

ОДНОЛАМПОВЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Евгений Карпов

В статье приведены результаты исследования характеристик различных типов каскадов, реализованных на комбинированной лампе 6Ф5П. Даны рекомендации по выбору режима работы ее триодной и пентодной части. Приведена и описана схема усилителя на этой лампе.

Введение

Широкое распространение и доступность комбинированных телевизионных ламп типа [6Ф3П](#) и [6Ф5П](#) вызывает у многих любителей ламповой техники желание попытаться их использовать в простых усилителях. В Интернете появился ряд публикаций, посвященных этой теме. Схемы усилителей действительно просты и вполне работоспособны, но некоторое несоответствие между заявленной выходной мощностью и коэффициентом нелинейных искажений меня смучило. По данным, приведенным Войшвилло [1], реально достижимая величина КПД анодной цепи триода в однотактном каскаде составляет $15\div 25\%$ (с учетом выходного трансформатора) и в исключительных случаях может составить 35% , но коэффициент гармоник при этом достигает $10\div 12\%$. Необходимо учесть, что в триодном включении используется пентод, а для большинства ламп в таком режиме вторая гармоника имеет повышенный уровень. Следовательно, для ламп 6Ф3П, 6Ф5П реальная выходная мощность приблизительно составит $1.5\div 2$ ватта при приемлемом уровне искажений.

Заинтересовавшись этим вопросом, я решил провести собственное исследование. Для экспериментов была выбрана лампа 6Ф5П. Выбор пал на этот тип лампы по следующим причинам – мощность, рассеиваемая анодом пентода, у нее немного больше, микрофонный эффект существенно меньше и, самое главное, под рукой было достаточное количество ламп. Первым делом была тщательно обследована случайная выборка ламп, на базе этих [данных](#) созданы [модели](#), а дальше я заставил поработать мой компьютер.

Моделирование

Конечно, основной интерес представлял выходной каскад, вносящий наибольшие искажения. После предварительного расчета были промоделированы разные варианты включения пентодной части лампы.

Моделирование не принесло каких-либо неожиданностей и соответствовало теории.

В пентодном режиме лампа дает довольно высокий уровень искажений и большое число гармоник с превалированием третьей. Использование пентодного включения явно не подходит для высококачественного воспроизведения.

В триодном режиме результаты гораздо более благоприятные. Превалирует вторая гармоника и гармониковый «хвост» гораздо короче. Компромисс между выходной мощностью и искажениями достигается при сопротивлении нагрузки около $4\text{ k}\Omega$. В этом случае коэффициент усиления каскада приблизительно равен $5\div 6$. Выходное сопротивление каскада (при идеальном трансформаторе) $\sim 1.2\text{ k}\Omega$.

Использование катодной обратной связи оказалось наиболее привлекательным. При достаточно глубокой местной обратной связи (порядка 12db) спектр выходного сигнала практически не отличается от спектра в триодном включении, но коэффициент усиления получается больше. Выходные сопротивления каскадов имеют сравнимые значения.

Фактически, пентод преобразуется в триод путем введения местной внешней обратной связи, в триоде же действует внутренняя обратная связь. При внешней схожести результата существуют важные различия: глубину обратной связи можно регулировать, обратная связь охватывает выходной трансформатор, катодная обратная связь линейна (внутренняя обратная связь триода носит нелинейный характер [2]).

Также моделировались и другие, более экзотические варианты, и хотя результаты получились хорошими, в дальнейшем мы не будем их касаться из-за сложностей технической реализации.

Моделирование режимов работы триодной половины лампы показало, что оптимальным вариантом является использование в аноде лампы источника тока.

Работа этой лампы при фиксированном токе благоприятствует повышению линейности каскада. По сравнению с каскадом, имеющим резистивную нагрузку, коэффициент гармоник уменьшается более, чем в два раза. Моделирование и измерения на реальных образцах показали, что использование резистора в анодной цепи позволяет получить коэффициент усиления порядка $45\div 50$ и коэффициент гармоник при размахе выходного напряжения $50\text{V}\sim 1.3\%$. Использование источника тока обеспечивает при аналогичных режимах коэффициент усиления около 68 и коэффициент гармоник, близкий к 0.5% .

