

Золушка

Евгений Карпов

В статье представлена схема мощного однотактного усилителя на лампе 6С33С.

Моноблок изготовлен в содружестве с Александром Найденом, взявшим на себя проработку общего дизайна, конструкции корпуса и оказавшем неоценимую помощь в окончательной настройке схемы.

Споры о возможности использования лампы 6С33С в аудиоусилителях ведутся уже давно, известно и достаточно много вариантов усилителей, реализованных на ее основе. В общем-то, это вполне закономерно, фактически, это единственный достаточно мощный триод, действительно доступный для широкого круга любителей хорошего звука. Лампа не требует больших анодных напряжений, имеет низкое выходное сопротивление и прямо просится в выходной каскад однотактного усилителя. Но все не так просто, как кажется, и пришлось долго и тщательно колдовать прежде, чем золушка стала принцессой, и лампа заиграла. Забегая вперед, хочу сказать, что я остался доволен полученными результатами. Несмотря на не высокие объективные характеристики усилителя, субъективно звук воспринимается очень хорошо – сочный, с прекрасной детализировкой и динамикой. По мнению людей, слушавших этот усилитель, он вполне может конкурировать с усилителями, выполненными на признанных аудиофильских триодах - ГМ70, 845, 211.

Но вернемся к вопросу использования этой лампы. Раздел этот будет одинаково полезен и тем, кто захочет повторить эту схему: для более полного понимания вопроса, так и тем, кто будет проектировать свою – нет смысла топтаться по граблям. Можно выделить три основных проблемы – обеспечение стабильности режима лампы, возбуждение выходного каскада, реализация выходного трансформатора. В общем, более или менее удачно удалось их всех решить.

- Обеспечение стабильности режима работы лампы.

Желание получить на выходе максимальную мощность приводит к необходимости использовать лампы в режимах близких к предельным. Но лампа 6С33С довольно капризна, режим лампы весьма чувствителен как к изменению анодного напряжения, так и к изменению напряжения накала. Использование автоматического смещения не решает проблемы стабильности в полной мере, приводит к значительным потерям мощности и порождает проблему шунтирующей емкости. Поэтому я от него отказался сразу. В принципе, при стабилизации анодного напряжения можно использовать фиксированное смещение (некоторое время усилитель так и работал), но стабильность тока покоя меня не очень устраивала. Кроме того, у лампы есть еще одна неприятная особенность – эффект саморазогрева и, соответственно, неуправляемого нарастания тока анода. Полностью решить проблему стабильности режима удалось, введя в выходной каскад следящую систему стабилизации тока покоя лампы. Частота среза следящей системы выбрана достаточно низкой (единицы секунд), поэтому никакого влияния на звук она не оказывает.

- Возбуждение выходного каскада.

Здесь надо учитывать два фактора. Во-первых, выходной каскад имеет низкий коэффициент усиления (около 3) и, соответственно, драйвер должен обеспечивать большой размах выходного напряжения. Во-вторых, лампа имеет значительную входную емкость, следовательно, драйверный каскад должен работать с большими токами, чтобы обеспечить приемлемые частотные характеристики. Это объективные факторы, но мне еще хотелось, чтобы усилитель имел только два каскада. Поэтому реализовать драйвер на одной маломощной лампе не представлялось возможным. Я кардинально отступил от всевозможных концепций (многие из них для меня вообще сомнительны) и использовал в качестве драйвера мощный пентод. Чтобы удовлетворить поставленным требованиям, драйверный каскад питается высоким напряжением (600V) и работает с большим током покоя (порядка 20÷30 mA). Такая реализация драйверного каскада дает еще одну интересную возможность. При правильном выборе типа драйверной лампы изменением режима ее работы можно в довольно широком диапазоне изменять характер искажений, вносимых усилителем.

- Выходной трансформатор

Достаточно опытный читатель, наверное, скажет: «А в чем проблема? Лампа имеет низкое выходное сопротивление (около 200 Ом в рабочей точке), индуктивность намагничивания должна быть не очень большой и трансформатор простым». Такая радужная картина будет наблюдаться, если опираться на

классические рекомендации, где индуктивность намагничивания трансформатора определяется частотной характеристикой усилителя и считается вполне нормальным завал частотной характеристики в 3dB на частоте 20 Hz. Но вдумайтесь, пожалуйста, что такое 3dB. Это значит, что на частоте 20 Hz уровень выходного сигнала упадет в 1.41 раза. Интересно, а куда же он делся? Все достаточно просто: индуктивность намагничивающая трансформатора начала потреблять большой ток и шунтировать нагрузку, приведенное сопротивление нагрузки упало, и на внутреннем сопротивлении лампы стало падать больше напряжения. Следовательно, через лампу, кроме тока нагрузки, стал протекать и заметный ток намагничивания трансформатора. Уменьшение приведенного сопротивления нагрузки и нелинейность тока, потребляемого трансформатором, приводит к существенному возрастанию нелинейных искажений в области низких частот, как при малом, так и при большом сигнале. Субъективно, это воспринимается очень неприятно – пропадают инструменты, из музыки получается «каша».

