

ЦИКЛОТРОН

Евгений Карпов

В статье представлена схема классического варианта циклотрона на мощных пентодах.

Своему появлению на свет схема обязана моему любопытству: интересно было послушать, а как же она будет звучать. В разных источниках приводятся значительно различающиеся мнения на сей счет, а самому слышать такой усилитель мне не приходилось, схема применяется довольно редко.

В качестве выходной лампы я решил использовать ГУ-50, и вот почему именно ее: В основном, меня привлекала значительная мощность рассеяния на аноде, мне не хотелось использовать параллельное включение ламп. Кроме того, лампа достаточно распространена, имеет высокую надежность и в обычных двухтактных схемах работает вполне удовлетворительно. У лампы есть не то чтобы недостаток, а особенность – она хорошо работает при высоких анодных напряжениях и довольно большом приведенном сопротивлении нагрузки. В итоге, выходной трансформатор получается сложным и громоздким, схема циклотрона позволяет эту проблему обойти.

Если обратиться к теории, то выходной каскад циклотрона представляет собой мостовую схему (рис.1), одна диагональ которой образована катодными повторителями, а другая - плавающими источниками питания. Учитывая низкое выходное сопротивление катодного повторителя и то, что относительно нагрузки лампы по переменному току включены параллельно, выходное сопротивление такой схемы стремится к теоретическому минимуму (для данного типа ламп). Соответственно, это позволяет существенно упростить выходной трансформатор и вообще заменить его автотрансформатором. К достоинствам схемы можно отнести и ее полную симметричность и, соответственно, малую чувствительность к шумам и помехам по цепям питания.

Конечно, определенное неудобство вызывает необходимость иметь два независимых источника анодного напряжения (для двух каналов - четыре), но мне думается, что это умеренная плата за упрощение конструкции выходного трансформатора.

Существует и еще один достаточно тонкий вопрос, связанный с использованием такой схемы. Достаточно много специалистов считают, что использование катодного повторителя, как каскада, охваченного стопроцентной ООС, отрицательно влияет на качество звука. Относительно малосигнальных трактов я для себя этот вопрос уже давно выяснил – увидеть или услышать отрицательное влияние катодного повторителя мне так и не удалось. А вот поведение мощного повторителя при работе на комплексную нагрузку вызывает некоторые сомнения. Честно говоря, мне так пока и не удалось получить однозначного ответа на этот вопрос. Как минимум, требуется подробно исследовать схему и с другими типами ламп, так что вопрос остается открытым.