В спектре выходного сигнала в обоих случаях преобладающей является вторая гармоника, но третья гармоника в каскаде с источником тока гораздо меньше и находится на уровне $\sim 0.07\%$, более высокие нечетные гармоники находятся на уровне шумов усилителя. Спектр выходного сигнала показан на рисунке 1, я привожу результаты моделирования, так как они мало отличаются от результатов, полученных прямым измерением величин гармоник селективным вольтметром, и гораздо нагляднее.

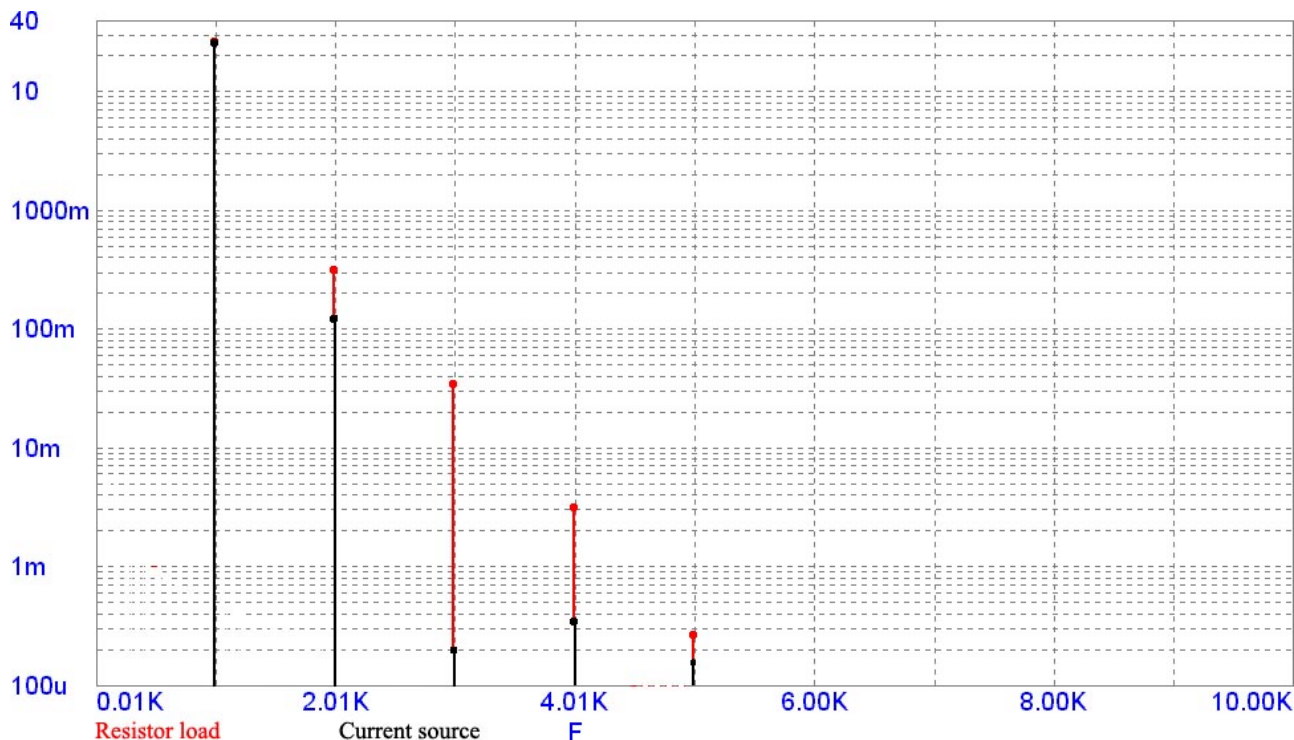


Рисунок 1

Хочу заметить, что время, потраченное на создание моделей, было потеряно не зря. Модели достаточно точно отражают поведение реальной лампы, расхождение между результатами моделирования и реально измеренными значениями не превышало $15\div 20\%$.

