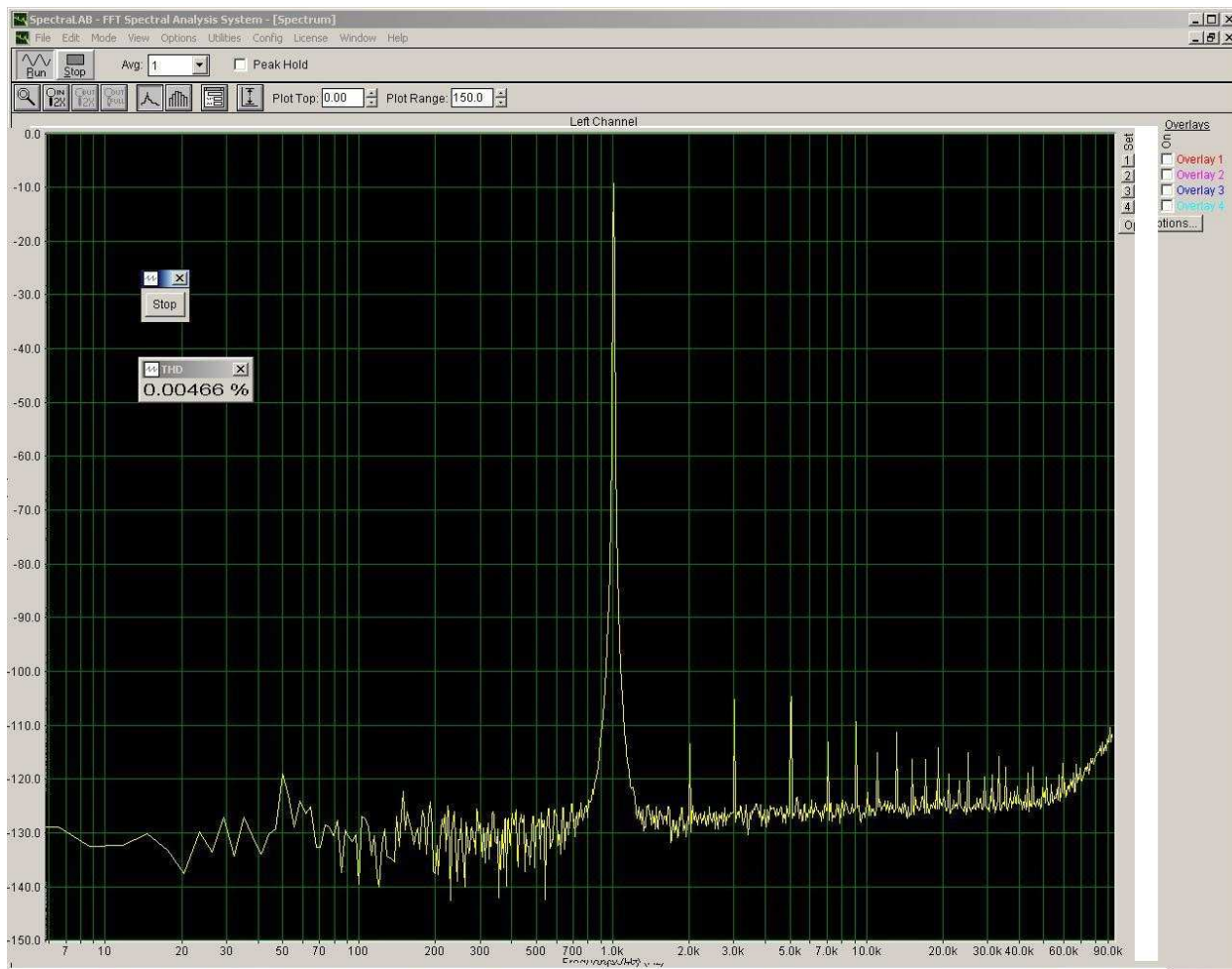
Глубина ООС в выходном каскаде ослаблена делителями R7, R10 и R14, R16. Поэтому выходное сопротивление не как у катодного повторителя, а примерно в 3.5 раза выше (около 150 Ом на каждое плечо, в сумме примерно 300 Ом между анодами, плюс активное сопротивление первички). Устранить ослабление можно заменой R7 и R16 на источники тока, но это потребует значительного усложнения схемы.

Межкаскадные конденсаторы C2 и C3 включены внутри контура ООС. Это значительно снижает вносимую ими в звук окраску, делает звук более нейтральным. Поэтому усилитель не сильно критичен к типу применённых конденсаторов. В своём макете я поставил китайские лавсановые. Увеличивать ёмкость сверх 1 мкФ не стоит. Благодаря тому, что конденсаторы включены внутри контура ООС, нижняя граница АЧХ каскада находится в районе 0.03 Гц.

