

С НОВЫМ ГОДОМ
С НОВЫМ ГОДОМ

ЕСЛИ НЕЛЬЗЯ, НО ОЧЕНЬ ХОЧЕТСЯ ИЛИ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТИПА ТВЗ

Евгений Карпов

В статье приведен краткий анализ параметров триодного однотактного каскада с выходным трансформатором типа ТВЗ и определены его реально достижимые параметры. Предложен способ переделки трансформаторов типа ТВЗ, не связанный с его перемоткой, позволяющий улучшить его параметры. Приведена схема лампового усилителя, предназначенного для работы с переделанным трансформатором, и приведены результаты его испытаний.

Эта статья носит прикладной характер и предназначена для достаточно опытных радиолюбителей. Я не буду вдаваться в подробности выбора элементов – рекомендаций, хоть пруд пруди - и подробности монтажа, а ограничусь только сведениями, дающими возможность повторить усилитель всем желающим.

Множество разговоров про чудо лампового звука, естественно, вызывает желание это чудо услышать; и первое, с чем столкнутся желающие – проблема выходного трансформатора. Проблема решается тремя путями.

Первый путь – изготовление трансформатора самостоятельно, это вполне возможно, но совсем не просто.

Второй путь – купить хороший выходной трансформатор, это просто, но совсем не дешево.

Третий путь – использовать то, что наиболее доступно, как в физическом, так и в финансовом плане.

Так как большинство людей идет третьим путем, я решил его изучить более подробно и проследовал на радиорынок. Зрелище, как говаривал ослик Иа, было душераздирающим. Фактически, оказались доступными только выходные трансформаторы от старых телевизоров. Зато можно было выбрать разные типы, и цена могла согреть даже душу скряги: она колебалась от 0.3 до 0.6 доллара, в зависимости от количества алкоголя, выпитого продавцом. Чаще всего встречались трансформаторы типа ТВЗ-1-9, их я и приобрел для экспериментов. Купил я и трансформаторы других типов для сравнения. Как оказалось, лучшими по параметрам оказались трансформаторы ТВЗ-1-1 и ТВ-2А-Ш наиболее почтенного возраста, но ТВЗ-1-9 было больше, именно с ними я решил бороться дальше.

Задача была поставлена следующим образом – попытаться улучшить параметры трансформатора его переделкой, но не перемоткой, а потом спроектировать выходной каскад так, чтобы максимально скомпенсировать его недостатки.

Немного теории

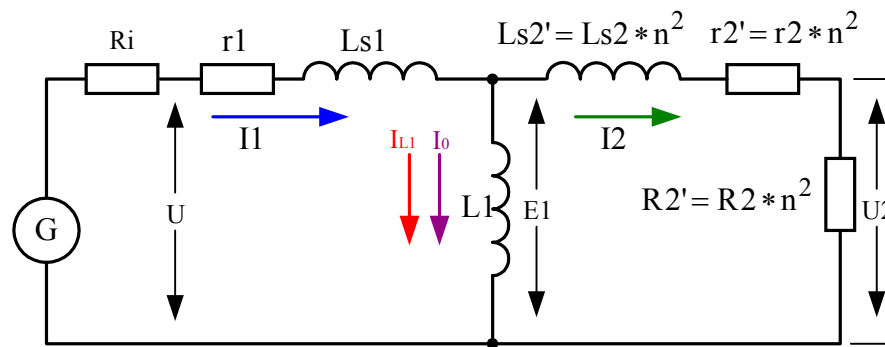
Чтобы разобраться, куда надо двигаться, давайте посмотрим, какие параметры трансформатора на что влияют. Если обратиться к классикам (например, Цыкину [1]) то, не вдаваясь в тонкости, можно сказать, что определяющими являются шесть параметров – индуктивность первичной обмотки, амплитуда индукции, индуктивность рассеяния, собственная емкость, сопротивления обмоток и коэффициент трансформации.

Параметры имеющихся трансформаторов были измерены и вот, что получилось –

Индуктивность первичной обмотки (L_1)	6.5 H;
Индуктивность рассеяния (приведенная к первичной обмотке) (L_s)	56 mH;
Емкость (приведенная к первичной обмотке) (C)	0.3 μ F;
Активное сопротивление первичной обмотки (r_1)	269 Ω ;
Активное сопротивление вторичной обмотки (r_2)	0.32 Ω .
Коэффициент трансформации (n)	37.

Здесь приведены усредненные данные, к сожалению, одинаковыми у трансформаторов оказались только надписи на катушках. Конечно, материал сердечника не известен, но после снятия кривых намагничивания я склоняюсь к мысли, что это сталь Э-44. В принципе, что есть - то есть, но надо было иметь точку отсчета для расчетов.

Взглянув на эти параметры, сразу вспоминается Иа, но давайте посмотрим, что же можно ожидать при использовании этого трансформатора. Я исходил из того, что наиболее часто такие трансформаторы используют в простых усилителях с выходными лампами 6Ф5П, 6Ф3П, 6П1П, 6П14П в триодном включении. В этом случае выходное сопротивление лампы находится в диапазоне 1.3÷2 k Ω . Для расчетов я взял среднее значение выходного сопротивления лампы, равное 1.7 k Ω . На рисунке 1 показана упрощенная эквивалентная схема трансформатора, подключенная к выходной лампе, которая представлена как генератор G с выходным сопротивлением R_i (все приведено к первичной стороне трансформатора). К ней мы будем периодически обращаться для пояснения расчетов.