Конечно, более правильно задавать допустимый уровень возрастания нелинейных искажений на низкой частоте, но такой расчет сложнее, чем традиционный, и требует наличия кривой намагничивания стали. Более простой путь - задать завал частотной характеристики на нижней рабочей частоте на уровне в доли децибела. Если теперь посчитать необходимую индуктивность намагничивания первичной обмотки трансформатора, то она заметно подрастет. Вот здесь и начинаются проблемы. С одной стороны, мы хотим получить большую индуктивность, с другой – через трансформатор течет большой ток подмагничивания, а результатом этой комбинации будет трансформатор впечатляющих габаритов. А чем больше размеры трансформатора, тем больше его паразитные параметры. Нас, в основном, интересует индуктивность рассеяния. Зная выходное сопротивление каскада и приведенное сопротивление нагрузки, не составляет особых проблем оценить допустимую индуктивность рассеяния. Например, чтобы получить завал частотной характеристики приблизительно 1dB на частоте 20 kHz, индуктивность рассеяния не должна превышать $3.8 \div 4$ мН. Реализовать такой трансформатор, используя доступные типы сталей и приемлемое секционирование, довольно сложно. Вообще, эта проблема существует и при использовании других типов мощных триодов с малым внутренним сопротивлением.

Удовлетворительно решить эту проблему можно, воспользовавшись давно известным способом - компенсацией постоянной составляющей магнитодвижущей силы (МДС) рабочей обмотки. Существует несколько вариантов компенсации МДС, наиболее простой – использование вспомогательной обмотки. На первый взгляд может показаться, что это совершенно невыгодно, так как часть окна сердечника занимает компенсирующая обмотка, но это не совсем так. За счет возможности снижения постоянной составляющей МДС в сердечнике (в принципе, ее можно свести к нулю) заданную индуктивность можно получить, используя сердечник меньших габаритов и при меньшем числе витков первичной обмотки. За счет уменьшения длины витка и общего числа витков обмоток не происходит значительного возрастания их активных сопротивлений и, соответственно, особых потерь в КПД трансформатора. Также с уменьшением габаритов трансформатора уменьшаются и его паразитные параметры. Конечно, это приводит к некоторому усложнению как конструкции самого трансформатора, так и к усложнению принципиальной схемы. Компенсирующая обмотка, чтобы не создавать дополнительную нагрузку на выходной каскад, должна питаться от качественного источника тока.

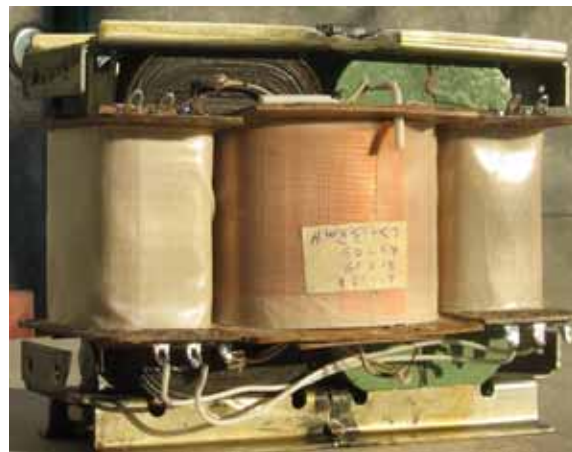


Рисунок 1

Исходя из вышеизложенных соображений, и был спроектирован выходной трансформатор. Он имеет несколько необычную конструкцию (рис.1). Хотя это немного и усложняет его изготовление, но позволяет получить лучшие параметры.

С точки зрения компенсации постоянной составляющей МДС основной обмотки не важно, где находится компенсирующая обмотка и сколько этих обмоток физически существует. Главное, чтобы МДС компенсирующих обмоток были направлены в нужную сторону. В показанной конструкции трансформатора компенсационные обмотки вынесены на боковые стержни сердечника. За счет увеличения суммарной площади охлаждения компенсирующих обмоток можно увеличить расчетную плотность тока через них. Соответственно, можно использовать более тонкий провод и освободить больше места для основной обмотки. Компенсирующие обмотки соединены параллельно, если считать магнитную цепь трансформатора симметричной, то нужное значение компенсирующей МДС можно получить при меньшем уровне переменной составляющей напряжения, возникающей на обмотках при протекании тока сигнала. Также за счет возникновения компенсирующих токов между обмотками происходит балансировка и выравнивание переменной составляющей индукции в боковых стержнях. Еще одним положительным свойством такого решения является дополнительное уменьшение паразитных параметров трансформатора.

В итоге при относительно небольших габаритах трансформатора удалось получить индуктивность намагничивания порядка 12 Н (при эквивалентном расчетном токе подмагничивания 30 мА) и индуктивность рассеяния 3.7 мН. Выходной каскад с этим трансформатором имеет частотную полосу (по уровню -3 dB) 5Hz÷40kHz.

Схема усилителя.

Всю схему усилителя условно можно разбить на четыре относительно независимые части. Это собственно сам усилитель, стабилизаторы компенсационного тока и тока покоя выходной лампы, стабилизаторы анодных напряжений и узел выпрямителей.

- Усилитель

Схема усилителя приведена на рисунке 2. Усилитель двухкаскадный, какие-либо обратные связи в