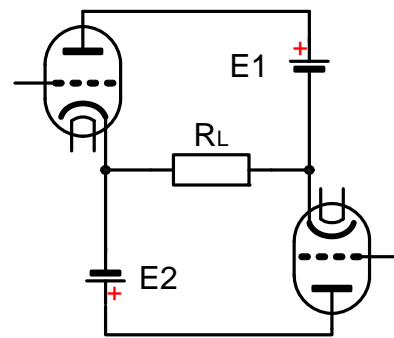


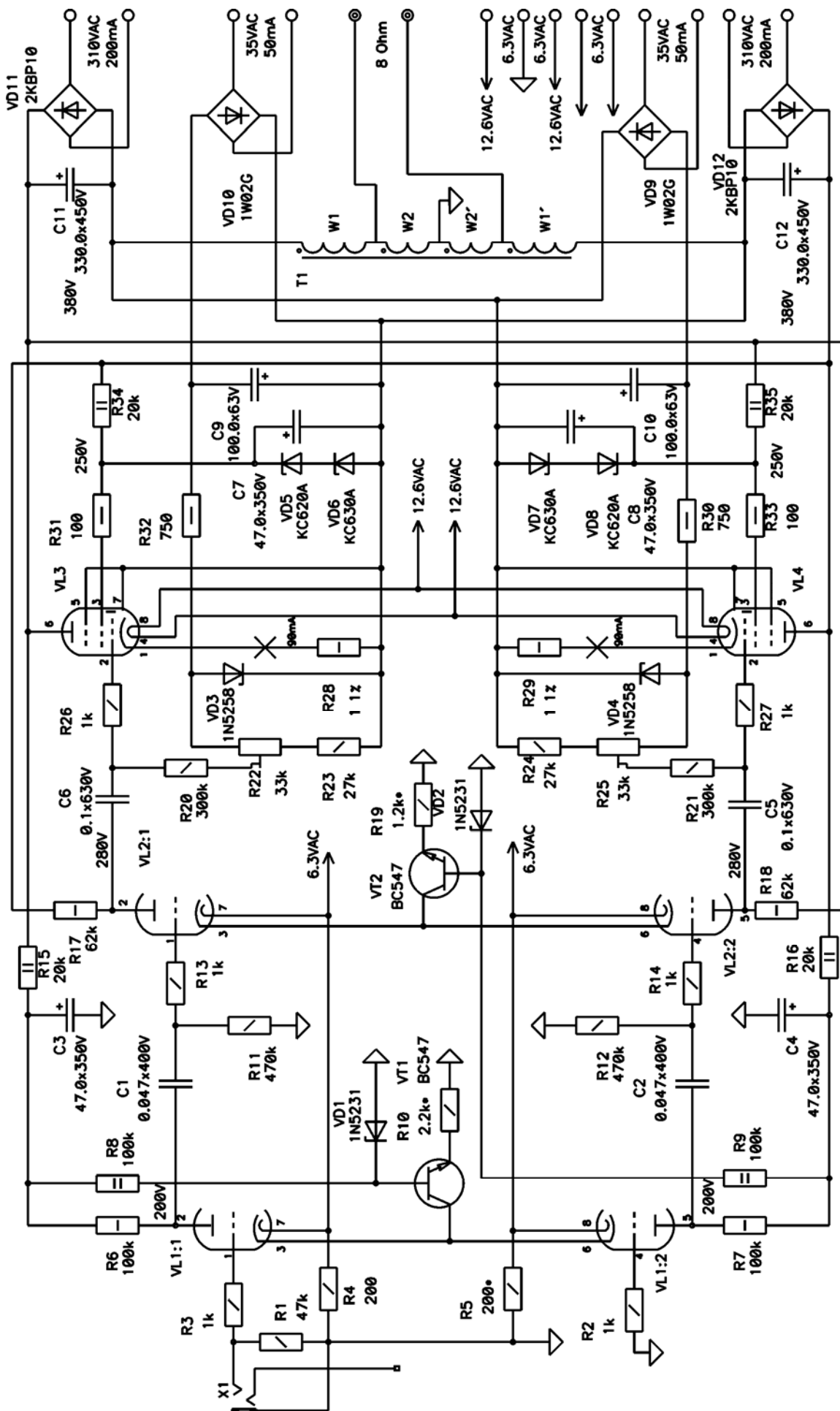
Рисунок 1

Схема усилителя

Полная схема усилителя приведена на рисунке 2, и имеет он следующие параметры.

Номинальная выходная мощность	20W
Номинальное сопротивление нагрузки	8Ω
Выходное сопротивление	~1Ω
Номинальное входное напряжение	~0.7V _{RMS}
Уровень шума (не взвешенный)	-95dB
Неравномерность частотной характеристики (20Hz÷40kHz)	3dB
Коэффициент гармоник (20W)	0.78%
Коэффициент гармоник (10W)	0.3%
Коэффициент гармоник (1W)	0.08%.

Усилитель имеет три каскада, не охвачен общей цепью ООС и полностью симметричен (на схеме показан вариант с несимметричным входом). Первый каскад (VL1) служит для предварительного усиления напряжения и при несимметричном входе попутно выполняет функцию фазоинвертора. Режим работы каскада задается источником тока на транзисторе VT1. Усиленное напряжение с его выхода поступает на вход драйверного каскада, выполненного на лампе VL2. Его режим также задается источником тока (VT2). В принципе, использование источника тока в этом каскаде не обязательно, но позволяет повысить стабильность работы каскада при колебаниях напряжения питания и замене лампы.