Эквивалентная схема выходного каскада с трансформатором

Рисунок 1

Параметры большого сигнала

Посмотрим, как обстоят дела с индукцией в сердечнике. Так как величина индукции обратно пропорциональна частоте, то нас будет интересовать именно область низких частот, где индукция достигает максимальных значений. Фактически, величина индукции определит максимальную мощность, которую может передать трансформатор в области низких частот при приемлемых искажениях. Амплитуда индукции в сердечнике определяется по формуле –

$$B = \frac{E1 \cdot 10^4}{4.44 \cdot f \cdot S \cdot W1},$$

где E1 – напряжение, приложенное к первичной обмотке (V), f- частота сигнала (Hz), S – активная площадь сечения сердечника (см²), W1 – число витков.

Для нас более удобно получить эту зависимость сразу через мощность в нагрузке. Если Вы посмотрите на рисунок 1, то станет ясно, что напряжение E1, приложенное к первичной обмотке, равно сумме напряжений на нагрузке R2' и напряжении на сопротивлении обмотки r2'. Индуктивность рассеяния Ls2' на низких частотах можно не учитывать. Также следует учесть, что через первичную обмотку протекает ток покоя лампы I₀, создающий намагничивающее поле, которое в свою очередь, определит начальное значение индукции B₀. По моим расчетам величина B₀ приблизительно равна 0.3 Т. После преобразования формула примет вид –

$$B = \frac{10^4 \cdot n^2 \cdot \left(\sqrt{\frac{P}{R2 \cdot n^2}} \cdot r2 + \sqrt{\frac{P}{R2 \cdot n^2}} \cdot R2 \right)}{4.44 \cdot f \cdot S \cdot W1} + B_0.$$

Для ручных расчетов эта формула чересчур громоздка, но машине все равно. По ней для трех час-

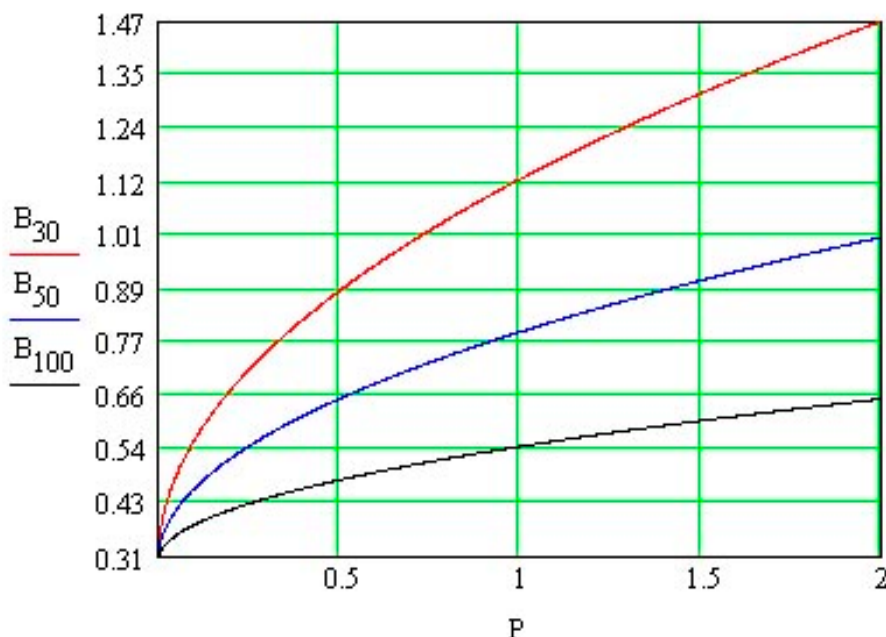


Рисунок 2

тот построены графики зависимости индукции от выходной мощности (рисунок 2).

Если учесть, что материал начинает насыщаться при индукции ~ 1.15 Т (это было выяснено при снятии основной кривой намагничивания), и допустить максимальную индукцию равной приблизительно 0.7 Т, то из графиков сразу ясно, какую мощность можно получить в области низких частот. Как Вы видите, на частоте 30 Hz можно получить выходную мощность около 0.25 W, на 50 Hz около 0.8 W, а на 100 Hz – индукция нас вообще не ограничивает. Превышение этих значений не только сильно повышает уровень гармоник, генерируемый трансформатором, но и увеличивает уровень гармоник, генерируемый лампой, за счет большего влияния уменьшения входного сопротивления трансформатора. Измерения на реальном каскаде показали, что при выходной мощности 1W, уменьшение частоты сигнала с 1 kHz до 50 Hz приводит к возрастанию уровня гармоник более, чем в два раза (лампа 6Ф5П).

Параметры малого сигнала

При работе усилителя на малых мощностях, когда проблем с индукцией нет (допустим у Вас усилитель для телефонов), оценим влияние трансформатора на частотные свойства усилителя. В этом случае удобнее производить оценку, воспользовавшись такими параметрами трансформатора, как индуктивность первичной обмотки и индуктивность рассеяния.