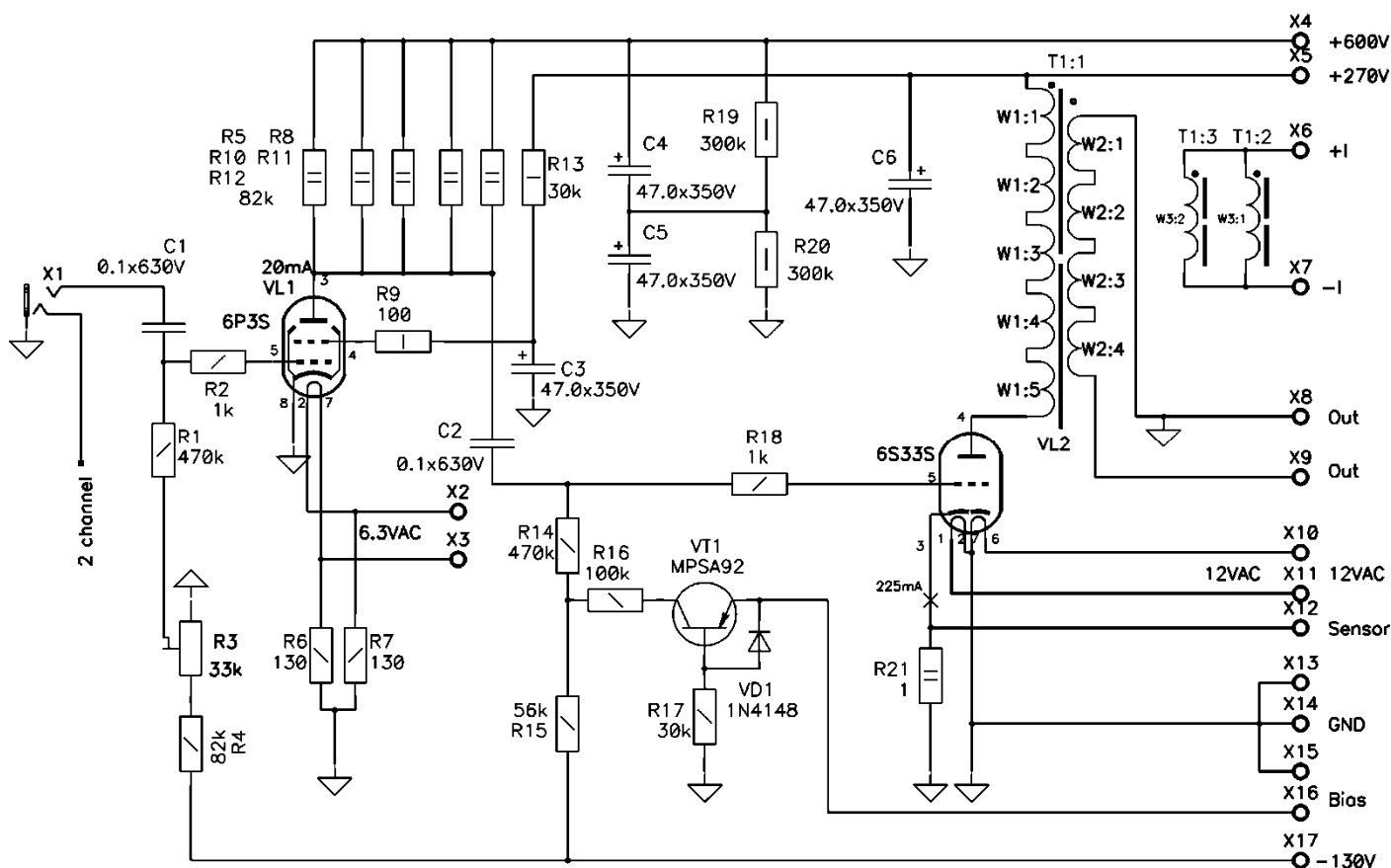


Рисунок 2

усилителе отсутствуют. Первый каскад обеспечивает основное усиление и также выполняет функции драйвера. Лампа работает с фиксированным смещением, величина которого определяется резистором R3. В процессе исследований была обнаружено, что в пару к 6С33С подходят далеко не все лампы. Наиболее подходящими оказались лампы – 6П3С, 6П7С и 6П13С. С одной стороны, характер искажений, вносимых этими лампами, позволяет эффективно компенсировать вторую гармонику, генерируемую лампой 6С33С, с другой стороны, уровень второй гармоники этих ламп очень сильно зависит от выбранного режима работы. Таким образом, регулируя режим драйверной лампы, можно в широких пределах менять характер искажений, вносимых всем усилителем. Второй каскад - усилитель мощности. Лампа 6С33С фактически тоже работает с фиксированным смещением. Величина смещения задается активным делителем, образованным резисторами R14, R15, R16 и транзистором VT1. Управляющий сигнал на эмиттер VT1 поступает с системы стабилизации тока. Информация о токе выходной лампы снимается с резистора R21.

Усилитель имеет следующие параметры.

Максимальная выходная мощность		15W
Номинальное входное напряжение		~2V _{RMS}
Номинальное сопротивление нагрузки		8Ω
Коэффициент нелинейных искажений	(1W)	0.51%
	(10W)	2.5%
	(15W)	3.57%
Неравномерность частотной характеристики (10Hz÷20kHz)		±1dB

Характер искажений, вносимых усилителем при разной выходной мощности, показан на рисунках 3÷5.

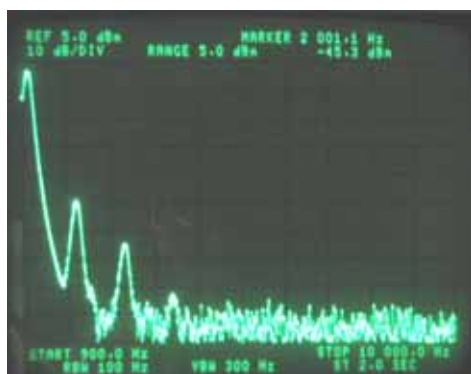


Рисунок 3



Рисунок 4



Рисунок 5

Невысокая чувствительность усилителя в некоторых случаях может создать проблемы. В этом случае можно дополнить схему еще одним каскадом усиления. Дополнительный каскад целесообразно реализовать на триоде с минимальным коэффициентом усиления (я использовал 6Г1) по реостатной схеме. Какого-либо влияния дополнительного каскада на качество звука не замечено.

- Стабилизаторы компенсационного тока и тока покоя выходной лампы.