Диапазон регулирования напряжения на экранных сетках 6П41С – 130...160 вольт, на первых сетках – 15...18 вольт. Главное – добиться величины анодного тока 90..100 мА.

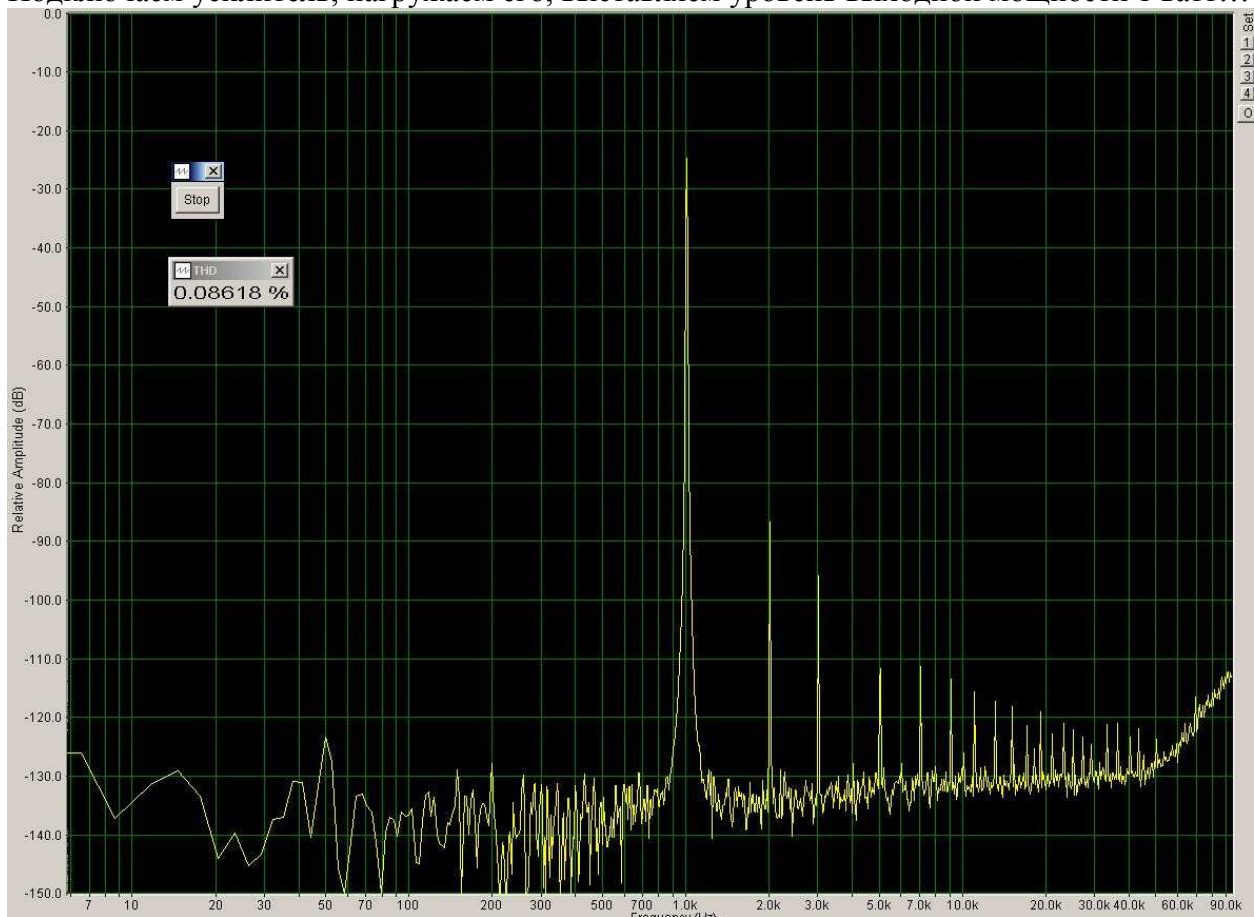
Посмотрим, на что способен этот крепыш. Для исследования я взял внешнюю USB «профессиональную» звуковую карту E-MU0404 и старый добрый «спектралаб». Заставить карту работать под «спектралабом» в 24-битном разрешении мне не удалось, зато удалось включить частоту дискретизации 192 кГц и исследовать спектр усилителя аж до 96 кГц. Помня о том, что динамический диапазон 16-битного квантования

ограничивается уровнем в 92 дБ, а заявленный динамический диапазон карты 117 дБ, я протестировал сквозной канал – соединил вход карты напрямую с выходом, и посмотрел спектр синуса 1 кГц, оцифрованного с 16-битным квантованием.

