

# ДВУХТАКТНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ

*Евгений Карпов*

Вашему вниманию предлагается описание лампового усилителя, собранного на широко распространенных лампах, имеющего относительно не сложную схему и отличное качество звука.

В общем, я считаю этот проект очень удачным. Незначительные модификации, введенные в схему классического двухтактного усилителя с выходным каскадом на пентодах, позволили существенно повысить качество его работы. Такая модифицированная схема гораздо больше соответствует современным представлениям, кстати, вполне обоснованным, об идеологии построения высококачественных аудио-усилителей (*сразу оговорюсь: под «современными представлениями» я имею в виду способы повышения линейности усилителя и получения желаемого характера вносимых искажений, организации цепей ООС и цепей питания, а не выбор направления проводов и типа припоя*). В усилителе нет каких-либо революционных решений. Все это по отдельности давным-давно известно, и в том или ином виде аналогичную схемотехнику можно найти в лучших образцах усилителей времен расцвета ламповых устройств. К сожалению, создается впечатление, что большинство современных конструкторов, работающих с лампами, напрочь забыли про десятки лет развития ламповой техники и о ее всех достижениях, да и о том, что сейчас 21 век, тоже. В какой-то степени я постарался исправить такое положение дел, воспользовавшись лучшими решениями из разных веков.

Предлагаемая вам схема является немного упрощенным вариантом схемы коммерческого усилителя, причем, все эти упрощения сделаны не в ущерб качеству звука. Важной особенностью этого варианта схемы является ее привязка к реальным пост-совковым возможностям радиолюбителей: в усилителе применены широко распространенные лампы, а самое главное, электромагнитные режимы выходных трансформаторов специально оптимизированы под сердечники из сталей среднего качества, использовавшихся в силовых трансформаторах бытовой аппаратуры. При наличии желания и определенной настойчивости усилитель вполне может быть изготовлен в домашних условиях радиолюбителем, имеющим среднюю квалификацию.

Высокое качество звука и практически полное отсутствие его ощутимой окраски, позволяет использовать усилитель не только для прослушивания музыки, но и как монитор. Достаточно большая выходная мощность усилителя делает его совместимым с практически любыми акустическими системами.

## Схема усилителя

Полная схема одного канала усилителя показана на рисунке 1. Усилитель имеет следующие параметры:

Номинальная выходная мощность	18W
Пиковая выходная мощность	25W
Номинальное входное напряжение	~0.7V <sub>RMS</sub>
Выходное сопротивление	0.8Ω
Входное сопротивление	47kΩ
Неравномерность частотной характеристики (20Hz – 20kHz)	1dB
Неравномерность частотной характеристики (5Hz – 40kHz)	3dB
Коэффициент гармоник (18W)	1.7%
Коэффициент гармоник (10W)	0.9%
Коэффициент гармоник (1W)	0.18%
Уровень шума (не взвешенный)	-90dB
Глубина общей ООС	~6dB
Максимальная потребляемая мощность	280W
Напряжение питания	180÷240V <sub>AC</sub>

Рассмотрим подробнее схему усилителя и ее основные особенности.

В усилителях мощности в 90% случаев основным источником искажений служит выходной каскад. Для повышения линейности выходного каскада предпринят ряд мер. Во-первых, выходной каскад работает в классе «А», во-вторых, использована ультралинейная схема включения пентодов, в-третьих, в каскад была введена катодная связь. Усилия не пропали даром, повышение линейности звукового тракта позволило значительно снизить глубину общей ООС без существенного ухудшения



объективных параметров усилителя. В принципе, усилитель прекрасно работает и без введения общей ООС. Такой выходной каскад имеет еще одно положительное свойство: в нем несколько снижены требования к идентичности параметров выходных ламп.

Конечно, вводя в выходной каскад катодную связь, у меня возникло острое желание проверить работоспособность каскада при перекрестном соединении отводов выходного трансформатора с экранирующими сетками выходных ламп [1]. Фактически, в выходной каскад вводится положительная обратная связь. В этом случае, изменяя глубину катодной связи, можно в широких пределах менять коэффициент передачи выходного каскада. Общее впечатление от этих экспериментов у меня сложилось отрицательное. Возможность установки большего коэффициента передачи, что в стандартном включении позволяет облегчить жизнь драйверному каскаду, но попутно увеличивается длина «хвоста» гармоник. Даже в случае установки одинакового коэффициента передачи для обоих вариантов каскада спектр продуктов искажений выходного каскада заметно длиннее при перекрестном соединении. И субъективно усилитель звучит хуже.