Схема стабилизаторов приведена на рисунке 6. Основой стабилизатора тока является трехвыводной стабилизатор напряжения, включенный в режиме источника тока (DA3). Хорошие частотные свойства стабилизатора и высокая стабильность его параметров обеспечивают хорошую стабильность тока подмагничивания. Для обеспечения нормального режима работы микросхемы DA3 она отделена от обмотки подмагничивания эмиттерным повторителем (VT1). Напряжение на базе транзистора зафиксировано стабилитроном. Получается своеобразный каскодный источник тока. Ток подмагничивания

устанавливается резистором R13, супрессор VD1 защищает источник тока от выбросов на обмотке подмагничивания при переходных процессах.

Стабилизатор тока покоя лампы представляет собой замкнутую, астатическую систему регулирования. Основной системы является интегратор на микросхеме DA1. На один вход интегратора поступает опорное напряжение с резистора R1, а на второй - информация о токе лампы. Эти напряжения сравниваются, и сигнал ошибки с выхода интегратора поступает на вход управляемого делителя, задающего напряжение смещения выходной лампы.

Так как положительное напряжение питания DA1 одновременно используется и для формирования опорного напряжения, для его стабилизации используется микросхема DA2.

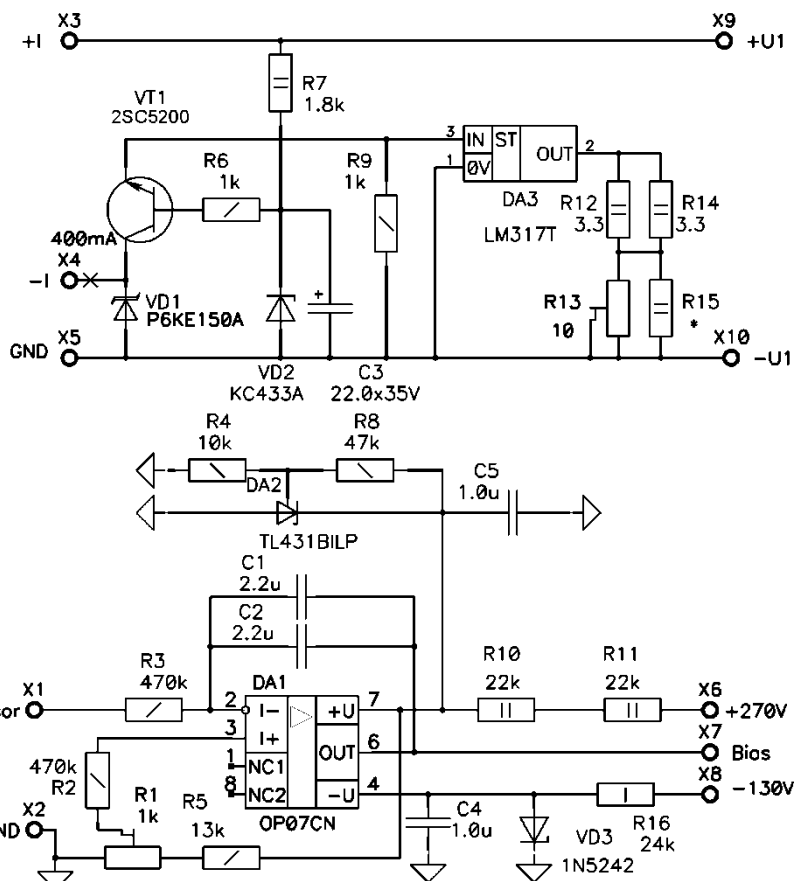


Рисунок 6

- Стабилизаторы анодных напряжений

Стабилизация анодных напряжений желательна для любых типов усилителей, а для этой схемы она просто необходима. Главная цель использования стабилизатора: устранить модуляцию напряжения питания током сигнала (не следует забывать, что пиковый ток лампы достигает 0.5А)[1]. Это улучшает воспроизведение низших частот и уменьшает уровень интермодуляционных искажений усилителя. Ну и совершенно очевидно, что стабилизация анодных напряжений позволяет снизить уровень их пульсаций (к чему однотактные схемы весьма чувствительны) и устраняет влияние колебаний сетевого напряжения на режим схемы.

Схема стабилизаторов анодных напряжений показана на рисунке 7.

Основной стабилизатор реализован по хорошо зарекомендовавшей себя схеме [1] на основе микросхемы TL431 (DA1). Базовая схема стабилизатора была немного модернизирована для увеличения выходного тока и расши-