Если Вы посмотрите на рисунок 1, то станет ясно, что в области низких частот (индуктивностями рассеяния пренебрегаем) лампа нагружена на две параллельные цепи. Первая цепь - это индуктивность намагничивания L_1 , через которую течет ток намагничивания I_{L1} , вторая - это цепь нагрузки, состоящая из последовательно включенных сопротивлений r_2' и R_2' , через которую протекает ток I_2 . По мере снижения частоты сигнала реактивное сопротивление L_1 падает, соответственно I_{L1} растет, а I_2 уменьшается. Кроме снижения коэффициента передачи каскада происходит, в общем случае, еще одна неприятная вещь – падает входное сопротивление трансформатора, что приводит к уменьшению анодной нагрузки лампы и, соответственно, к росту коэффициента гармоник. Для оценки влияния индуктивности первичной обмотки воспользуемся широко известной упрощенной формулой –

$$M_L = \sqrt{1 + \left(\frac{Re}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_1} \right)^2},$$

где M_L – коэффициент частотных искажений, Re – сопротивление эквивалентного генератора. Величина Re определяется из следующего выражения –

$$Re = \frac{(R_i + r_1) \cdot (r_2' + R_2')}{R_i + r_1 + r_2' + R_2'}.$$

Эта формула как раз предназначена для расчетов при малых значениях индукции в области низких частот [1]. На рисунке 3 показаны результаты расчетов частотных искажений каскада в области нижних частот с выходным трансформатором ТВ3-1-9 для трех значений выходного сопротивления лампы.

Из графиков видно, что при принятом выходном сопротивлении лампы 1700 Ω (средняя кривая) завал частотной характеристики на -3db достигается при частоте около 40 Hz. Снижение выходного сопротивления лампы приводит к уменьшению частотных искажений (верхняя кривая).

Но не будем делать скоропалительных выводов и посмотрим, что происходит в области верхних частот.

Из рисунка 1 ясно, что индуктивности рассеяния включаются последовательно с нагрузкой (индуктивность L_1 можно не учитывать, так как в области высоких частот ток I_{L1} ничтожно мал), с повышением частоты их реактивное сопротивление растет, соответственно, это приводит к уменьшению выходной мощности. Коэффициент частотных искажений определим по формуле –

$$M_H = \sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_s}{R_i + r_1 + r_2' + R_2'} \right)^2},$$

где M_H – коэффициент частотных искажений, L_s – индуктивность рассеяния, приведенная к первичной обмотке (измеренное значение).

На рисунке 4 показаны результаты расчетов частотных искажений каскада в области верхних частот с выходным трансформатором ТВЗ-1-9 для трех значений выходного сопротивления лампы.

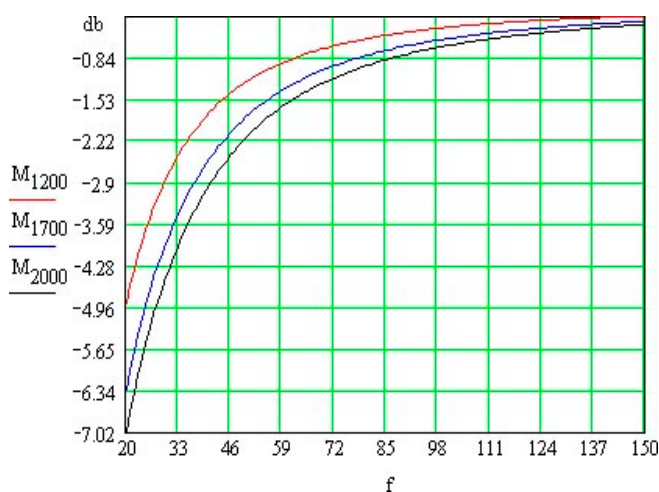


Рисунок 3

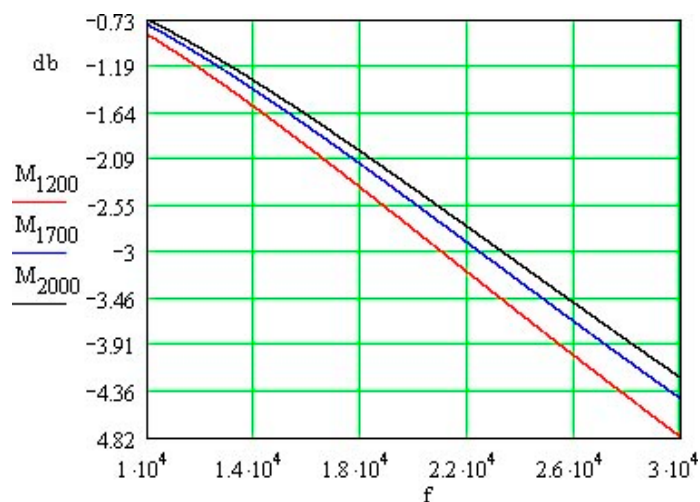


Рисунок 4

Как Вы видите, ситуация изменилась на противоположную – чем ниже выходное сопротивление лампы, тем больше частотные искажения. Этот факт легко объясним: чем больше лампа напоминает источник тока, тем меньшее влияние оказывают включенные последовательно с нагрузкой паразитные сопротивления на величину выходного тока I_1 ($I_2 = I_1$ в области высоких частот), в том числе, и индуктивность рассеяния. Это вполне справедливо в режиме малого сигнала.

Поэтому я Вам и рекомендовал не спешить браться за паяльник и менять тип выходной лампы.

Из вышесказанного можно сделать простой вывод, что для выходного трансформатора с не очень хорошими параметрами существует некоторое оптимальное выходное сопротивление источника сигнала, позволяющее получить максимально широкую полосу. Величину этого сопротивления достаточно просто вычислить, решив оптимизационную задачу в любом математическом пакете. Если трансформатор имеет большую индуктивность первичной обмотки и малые паразитные параметры, эта задача сразу теряет актуальность.

Это крайне поверхностное исследование параметров выходного каскада с трансформаторами типа ТВЗ дало ответ на два вопроса: чего ожидать от стандартного трансформатора и куда стремиться.

Собственно говоря, куда стремиться, было ясно с самого начала – паразитные параметры и амплитуду индукции надо снижать, а индуктивность первичной обмотки повышать. Но мне хотелось качественные (скорее эмоциональные) определения – повышать и понижать, перевести в количественную форму.