В выходном каскаде используется фиксированное смещение. Хорошая стабильность параметров лампы 6ПЗС и при максимальной мощности рассеяния на аноде тоже обеспечивает стабильную работу выходного каскада без использования дополнительных цепей стабилизирующих ООС. Вполне достаточно использовать стабилизированное напряжение питания и смещения.

Фазоинверсный каскад выполнен на основе дифференциального каскада, у которого заземлен один вход. Одновременно он выполняет функции драйвера и реализован на двойном триоде 6Н8С. Чтобы такой каскад хорошо работал, сопротивление в цепи катодов ламп должно быть как можно больше (вообще - стремиться к бесконечности), для обеспечения этого условия в цепь катодов ламп включен источник тока на транзисторе VT1. Подстройку симметрии фазоинвертора можно осуществить, изменяя в небольших пределах сопротивление в аноде лампы одного из плеч. Как правило, необходимости в такой подстройке не возникает.

Предварительный каскад усиления выполнен по стандартной резистивной схеме с автоматическим смещением на половинке лампы 6Н8С. На вход каскада заведена цепь общей ООС усилителя. В схеме используется общая ООС по напряжению параллельного типа. Такое решение цепи ООС имеет ряд преимуществ по сравнению с широко распространенным вариантом ввода сигнала ООС в цепь катода первой лампы. Но в аудио-усилителях такая схема используется сравнительно редко, так как накладывает жесткие требования на величину и стабильность выходного сопротивления источника сигнала. Чтобы усилитель можно было использовать с любым источником сигнала, на его входе включен катодный повторитель. Повторитель питается двуполярным напряжением, это позволило избежать использования дополнительной разделительной емкости.

Если вы точно знаете, какой источник сигнала будет использоваться, и он имеет малое выходное сопротивление (десятки Ом), то катодный повторитель можно исключить. В этом случае, освободившийся триод включают параллельно триоде предварительного каскада (с корректировкой режима, естественно). Усилитель был испытан и в таком варианте. Какого-либо улучшения качества звука при исключении катодного повторителя замечено не было, но уровень шумов усилителя, естественно, уменьшился (~ -92dB).

На рисунках 2÷4 показаны спектрограммы выходного сигнала при разных уровнях выходной мощности. В общем, спектрограммы характерны для двухтактных схем, преобладающими являются нечетные гармоники. Что, несомненно, приятно, то это весьма короткий спектр продуктов искажений и быстрое затухание высших гармоник при максимальной выходной мощности (Рис. 2). Уменьшение выходной мощности приводит к быстрому сокращению количества высших гармонических составляющих и уменьшению их уровня (Рис. 3, 4). Характер искажений, вносимых усилителем достаточно близок к современным представлениям о том, какие искажения допустимы [2]. Хотя, конечно, витающий в воздухе вопрос о «правильных» или «неправильных» искажениях довольно спорен (во всяком случае, для меня).

Но факт остается фактом, этот усилитель звучит заметно лучше, чем транзисторная схема с уровнем искажений на три порядка ниже и достаточно коротким гармониковым «хвостом».

