

ТВЗ жил, жив и будет жить

Евгений Карпов

Рассмотрены два простых ламповых усилителя повышенной мощности с выходными трансформаторами типа ТВЗ, даны рекомендации по выбору компонентов и методике их налаживания.

Статья рассчитана на начинающих любителей – схемы максимально упрощены, не содержат никаких полупроводниковых и дефицитных компонентов, практически не требуют налаживания.

К моему собственному удивлению, я опять возвращаюсь к теме использования трансформаторов типа ТВЗ, хотя вроде по этому вопросу уже все сказано [1]. После публикации первой статьи прошло достаточно много времени, и на основе полученных отзывов можно сделать некоторые дополнительные выводы.

Во-первых, положение дел с выходными трансформаторами не изменилось в лучшую сторону, тема продолжает оставаться актуальной.

Во-вторых, наибольший интерес к ламповым усилителям, использующим ТВЗ, проявляют начинающие любители.

В-третьих, использовать такой усилитель для прослушивания музыки с относительно дешевой акустикой (SPL около 90 dB) весьма проблематично – слишком маленькая выходная мощность.

В этой статье предпринята попытка учесть полученную информацию. Вашему вниманию предлагаются две схемы простых ламповых усилителей, использующих трансформатор типа ТВЗ с повышенной выходной мощностью. Схемы рассчитаны на повторение начинающими любителями – максимально упрощены, не содержат никаких полупроводниковых и дефицитных компонентов, практически не требуют налаживания.

Усилитель с однотактным выходным каскадом.

Схема усилителя показана на первом рисунке, он имеет следующие параметры;

Номинальная чувствительность	$\approx 0.4V_{RMS}$
Номинальная выходная мощность	5.0W
Коэффициент гармоник	5% (при номинальной выходной мощности)
Мощностная частотная полоса	200Hz÷30kHz (по уровню – 1db, P=5W)
Малосигнальная частотная полоса	40Hz÷40kHz (по уровню – 1db, P=0.1W)
Уровень шума	-80dB (не взвешенный)
Номинальное сопротивление нагрузки	4Ω, 8Ω
Входное сопротивление	470kΩ ± 10%
Вход	открытый

Фактически, это обычный однотактный усилитель, имеющий два выходных каскада, работающих на одну нагрузку и возбуждаемых одним сигналом. По постоянному току выходные лампы (VL3, VL4) включены параллельно, а по переменному току – могут быть включены как параллельно, так и последовательно, в зависимости от коммутации вторичных обмоток (на схеме обмотки включены последовательно - для нагрузки 8Ω, для нагрузки 4Ω - обмотки включаются параллельно согласно). Такое включение чем-то сродни параллельному включению усилительных приборов, но имеет некоторые преимущества. Включение в анод каждой выходной лампы приведенного сопротивления потерь трансформатора и возможность независимого регулирования режима каждой лампы по постоянному току (R9, R15) значительно уменьшает влияние разброса параметров ламп. Конечно, желательно иметь лампы с близкими параметрами, но это не является обязательным требованием. В качестве выходных ламп используются пентоды 6П14П в триодном включении. Выбор этих ламп не случаен, они имеют хорошую линейность, удовлетворительно согласуются с выходными трансформаторами и, что для нас очень важно, имеют высокий коэффициент усиления. Следовательно, для возбуждения выходного каскада требуется сигнал с относительно небольшим размахом, что резко снижает требования к предварительному каскаду.

Резисторы R12 и R18 предназначены для измерения тока ламп и влияния на параметры каскада практически не оказывают. Других особенностей выходной каскад не имеет.

Предварительный усилитель выполнен на паре лампы VL1:1 и VL1:2. На лампе VL1:1 реализован обычный резистивный каскад с автоматическим смещением, а на VL1:2 – катодный повторитель. Добавление в схему катодного повторителя позволило выбрать сопротивление анодной нагрузки первого каскада (R4) достаточно большим, это обеспечивает хорошую линейность каскада при умеренном размахе выходного напряжения (20÷30V) на аноде, высокий коэффициент усиления и хорошую частотную характеристику при небольших токах лампы. Значительная величина анодного резистора попутно решает и еще один вопрос: появляется возможность отказаться от емкости, шунтирующей резистор автоматического смещения (R3). При этом глубина местной отрицательной обратной связи (ООС), возникающая в первом каскаде, не превышает $\approx 3dB$. Столь малая вели-