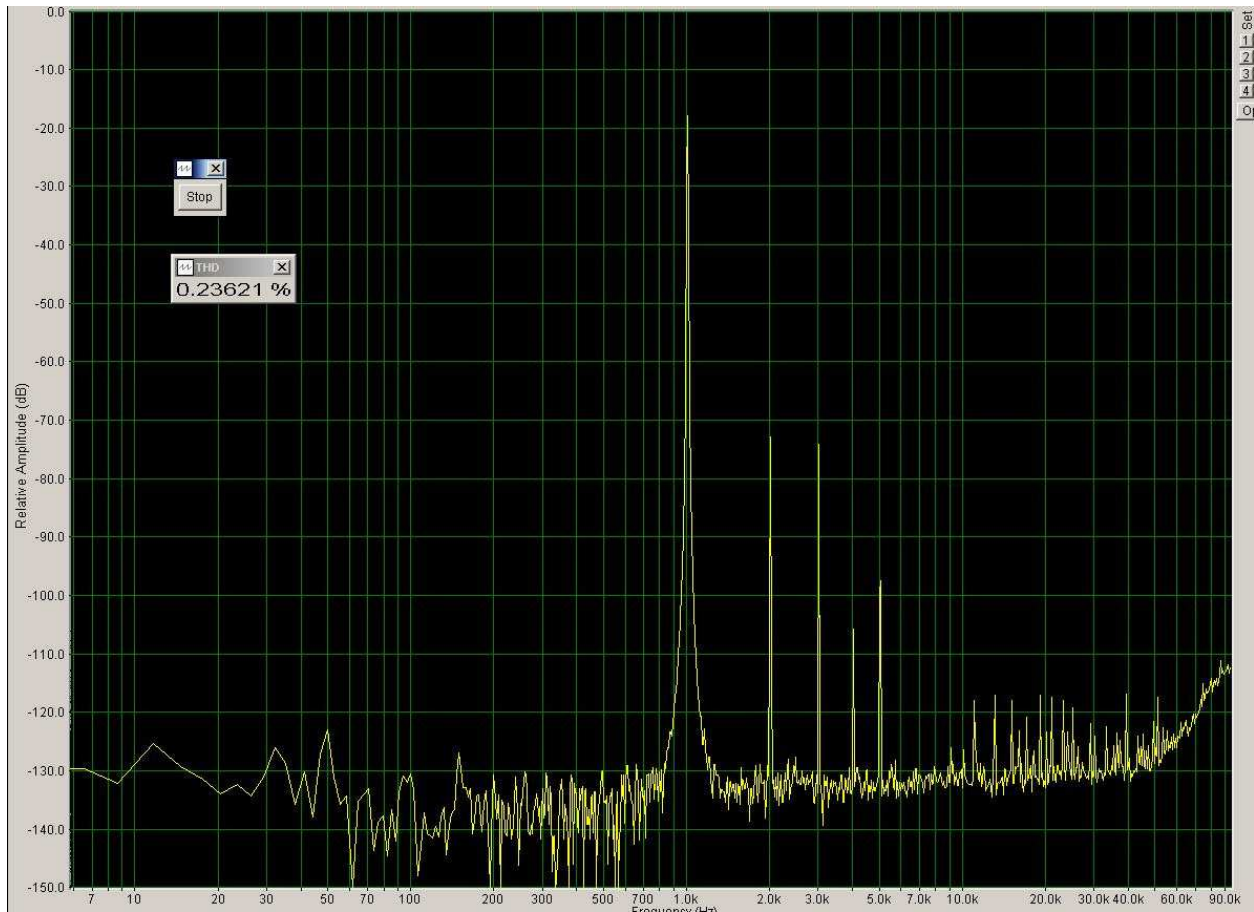


Мдя... Ну да ладно. На то, что ниже -100дБ, смотреть не будем, считая этот мусор продуктами искажений самого измерительного инструмента.