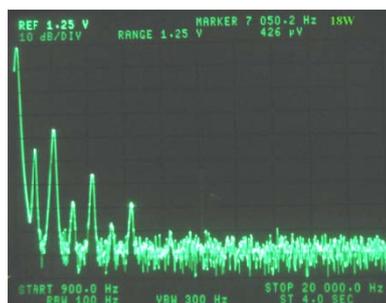


Рисунок 2

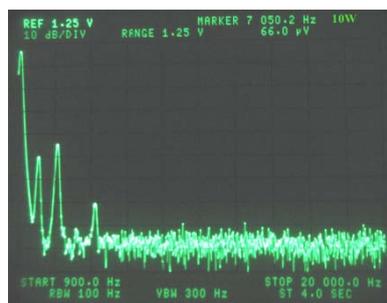


Рисунок 3

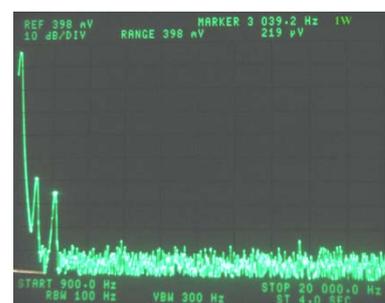


Рисунок 4

## Источник питания

Оба канала усилителя питаются от одного стабилизированного источника питания (Рис. 5). Стабилизируется анодное напряжение и напряжение смещения, напряжение накала ламп не стабилизировано (хотя, конечно, надо). Вообще, о полезности использования стабилизированного питания в ламповых усилителях уже неоднократно говорено – это и независимость параметров усилителя от сетевого напряжения, и улучшение воспроизведения низких частот, и отсутствие взаимного влияния каналов, и еще много чего [3]. Так что не буду повторяться, а сразу перейду к рассмотрению схемы.

Стабилизатор анодного напряжения реализован на базе хорошо известной схемы, подробно описанной в статье [3]. В схеме изменены номиналы некоторых компонентов и использовано параллельное включение проходных транзисторов для обеспечения надежной работы стабилизатора при большем выходном токе. Номинальное выходное напряжение стабилизатора – 400V при токе нагрузки до 350mA.

Несколько необычно решен вопрос задержки подачи анодного напряжения. Так как в усилителе используется один сетевой трансформатор, то возникает необходимость коммутации высокого анодного напряжения. На анодной обмотке силового трансформатора при повышенном напряжении сети напряжение может достигать 500÷550 вольт. Также следует учесть, что в выпрямителе используется емкостной фильтр, и подключение высокого напряжения приводит к значительному броску тока. Подавляющее большинство малогабаритных реле не может надежно работать в таких условиях. Существует два варианта решения этой проблемы: или использовать специализированное силовое реле, или использовать электронный ключ. Я выбрал второй вариант, конечно, это не совсем ключ, скорее – следящий повторитель и лишние потери мощности, но подыскать подходящее реле в обозримом пространстве не удалось. Теперь контакты реле коммутируют цепь затвора проходного транзистора (VT1), и можно использовать реле любого типа. В момент включения транзистора на нем рассеивается значительная динамическая мощность (до 800W), так что к выбору типа транзистора следует относиться со всей серьезностью. Реле управляется таймером, реализованным на микросхеме DA1. Вся схема задержки питается непосредственно от напряжения накала ламп.

Стабилизатор отрицательного напряжения реализован на высоковольтном трехвыводном стабилизаторе (DA3), так как он имеет очень маленький выходной ток, то его пришлось упрочнить. Стабилизатор не имеет системы защиты проходного транзистора, поэтому при настройке усилителя следует исключить возможность короткого замыкания его выхода. Приобретение микросхемы LR8 может вызвать определенные сложности и, в общем, нет никакой особой необходимости использовать именно эту схему. Подойдет любой стабилизатор, обеспечивающий на выходе напряжение 50V при токе нагрузки 50-70mA и малом уровне пульсаций.



## Конструкция и детали

Усилитель смонтирован на стальном шасси. Исходно планировалось поместить усилитель в корпус, а отделку самого шасси ограничить гальваническим покрытием, но меня убедили (правда, не до конца), что усилитель будет смотреться и без корпуса. В результате, я пошел на компромисс, и шасси просто покрашено черной полуматовой шагреновой краской. Сверху шасси установлены лампы, трансформаторы в кожухах (при использовании внешнего корпуса использование кожухов совершенно необязательно) и радиатор основного стабилизатора, все остальные компоненты размещены в подвале шасси. Снизу шасси закрыто перфорированной металлической крышкой.

Монтаж самого усилителя выполнен навесным способом, преимущественно выводами самих компонентов.



Рисунок 6



Рисунок 7

Конечно, монтаж на печатной плате или на расширочных панелях выглядит более «опрятно», но для единичных экземпляров ламповых устройств, не подверженных сильным вибрациям, использование навесного монтажа более целесообразно. Кроме того, навесной монтаж обладает минимальными паразитными параметрами. При монтаже усилителя следует соблюдать правило, что питание распространяется навстречу сигналу и избегать «земляных» петель. Особое внимание надо обратить на монтаж выходного каскада, так как ультралинейные выходные каскады весьма склонны к возбуждению на высоких частотах.