VL1,VL2 6N8S VL3 VL4 GU-50

Рисунок 2

С драйверного каскада сигнал поступает на сетки ламп выходных катодных повторителей. Выходные лампы работают с фиксированным смещением. Каждая выходная лампа имеет свой стабилизированный источник смещения, и режимы ламп задаются независимо подстроечными резисторами R22, R25. Использовать автоматическое смещение нежелательно. Вообще, вопрос организации цепей смещения в мощных выходных каскадах - тема отдельной статьи. В нашем случае (да и не только в нашем) применение автоматического смещения приводит к нежелательному сдвигу рабочих точек ламп при большом сигнале. Напряжение на экранирующих сетках ламп стабилизировано цепочками стабилитронов – VD5÷VD8. Стабилизация напряжения на экранирующих сетках и напряжения смещения позволило обойтись без стабилизации анодных напряжений и использовать лампы в режимах близких к предельным, так как ток анода пентодов в этом случае слабо зависит от колебаний анодного напряжения. Длительные испытания усилителя показали высокую стабильность режима работы выходного каскада. Резисторы R28 и R29 предназначены для контроля токов ламп в процессе регулировки.

Данные по трансформатору питания я приводить не буду, так как я использовал подходящий трансформатор из ряда ТА и трансформатор неизвестной породы для цепей накала и смещения. В циклотроне удобнее использовать именно два трансформатора, это упрощает организацию задержки анодного напряжения (все-таки четыре канала), а ее организовать – очень желательно. Для самостоятельного расчета силового трансформатора прямо на схеме приведены необходимые значения переменного напряжения и действующего тока обмоток.

Характер искажений, вносимых усилителем при разной мощности, показан на рисунках 3÷5, а его частотная характеристика на рисунке 6. Спектрограммы приведены для выходной мощности 20, 10 и 1 ватт на нагрузке 8Ω.