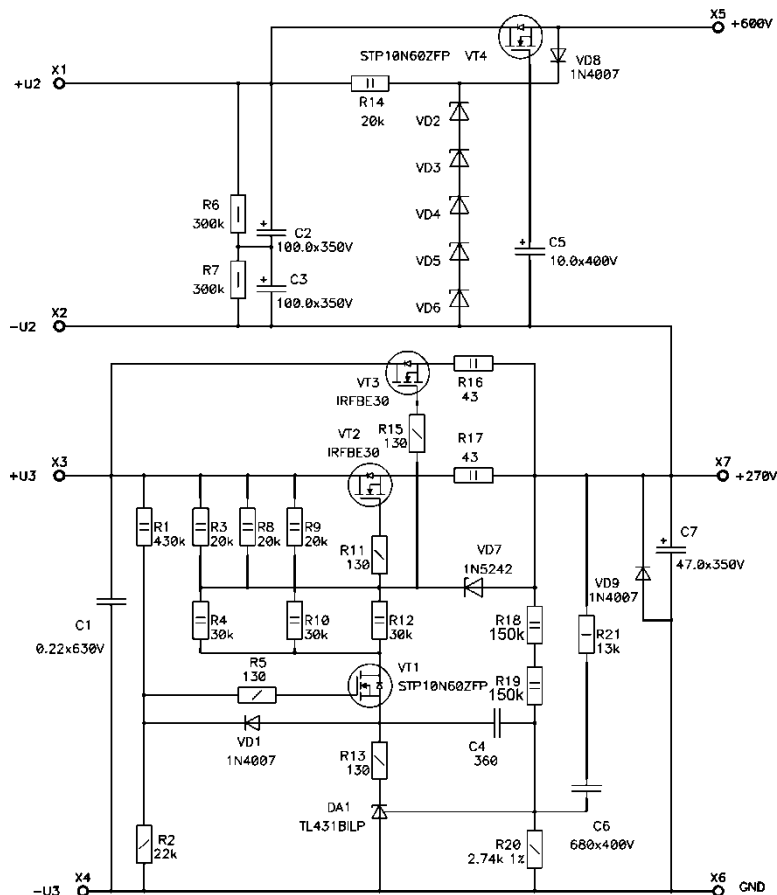


Рисунок 7

рения диапазона входных напряжений. Так как схема уже была подробно описана и никаких изменений в принципе работы не было, то мы не будем останавливаться на ее работе более подробно.

Для получения анодного напряжения 600V, суммируется основное анодное напряжение и напряжение вольтодобавки. Напряжение вольтодобавки стабилизировано простейшим параметрическим стабилизатором, реализованным на транзисторе VT4 и стабилитронах VD2÷VD6.

- Узел выпрямителей

Для питания усилителя используется два трансформатора. Один трансформатор обеспечивает напряжение накала ламп и стабилизированное напряжение отрицательного смещения, при включении питания усилителя напряжение на его первичную обмотку поступает сразу. Второй трансформатор обеспечивает анодные напряжения и напряжение питания катушек подмагничивания. Напряжение на его первичную обмотку поступает с задержкой, определяемой таймером на микросхеме DA1. Схема узла выпрямителей показана на рисунке 8.

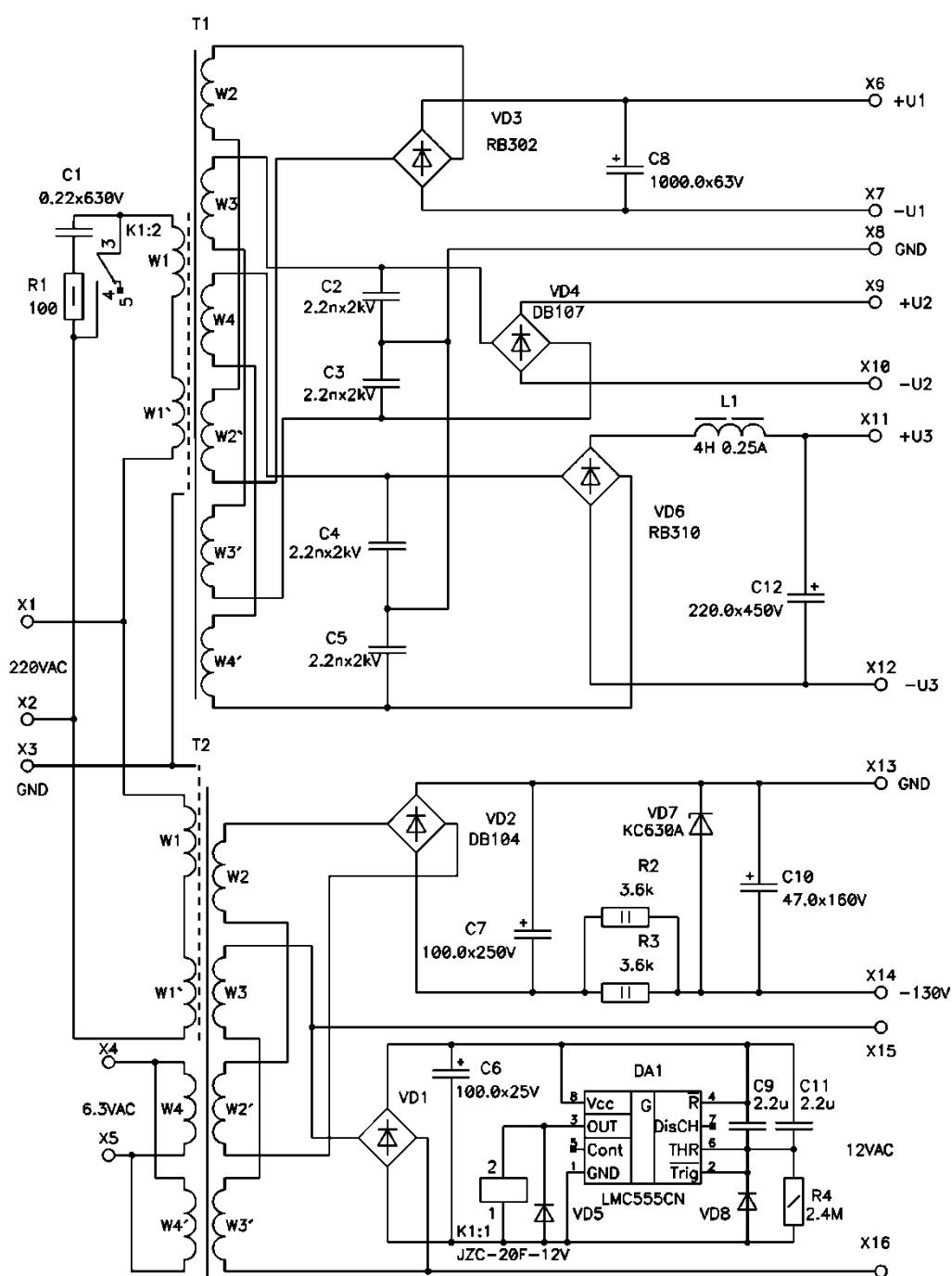


Рисунок 8

Конструкция и детали

Первое, что я хочу отметить: усилитель реализован как моноблок, соответственно, мощность источников питания рассчитана только на один канал усилителя.