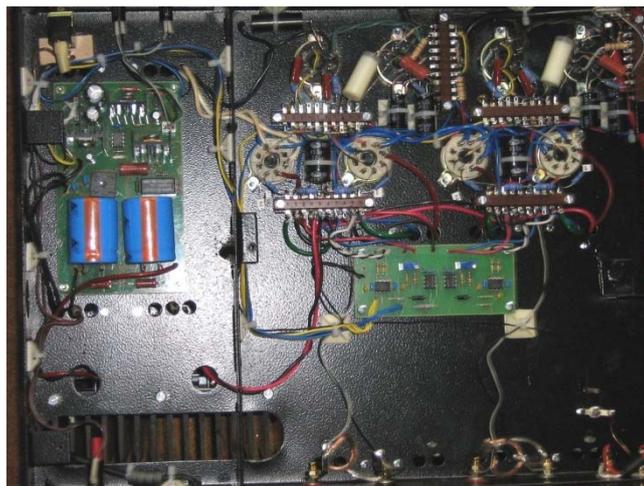


Рисунок 8

Монтаж вспомогательных цепей, содержащих большое количество мелких компонентов, выполнен на печатных платах. Внешний вид усилителя и вид на его монтаж показан на рисунках 6, 7 и 8. Несмотря на то, что в подвале шасси достаточно много свободного места, монтаж схемы самого усилителя необходимо выполнять по возможности компактно. Шасси подключается к общему проводу усилителя в одной точке, в районе входных гнезд (естественно, сами входные гнезда должны быть от шасси изолированы).

Плата основного стабилизатора установлена непосредственно на охладитель проходных транзисторов и закрыта перфорированной крышкой (Рис. 9). Такое решение диктуется необходимостью минимизировать длину соединительных проводников между платой и транзисторами. Транзисторы основного стабилизатора должны быть установлены на охладитель с эффективной площадью не менее  $1800\text{см}^2$ . При повышенном напряжении сети температура охладителя повышается до  $60\text{C}^\circ$ . Проходной транзистор VT5 и коммутирующий транзистор VT1 установлены на небольшие охладители с площадью  $4\div 5\text{см}^2$ .

Собственно в усилителе используются детали следующих типов: постоянные резисторы – С2-23 и BOW, электролитические емкости – Panasonic и Samsung, разделительные емкости - WIMA МКР 4 и Cornell Dubilier. Подстроечные резисторы R18, R23 должны быть многооборотными, любого типа. К компонентам, используемым в источнике питания, ни каких особых требований нет, они должны иметь необходимую мощность рассеяния и рабочее напряжение. Следует обратить внимание на емкости С1 и С2, их рабочее напряжение должно быть не менее 3кV. Первичная обмотка силового трансформатора должна быть зашунтирована емкостью величиной  $0.047 \div 0.1 \mu\text{F}$ , ее рабочее напряжение должно быть не мене 250V<sub>RMS</sub>.



Рисунок 9

### Силовой трансформатор

Силовой трансформатор изготовлен на базе трансформатора ТС-280Р. Первичная обмотка трансформатора включается на напряжение 237 вольт [4], это позволяет уменьшить величину индукции в сердечнике трансформатора. В принципе, изоляцию между первичной обмоткой и экраном, сам экран и изоляцию между экраном и вторичными обмотками можно не трогать, но лучше это все снять и переделать (намотано много и криво). Между первичной обмоткой и экраном укладывают три слоя изоляции из пленки ПЭТ-Э толщиной 0.125мм, экран делают из тонкой меди и более широким, экран от вторичных обмоток изолируют двумя слоями пленки ПЭТ-Э. Катушки трансформатора одинаковые, обмотки наматываются в том порядке, в каком они перечислены в таблице 1, намотка рядовая, межобмоточная изоляция два слоя пленки ПЭТ-Э, межслоевая изоляция – один слой из конденсаторной бумаги толщиной 0.03мм. Высоковольтная обмотка мотается с защитным зазором 2 мм. Половинки высоковольтных силовых обмоток и обмоток источника смещения – включаются последовательно, обмотки накала и экраны – включаются параллельно. Намотанный и собранный трансформатор пропитывается лаком МЛ-92 и высушивается при температуре 120С° в течение 5 часов.