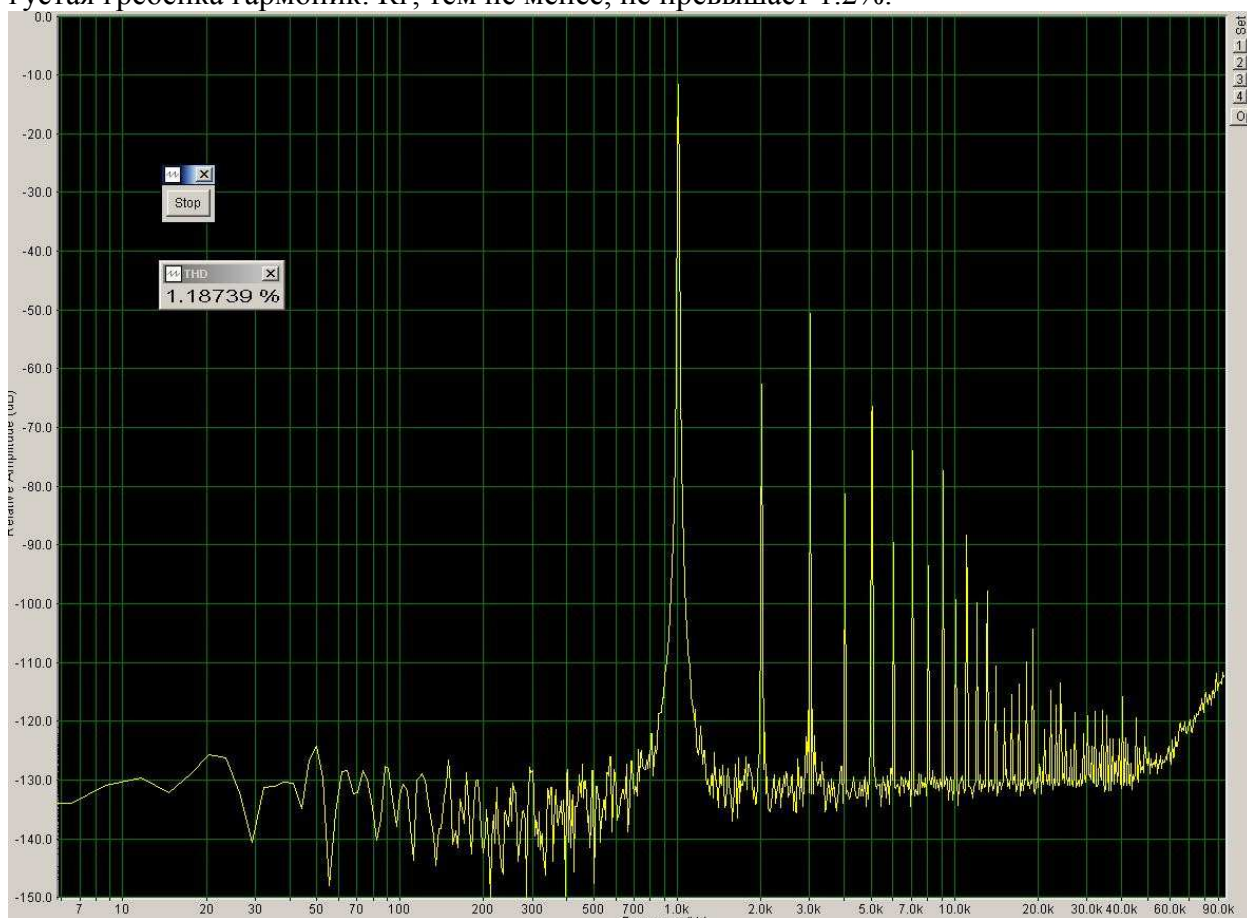
Подключаем усилитель, нагружаем его, выставляем уровень выходной мощности 1 ватт...



Потом 5 ватт...



И, наконец, 20 ватт. Здесь начинается небольшое ограничение сигнала и связанная с ним густая гребёнка гармоник. Кг, тем не менее, не превышает 1.2%.



Приятно порадовало полное отсутствие в спектре сигнала фона 50 Гц и его гармоник. То, что я не услышал фона из колонок – это не от глухоты. А его просто нет, вплоть до уровня -125 дБ. Поделюсь секретом – это я электронных дросселей в питание напихал (справедливости ради должен отметить, что двойной LC-фильтр чистит питание не хуже). Ну и правильный монтаж, естественно. Кроме того, выходные трансформаторы пришлось удалить от силового на 40 см. При приближении «выходников» к «силовику», сразу видно, как на спектре растёт гребёнка 50, 100, 150 и т.д. герц. Было решено вынести выходные трансформаторы прямо к колонкам.

Линейность АЧХ. Сами понимаете, это зависит, прежде всего, от выходных трансформаторов. С теми, что мне дал Василий, нелинейность в диапазоне 20Гц...20кГц не превысила 0.5 дБ.

Ну, вот, собственно, и всё, что я хотел сказать.

P.S. При наладке усилителя можно поварьировать в небольших пределах номиналы резисторов R6 и R12 для точной подстройки режимов ламп. Критерий – минимум искажений. Если есть желание применить несекционированный выходной трансформатор, то для коррекции АЧХ на ВЧ следует включить корректирующую RC-цепочку между катодами VL3 и VL4 – резистор 2...3 кОм и конденсатор 100...510 пФ, включенные последовательно.