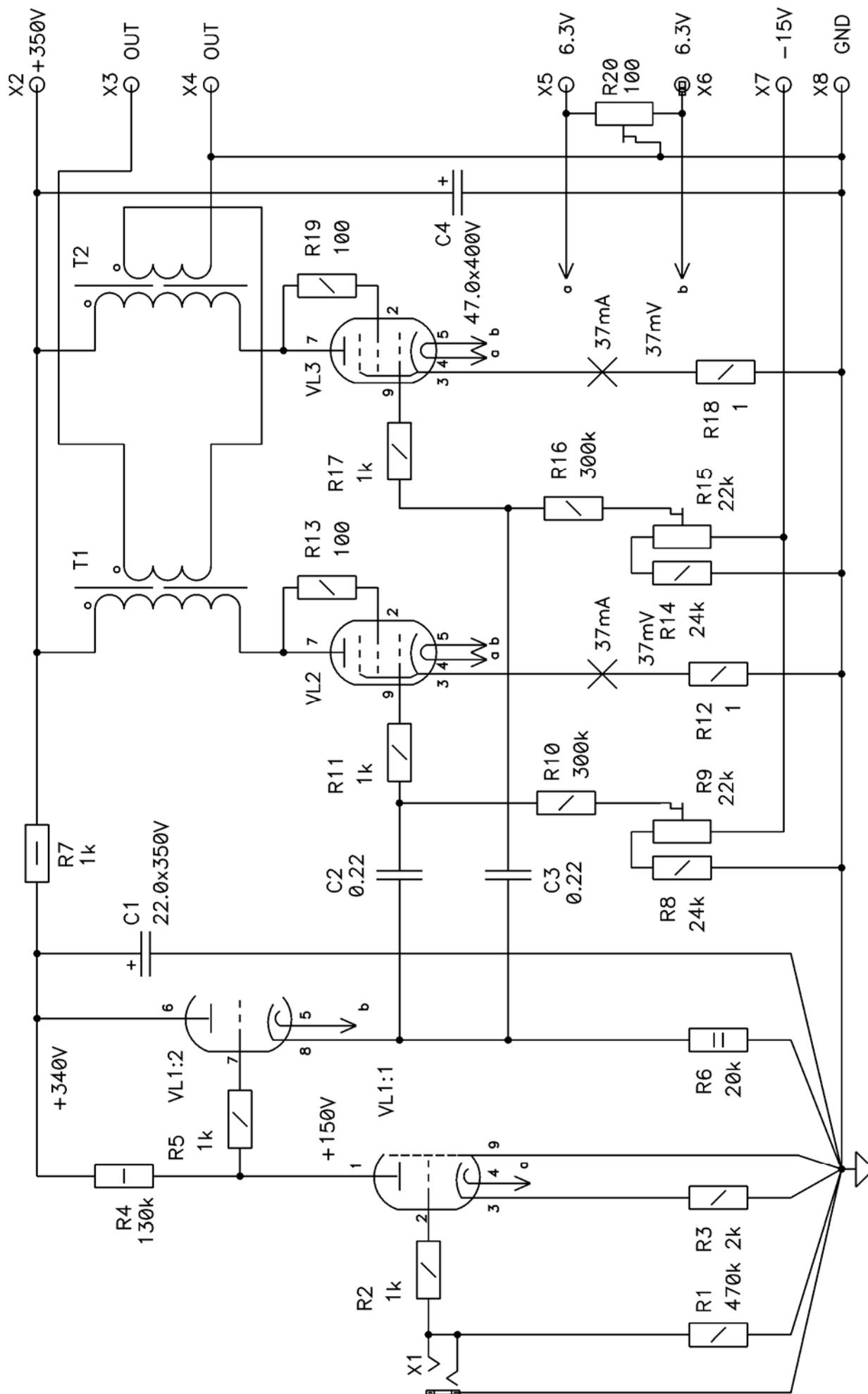


Рисунок 1

чина ООС никак не сказывается на спектре гармоник на выходе предварительного усилителя (наблюдается только вторая гармоника).

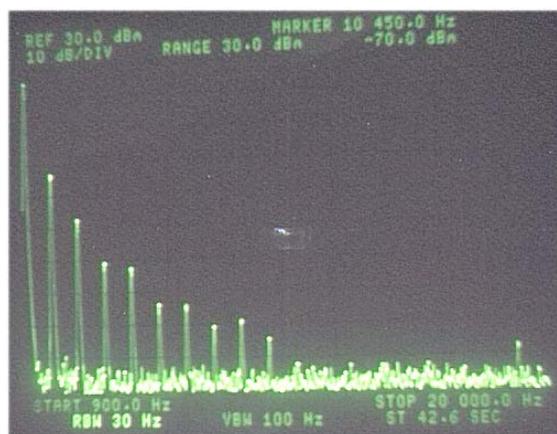
Высокая нагрузочная способность катодного повторителя позволит возбуждать и большее число выходных каскадов и, соответственно, еще увеличить выходную мощность. Целесообразно ли это делать, решать вам.