Таблица 1

Обмотка	Число витков	Провод	Примечание
W2	585	ПЭВ-2 Ø 0.5 (0.475)	Силовая
W3	90	ПЭВ-2 Ø 0.23	Смещение
W4	16	ПЭВ-2 Ø 1.25	Накал

### Выходной трансформатор

Для выходного трансформатора используется сердечник и арматура от стандартного трансформатора ТС-180-2. Обе катушки трансформатора одинаковы, его точные данные приведены в таблице 2 (одной катушки).

Таблица 2

Обмотка	Число витков	Провод	Примечание
Wu	578	ПЭТ-150 Ø 0.335	Секция первичной обмотки
Wa1	154	ПЭТ-150 Ø 0.335	Секция первичной обмотки
Wa2	1022	ПЭТ-150 Ø 0.335	Секция первичной обмотки
Wa3	732	ПЭТ-150 Ø 0.335	Секция первичной обмотки
Wc	259	ПЭТ-150 Ø 0.335	Катодная обмотка
W22	89	ПЭВ-2 Ø 0.83	Выходная обмотка
W21	89	ПЭВ-2 Ø 0.83	Выходная обмотка

Намотка трансформатора рядовая. Первичная и катодная обмотки мотаются с защитным зазором 2.5мм, вторичные обмотки мотаются от щечки до щечки. Для межслоевой изоляции используется конденсаторная бумага толщиной 0.03мм (один слой), для межобмоточной изоляции используется пленка ПЭТ-Э толщиной 0.125мм (два слоя), трансформатор не пропитывается. На выводы обмоток в обязательном порядке надеваются изолирующие трубки.

На рисунке 10 условно показан порядок намотки секций на катушке и коммутация секций между катушками. Хочу обратить внимание читателей, что начала и концы обмоток, показанных на рисунке 10, условны и показывают направление намотки провода на катушке. Если вспомнить, что магнитное поле в стержнях сердечника направлено в разные стороны, то прямого соответствия между началом обмотки на рисунке 10 и в схеме - нет. Поэтому я настоятельно рекомендую после сборки и коммутации обмоток трансформатора уточнить фазировку всех обмоток в соответствии с принципиальной схемой. Для этого можно воспользоваться осциллографом с внешней синхронизацией. Подайте переменное напряжение на выводы, подключаемые к анодам ламп, и определите фазировку всех остальных обмоток.