Экспериментальные результаты

Проверка результатов моделирования проводилась для всех трех вариантов построения выходного каскада (схемы включения лампы приведена на рисунке 2, цепи накала не показаны). Вариант включения в режиме пентода был проверен из соображений: лучше один раз увидеть,

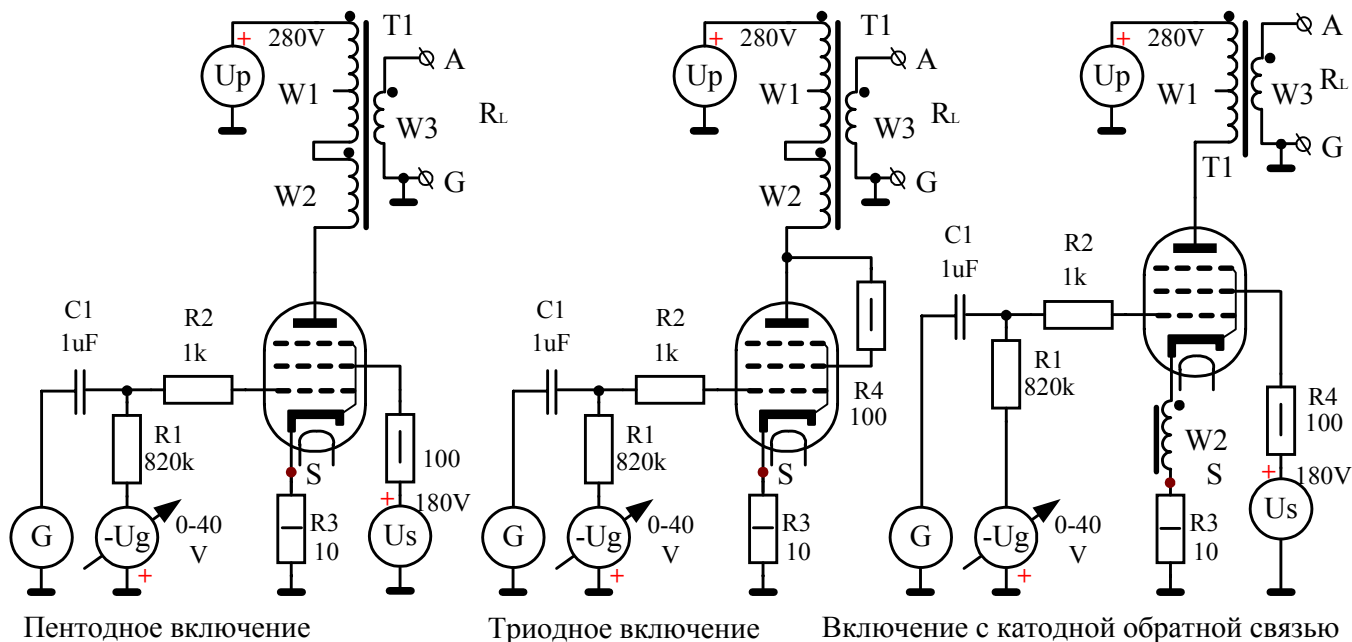


Рисунок 2

чем сто раз услышать. А вот какой вариант лучше - включение лампы в режиме триода или с катодной обратной связью - предстояло уточнить.

При проведении экспериментов использовались стабилизированные источники и один выходной трансформатор. Трансформатор имел сравнительно не большую индуктивность первичной обмотки (около 15 Г), но очень маленькие паразитные параметры. Также в нем имелось достаточное количество отводов, что позволяло обеспечить оптимальные сопротивления нагрузки лампы для всех режимов. Спектроанализатор подключался параллельно нагрузке (выводы А, Г). Испытания проводились на частоте 1kHz. Ток покоя лампы устанавливался максимально возможным по рассеиваемой на аноде мощности (порядка 30mA). Результаты измерений приведены ниже.