На рисунках 2 и 3 показан спектр выходного сигнала усилителя при номинальной выходной мощности и при мощности 2 ватта соответственно.



F=1kHz, $R_L=8\Omega$, P=5W, THD=5%

Рисунок 2



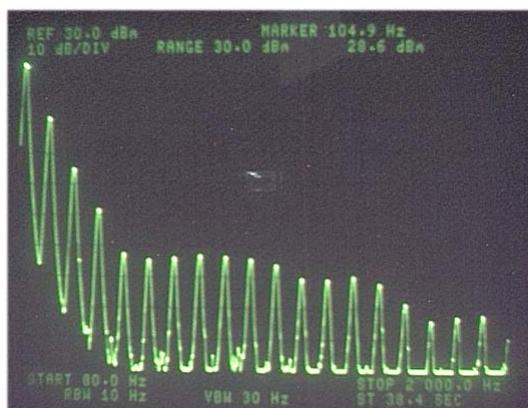
F=1kHz, $R_L=8\Omega$, P=2W, THD=3%

Рисунок 3

Что можно сказать по поводу этих спектрограмм?

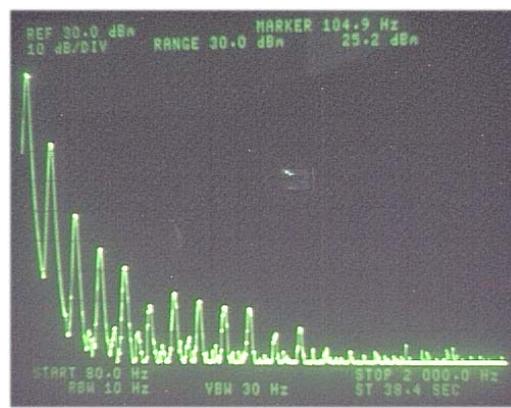
1. Огибающая спектра характерна для однокатных ламповых каскадов.
2. При номинальной мощности сигнал имеет довольно длинный гармониковый хвост (одиночный каскад имеет приблизительно такой же спектр). Однако высшие составляющие спектра имеют весьма малую амплитуду (-70÷-90dB) и будут эффективно маскироваться низкочастотными составляющими.
3. Уменьшение выходной мощности приводит к быстрому уменьшению уровней гармоник и сокращению их числа. (Последняя гармоника на обоих графиках не имеет отношения к выходному сигналу усилителя и является помехой, генерируемой генератором цифрового вольтметра)

Понижение частоты сигнала приводит к общему росту уровня гармоник, а при номинальной мощности и к увеличению их числа (Рис. 4, 5), хотя характер огибающей спектра остается приблизительно прежним. Это основная проблема, которая свойственна усилителям с трансформаторами ТВЗ.



F=100Hz, $R_L=8\Omega$, P=5W, THD=11.5%

Рисунок 4



F=100Hz, $R_L=8\Omega$, P=2W, THD=5.8%

Рисунок 5

Теперь коснемся вопроса выбора компонентов. Можно использовать постоянные резисторы; кроме токоизмерительных, подойдут типов МЛТ, ОМЛТ, С2-23 с точностью 5%, токоизмерительные резисторы желательно применить типа С2-14, МОН с точностью 1%. Подстроечные резисторы, устанавливающие токи покоя ламп, R9 и R15 лучше использовать многооборотные, любого типа.

Антифоновый резистор в цепи накала (R20) должен иметь мощность рассеяния не менее 0.5W, подойдут резисторы типа С5-28, ППБ-1.

Разделительные емкости C2, C3 – пленочные, с рабочим напряжением не менее 350V. Если есть возможность, используйте импортные емкости типа МКР, но вполне подходят и емкости типа К73-11, К73-16, К73-17. Электролитические емкости производства PANASONIC, NICHICON или им подобные.

Как я уже говорил выше, тип выходных ламп менять не стоит, вот вместо первой лампы можно попробовать использовать 6Н23П, 6Н30П, 6Н6П. Но следует помнить, что замена типа ламп, скорее всего, потребует подбора режима по постоянному току (резистор R3).

Усилитель с одноктактным симметричным выходным каскадом.