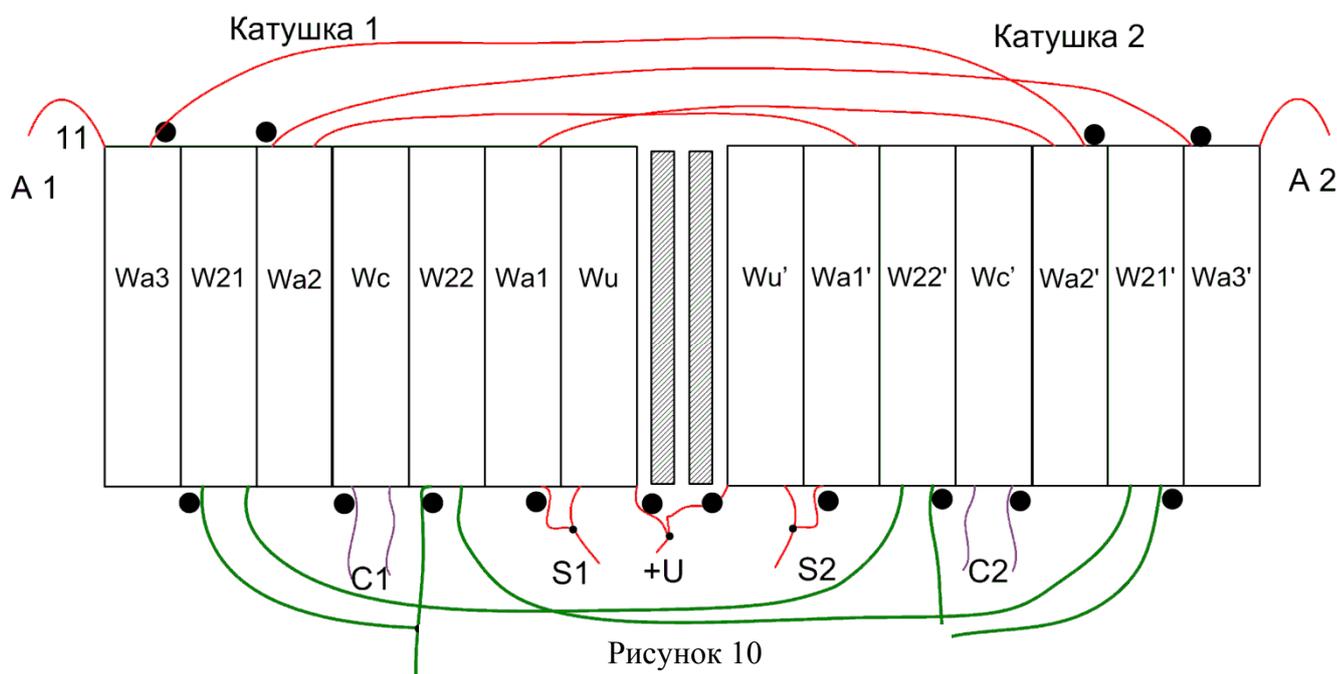


Рисунок 10

На рисунке 11 показан общий вид собранного трансформатора. После сборки трансформатора очень желательно измерить его параметры. Дело в том, что в зависимости от качества сердечника (в основном, от качества шлифовки стыков половинок) и качества сборки, индуктивность намагничивания первичной обмотки может находиться в пределах 60÷90 Н. Естественно, надо стремиться, чтобы этот параметр был близок в обоих каналах усилителя (для стерео варианта). Выбор пути по выравниванию параметров трансформаторов за вами (или лучше собрать трансформатор с меньшей индуктивностью, или хуже - с большей). Индуктивность рассеяния трансформатора от сердечника и качества сборки практически не зависит. Умеренное секционирование, примененное в этом трансформаторе, позволило получить достаточно малые паразитные параметры – индуктивность рассеяния между первичной и вторичной обмоткой не превышает 30мН, а между половинками первичной обмотки - 14мН.

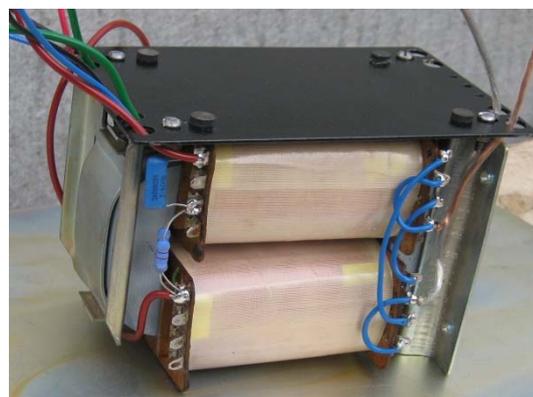


Рисунок 11

Параметры усилителя во многом зависят от качества

изготовления выходного трансформатора, поэтому я хочу предложить вам несколько рекомендаций по его изготовлению.

1. Перед изготовлением трансформатора определите, как он будет расположен и как закреплен на шасси. После этого так разместите выводы обмоток на катушке, чтобы получить минимальные длины проводов, соединяющих трансформатор с выходными лампами. Так же желательно отвести подальше выводы трансформатора, подключаемые к анодам ламп, от выводов, подключаемым к экранным сеткам. Для подключения анодных цепей следует использовать провод с рабочим напряжением не менее 800 вольт или использовать дополнительную изолирующую трубку.
2. Разборка трансформатора, собранного на заводе, достаточно часто сопровождается расслоением пластин сердечника. Необходимо проверить, не возник ли этот дефект, и если есть отслоившиеся пластины, то их надо подклеить. В любом случае целесообразно искупать сердечник в лаке или жидкой краске и хорошенько просушить. Перед «купанием» сердечников следует тщательно защитить от попадания лака стыковочные плоскости половинок. Перед разборкой трансформатора пометьте взаимное расположение половинок сердечника и принадлежность половинок к одному комплекту, придерживайтесь этих меток в дальнейшем. Если вы имеете несколько сердечников, выберете те, у которых плоскость разъема половинок перпендикулярна к кернам, а сами плоскости плоскопараллельны.
3. При намотке анодных обмоток обязательно оставляйте защитный зазор между обмоткой и щечкой катушки. Оставлять защитный зазор на глазок не рекомендуется, так как нет никаких гарантий, что провод не сползет. Это совершенно недопустимо. Для задания защитного зазора используется специальная самоклеющаяся ленточка нужной ширины. Приобрести такую ленточку достаточно проблематично, но ситуация не безвыходная. Вполне адекватной заменой может быть обыкновенная ПЭ изоляция или бумажная малярная лента, нарезанная на рулоны нужной ширины. Лента нарезается из стандартного рулона на токарном станке специальным резцом (любой квалифицированный токарь сделает вам эту операцию за пять минут).
4. Для изготовления трансформаторов используйте рекомендованные материалы или их аналоги. Значительные отклонения толщины изолирующих прокладок (в сторону увеличения) приведут к тому, что обмотки не поместятся на катушку. Не используйте подручные материалы (тем более, что ПТЭ пленку и конденсаторную бумагу можно свободно приобрести), так как не известны ни их электрическая прочность (напряжение между выводами трансформатора может подбираться к 1kV), ни диэлектрическая проницаемость.