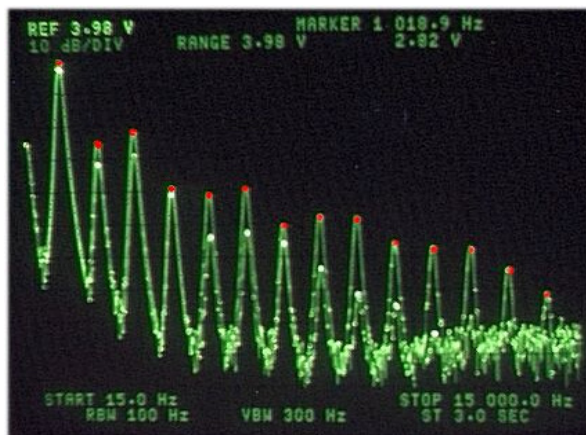


Рисунок 3

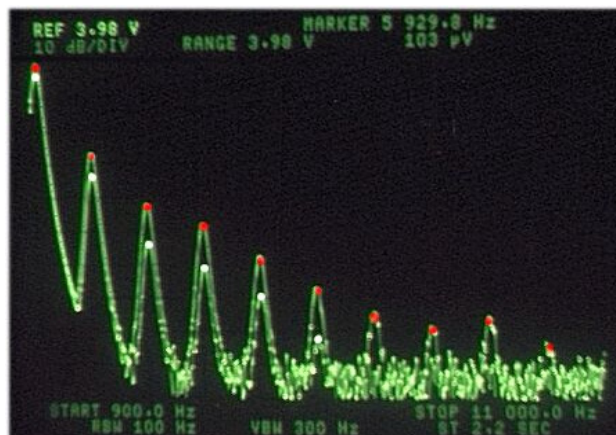


Рисунок 4

На рисунке 3 показан спектр выходного сигнала лампы в пентодном включении для двух уровней выходной мощности 1 и 1.9W. При выходной мощности в 1.9W прекрасно различима 14 гармоника. Заметьте, что третья гармоника превышает вторую при обоих уровнях мощности. При выходной мощности 1.9W коэффициент гармоник составляет около 12%, при снижении выходной мощности до 1W коэффициент гармоник приблизительно равен 7%. Выходное сопротивление каскада (с учетом выходного трансформатора) равно 16 kΩ.



Рисунок 5

На рисунках 4 и 5 приведены спектры выходного сигнала при триодном включении и схеме с катодной связью, соответственно, для выходной мощности 1 и 1.6W. Как Вы видите, они весьма похожи. При выходной мощности 1.6W различима 9 гармоника, и коэффициент гармоник не превышает 4.5%; при снижении выходной мощности до 1W шестая гармоника находится на уровне шумов, и коэффициент гармоник не превышает 2.5%. В обоих каскадах при любой мощности преобладающей является вторая гармоника, и уменьшение выходной мощности приводит к быстрому затуханию спектра. Если сравнить результаты для обеих схем, то можно увидеть, что параметры схемы с катодной связью чуть лучше (рис.5). Измеренное выходное сопротивление для триодного включения равно 1.4 kΩ, а для схемы с катодной связью 1.5 kΩ

Следует учесть, что шкала прибора логарифмическая (к сожалению, сетки не видно) и покрывает диапазон 100db. Чтобы Вы могли оценить уровни гармоник, на рисунке 5 указаны их численные значения.

Схема усилителя

Логическим завершением этих исследований стала разработка схемы усилителя на лампе 6Ф5П. Разработанная схема легла в основу готовящегося к выпуску компанией «MP34» мультимедийного центра с ламповым выходным усилителем. Так как усилитель предназначен для серийного производства, произошло некоторое смещение приоритетов при проектировании. Основными

требованиями стали высокая повторяемость конструкции с получением гарантированного качества.

За основу принята схема выходного каскада с катодной обратной связью, обеспечивающая более высокую чувствительность усилителя и более стабильные параметры.

Электрические характеристики прототипа усилителя приведены ниже –

Номинальная чувствительность	0.25V_{RMS}
Номинальная выходная мощность	1.0W
Максимальная выходная мощность	~1.5W
Коэффициент гармоник	<5% (при максимальной выходной мощности)
Мощностная частотная полоса	50Hz÷30kHz (по уровню – 1db, P=1.3W)
Малосигнальная частотная полоса	30Hz÷60kHz (по уровню – 1db, P=0.16W)
Неравномерность частотной характеристики	<0.5db (30Hz÷50kHz, P=0.16W)
Уровень фона	-75db (частота 50 Hz) -80db (частота 100 Hz)
Уровень шума	-71db (не взвешенный)
Перекрестная помеха между каналами	-57db (30Hz) -66db (100Hz) -84db (1kHz) -84db (10kHz) -87db (20kHz)
Номинальное сопротивление нагрузки	8Ω
Входное сопротивление	47kΩ ± 10%
Вход	открытый
Потребляемая мощность	60W (не более, при напряжении сети 220VAC)
Напряжение питания	220VAC ± 10

Принципиальная схема прототипа усилителя показана на рисунке 6.