Схема усилителя показана на восьмом рисунке, он имеет следующие параметры;

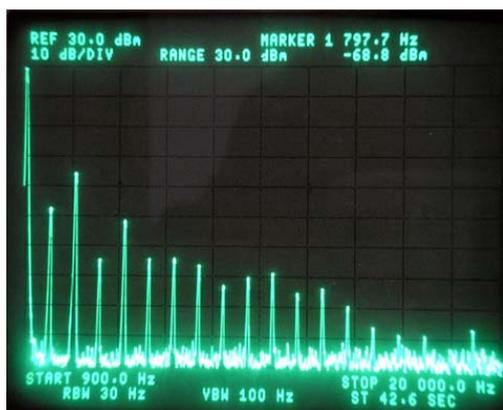
Номинальная чувствительность	$\approx 0.9V_{RMS}$
Номинальная выходная мощность	5.0W
Коэффициент гармоник	1.4% (при номинальной выходной мощности)
Мощностная частотная полоса	100Hz÷30kHz (по уровню – 1db, P=5W)
Малосигнальная частотная полоса	30Hz÷40kHz (по уровню – 1db, P=0.1W)
Уровень шума	-86dB (не взвешенный)
Номинальное сопротивление нагрузки	8Ω
Входное сопротивление	300kΩ ± 10%
Вход	закрытый

Хотя выходной каскад не усложнился, небольшие изменения в его схеме приводят к появлению совершенно новых качеств.

Парафазное возбуждение выходного каскада, вернее - их пары, превращает классические одноктактные каскады в одноктактный аналог двухтактной схемы (более подробно о работе таких схем, их параметрах и основах расчета можно прочесть в статье «СИММЕТРИЧНЫЕ ОДНОТАКТНЫЕ КАСКАДЫ» [2]).

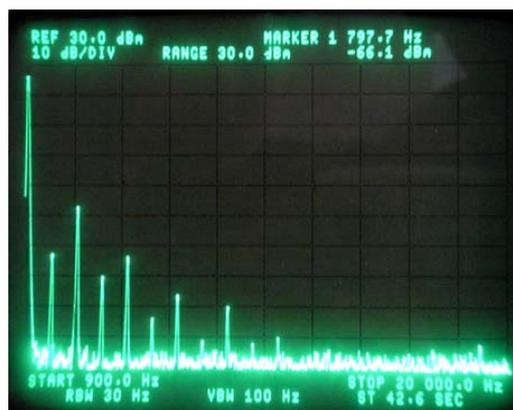
Изменение коммутации обмоток выходных трансформаторов позволяет получить симметричный одноктактный каскад с катодной обратной связью.

Все эти изменения имеют цель несколько улучшить параметры выходного каскада, являющегося основным источником нелинейности в нашем усилителе (и не только в нашем). Результаты этих усилий можно увидеть на спектрограммах, показанных на рисунках 6 и 7.



F=1kHz, R_L=8Ω, P=5W, THD=1.4%

Рисунок 6



F=1kHz, R_L=8Ω, P=2W, THD=0.7%

Рисунок 7

Первое, что бросается в глаза, это частично подавленные четные гармоники. Такой спектр характерен именно для двухтактных каскадов, степень подавления четных гармоник зависит от степени идентичности ламп, и в таком каскаде спектр может дополнительно регулироваться изменением режима ламп по постоянному току. Если сравнить эти спектрограммы с аналогичными для одноктактного усилителя (Рис. 2, 3), можно увидеть, что уровень нечетных гармоник также уменьшился на 3÷6dB при сохранении их числа. Это сказывается влияние катодной ООС. Следует отметить, что при столь малой глубине местной ООС в выходном каскаде ($\approx 2.7dB$) эффект размножения спектра не