Такие параметры трансформатора, как индуктивность рассеяния, коэффициент трансформации и собственная емкость определяются параметрами катушки, и мы на них без перемотки последней воздействовать не можем.

Но не все потеряно! Изменив конструкцию трансформатора, мы можем воздействовать на индуктивность первичной обмотки и амплитуду индукции, а это совсем не мало.

Переделка трансформатора.

Переделка трансформатора заключается в изменении способа сборки сердечника. Исходно сердечник собран с зазором (реально, и Вы это увидите, прокладки в сердечнике нет, используется конструктивный зазор). Давайте удалим зазор сборкой сердечника вперекрышку и посмотрим, что получится.

Для переделки трансформатор надо вынуть из металлической обоймы, предварительно разогнув крепежные лапки. Далее, изъав из катушки магнитопровод, аккуратно отделите пластины друг от друга и соберите сердечник вперекрышку. Сборку сердечника делайте тщательно, для уменьшения конструктивного зазора, и обязательно используйте все имеющиеся в наличии пластины. Скорее всего, замыкающих пластин не хватит, поэтому желательно иметь еще один трансформатор с аналогичным сердечником. Если Вы переделываете два трансформатора, число пластин в обоих

должно быть одинаковым. Вид переделанного трансформатора без обоймы показан на рисунке 5. После сборки трансформатор желательно вставить в обойму. Легче всего это проделать, используя большие слесарные тиски, но особенно не усердствуйте – большие механические напряжения ухудшают магнитные свойства стали.

Я проделал все вышеуказанные операции и измерил параметры трансформатора.

Получилось следующее:

Индуктивность первичной обмотки

12.3 Н;

Индуктивность рассеяния

57 мН;

Емкость

0.3 μ F.

Коэффициент трансформации и сопротивления обмоток, естественно, не изменились.

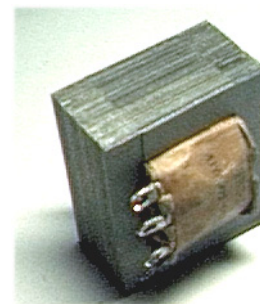


Рисунок 5

Как Вы видите, параметры трансформатора существенно улучшились – индуктивность первичной обмотки выросла почти в два раза, а паразитные параметры не изменились. Вы можете справедливо отметить: в трансформаторе нет зазора, следовательно, нет его линеаризирующего воздействия – согласен, но заметьте, отсутствие подмагничивания дало нам уменьшение амплитуды магнитной индукции в сердечнике на 0.3 Т при одинаковой выходной мощности. В итоге, коэффициент искажений, вносимый трансформатором, уменьшился. Совершенно очевидно, что возросшая индуктивность первичной обмотки позволяет расширить полосу воспроизводимых частот.

Теперь, конечно, трансформатор не может работать с подмагничиванием, и для его возбуждения необходимо использовать другой тип выходного каскада.

Выходной каскад

Наиболее очевидный путь - использовать дроссельный выходной каскад [2] и отделить трансформатор от цепи анода лампы емкостью (рисунок 6). Это решает основную задачу - исключить подмагничивание выходного трансформатора, но требует использования дросселя в анодной цепи. Требования к дросселю предъявляются не менее жесткие, чем к выходному трансформатору (по величине индуктивности, амплитуде индукции и паразитным параметрам). Поэтому, этот вариант для нас неприемлем. Хочу сразу предупредить читателей, что использование дросселей фильтров в этой схеме абсолютно недопустимо.

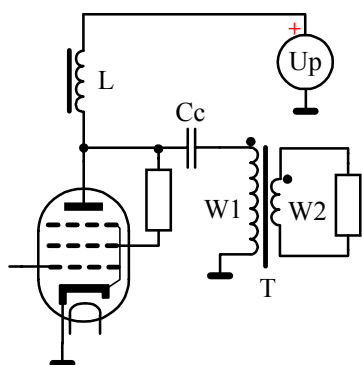


Рисунок 6

Наиболее подходящей для наших целей является схема с источником тока в цепи анода [3] (рисунок 7). Такая схема имеет ряд преимуществ по сравнению с дроссельным каскадом. Высокое выходное сопротивление источника тока позволяет получить от лампы максимальное усиление, каскад имеет более широкую полосу воспроизводимых частот, снижаются требования к источнику питания, вся конструкция имеет гораздо меньшие габариты.

Хочу более подробно коснуться вопроса полосы воспроизводимых частот и качества источника питания. Если в дроссельном каскаде принять индуктивность дросселя, равной бесконечности, а паразитные параметры равными нулю, то каскады будут иметь одинаковые параметры по коэффициенту усиления и полосе воспроизводимых частот. Но реализовать такой дроссель невозможно с реальным дросселем, так как конечная индуктивность ограничит полосу частот снизу, а паразитные параметры сверху. А вот источник тока с параметрами, близкими к идеальным, реализовать вполне возможно. Большим плюсом каскада с источником тока является отсутствие жестких требований к элементам источника питания, через него не протекает переменная составляющая тока нагрузки, а замыкается в контуре, образованном лампой, разделительной емкостью и первичной обмоткой трансформатора. Это дает возможность использовать в источнике любые типы емкостей и, в общем, не особенно важна амплитуда пульсаций.