Усилитель собран по однотактной схеме и содержит два усилительных каскада. Для обеспечения высокого качества звуковоспроизведения и высокой повторяемости каждый каскад охвачен местной отрицательной обратной связью, а весь усилитель – общей отрицательной обратной связью с глубиной около 6db. Применение местных обратных связей, особенно в выходном каскаде [3], благоприятно сказывается на линейности и фазовой характеристике усилителя, а малая глубина общей обратной связи, не ухудшая качества звуковоспроизведения, позволяет дополнительно стабилизировать его параметры.

Так как усилитель содержит два идентичных канала, рассмотрим только один канал, например, верхний на рисунке 6.

Входной каскад

Во входном каскаде используется триодная часть лампы – VL1:1, и в нем обеспечивается основное усиление сигнала по напряжению. Как было показано выше, оптимальным вариантом является использование в аноде лампы источника тока. Он собран на элементах VT1, VT2, VD1, VD2, R9, R10, R13. Для реализации преимуществ такого каскада необходимо, чтобы источник тока был близок к идеальному. Поэтому и используется достаточно сложная схема, параметры которой, во всяком случае, в диапазоне звуковых частот, близки к идеальным

Вас не должно смущать наличие транзисторов в усилителе. Через источник тока переменная составляющая тока сигнала не протекает, так как он имеет очень большое выходное сопротивление. Основной функцией источника тока является задание режима работы лампы.

Большой запас усиления каскада позволяет упростить катодную цепь лампы и отказаться от применения в ней электролитических емкостей. Неглубокая местная отрицательная обратная связь через катодный резистор R7 способствует повышению стабильности усилителя и улучшению его параметров. Для расширения полосы частот каскада ток покоя лампы выбран достаточно большим (3.6mA). В результате, каскад имеет полосу пропускания от 0÷80 kHz и неравномерность АЧХ, не превышающую 1db (на аноде лампы).