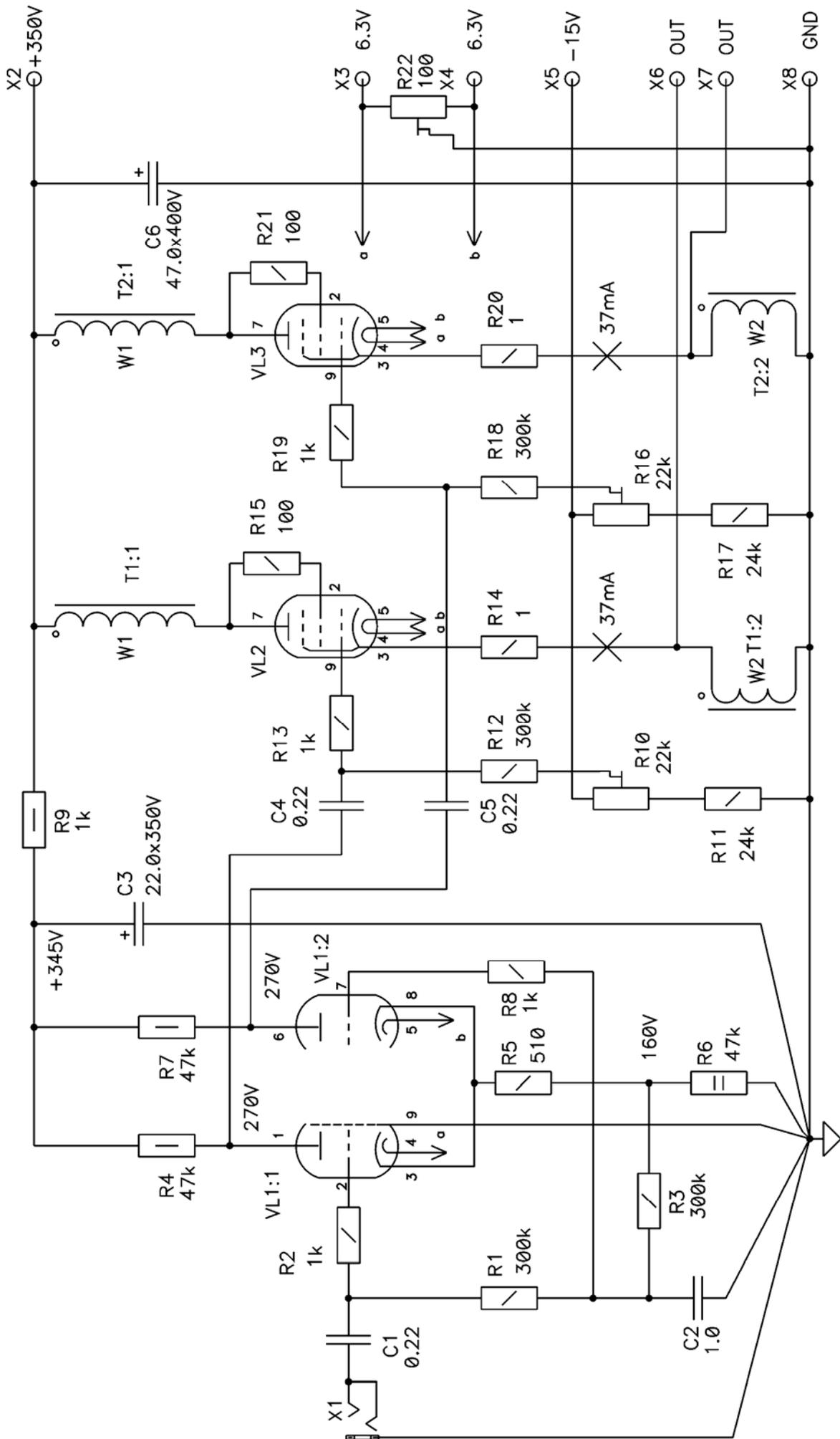
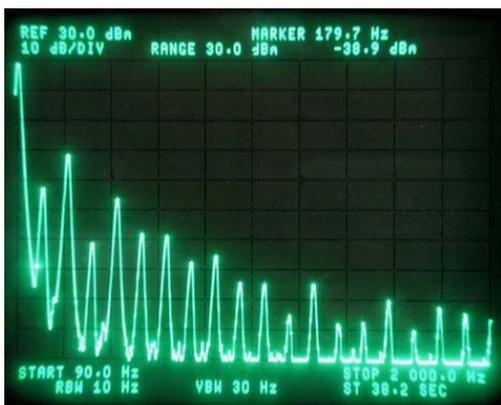


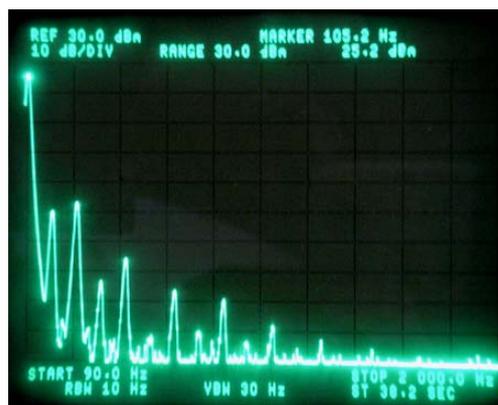
Рисунок 8

регистрируется. Особенно заметно сказывается влияние катодной ООС в области низких частот (Рис. 9, 10). Также, дополнительному расширению частотного диапазона в область низких частот способствует возросшая эквивалентная индуктивность первичной обмотки, так как теперь первичная и вторичная обмотки выходного трансформатора включены последовательно согласно.



F=100Hz, $R_L=8\Omega$, P=5W, THD=2.2%

Рисунок 9



F=100Hz, $R_L=8\Omega$, P=2W, THD=0.8%

Рисунок 10

Существенные изменения претерпел входной каскад усилителя. Чтобы не усложнять схему, хотелось совместить в одном каскаде функции предварительного усилителя и фазоинвертора. Следовательно, наряду с удовлетворительной симметрией выходных противофазных напряжений схема должна обеспечивать и достаточное усиление. Этим требованиям удовлетворяет фазоинвертор с катодной связью. При достаточно больших значениях μ лампы и сопротивлении резистора R6 удовлетворительные параметры каскада получаются без дополнительной подстройки (при желании, можно включить подстроечный резистор сопротивлением 4÷5k Ω последовательно с резистором R7 и сбалансировать каскад точнее). Режим работы каскада по постоянному току устанавливается резистором R5.

