

**Мрб**

Массовая Радио-  
Библиотека

Основана в 1947  
Выпуск 1257

**Д.А. Климов**

# **ламповые усилители**

**методика расчета  
и конструирования**



Москва  
Радио и связь  
2002

УДК 621.375.132

ББК 32.846.6

К 49

**Климов Д.А.**

К 49 Ламповые усилители. Методика расчета и проектирования: – М.: Радио и связь, 2002. – 88 с.: ил. – (Массовая радиобиблиотека; Вып.1257).

**ISBN 5-256-01618-0.**

В книге изложены практические вопросы расчета, проектирования и конструирования ламповых усилителей мощности, обеспечивающих высокое качество воспроизведения звуковых частот.

Для радиолюбителей.

**ББК 32.846.6**

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Сегодня, наверное, каждый любитель музыки слышит о ламповых усилителях. Рекламные проспекты западных фирм и российские выставки предлагают широкий выбор моделей, различающихся по назначению, мощности, оформлению и цене. Не прекращаются споры о "феномене лампового звучания". Действительно, все измеряемые параметры ламповых усилителей на несколько порядков хуже, чем у транзисторных и интегральных, но звучат они, несмотря ни на что, просто волшебным образом. Убедительного объяснения этому факту до сих пор не приведено. Может быть, поэтому радиолюбители зачастую не торопятся изменять традиционной схемотехнике. К тому же отпугивает сложность изготовления качественных трансформаторов и отсутствие справочных материалов и методик расчета. Но все эти трудности, скорее, кажущиеся, чем действительные.

Я сам очень долгое время являлся приверженцем транзисторов и операционных усилителей и был убежден, что с их помощью можно построить гораздо более качественные усилители, снизив с помощью отрицательной обратной связи нелинейные и интермодуляционные искажения до десятитысячных долей процента, пока однажды не уступил уговорам одного моего друга – ярого поклонника Hi-End'a и не решился на постройку лампового усилителя. Я просмотрел всю литературу, какую смог найти в городской библиотеке, нашел некоторые справочные данные и теоретические предпосылки для расчетов, определился со схемами и занялся поиском комплектующих. После безуспешных попыток найти исполнителей заказа на изготовление выходных трансформаторов взялся сам за их намотку, ориентируясь, скорее, на интуицию, чем на расчеты, и наконец собрал макет усилителя. Результаты превзошли все мои ожидания! Не стану описывать свои эмоции, скажу только, что этот шаг заставил меня забросить и разобрать все мои прежние конструкции, которыми я раньше так гордился, заняться подбором и доводкой акустических систем и изменил мои жанровые пристрастия: диско- и рок-музыка показались чрезвычайно бедными в оформлении по сравнению с джазом и классикой. Конструкторы ламповой техники предлагают потребителям самые разнообразные концепции построения ламповых усилителей. Одни строят свои усилители только на прямоточных лампах, избегая применения каких бы

то ни было полупроводниковых приборов, даже для выпрямления применяя только вакуумные кенотроны. Другие используют лампы только в усилительных каскадах, а во всех сервисных устройствах – выпрямителях, стабилизаторах тока и напряжения и т.д. – применяют кремниевые полупроводниковые приборы. Одни ратуют за использование во всех цепях только старинных бумажных конденсаторов и избегают обратной связи, как чумы, другие же не столь категоричны в выборе комплектующих элементов и схемных решений.

На мой взгляд, для того, чтобы добиться стабильно высоких параметров от ламповой техники, а также повысить надежность и срок ее службы, необходимо довольно жестко стабилизировать режимы работы каскадов с помощью стабилизаторов напряжений и токов. В принципе такие устройства можно создать, применяя одни только лампы, однако в этом случае ламповый усилитель получится невероятно громоздким и тяжелым. Применение полупроводниковых транзисторов и диодов для стабилизации режимов ламп способно значительно улучшить параметры ламповой аппаратуры, не оказывая влияния на обрабатываемый сигнал.