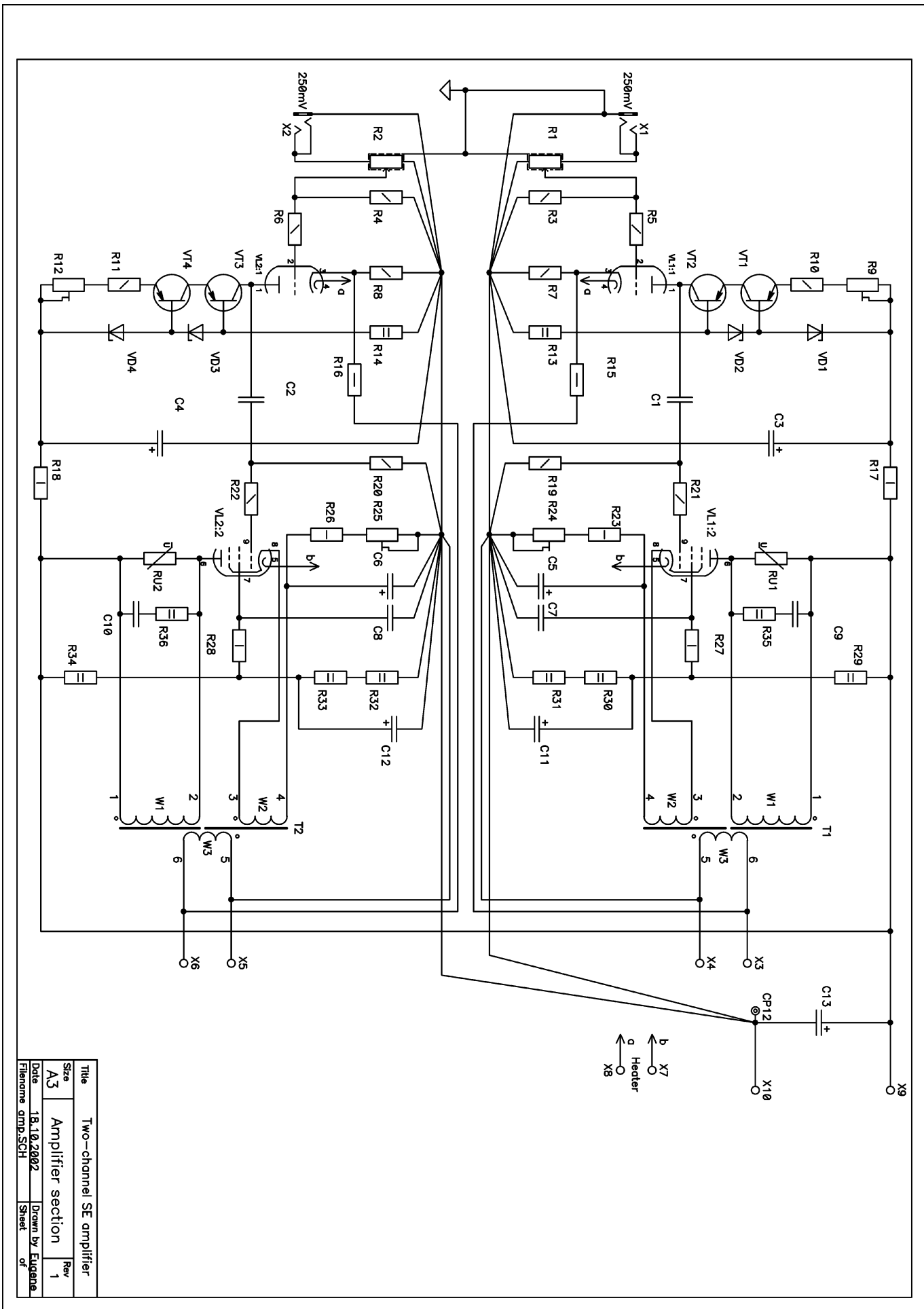


Рисунок 6

Рассмотрим назначение элементов схемы более подробно.

Входной сигнал через регулятор усиления R1 и антипаразитный резистор R5 поступает непосредственно на управляющую сетку триода. Отрицательное напряжение смещения, образующееся на резисторе R7, включенного в цепь катода лампы, поступает на сетку через резистор R8. Величина отрицательного смещения определяется величиной тока, текущего через резистор R7 и заданного источником тока.

Анод лампы, как говорилось выше, нагружен на каскодный источник тока. Собственно говоря, источником тока является транзистор VT1, величина выходного тока которого определяется значением суммы сопротивлений R10, R9, включенных в его эмиттер. Такой источник тока вполне работоспособен самостоятельно, но при больших изменениях напряжения на его выходе за счет эффекта Эрли стабильность выходного тока падает. Фактически, это эквивалентно уменьшению его выходного сопротивления. Это важный момент, так как размах напряжения на аноде лампы в рабочем режиме достигает 40 – 50V. Для устранения этого эффекта добавлен второй транзистор VT2. Напряжение на базе этого транзистора зафиксировано и определяется суммой напряжений стабилитронов VD1 и VD2, следовательно, будет стабильным напряжение и на его эмиттере. Значит, каскад на VT2 стабилизирует напряжение питания источнику тока, это устраняет эффект Эрли, что повышает качество источника тока. Для источника тока каскад на VT2 является схемой с общей базой, которая просто передает его ток дальше (реально, часть тока ответвляется в базу VT2, но при больших значениях β транзистора этим можно пренебречь). Более подробно со схемами и работой источников тока Вы можете ознакомиться в [4].

Общая обратная связь поступает в цепь первого каскада усилителя на катод лампы VL1:1 через резистор R15.

Для исключения влияния выходного каскада по анодной цепи входной каскад питается через дополнительный фильтр, выполненный на элементах R17, C3.

Через разделительную ёмкость C1 усиленный сигнал с анода триода поступает на вход выходного каскада.

Выходной каскад

В выходном каскаде усилителя используется пентодная часть лампы VL1:2. Основной особенностью выходного каскада является использование катодной обратной связи. Для реализации местной отрицательной обратной связи часть витков первичной обмотки перенесена в цепь катода лампы (обмотка W2). В результате, выходной каскад охватывается линейной местной локальной отрицательной обратной связью с глубиной порядка 12÷13db. Это позволяет резко снизить выходное сопротивление (улучшить коэффициент демпфирования) каскада, снизить коэффициент гармоник и улучшить фазочастотную характеристику.