Если вы внимательно посмотрите на схему, то увидите, что она полностью симметрична. Если увеличить сопротивление R8 до 300k Ω а также подать через емкость сигнал на сетку лампы VL1:2, то вы получите усилитель с дифференциальным входом (выход у усилителя тоже дифференциальный). Это может быть полезно при подключении усилителя, например, к дифференциальному выходу кодека.

Все рекомендации по выбору пассивных компонентов для предыдущей схемы справедливы и для этого варианта. Тип выходных ламп также менять не следует. Круг ламп, пригодных для первого каскада, сузился. Кроме требования высокого допустимого напряжения катод - подогреватель, появилось дополнительное требование: μ должно быть не менее 30. Из широко распространенных ламп подойдет 6Н23П.

Налаживание усилителей

Хотя усилитель не содержит «нежных» элементов и ошибки монтажа, как правило, не приводят к катастрофическим последствиям, налаживание начинается с тщательного контроля правильности монтажа: нервы, свои и окружающих, следует беречь. Далее целесообразно придерживаться следующего порядка работы –

- Отключить от штатного источника цепь накала и смещения -15V
- Закоротить вход усилителя
- Подать напряжения в цепь накала и напряжение смещения от внешнего источника.
- Установить на средних выводах резисторов R9, R15 (R10, R16) максимальное отрицательное напряжение, что эквивалентно установке максимального отрицательного смещения на сетках выходных ламп (измерение напряжения непосредственно на сетках ламп может дать неадекватные результаты при низком входном сопротивлении измерительного прибора).
- Подключить штатный источник питания к ЛАТРу и плавно повышать входное напряжение до достижения анодным напряжением своего номинала. При этом надо контролировать три параметра - анодное напряжение и токи выходных ламп. Токи выходных ламп контролируются по падению напряжения на токоизмерительных резисторах R12, R18 (R14, R20). Про-

делывается это следующим образом – анодное напряжение поднимается на 50÷60V, после чего проверяются значения токов. При достижении анодным напряжением своего номинала токи выходных ламп должны быть меньше указанных на схеме.

- Проверить напряжения в контрольных точках предварительного каскада. Допускается отклонение 10÷15%, если отклонение существенно больше, то придется подстроить его режим резистором R3 (R5). Следует обратить внимание на разницу напряжений на анодах лампы фазоинверсного каскада во второй схеме, если она превышает 15÷25V, то следует быть готовым к дополнительной балансировке каскада (как это сделать, я говорил выше), или заменить лампу.
- Установить номинальные токи покоя выходных ламп резисторами R9, R15 (R10, R16). При этом надо контролировать анодное напряжение, так как при увеличении потребляемого тока оно будет падать. Естественно, его надо возвращать к номиналу. После завершения этой операции, если источник анодного напряжения не стабилизирован, следует проверить переменное напряжение на входе штатного источника питания, оно должно быть равным 220V. Это будет свидетельством правильности расчета и работы источника питания.
- Добиться минимального уровня фона, регулируя положение движка резистора R20 (R22). Возможно, вам придется поискать оптимальную точку заземления шасси (чаще всего, шасси заземляется в районе установки входных гнезд).

Если ваш единственный измерительный прибор – мультиметр, то первый этап налаживания можно считать законченным и можно переходить к прослушиванию. Теперь можно попытаться на слух подстроить режимы выходного каскада, изменяя токи покоя ламп. Здесь следует проявлять осторожность, лампы работают в режимах близких к предельным, поэтому следует контролировать токи ламп и напряжение на их анодах (при отсутствии сигнала). Их произведение не должно превысить 16 ватт (на лампу) в любом случае (в том числе и при повышенном напряжении сети).

При наличии более широкого парка измерительных приборов перед прослушиванием целесообразно провести более тщательную настройку схемы и снять ее параметры. Я думаю, имея соответствующие измерительные приборы, вы знаете, что с ними делать и без моих советов.

Источник питания

Для питания одного канала усилителя необходимы источники со следующими параметрами (указаны номинальные величины напряжений при номинальном напряжении сети):

+350V	80mA,
-15V	0.7mA,
~6.3V	2.4A.