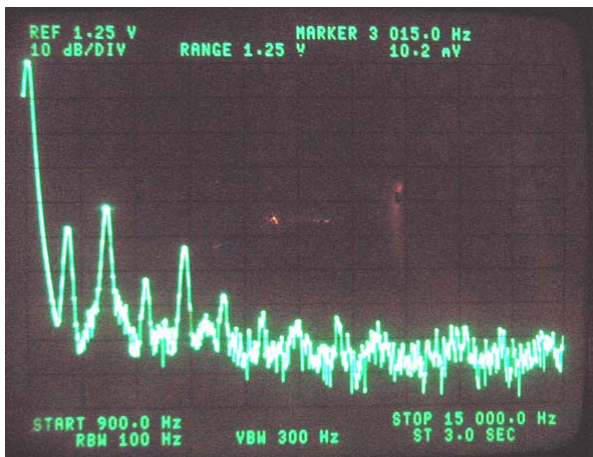


Рисунок 3

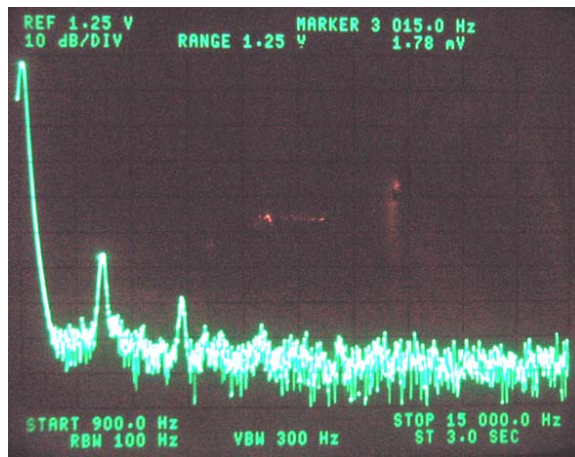


Рисунок 4

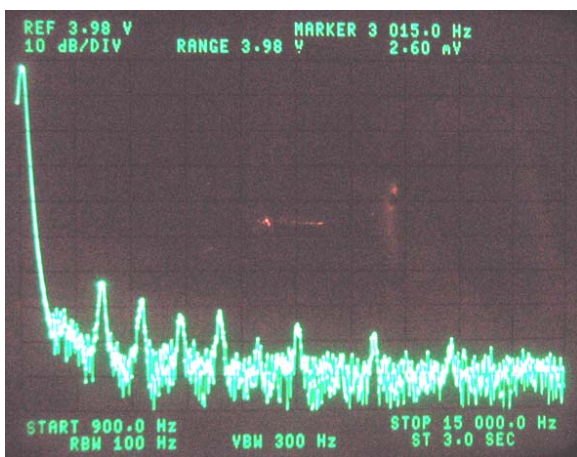


Рисунок 5



Рисунок 6

Как вы видите, искажения, вносимые усилителем, характерны для двухтактных схем – преобладают нечетные гармоники. При максимальной мощности наблюдается появление и четных гармоник, это уже «заслуга» предварительного каскада усиления. Что меня немного удивило и не очень понравилось, это наличие высших гармоник (вплоть до девятой) малого уровня ($-80 \div -110$ dB) при низкой выходной мощности. При детальном исследовании (первая гармоника подавлялась на 50dB) выяснилось, что эти гармоники присутствуют при любом уровне выходной мощности и мало изменяются по величине. Является ли это характерным именно для ламп ГУ-50 или свойственно мощному катодному повторителю, надо еще выяснять.

Конструкция и детали

Усилитель был собран на металлическом шасси, монтаж навесной, в основном, выводами самих деталей с использованием промежуточных опорных лепестков (Рис. 7).

Использовались резисторы типа ОМЛТ, P1-72 и ERX1S, многооборотные подстроечные резисторы типа СПЗ-39, разделительные емкости типа К73-16 (их лучше заменить на тип МКР), электролитические емкости серии ЕСА (Panasonic).

Мощные стабилитроны установлены на небольшие радиаторы с площадью $4 \div 5$ см².

Требования к монтажу стандартные: питание распространяется навстречу сигналу, цепи накала разведены плотно свитым проводом, шасси заземляется в одной точке вблизи входного разъема, монтаж вытянут в линию по распространению сигнала. Резисторы R6, R7 и R17, R18 желательно подобрать парами, величина отклонения номинала от указанного значения на схеме не имеет принципиального значения.

Подбирать лампы в выходном каскаде, в общем-то, не обязательно (представленные результаты получены для пары наугад вытаскиваемой из ящика), другой разговор, что лампы в предварительном и драйверном каскаде желательно подобрать парными (по коэффициенту усиления) для двух каналов. Вместо ламп 6Н8С можно использовать и другие лампы, во входном каскаде можно применить 6Н1П, в драйверном – 6Н6П. Прямой замены для ламп ГУ-50 нет, можно попробовать использовать параллельно включенные лампы 6ПЗС. Но, скорее всего, потребуется скорректировать параметры выходного трансформатора.

Конечно, самым трудоемким узлом в усилителе является выходной трансформатор. Хочу заметить, что мнение о необычайной простоте выходного трансформатора является несколько преувеличенным. Давайте разберемся подробнее.

Во-первых, значительно ослабляются требования к электрической прочности трансформатора, так как трансформатор не находится под высоким потенциалом. Это позволяет без вреда для качества изготавливать трансформатор по упрощенной технологии.

Во-вторых, так как лампы включены параллельно, отсутствуют жесткие требования к симметричности трансформатора. Но следует учесть, что средний вывод обмотки заземляют, поэтому можно условно считать, что трансформатор все-таки имеет две полуобмотки. Чтобы получить симметрию (по паразитным параметрам) относительно этой точки, желательно использовать симметричную конструкцию трансформатора, а вот величина магнитной связи между этими двумя полуобмотками существенного значения не имеет. Поэтому для нашего выходного трансформатора (да и для любых двухтактных схем) удобно использовать сердечник стержневого типа.