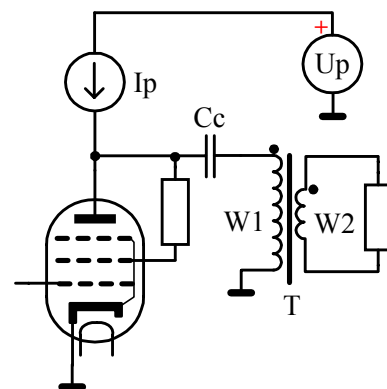


Рисунок 7

Существуют и минусы. Самым неприятным является то, что требуемое напряжение питания гораздо выше (как минимум в полтора раза по сравнению с дроссельным каскадом). Эффективность каскада, соответственно, меньше. И схема каскада гораздо сложнее.

Источник тока можно выполнить по любой схеме, как на лампе, так и на транзисторах. Я склонился к варианту на транзисторах по следующим причинам. Транзисторная схема позволяет получить более высокое качество стабилизации тока, минимальное рабочее напряжение гораздо ниже (итак, требуется весьма высокое анодное напряжение), не требуется дополнительная накальная обмотка для верхней лампы.

Предметом Вашей особой заботы должна стать разделительная емкость C_c . Ее качество будет влиять на выходной сигнал, так как через нее протекает выходной ток лампы. Про электролитические конденсаторы сразу следует забыть, можно использовать бумажные и пленочные емкости. Эта проблема не так страшна, как кажется, так как емкость относительно не велика и вполне может быть набрана даже из емкостей типа K73-17, 1.0x400V.

Схема усилителя

Полная принципиальная схема усилителя приведена на рисунке 8, там же указаны режимы ламп по постоянному току. Выбор активных компонентов схемы, в основном, определился возможностью их приобретения широким кругом радиолюбителей.

Усилитель двухкаскадный: первый каскад выполнен на триодной части лампы VL1, выходной каскад на пентодной части, которая включена триодом. В обоих каскадах в анодной цепи используются источники тока. Преимущества использования источника в выходном каскаде мы обсудили выше, использование источника тока в каскаде предварительного усиления также вполне обосновано.

Во-первых, это дает возможность получить от лампы максимальное усиление. Во-вторых, работа лампы при фиксированном токе позволяет снизить коэффициент гармоник каскада в два - два с половиной раза. Хорошая частотная характеристика обеспечивается выбором достаточно большой величины тока покоя лампы. В каскаде используется автоматическое смещение, образующееся на резисторе R4, также через него вводится не глубокая местная отрицательная обратная связь. При желании, усилитель можно охватить общей обратной связью, подав в цепь катода триода часть сигнала с выхода усилителя, через резистор R8.

В выходном каскаде используется фиксированное смещение, величина которого регулируется резистором R12. Основное назначение резистора R13 - обеспечить удобное измерение тока покоя выходного каскада, здесь желательно использовать однопроцентный резистор.

Для защиты компонентов выходного каскада от перенапряжений используется варистор RU1 с квалификационным напряжением 180V (SIOV-S05K180). Малые паразитные параметры варистора практически не оказывают влияния на выходной сигнал. В место варистора можно использовать газовые разрядники легкой серии или телекоммуникационные супрессоры с малой емкостью на подходящее напряжение.

Применение сложных каскодных источников тока обусловлено большим размахом переменного напряжения на анодах ламп [4] (особенно в выходном каскаде). Использование простых схем на одном транзисторе (это относится и к варианту источника тока на полевом транзисторе с резистором в цепи истока), рекомендуемых некоторыми авторами, не позволяет обеспечить приемлемый уровень стабилизации тока в широком диапазоне частот. В выходном каскаде даже использование каскодной схемы не решает всех проблем. На частотах, превышающих 25÷30 kHz, начинает становиться заметным спад усиления за счет влияния емкостей транзистора VT4. Несколько расширить полосу частот каскада можно, заменив пару транзисторов VT4, VT5 на один высокочастотный, высоковольтный PNP транзистор подходящей мощности (например, типа 2SB1011). Однако такие транзисторы не являются широко доступными, поэтому приведена схема на более доступных компонентах.

Я хочу коснуться еще одного вопроса, связанного с применением источников тока и их влиянием на качество звука. Идеальный источник тока, естественно, не окажет никакого влияния, но реальные схемы могут оказывать. Прежде, чем рекомендовать эту схему, я ее достаточно подробно исследовал, и существенного ухудшения спектра выходного сигнала в диапазоне звуковых частот не обнаружил. Для исследований использовался спектроанализатор с динамическим диапазоном 120db и селективный вольтметр с еще более впечатляющими параметрами – 140db. Конечно, отличия от резистивного каскада существуют, но на уровне -80÷-90 db. Во многих случаях,