Самый простой вариант источника питания с нужным набором напряжений показан на рисунке 11. Собственно говоря, сам источник, состоящий из силового трансформатора и двух выпрямителей с фильтрами, в комментариях не нуждается. Но для обеспечения надежной работы усилителя он снабжен двумя дополнительными узлами.

Первый узел - это устройство задержки подачи анодного напряжения. Отказ от двухполупериодного кенотронного выпрямителя в пользу твердотельного моста значительно упрощает конструкцию силового трансформатора и повышает эффективность источника, но при включении такого источника до прогрева ламп на усилитель будет подано анодное напряжение, значительно превышающее номинальное значение. Это нежелательно, и для исключения такой ситуации используется реле времени, подключающее анодное напряжение с задержкой ≈25с. Реле времени выполнено на таймере КР1006ВИ1 (DA1), его исполнительным устройством является электромагнитное реле К1, коммутирующее своими контактами цепь высоковольтного выпрямителя. Питается узел непосредственно от цепи накала ламп через выпрямитель с удвоением напряжения (VD12, VD13, C6, C7). При правильном монтаже какой-либо наладки он не требует.

Второй узел - это устройство нелинейной коррекции напряжения смещения, оно реализовано на управляемом источнике тока (VT1, VD9, R2, R3). Необходимо оно вот зачем. Допустим, что делители напряжения смещения выходных ламп питаются непосредственно от выпрямителя (так часто и делают). При возрастании напряжения сети выше номинала начинает увеличиваться как анодное напряжение, так и отрицательное напряжение смещения. Хотя в процентном отношении прирост одинаковый, в абсолютных величинах анодное напряжение возрастает гораздо больше.

Поэтому, несмотря на возросшее напряжение смещения (по абсолютной величине), анодный ток лампы начинает расти, степень возрастания тока анода зависит от типа лампы и ее режима. Это приводит к тому, что возможности лампы не используются в полной мере, приходится занижать номинальные рабочие режимы с учетом возможного максимального повышения сетевого напряжения и допустимой мощности рассеяния на аноде в этом случае. Чтобы сохранить анодный ток приблизительно постоянным или даже его немного уменьшить, необходимо обеспечить более быстрое нарастание отрицательного напряжения смещения. На рисунке 12 приведены графики, показывающие, как будет увеличиваться приращение напряжения смещения (от зафиксированной рабочей точки при номинальном сетевом напряжении) при росте сетевого напряжения (красная линия) и как должно увеличиваться напряжение смещения для удержания рабочей точки лампы в области безопасных режимов (синяя линия). Расчеты выполнены в предположении неизменности параметров лампы в окрестностях конкретной рабочей точки. Устройство коррекции и обеспечивает необходимое изменение напряжения смещения при колебаниях сети.

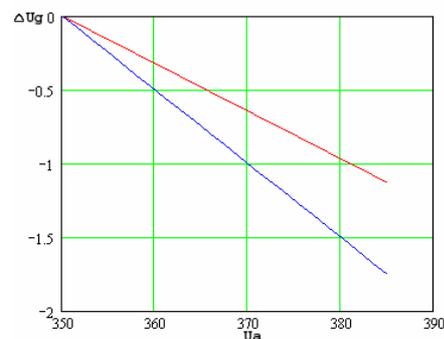


Рисунок 11

Работает оно следующим образом. Напряжение с выпрямителя, поступает на делитель, образованный резистором R1 и цепями смещения усилителя. Параметры делителя и выходное напряжение выпрямителя выбраны таким образом, что на выходе источника при номинальной сети напряжение равно -15V. При этом напряжение выпрямителя приблизительно равно -22.5V. Стабилитрон VD9 имеет приблизительно такое же напряжение стабилизации, следовательно, он заперт или находится на границе режима стабилизации и ток через него очень мал. Соответственно мал ток через резистор R2, падение напряжение на нем также мало и транзистор заперт. При повышении входного напряжения ток через стабилитрон и резистор R2 будет быстро увеличиваться; когда напряжение на резисторе R2 превысит порог отпираания транзистора, он отойдет и начнет шунтировать резистор R1, добавляя свой ток, пропорциональный напряжению на R2 и величине резистора R3.

Изменяя величину R3, можно изменять величину добавляемого тока и получить желаемый характер изменения напряжения смещения.

Настраивается корректор следующим образом –

- Отключить анодный выпрямитель и подать на вход источника питания номинальное напряжение (220V). Установить резистор R3 в среднее положение.
- Проверить величину напряжения смещения на выходе источника питания, и при значительном отклонении от величины -15V подобрать резистор R1.
- Подключить анодный выпрямитель, плавно подать на вход источника питания номинальное напряжение (220V) и проконтролировать токи выходных ламп (они должны соответствовать установленным ранее). Плавно повышая сетевое напряжение, контролируйте ток любой лампы. Если он будет изменяться более чем на $\pm 2-3\text{mA}$, то подкорректируйте его значение резистором R3. При максимальном напряжении сети ток лампы не должен превышать 40mA.