Не вдаваясь в дискуссию на тему "Что есть Hi-End", можно заметить, что для разработки высококачественной звуковоспроизводящей техники необходим системный подход. Другими словами, нужен алгоритм, следуя которому можно добиться требуемого результата, избегая ненужных проб и ошибок. Учитывая, что справочники и учебники по ламповой технике, по вполне понятным причинам, давно не переиздавались, их поиск может стать довольно большой проблемой.

Расчет схем ламповых усилителей не составит трудностей для любого радиолюбителя, занимавшегося созданием аудиотехники. Все расчеты можно легко выполнить на карманном калькуляторе или, составив программу на любом языке высокого уровня, рассчитывать все необходимые параметры на компьютере. Схемотехника ламповых усилителей также не содержит особых изысков. Все применяемые решения давно известны, описаны и применяются как в ламповой, так и в транзисторной технике.

Высокое качество звука зависит больше от рациональности конструкции, качественного монтажа и применяемых комплектующих. Отказ от применения глубоких обратных связей приводит к тому, что усилители обладают плохой повторяемостью, т.е. каждое изделие обладает собственным характером и голосом. Поэтому требуется тщательная регулировка и настройка усилителей, а также профилактические регулировки в процессе жизни усилителя, так как лампы, в отличие от транзисторов, быстрее стареют и довольно значительно изменяют свои параметры.

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ЛАМПОВЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проектирование усилителя начинается прежде всего с постановки задачи и принятия решения: каким будет усилитель.

Для того чтобы определить задачу, следует вспомнить о том, что усилитель это не вещь "в себе", а часть комплекса, в который кроме него входят, как минимум, два компонента: источник сигнала и акустические системы. Определив источник, можно задать чувствительность будущего усилителя. Так, если ваш CD-плеер имеет выходное напряжение 2 В, то и усилитель должен иметь соответствующее значение входного напряжения. С учетом запаса по чувствительности лучше выбрать значение 1,5 В. С другой стороны, недопустимо повышать чувствительность аппарата, например, до 0,25 В. В этом случае регулировать громкость вам придется микроскопическими движениями регулятора громкости. Кроме того, такой усилитель будет слишком чувствителен к наводкам и шумам по входу. Если же источников два и более и они сильно различаются по выходным напряжениям, следует предусмотреть возможность изменения чувствительности усилителя. Например, сделать два входа и добавить усилительный каскад для низковольтного источника.

Выходную мощность усилителя следует выбирать исходя из возможностей ваших акустических систем. Следует помнить, что выбор неоправданно большой выходной мощности сильно удорожит и усложнит конструкцию усилителя. Слишком маленькая же не позволит озвучить помещение, и тогда мелкие нюансы звуковой картины исчезнут. Для предварительного выбора можно воспользоваться следующими рекомендациями: если вы являетесь обладателем сверхчувствительных колонок (92 дБ/Вт/м и более), то для работы с ними достаточен аппарат с выходной мощностью около 5 Вт и менее. Если колонки имеют чувствительность 86–90 дБ/Вт/м, потребуется усилитель мощностью до 10–12 Вт. Если же колонки имеют низкую чувствительность (такими обычно бывают огромные "монстры" с расширенным низкочастотным диапазоном или сабву-

феры), то усилитель должен иметь мощность не менее 20–50 Вт. Приведенные рекомендации справедливы для комнаты средних размеров, для более просторных помещений следует увеличить мощность, не превышая, однако, пределов мощности акустических систем.

На постановку задачи и определение параметров могут оказать влияние и другие специфические факторы.