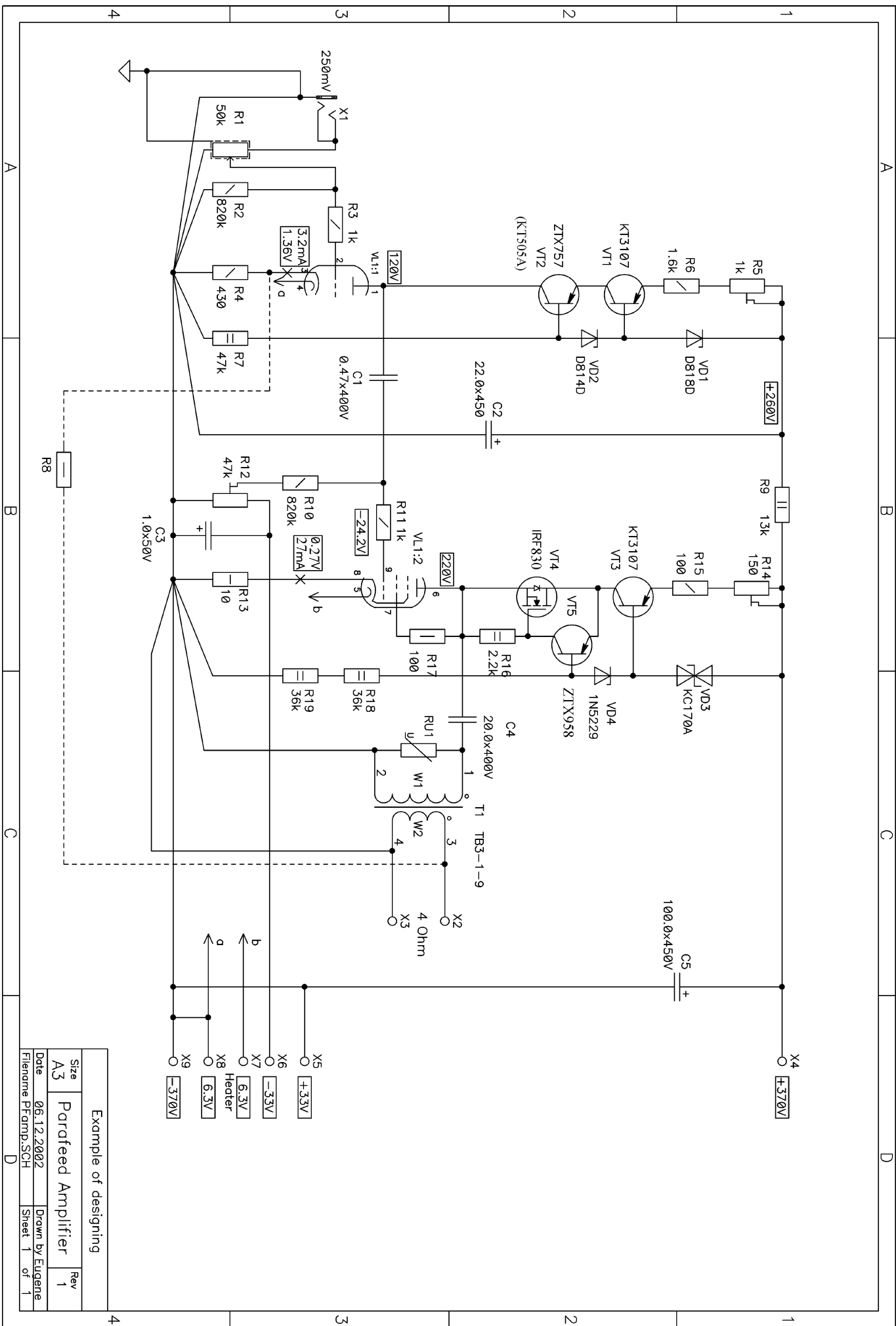


Рисунок 8

это уже ниже собственных шумов каскада. Действительно на что надо обратить внимание, это уровень шумов каскада с источником тока. Применение активных элементов в цепи анода приводит к некоторому возрастанию шумов, это в равной мере относится и к источникам, выполненным на лампах, но для каскадов, работающих с уровнями входных сигналов в сотни милливольт, принципиального значения не имеет. Во входных каскадах высокочувствительных усилителей это надо иметь в виду.

Я не сторонник подхода борьбы «за чистоту рядов» ради самой борьбы и отрицания реальных преимуществ гибридных схем. Результатом такого подхода, на мой взгляд, будет топтание вокруг решений 50-х годов прошлого века и рассуждения о необходимом составе используемого припоя. Самым пикантным в нашем случае является то, что сигнал усиливается именно лампами (через источник тока переменная составляющая практически не протекает).

Налаживание усилителя

При использовании заведомо исправных деталей и правильном монтаже проблем с налаживанием не возникает. Для налаживания усилителя, как минимум, необходим тестер, очень желательно наличие генератора и осциллографа. Перед включением усилителя установите движки переменных резисторов R5, R14 в верхнее по схеме положение (соответствует минимальному току), R12 - в нижнее положение. Это не ошибка, лампу надо полностью отпереть. Вход усилителя должен быть закорочен. Сначала установите ток покоя первого каскада (R5), потом выходного (R14). Нужное напряжение на аноде VL1:2 (R12) устанавливается в последнюю очередь.

Точную подстройку напряжения смещения VL1:2 выполняют, подав на вход усилителя сигнал (выход, естественно, должен быть нагружен на эквивалент нагрузки). Необходимо добиться максимального размаха напряжения на аноде выходной лампы при минимальных искажениях. Следует заметить, что ограничение верхней полуволны выходного напряжения происходит довольно резко. Это связано с выходом источника тока из режима стабилизации. При использовании лампового источника тока этот эффект менее заметен.

В схеме выходного каскада существует интересная возможность. Разделительная емкость C4 совместно с индуктивностью первичной обмотки образуют низкодобротный, последовательный резонансный контур. Резонансная частота контура с номиналами элементов, указанных на схеме, приблизительно равна 10 Hz и существенного влияния на выходной сигнал не оказывает. Уменьшая значение емкости C4, можно сдвинуть резонансную частоту контура в область более высоких частот, что приведет к подъему (расширению) частотной характеристики в низкочастотной области. Это теоретические предпосылки, реальные процессы, происходящие в этом контуре, гораздо сложнее, и результат не всегда однозначен. Я не берусь давать Вам по этому поводу рекомендаций (это надо слушать), и проведение такого эксперимента оставляю на Ваше усмотрение.

Компоненты

Конкретные типы компонентов я перечислять не буду, но хочу обратить Ваше внимание на некоторые моменты.

Подстроечные резисторы, очень желательно, применить многооборотные. Вполне подойдут типы – СПЗ-37, СПЗ-39, СП5-2, СП5-3, СП5-14.