Теперь коснемся вопроса используемых в источнике компонентов.

Самым сложным вопросом, конечно, будет трансформатор питания. Подобрать готовый вряд ли удастся, самый простой вариант - перемотать силовой трансформатор с подходящей габаритной мощностью (порядка 60 ватт). На схеме указаны напряжения обмоток (на холостом ходу) и их действующие токи. Конденсаторы C3, C6, C7 – любого типа, C4 – производства PANASONIC, NICHICON, JAMICON, конденсатор C5 - обязательно керамический или пленочный. Вместо дросселя Д-5-0.08 можно использовать любой другой с подходящими параметрами (индуктивность - >5H, ток подмагничивания - >80mA) или включить несколько дросселей с меньшей индуктивностью последовательно. Реле должно иметь рабочее напряжение 12V при токе не более 100mA. Контакты должны выдерживать коммутацию высокого напряжения (вполне подойдет реле, используемое в блоках питания телевизоров).

Описанный источник рассчитан на питание одного канала усилителя. Если вы собираете двухканальный вариант, то можно использовать один силовой трансформатор. Цепи накала и смещения можно сделать общими, а вот высоковольтные выпрямители желательно сделать отдельными – каждому каналу свой.

После достаточно длительного и подробного рассмотрения этого источника, я хочу дать вам еще один совет – не используйте этот источник вовсе.

Дело в том, что полностью реализовать возможности усилителя и обеспечить стабильную работу с этим источником не удастся. Пониженное напряжение сети, что у нас встречается сплошь и рядом, приводит к снижению выходной мощности и возрастанию искажений, а достаточно большое выходное сопротивление фильтра отражается на воспроизведении низких частот и динамике усилителя.

Использование полностью стабилизированного источника питания или хотя бы стабилизация анодного напряжения и напряжения смещения, даст вам взамен общее улучшение параметров усилителя и его стабильную работу в любой ситуации, кроме того, подрубит на корню мифы о влиянии на качество звука времени суток и погоды.

В качестве высоковольтного стабилизатора можно использовать любую из схем, приведенных на сайте [3, 4], а стабилизированный источник напряжения смещения реализуется в виде простейшего параметрического стабилизатора на одном стабилитроне. Кажущееся усложнение схемы оборачивается экономией сил и средств; во-первых, теперь от одного стабилизатора можно питать оба канала усилителя без ухудшения каких либо показателей, во-вторых, для стабилизированного источника гораздо легче подыскать серийный силовой трансформатор, например, из серий ТА, ТАН.

Заключение

Хочу обратить внимание читателей, что это все-таки усилители начального уровня и, хотя они имеют достаточную мощность и отлично звучат, относить их к классу HI-FI не стоит (над ними витает призрак ТВЗ). Поэтому нет смысла превышать число сущностей сверх необходимого и заниматься поиском каких либо специальных аудиокомпонентов и материалов (надо еще выудить из горы маркетинговой шелухи истинные зерна), все отлично работает с рекомендованными выше компонентами, спаянными припоем ПОС-61. И уж точно, не стоит заниматься всякими изотерическими исследованиями вроде выслушивания направления включения каждого проводника и подбора типа припоя, а лучше посвятить время тщательному продумыванию компоновки усилителя, вопросам правильного направления распространения напряжений питания и организации общего провода.

Конструкция усилителя может быть произвольной, лучше всего использовать традиционный вариант с металлическим П-образным шасси и навесным монтажом, когда элементы монтируются непосредственно на ламелях ламповых панелей с использованием своих выводов. Особое внимание надо обратить на взаимное расположение дросселя и выходных трансформаторов, а также дросселя и входных каскадов усилителя. Дело в том, что дешевые дросселя от бытовой аппаратуры изготовлены по упрощенной технологии (зазор полностью не экранирован обмоткой) и имеют повышенные поля рассеяния (кроме того, они еще и гудеть могут).

В заключение хочу сказать, что затраченные вами средства (весьма умеренные), время и усилия окупятся сторицей, когда вы усядетесь в кресло и слушаете в исполнении этих усилителей хорошую музыку.

Литература

1. Е. В. Карпов, ТВЗ в ламповом УМЗЧ, Радио №4, 2003.
2. Е. В. Карпов, Симметричные однотактные каскады, 2003.
3. Е. В. Карпов, Простой высоковольтный стабилизатор, Интернет издание, 2002.
4. Е. В. Карпов, Высоковольтный стабилизатор с малым уровнем пульсаций, Интернет издание, 2004.