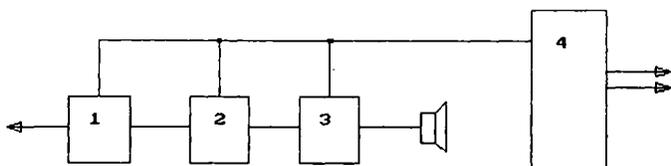
## 2. БЛОК-СХЕМЫ ЛАМПОВЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ

Сформулировав задачу, можно определиться с выбором блок-схемы усилителя и предварительно, в уме, наметить конструкцию. Прежде всего необходимо выбрать, каким будет выходной каскад – одно или двухтактным. И те и другие имеют свои достоинства и врожденные недостатки. Однотактные каскады обеспечивают более высокую верность воспроизведения, однако заметить это преимущество можно, лишь имея высококачественный CD-плеер и акустические системы с низкими нелинейными искажениями. Главными недостатками однотактных каскадов являются их низкий КПД и протекание постоянного тока через первичную обмотку выходного трансформатора.

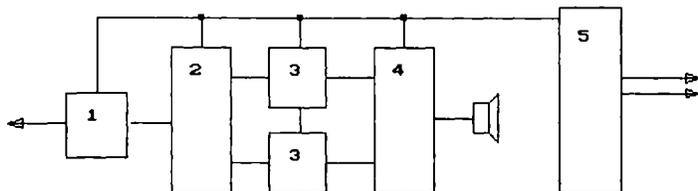
Первый из этих недостатков приводит к тому, что от усилителя невозможно получить достаточно высокую мощность (реально не более 10 Вт), а также к увеличению силового трансформатора. Второй же заставляет увеличивать габариты выходного трансформатора, чтобы избежать насыщения магнитопровода и, кроме того, может привести к ограничению частотного диапазона снизу.

Таким образом, выбрав однотактный каскад, вы заранее получаете громоздкий и маломощный аппарат (сравнительно, конечно) который, однако, может оправдать себя при наличии, как уже говорилось, высококачественного источника сигнала и высококачественных акустических систем.

Двухтактный выходной каскад обладает большим КПД (при работе в режиме В), а следовательно, позволит получить большую выходную мощность и применить силовой трансформатор меньших размеров. Кроме того, в спектре выходного сигнала двухтактного каскада отсутствуют четные гармоники. Вопреки установившемуся мнению двухтактный выходной каскад зачастую позволяет получить значительно меньшие нелинейные искажения сигнала по сравнению с однотактным каскадом. Нужно лишь правильно выбрать рабочую точку выходных ламп и тщательно отрегулировать каскад в динамическом режиме (на синусоидальном сигнале).



**Рис. 1. Общая блок-схема однотактного усилителя мощности:**  
 1 – входной каскад; 2 – драйвер; 3 – выходной каскад; 4 – блок питания



**Рис. 2. Общая блок-схема двухтактного усилителя мощности:**  
 1 – входной каскад; 2 – фазоинвертор; 3 – драйверы;  
 4 – выходной каскад; 5 – блок питания

На рис. 1 и 2 приведены блок-схемы однотактного и двухтактного усилителей мощности. Как видно из этих рисунков, усилители содержат три–четыре каскада усиления и блок питания, включающий в себя силовой трансформатор и выпрямители. Драйверные каскады необходимы лишь в том случае, когда напряжения сигнала с выхода фазоинвертора или входного каскада недостаточно для расчки выходного каскада. В некоторых случаях вполне возможно обойтись без них. Надо помнить, что любой каскад вносит в сигнал частотные, фазовые и нелинейные искажения, поэтому в высококачественных усилителях лучше обойтись необходимым минимумом. По этой же причине в схемах усилителей отсутствуют регуляторы тембра и баланса. Мой опыт показывает, что хорошо сконструированный усилитель не нуждается в дополнительных регулировках тембра, а для установки баланса можно применить отдельные регуляторы уровня сигнала на входе каждого канала стереоусилителя. При необходимости регуляторы тембра и баланса лучше всего поставить в отдельном предусилителе. Входной каскад усиливает сигнал до необходимого уровня и обеспечивает заданную чувствительность. Другой задачей входного каскада является согласование усилителя с выходным сопротивлением источника сигнала и с соединительным кабелем.