## **Наладка усилителя**

Налаживание усилителя можно условно разбить на три этапа. Первый этап - традиционный. Наладка усилителя начинается с проверки монтажа. Потом следует проверить работу источников питания, не вставляя ламп. Перед первым включением необходимо замкнуть коммутирующий транзистор VT1 (Рис. 5) и плавно повышать напряжение на первичной обмотке силового трансформатора до входа стабилизаторов в режим. Когда оба стабилизатора начнут работать, необходимо проверить величину выходного напряжения (если необходимо, подкорректировать его значение) и отсутствие самовозбуждения. Повышать сетевое напряжение до номинального не следует, при отсутствии нагрузки напряжение на фильтрующих емкостях может превысить допустимое. Потом вышеперечисленные действия выполняют повторно, подключив к высоковольтному стабилизатору эквивалент нагрузки (достаточно нагрузить стабилизатор током 100÷150mA). Теперь сетевое напряжение повышают до номинального. Попутно проверяется работоспособность схемы задержки, устанавливается напряжение смещения выходных ламп на уровне -35÷-40 вольт и проверяется наличие напряжения накала на ламповых панельках. Если претензий к работе системы питания нет, удаляют замыкающую перемычку с VT1, отключают эквивалент нагрузки, вставляют маломощные лампы и закорачивают вход. Теперь усилитель включают штатным образом. После прогрева ламп проверяют их режимы по постоян-

ному току и подстраивают их. Режим лампы VL1:2 подстраивают резистором R7, лампы VL2 – резистором R15. В заключение, проверяют работоспособность предварительных каскадов, подав на вход усилителя сигнал от генератора. В последнюю очередь вставляют выходные лампы. Очень желательно перед включением усилителя с выходными лампами подключить к его выходу (а еще лучше, прямо к аноду одной из выходных ламп) осциллограф. Усилитель включают (при закороченном входе), и после прогрева устанавливают токи покоя выходных ламп резисторами R18, R23. При этом надо контролировать отсутствие самовозбуждения выходного каскада. При наличии значительного уровня самовозбуждения усилитель надо немедленно выключить и проверить правильность фазировки обмоток выходного трансформатора и качество монтажа. Если самовозбуждения нет, усилителю дают прогреться еще минут двадцать и корректируют токи покоя выходных ламп. После этого можно проверить работу всего усилителя, подав сигнал на его вход и подключив на выход эквивалент нагрузки. Номинальную чувствительность устанавливают подстройкой номинала резистора обратной связи (R6). Первый этап наладки можно считать законченным и послушать, что получилось.

Схема имеет хорошую повторяемость, все изготовленные экземпляры начинали работать сразу и требовали минимальной коррекции режимов.

Теоретически схему можно настроить, пользуясь одним мультиметром, но если вы хотите чтобы все вокруг ахнуло, то мультиметра явно недостаточно, требуется парк реальных или виртуальных измерительных приборов и кропотливая работа. Я не сторонник механистического подхода при проектировании и сравнении аудио усилителей. Создание «прецизионных» усилителей низкой частоты без учета особенностей конечного воспринимающего устройства – человека, как по мне, лишено смысла. Но и полное пренебрежение объективными измерениями параметров усилителей, весьма характерное для большинства публикаций в интернете (да и в некоторых журналах тоже), мягко говоря, тоже бесперспективно.