Второе: в данный момент окончательный вариант шасси усилителя находится в изготовлении и, к сожалению, показать реальный внешний вид нет возможности. Но чтобы вы представляли, как он будет выглядеть, я привожу внешний вид модели (рисунок 9). Эта картинка вполне реальна, именно из этой модели получены чертежи всех деталей. Конечно, есть и отличия - некоторые компоненты изображены упрощенно, некоторые компоненты отсутствуют, будет использовано другое цветовое решение.

Усилитель смонтирован на несущем стальном шасси, боковые стенки шасси отделаны декоративными деревянными элементами, несущее шасси сверху закрыто декоративной крышкой. Все трансформаторы помещены в кожуха из мягкой стали толщиной 1.5мм. Монтаж усилителя навесной, преимущественно выводами самих компонентов; там, где необходимы промежуточные опорные точки, установлены соединительные платы ПСК-х-10. Непосредственно в схеме усилителя используются следующие пассивные компоненты: электролитические емкости – Panasonic, серия ECA-M, постоянные резисторы – тонкопленочные C2-33, P1-72, C2-23, Разделительные емкости – WIMA MKP 4.

Приведенный выше перечень не догма, а констатация факта, могут быть использованы компоненты и любых других типов и производителей с аналогичными параметрами. Выбор типов пассивных компонентов, находящихся вне звукового тракта, произвольный (естественно, с учетом их рабочих напряжений и рассеиваемых мощностей).

В схеме стабилизаторов не указаны типы стабилитронов VD2÷VD6, это связано с тем, что высоковольтные маломощные стабилитроны встречаются редко. В сумме надо «набрать» напряжение стабилизации порядка 335 вольт. Количество последовательно включенных стабилитронов может быть любым, их минимальный ток стабилизации не должен превышать 1÷2mA.

Все транзисторы стабилизаторов анодных напряжений устанавливаются на общий охладитель (через изолирующие прокладки) с эффективной площадью 1500÷2000см². Транзистор стабилизатора тока подмагничивания устанавливается на охладитель с эффективной площадью ~600см², микросхема LM317T устанавливается на отдельный охладитель площадью 3÷4см². Отвод тепла от стабилитрона VD7 в узле выпрямителей осуществляется элементами шасси, на которое он установлен через изолирующую прокладку.

Все вспомогательные узлы усилителя размещены на трех печатных платах – плате стабилизатора тока покоя (размещена у выходной лампы), платы стабилизаторов анодных напряжений (закреплена непосредственно на охладителе) и платы выпрямителей (размещена у задней стенки шасси).

- Выходной трансформатор

Сердечник выходного трансформатора составлен из двух сердечников ПЛМ22x32x58 из стали 3413 или 3414 (толщина ленты 0.35мм). Найти такие сердечники будет достаточно сложно, но не будет большой беды, если воспользоваться сердечниками из стали 3411, которая используется для сердечников силовых трансформаторов. В частности, подходящий сердечник используется в трансформаторе ТС-90-2, но вам в любом случае надо запастись шестью такими трансформаторами, так как от них используется фурнитура и катушки. Основное отличие между сталями 3414 и 3411 в величине потерь в достаточно сильных полях. Если выбрана небольшая индукция (у нас так и есть), то разница в потерях этих сталей становится незначительной.

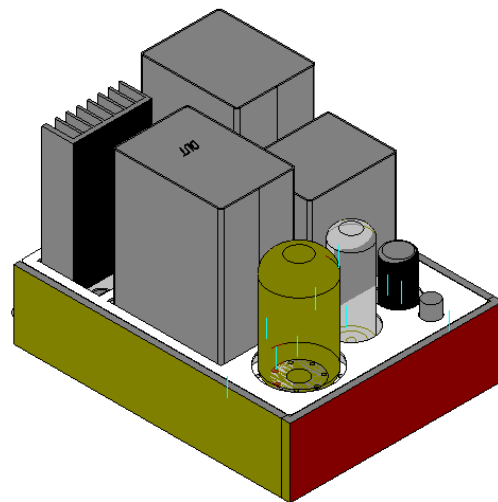


Рисунок 9

Стяжной хомут для выходного трансформатора изготавливается из двух комплектов хомутов от трансформаторов ТС-90-2. Стяжные скобы подрезаются так, что бы их торцы соприкасались, когда они уложены на стоящие рядом сердечники. После подгонки размера получившиеся половинки свариваются встык полуавтоматической сваркой. Для усиления шва сверху наваривается накладка из миллиметровой стали. Для стягивания сердечника используются две штатные стяжки от трансформаторов. Вся конструкция хорошо видна на рисунке 1.

Каркас основных обмоток склеен и прессшпана толщиной 0.5мм и пропитан электроизолирующим лаком, его размеры указаны на рисунке 10, там же показан порядок намотки обмоток.

Первичная обмотка намотана проводом ПЭТ-150 $\varnothing 0.335\text{мм}$ и содержит 1950 витков (5 секций по 390 витков в три слоя по 130 витков). Вторичная обмотка содержит 204 витка проводом ПЭВ-2 $\varnothing 0.96\text{мм}$ (4 секции по 51 витку в один слой). Намотка обеих обмоток рядовая, виток к витку. Секции первичной и вторичной обмотки соединены последовательно согласно.