Выходной каскад совместно с выходным трансформатором усиливает сигнал по напряжению и по току и обеспечивает согласование нагрузки с выходным сопротивлением лампы.

Двухтактный усилитель включает в себя фазоинвертор, в котором сигнал расщепляется на два противофазных, необходимых для работы двухтактного выходного каскада.

Блок питания включает в себя силовой трансформатор, выпрямители, стабилизаторы напряжений, устройства задержки включения анодного напряжения и т.д.

### 3. ВЫХОДНОЙ КАСКАД

Однотактный выходной каскад содержит минимум деталей и прост в регулировке. Пентоды могут использоваться в ультралинейном (рис.3,б), триодном или обычном (рис.3,а) режимах. При триодном включении экранирующая сетка соединяется с анодом через резистор номиналом 100–1000 Ом. В ультралинейном включении каскад охватывается обратной связью по экранирующей сетке, что обеспечивает снижение нелинейных искажений. При этом необходимо повысить напряжение сигнала на входе, так как обратная связь снижает чувствительность каскада. В пентодном режиме обеспечивается наибольший коэффициент усиления лампы. Однотактные каскады используются только в режиме А.

Резистор  $R_k$  в катодной цепи лампы задает ток покоя анода и создает местную отрицательную обратную связь. Для устранения обратной связи по переменному току и вызываемого ей снижения чувствительности резистор шунтируют конденсатором  $C_k$ . Этот конденсатор совместно с резистором  $R_k$  образует фильтр низких частот. Для того чтобы этот фильтр не вызывал снижения усиления в рабочем диапазоне частот, он должен быть рассчитан на пропускание низшей частоты диапазона.

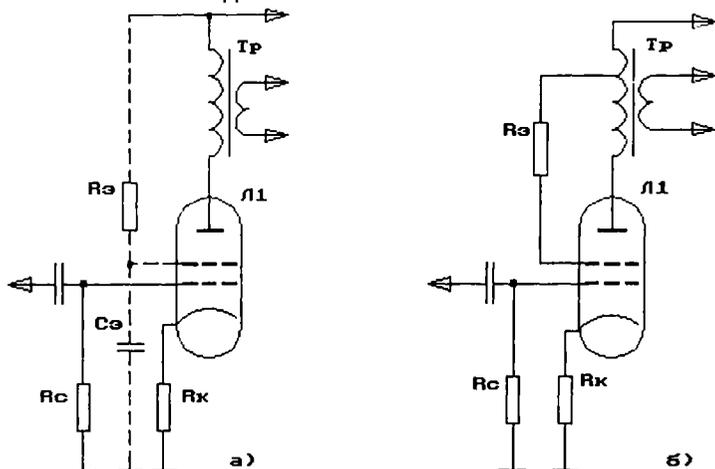


Рис. 3. Схемы однотактных выходных каскадов:

а – однотактный выходной каскад на триоде или пентоде;

б – однотактный выходной каскад на пентоде с ультралинейным включением

Резистор  $R_c$  в сеточной цепи лампы определяет входное сопротивление каскада. Его величина не должна превышать максимального значения, указываемого в справочниках. В противном случае появляется опасность возникновения сеточного тока, который снижает усиление и вызывает увеличение шумов и нелинейных искажений.

Анодный ток покоя лампы создает падение напряжения на резисторе  $R_k$ , что приводит к бесполезному рассеиванию мощности на нем. В выходных каскадах класса А, где этот ток может достигать сотен миллиампер, потери мощности на катодном резисторе сопоставимы с выходной мощностью каскада. Для исключения таких потерь и повышения КПД можно применить фиксированное смещение. Для этого резистор  $R_k$  исключают, катод лампы соединяют с общим проводом, а нижний вывод резистора  $R_c$  подключают к источнику отрицательного напряжения. Если один источник напряжения смещения используется для питания нескольких каскадов, то цепь каждой лампы должна быть надежно развязана по переменному току. Для этого нижний вывод резистора  $R_c$  заземляют через конденсатор емкостью 50–100 мкФ.