Так какие же задачи надо решить на втором этапе наладки усилителя?

Во-первых, необходимо согласовать коэффициенты передачи обоих каналов усилителя с учетом следующего ограничения: номиналы резисторов в цепях ООС (в разных каналах усилителя) не должны отличаться более чем на 10÷15 %. Если, изменяя резистор R6 в указанных пределах, согласовать коэффициенты передачи не удастся, то необходимо подобрать пары ламп в предварительный и фазоинверсный каскады. Поэтому приобретайте лампы с некоторым запасом, желательно одного года и месяца выпуска, одного производителя.

Во-вторых, необходимо подстроить режимы предварительного и фазоинверсного каскадов. Здесь преследуются две цели – минимизировать уровень искажений, вносимых этими каскадами и обеспечить идентичность обоих каналов усилителя. Возможно, здесь придется пойти на некоторый компромисс между желанием получить одинаковый характер искажений и их минимальное значение.

В-третьих, необходимо произвести более тщательный подбор пар ламп в выходных каскадах. Необходимость подбора пар ламп в двухтактных каскадах - факт общеизвестный, но подбор пар ламп в одной - двух точках характеристики недостаточно эффективен [5]. Здесь существует два пути: снять характеристики нескольких десятков (а лучше сотен) ламп и поручить подбор пар программе, или подбирать лампы прямо в выходном каскаде усилителя. Первый путь малоприменим для любительских условий, а вот второй - наиболее реален и, несмотря на простоту, дает прекрасные результаты (я бы даже сказал – наилучшие при наличии достаточного терпения). Я даже затрудняюсь определить методологию этого подбора, это надо видеть или слышать. С формальной точки зрения надо стремиться получить минимальный уровень искажений и желаемое распределение уровней гармонических составляющих. Процесс подбора совершенно прост - устанавливаем пару ламп, подстраиваем токи покоя и смотрим (слушаем), что получилось. Продолжается это до тех пор, пока есть лампы и терпение (лампы надо пронумеровать и результаты как - то документировать).

На втором этапе наладки все измерения проводятся при работе усилителя на эквивалент нагрузки при номинальной мощности. Следует иметь в виду, что при изменении режимов ламп будет изменяться и коэффициент передачи усилителя, уровень выходной мощности надо поддерживать по-

стоянным. Для проведения этого этапа наладки необходимо три прибора – генератор с малым уровнем искажений, вольтметр среднеквадратических значений (дешевые мультиметры не подходят) и спектроанализатор. Я, конечно, понимаю, что такие приборы в любительской лаборатории – редкость, компромиссным решением проблемы является использование приличной звуковой карты и виртуальных приборов. Так как большинство измерений носят не количественный, а качественный характер, то погрешности такой виртуальной лаборатории несущественно влияют на конечный результат.

Третий этап наладки носит несколько эзотерический характер: это подстройка режимов схемы на слух. Чтобы проделать такую операцию, надо иметь достаточно большой опыт и безукоризненный звуковой тракт. В общем, проделывание такой операции имеет к наладке схемы довольно условное отношение, это скорее установка личных предпочтений. Наиболее интересным является сравнение объективных параметров усилителя до и после проведения подстройки.

После окончания всех манипуляций по настройке схемы необходимо повторно выровнять коэффициенты передачи обоих каналов усилителя.

## **Заключение**

Единственно, что я могу добавить к вышесказанному: тот, кто осилит этот непростой путь, не пожалеет о потраченном времени и средствах.

## **Литература**

1. [Menno Van Der Veen, Новые схемы двухтактных ламповых усилителей мощности, Glass Audio, 1999.](#)
2. [Daniel H. Cheever, Новая методика тестирования аудиоусилителей основанная на психоакустических данных и обеспечивающая лучшую корреляцию с субъективным качеством звука, Интернет-издание, 2005.](#)
3. [Евгений Карпов, Простой высоковольтный стабилизатор, Интернет-издание, 2004.](#)
4. Сидоров И. Н. и др. Малогабаритные трансформаторы и дроссели, М.: Радио и связь, 1985.
5. [Евгений Карпов, Отбор ламп, Интернет-издание, 2003.](#)