В-третьих, низкое выходное сопротивление каскада позволяет значительно снизить величину необходимой индуктивности обмотки. Но здесь не следует сильно увлекаться. Расчет необходимой индуктивности по срезу АЧХ на частоте $20 \div 30$ Hz дает совершенно неприемлемые результаты по уровню искажений на низких частотах. Объясняется все очень просто: нелинейный ток намагничивания сердечника не должен вносить существенного вклада в суммарный ток, отдаваемый лампой.

В-четвертых, низкое выходное сопротивление каскада выдвигает жесткие требования по магнитной связи (индуктивности рассеяния) между всей первичной обмоткой и ее частью, подключенной к нагрузке.

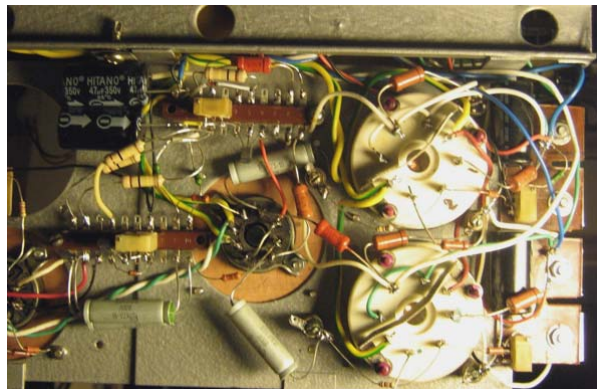


Рисунок 7

При плохой магнитной связи сразу возникнут проблемы с АЧХ в области высших частот. Поэтому секционирование в выходном трансформаторе для циклотрона не отменяется, а всячески приветствуется. Увеличение собственной емкости трансформатора не является критическим, как из-за относительно низких напряжений на обмотках, так и из-за больших рабочих токов.

Исходя из этих соображений, и был изготовлен выходной трансформатор. В трансформаторе используется сердечник ПЛМ 22x32x58. Фактически, был использован сердечник, каркасы и фурнитура от серийного силового трансформатора ТС 90-2. Конечно, сталь 3411 не лучшее, что придумало человечество, но если ограничиться индукцией 0.4÷0.6 Тесла, то вы получите отличный трансформатор. Катушки трансформатора совершенно одинаковы и должны быть намотаны в одну сторону. Схема соединений секций показана на рисунке 8.