В качестве разделительной емкости C4 желательно использовать металлобумажные типы емкостей (МБГЧ, МБГО, МБГТ) с рабочим напряжением не менее 400 V.

Транзистор VT4 необходимо установить на радиатор, способный рассеять 5÷6 W мощности (необходимая площадь радиатора - 120÷150 см²).

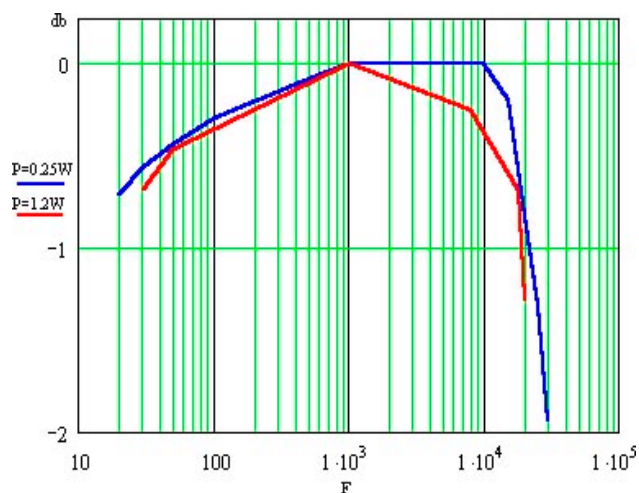
Результаты испытаний

Для проверки схемы был собран макет усилителя. Питание макета осуществлялось от не стабилизированного выпрямителя с индуктивным фильтром. Ниже приведены результаты измерений параметров усилителя (таблица 1) и спектры выходного сигнала при работе в различных режимах. При испытаниях общая обратная связь не использовалась.

Таблица 1

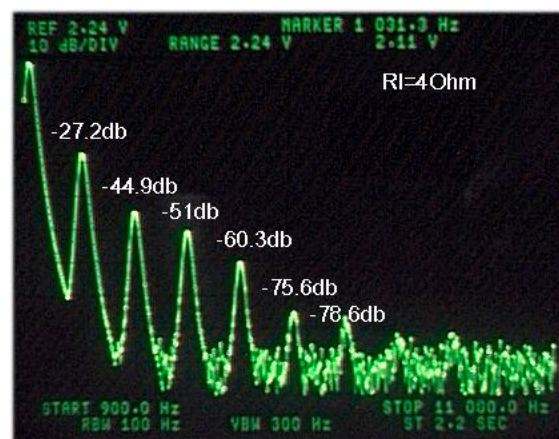
Параметр	Режим измерения	Значение	Единицы
Номинальная выходная мощность	$R_L=4\Omega$, $U_s=370V$	1.2	W
Чувствительность	$R_L=4\Omega$, $U_s=370V$, $F=1kHz$, $P=1.2W$	0.25	V
Коэффициент усиления	$R_L=4\Omega$, $U_s=370V$	9.17	-

Параметр	Режим измерения	Значение	Единицы
Коэффициент усиления первого каскада	$U_s=370V$, $F=1kHz$	60	-
Коэффициент усиления второго каскада	$R_L=4\Omega$, $U_s=370V$, $F=1kHz$	6	-
Выходное сопротивление (приведенное)	$R_L=4\Omega$, $U_s=370V$, $F=1kHz$	1839	Ω
Коэффициент гармоник (не более)	$R_L=4\Omega$, $U_s=370V$, $F=1kHz$, $P=1.2W$	4.4	%
Коэффициент гармоник (не более)	$R_L=4\Omega$, $U_s=370V$, $F=1kHz$, $P=0.1W$	1	%
Мощностная полоса (неравномерность ≤ 1 db)	$R_L=4\Omega$, $U_s=370V$, $P=1.2W$	0.03÷18	kHz
Малосигнальная полоса (неравномерность ≤ 1 db)	$R_L=4\Omega$, $U_s=370V$, $P=0.2W$	0.02÷22	kHz
Коэффициент демпфирования	$R_L=4\Omega$, $U_s=370V$, $F=1kHz$, $P=1.2W$	2.988	-
Скорость нарастания выходного напряжения	$R_L=4\Omega$, $U_s=370V$, $P=0.2W$	1.2	$V/\mu s$



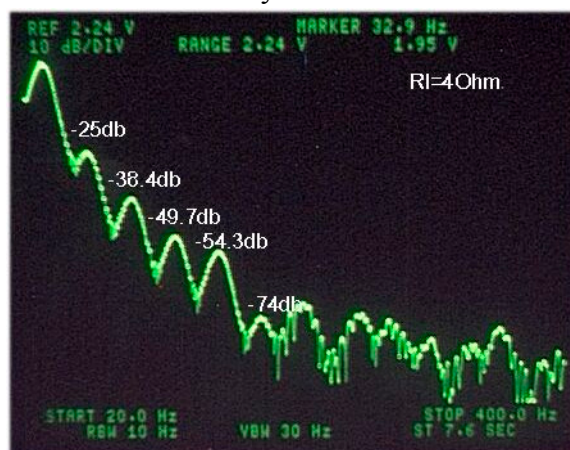
Амплитудно-частотная характеристика усилителя