Конечно, введение довольно глубокой обратной связи приводит к снижению коэффициента усиления выходного каскада, это компенсируется высоким коэффициентом усиления первого каскада. Таким образом, сознательно произведено перераспределение коэффициентов усиления между каскадами, позволяющее минимизировать общий уровень искажений усилителя и обеспечить необходимую чувствительность.

Для получения минимального выходного сопротивления лампа работает с большим током анода, близким к предельному значению, определяемому по максимальной мощности рассеяния на аноде.

Рассмотрим назначение элементов схемы более подробно.

Входной сигнал поступает на сетку лампы через антипаразитный резистор R21. Учитывая, что лампа сильно нагружена, для повышения стабильности работы усилителя режим лампы по постоянному току задается цепью автоматического смещения, хотя при фиксированном смещении параметры каскада будут немного лучше. Цепь автоматического смещения состоит из резисторов R23, R24 (падение напряжение на них и задает напряжение смещения) и блокирующей емкости C5, шунтирующей цепочку резисторов по переменному току. Постоянная времени этой цепи близка к 0.7с, поэтому напряжение автоматического смещения мало зависит от параметров усиливаемого сигнала, и его можно считать постоянным. Напряжение автоматического смещения поступает в цепь сетки через резистор R19.

Необходимое напряжение для питания экранной сетки формируется с помощью делителя R29, R30, R31. Для устранения влияния усиливаемого сигнала на величину этого напряжения (на-

пряжение на экранной сетке должно быть постоянным) нижнее плечо делителя зашунтировано емкостью С11. Непосредственно на экранную сетку напряжение с делителя поступает через антипаразитный резистор R27. Дополнительно цепь экранной сетки зашунтирована конденсатором с малыми паразитными параметрами С7, это предупреждает возбуждение выходного каскада на ультразвуковых частотах.

Анодная цепь лампы нагружена на выходной трансформатор. Для выравнивания частотной характеристики в области высших частот первичная обмотка зашунтирована цепью R35, С9. Эта цепочка рассчитана на громкоговоритель с сопротивлением 8 Ω и индуктивностью около 0.2 мН, приблизительно такие параметры имеют две динамические головки ЗГД-38, соединенные последовательно. Для других типов динамических головок параметры корректирующей цепочки необходимо подобрать заново. Более подробно о работе этой цепочки и методике ее подбора для конкретной акустической системы можно прочесть в [1], [5].

Первичная обмотка выходного трансформатора зашунтирована защитным варистором RU1.

В нормальном режиме работы варистор практически не оказывает влияния на выходной сигнал, так как имеет собственную емкость порядка 50÷70 пФ и токи утечки на уровне единиц микроампер. Однако при перенапряжениях, например, при обрыве нагрузки, его сопротивление резко падает и ограничивает напряжение на обмотках трансформатора и лампе.

Общая обратная связь снимается непосредственно с выходной обмотки трансформатора.

Источник питания

Для питания обоих каналов усилителя используется один высококачественный, стабилизированный источник анодного напряжения [6]. Цепи накала также питаются от одного низковольтного стабилизатора постоянным напряжением.

Применение стабилизаторов позволяет устранить влияние изменений напряжения сети на параметры усилителя, уменьшить уровень фона, а также практически исключить взаимное влияние каналов друг на друга.

Заключение

Испытания усилителя полностью подтвердили правильность использованных решений – схема мало чувствительна к замене ламп, требует минимального налаживания и обеспечивает хорошее качество звука

Я надеюсь, что результаты этого маленького исследования и достаточно подробно описанные технические решения, использованные в усилителе, будут интересны квалифицированным любителям ламповой техники и помогут им в реализации собственных проектов.

Литература

1. Г.В. Войшвилло, [Усилители низкой частоты](#), Связьиздат, 1939.
2. Г. Стокман, [Обратная связь, свойственная триоду](#).
3. Т.Н. Вилльямсон, П.Д. Волкер, [Преувеличения и Усилители](#), 1955.
4. П. Хоровиц, У. Хилл, Искусство схемотехники, Мир, 1983.
5. Г.С. Цыкин, [Трансформаторы низкой частоты](#), Связьиздат, 1955.
6. Е.В. Карпов, [Простой высоковольтный стабилизатор](#), NexTube, 2002.