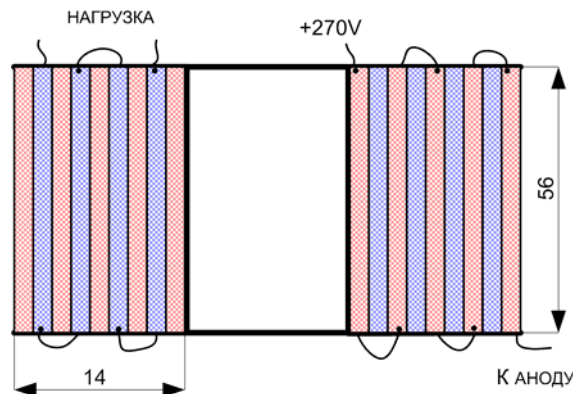


Рисунок 10

Трансформатор не пропитывается. Электрическая прочность обеспечивается конструктивными мерами и качественными изоляционными материалами. Первичная обмотка намотана с защитными зазорами (около 2 мм). Вторичная обмотка мотается от щечки до щечки. Выводы обмоток выполнены непосредственно обмоточным проводом, на выводы в обязательном порядке надевается изоляционная трубка. Межслоевая изоляция первичной обмотки выполнена из конденсаторной бумаги толщиной 0.03мм в один слой, межобмоточная изоляция выполнена из пленки ПЭТ-Э толщиной 0.125мм в два слоя.

Для упрощения жизни компенсационные обмотки изготовлены из катушек трансформаторов ТС-90-2. С катушек снимают все обмотки, кроме первичной, и аккуратно подрезают с одной стороны щечки. Собственно первичные обмотки, оставшиеся на катушках, и используются как компенсационные. Чтобы было понятно, как надо включать компенсационные обмотки, на рисунке 11 условно показаны рабочая и компенсационные обмотки, направление текущих через них токов и МДС, которые они создают. Чтобы условие компенсации выполнялось, необходимо соблюсти правильную фазировку (направление намотки провода) для всех катушек.

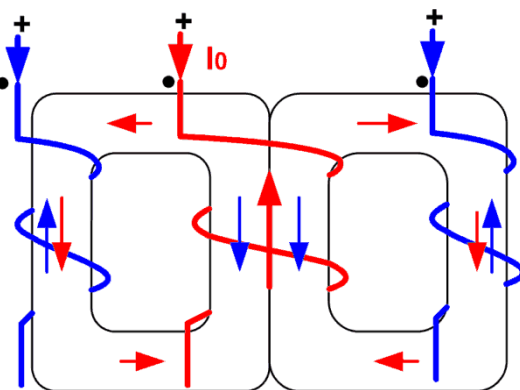


Рисунок 11

Сердечник трансформатора собирается с полным зазором $\sim 0.14\text{мм}$. После сборки трансформатора его необходимо сбалансировать. Для этого компенсационные катушки временно включаются встречно последовательно, к их свободным выводам подключается вольтметр, а на первичную обмотку через ЛАТР подается напряжение 100÷150 вольт. Регулируя усилие затяжки гаек стяжек, необходимо добиться минимальных показаний вольтметра (порядка 0.3÷0.8 вольта). Если добиться таких показаний вольтметра не удастся, то возможны два варианта дальнейших действий. Можно попробовать заменить половинку сердечника другим комплектом магнитопровода или измерить напряжение на каждой компенсационной катушке отдельно и немного увеличить зазор в магнитопроводе там, где напряжение на катушке выше.

- Трансформаторы питания

Анодный трансформатор (Т1) изготовлен на базе серийного трансформатора ТС 180-2. Трансформатор разбирают и снимают с него все вторичные обмотки и экран. Для уменьшения величины индукции в сердечнике доматывают к каждой половинке первичной обмотки по 22 витка проводом ПЭВ-2 Ø 0.62мм. Возвращают на место экран (его лучше заменить на медный и более широкий). От первичной обмотки экран изолируется тремя слоями пленки ПЭТ-Э, а от вторичных обмоток – двумя слоями той же пленки. Потом наматываются вторичные обмотки (таблица 1), так как катушки одинаковы, то приведены моточные для одной катушки. Намотка обмоток – рядовая.

Таблица 1

Обмотка	Провод	Число витков
W2	ПЭВ-2 Ø 0.62	73
W3	ПЭВ-2 Ø 0.21	724
W4	ПЭВ-2 Ø 0.41	860

Аналогичным образом переделывают и накальный трансформатор (Т2), он изготовлен на базе серийного трансформатора ТС 90-2. Для этого трансформатора доматывают к каждой половинке первичной обмотки по 33 витка проводом ПЭВ-2 Ø 0.41мм. Моточные данные этого трансформатора приведены в таблице 2.

Таблица 2

Обмотка	Провод	Число витков
W2	ПЭВ-2 Ø 0.21	350
W3	ПЭВ-2 Ø 1.4	31
W4	ПЭВ-2 Ø 0.62	31

В обоих трансформаторах для межслоевой изоляции используется конденсаторная бумага толщиной 0.03мм в один слой, межобмоточная изоляция – пленка ПЭТ-Э толщиной 0.125мм в два слоя. В принципе, для межобмоточной изоляции можно воспользоваться и прокладками, снятыми с трансформаторов при разборке. В любом случае перед использованием старой изоляции её надо прогладить горячим утюгом для разравнивания и удаления лишнего церезина.