Рисунок 9



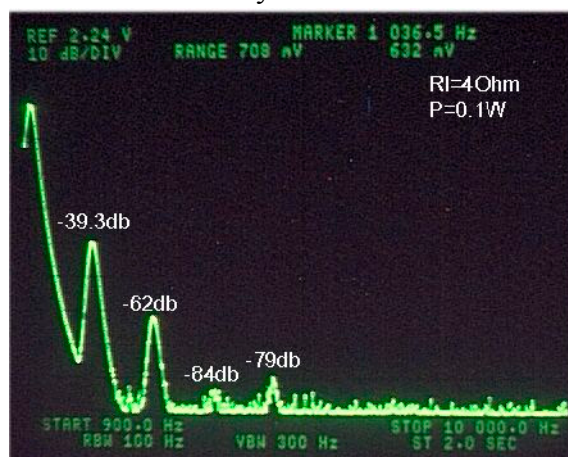
Спектр выходного сигнала $F=1kHz$, $P=1.2W$

Рисунок 10



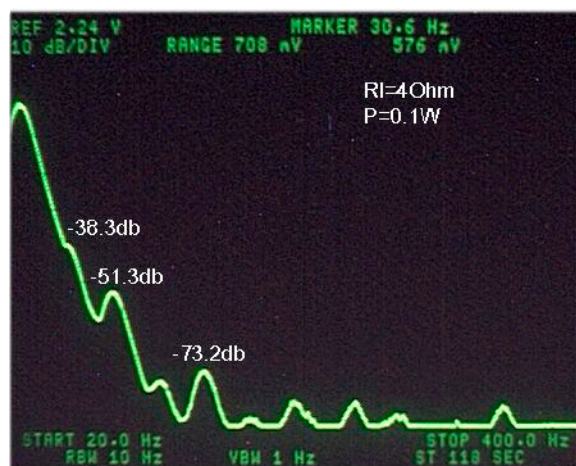
Спектр выходного сигнала $F=30Hz$, $P=1.2W$

Рисунок 11



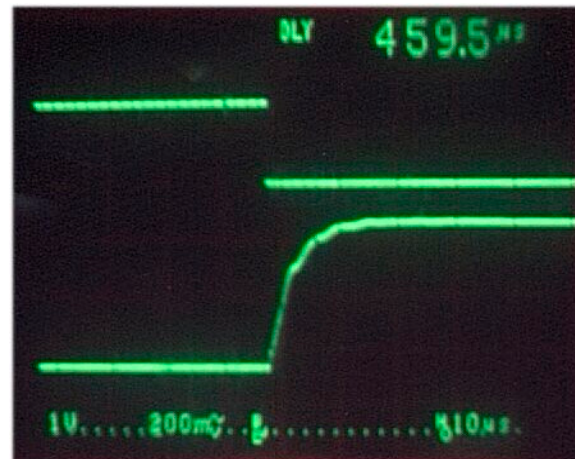
Спектр выходного сигнала $F=1kHz$, $P=0.1W$

Рисунок 12



Спектр выходного сигнала $F=30Hz$, $P=0.1W$

Рисунок 13



Импульсный сигнал $F=1kHz$, $P=1.2W$

Рисунок 14

По сравнению с усилителем, использующим традиционный выходной каскад и не переделанный трансформатор, параметры явно улучшились. Если в области средних и высших частот изменения не значительные, на частоте 1 kHz коэффициент гармоник уменьшился приблизительно на 12%, то в области низких частот выигрыш значительный. Произошло значительное расширение полосы в область низших частот при существенно меньшем уровне гармоник (на частоте 50 Hz и мощности 1.2 W почти в 2 раза). При выходной мощности 0.1 W коэффициент гармоник на частоте 30 Hz не превышает 1.2%. В спектре выходного сигнала во всех режимах преобладающей является вторая гармоника. Количество высших гармоник ограничено, кроме того, они имеют очень маленький уровень.

Скорость нарастания выходного напряжения усилителя довольно маленькая, но здесь мало что можно сделать, большие паразитные параметры выходного трансформатора существенно ограничивают возможности коррекции. В действие вступает закон «Тришкиного кафтана», попытка улучшить скорость нарастания приводит к ухудшению других параметров.

Заключение

Получившийся усилитель – это не «Ongaku», но и не говорящая консервная банка китайского производства за 20 долларов. У него чистый певучий звук. Конечно, маленькая выходная мощность накладывает определенные ограничения на его использование. Для озвучивания комнаты среднего размера эта мощность явно маловата, но как телефонный усилитель он будет совсем не плох.

Я бы сравнил этот усилитель с флакончиком пробных духов, Вы сможете сами оценить особенности лампового звука и решить, насколько он Вам нравится, а не полагаться на мнение других людей.

Усилитель можно совершенствовать дальше. Весьма перспективным направлением является использование более линейных ламп. Результаты моделирования показали, что использование на выходе триодов средней мощности позволяет уменьшить коэффициент гармоник на полной мощности еще в полтора - два раза. Но это неизбежно приводит к увеличению числа ламп (которые еще и дефицитны) и усложнению схемы.

Не сошелся свет клином и на трансформаторах ТВЗ. Опытные радиолюбители на основе описанного подхода, используя более качественные трансформаторы, могут реализовать свои конструкции с гораздо лучшими параметрами. Потенциальные возможности выходного каскада с источником тока довольно велики.

В заключение, я хочу заметить, что использование трансформаторов типа ТВЗ - это большой компромисс между качеством и стоимостью. Для реализации высококачественного лампового усилителя необходимо использование хорошего выходного трансформатора.

Литература

1. Г.С. Цыкин, [Трансформаторы низкой частоты](#), Связьиздат, 1955
2. Г.В. Войшвилло, [Усилители низкой частоты](#), Связьиздат, 1939.
3. А.П. Ложников, Е.К. Сонин, [Каскодные усилители](#), Энергия, 1964.
4. П. Хоровиц, У. Хилл, Искусство схемотехники, Мир, 1983.