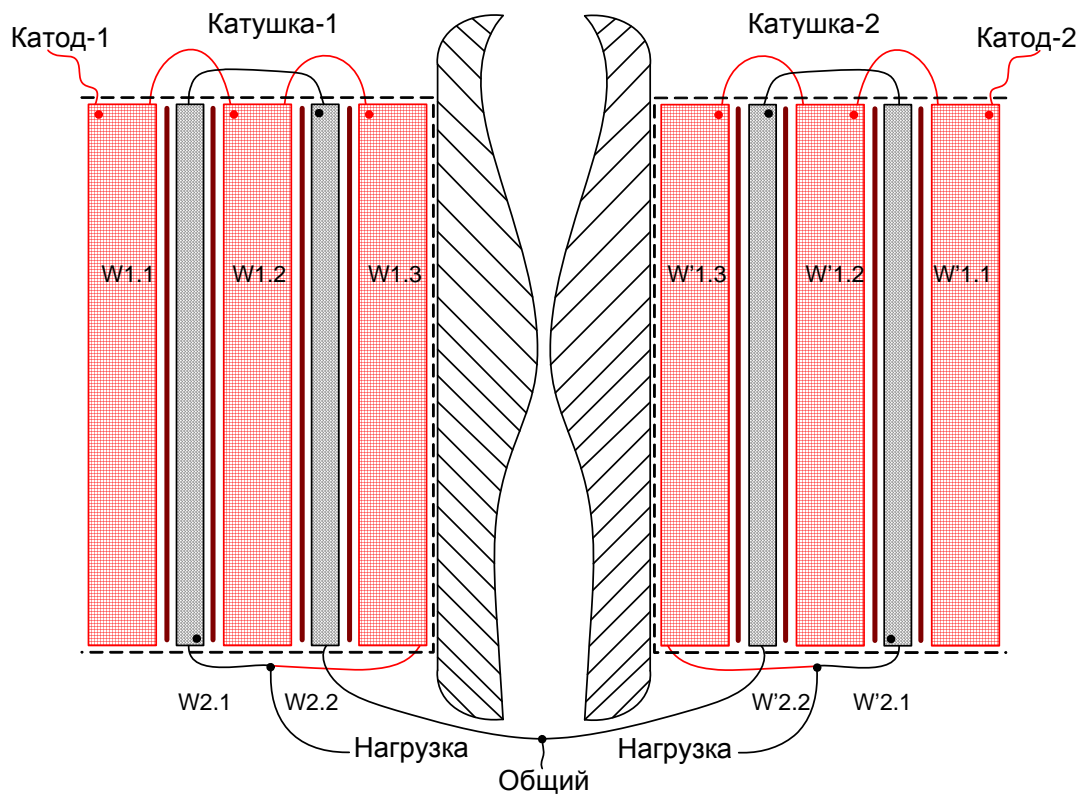


Рисунок 8

Обмотка W1 намотана проводом ПЭЛ 0.33. Секции W1.1 и W1.3 имеют по 340 витков, секция W1.2 имеет 680 витков. Намотка рядовая, прокладки толщиной 0.025мм кладутся через каждые два слоя (исключительно ради удобства намотки). Слой ложится практически от щечки до щечки, неполный слой равномерно распределяется вдоль всей катушки.

Обмотка W2 намотана проводом ПЭЛ 1.0. Секции W2.1 и W2.2 имеют по 41 витку.

Толщина межобмоточной изоляции – 0.2мм. Для изоляционных прокладок подойдет конденсаторная бумага или полиэтилентерфталатная пленка. Намотку следует проводить аккуратно и с достаточным натяжением провода, катушки заполнены практически на 100%, и при небрежной намотке обмотка может не поместиться на катушку. Трансформатор не пропитывается, половинки сердечника склеиваются любым подходящим клеем, надо стремиться, что бы технологический зазор не превышал 100÷150 микрон. Индуктивность намагничивания автотрансформатора, измеренная между крайними выводами (подключаемых к катодам ламп), приблизительно равна 19Н. Индуктивность рассеяния – около 7мН (выводы нагрузки замкнуты).

Налаживание усилителя

Налаживание усилителя начинается с проверки монтажа и установки движков подстроечных резисторов R22, R25 в положение, соответствующее максимальной величине отрицательного смещения. Вход усилителя закорачивают, отключают выводы высоковольтных обмоток от выпрямителя и подают напряжение питания. Проверяют наличие отрицательного смещения на сетках выходных ламп и его величину. Если все нормально, восстанавливают соединения и включают усилитель. После появления анодного напряжения сразу же проверяют величину тока выходных ламп, он не

должен превышать 90 мА. Если это так, то проверяют напряжения на экранирующих сетках выходных ламп и напряжения на анодах ламп предварительного усилителя и драйверного каскада. В случае необходимости, подстраивают величины анодных напряжений подбором токозадающих резисторов источников тока. Вполне допустимо отклонение $\pm 5 \div 7$ вольт. В последнюю очередь устанавливают ток выходных ламп на уровне $90 \div 95$ мА. Равенство токов ламп следует установить максимально точно. Далее дают усилителю погреться 20÷30 минут и повторяют регулировку тока покоя выходных ламп. После проработки всех этих процедур можно идти слушать, что получилось.

Заключение

В какой-то степени я был немного разочарован, послушав усилитель. Вроде довольно высокие объективные параметры предполагали и более высокое субъективное качество, а ничего необычного мы не услышали. Усилитель звучал на уровне хорошей двухтактной схемы на пентодах. Конечно, его звук имеет некоторые отличия, эти нюансы замечаются немного позже, но первое впечатление было именно таким.

Подводя итог, можно сказать, что усилители такого типа вполне могут составить конкуренцию классическим двухтактным усилителям. А достаточно простая конструкция выходного трансформатора делает такую схему особенно привлекательной для изготовления в любительских условиях.