После сборки и проверки оба трансформатора пропитываются лаком МЛ-92 и высушиваются при температуре 120С° в течении 5 часов. Пропитка значительно улучшает отвод тепла из внутренних слоев катушки и уменьшает уровень акустических шумов.

Несколько общих замечаний по изготовлению силовых трансформаторов.

Перед разборкой трансформатора целесообразно измерить их ток холостого хода при номинальном напряжении. После перемотки и сборки трансформатора необходимо измерить ток холостого хода повторно, он не должен превышать ранее полученное значение. Дело в том, что любители используют для склейки половин сердечника всевозможные доморощенные клеевые пасты с добавкой толченого феррита или альсифера. Результат их применения непредсказуем. Если ток холостого хода увеличился, то пасту надо удалить. Удовлетворительные результаты можно получить, нанеся на половинки сердечника тонкий слой масляного лака и сразу их сжать.

Перед началом намотки трансформатора необходимо тщательно облудить контактные лепестки. В продаже достаточно часто встречаются абсолютно новые не паяные трансформаторы (это, кстати, лучший вариант). Лепестки на них просто не паяются. В этом случае придется удалять химическое лужение механическим путем (до чистого металла), использовать активные флюсы нельзя – они впитываются в каркас и полностью их удалить невозможно.

Дросселем можно воспользоваться готовым, его активное сопротивление должно находиться в пределах 90÷120 Ом. Если готового дросселя найти не удастся, то его можно изготовить самостоятельно. Сердечник дросселя УШ 16x48 (полтора сердечника от ТВК-110), он содержит 1920 витков проводом ПЭВ-2 Ø 0.27мм. Полный зазор в сердечнике – 0.8мм. Такой, несколько странный, сердечник пришлось использовать из-за необходимости поместить дроссель в подвале шасси. Изготовленный дроссель также подлежит пропитке и сушке, как и силовые трансформаторы (сделать это надо обязательно, иначе вместо музыки вы будете слышать его гудение).

Наладка усилителя

Налаживание усилителя можно разбить на четыре этапа.

Первый этап – проверка источников питания. Источники надо запускать по одному (отключив остальные от трансформатора). Выход источника отключают от схемы и подключают эквивалент нагрузки (600V - 20÷30mA, 270V - 150÷200mA, -130V - 15÷20mA), напряжение на входе желательно повышать плавно, воспользовавшись ЛАТРом. Стабилизатор компенсационного тока проверяют, не отключая его от компенсационных катушек. Попутно устанавливают начальное значение компенсационного тока. Для стабилизаторов анодных напряжений, кроме значения выходного напряжения, надо проконтролировать отсутствие возбуждения схемы.

Второй этап – установка режимов усилителя. Все источники подключаются к схеме усилителя, выходная лампа изымается, и к цепи основного анодного напряжения (270V) подключается эквивалент нагрузки, вход усилителя заземляют. Движок потенциометра R3 (Рисунок 2) устанавливается в среднее положение. На усилитель подается сетевое питание. После срабатывания реле задержки и появления анодных напряжений резистором R3 устанавливают на аноде VL1 напряжение 300V. Устанавливают на движке R1 (Рисунок 6) напряжение 0.2V. Усилитель отключается от сети. Эквивалент нагрузки отключают и устанавливают на место выходную лампу. Включают усилитель и дают ему прогреться в течение 5÷6 минут (при этом полезно контролировать ток выходной лампы, после появления анодного напряжения он должен плавно нарасти до установленного значения). После прогрева окончательно устанавливают ток покоя выходного каскада.

Третий этап – настройка усилителя. Как ни парадоксально, окончательная настройка усилителя производится на слух. Конечно, если под рукой есть необходимые приборы, можно измерить и объективные параметры усилителя, операция желательная, но не обязательная. Прогрев усилитель в течение 15÷20 минут, подстраивая резистор R3 (Рисунок 2) и резистор R13 (Рисунок 6), добиваются, на ваш взгляд, наилучшего звучания. Настройку надо повторить несколько раз, используя музыкальные произведения разных жанров.

Четвертый этап – согласование каналов. Это самый хлопотный этап настройки, желательно, чтобы два канала имели не только одинаковый коэффициент передачи, но и приблизительно одинаковый характер вносимых искажений. Добиваются этого, как подстройкой режимов, так и путем подбора ламп. Делать это на слух крайне неблагоприятная задача, желательно использовать спектроанализатор. Такой прибор довольно редкая вещь, особенно в любительской лаборатории. Но учитывая, что нам важна скорее качественная, чем количественная, оценка вносимых искажений, вполне можно обойтись компьютером с приличной звуковой картой и программной реализацией спектроанализатора. Вот это уже совсем не редкость.

Заключение

Хотя сам усилитель очень прост, но все в комплексе представляет собой достаточно сложное устройство. Поэтому я хотел бы несколько остудить «горячие головы» и обратить внимание читателей на некоторые сложности, которые могут возникнуть при повторении этой схемы.

Во-первых, описание самой схемы и этапов ее наладки, хотя оно достаточно подробное, рассчитано на людей, имеющих базовые знания в области электроники и опыт изготовления, как ламповых, так и полупроводниковых устройств.

Во-вторых, необходимо иметь опыт изготовления моточных изделий, соответствующие материалы и хотя бы простейшее оборудование.

В-третьих, стоимость изготовления двух моноблоков (таких, чтобы их было не стыдно кому-то показать) получается высокой. Хорошо, если вы уложитесь в 300€, при условии, что трансформаторы вы изготовите самостоятельно.

В-четвертых, изготовление усилителей очень, очень трудоемко.

Литература

1. Карпов Е. В. [Простой высоковольтный стабилизатор](#), Интернет издание, 2002.