Иногда однотактные каскады используют в так называемом режиме А2. Под этим подразумевают, что амплитуда входного сигнала превышает напряжение смещения (напряжение на резисторе  $R_k$ ). При этом потенциал управляющей сетки относительно катода становится положительным и возникает сеточный ток. Сеточный ток вызывает увеличение искажений сигнала и увеличение шумов, однако с этим иногда приходится мириться ради увеличения КПД каскада.

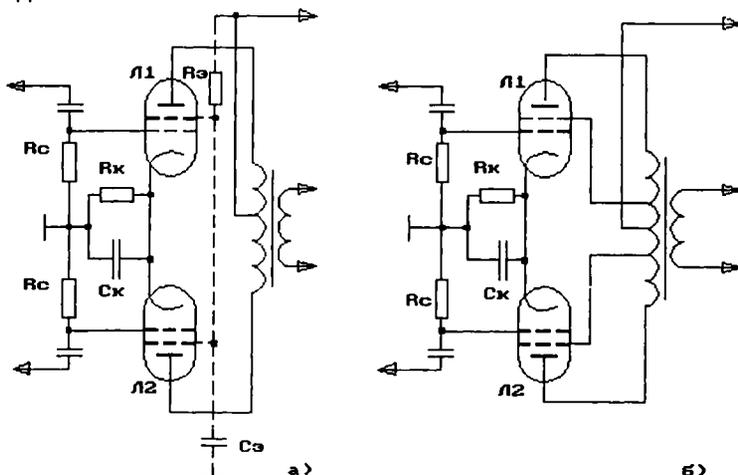


Рис. 4. Схемы двухтактных выходных каскадов:

- а – двухтактный выходной каскад на триодах или пентодах;
- б – двухтактный выходной каскад на пентодах с ультралинейным включением

Двухтактный выходной каскад (рис.4) отличается от одноктактного тем, что построен на двух лампах, каждая из которых усиливает одну полуволну сигнала. Двухтактный каскад может использоваться как в режиме А, так и в режиме В. Однако чистый режим В в высококачественных усилителях не используется из-за больших нелинейных искажений. Поэтому для повышения КПД каскада используют промежуточный режим АВ. Включение ламп и назначение элементов схемы то же, что и у одноктактного каскада. В силу того, что выходной сигнал складывается из двух полуволн, плечи двухтактного каскада должны обладать большой симметричностью. Для обеспечения этого требования подбирают лампы с максимально близкими параметрами в статическом режиме, применяют резисторы с допуском 1–2%, наматывают обмотки выходного трансформатора в два провода и тщательно балансируют плечи в динамическом режиме (на синусоидальном сигнале).

### 3.1. ВЫБОР ТИПА ЛАМП ДЛЯ ВЫХОДНОГО КАСКАДА

Предварительный выбор типа ламп можно произвести, основываясь на таком параметре лампы, как максимальная мощность, рассеиваемая анодом:  $P_{a\max}$ . Если вы выбрали одноктактный выходной каскад, то, учитывая, что КПД каскада не превысит 30–35%, можно определить, что выходная мощность  $P_{\text{вых}}$  приблизительно равна  $P_{a\max}/3$ . Для двухтактного выходного каскада выходная мощность может значительно превышать  $P_{a\max}$ , но не более чем в 2–3 раза. Повторяю, что такая приблизительная оценка годится только для предварительной оценки выходной лампы по мощности. Выбрав лампу, мы получаем для расчета необходимые данные:

- $R_i$  – внутреннее сопротивление лампы;
- $S$  – крутизна характеристики;
- $\mu$  – статический коэффициент усиления;
- $I_{a\max}$  – максимальный ток анода;
- $U_{a\max}$  – максимальное напряжение анод–катод;
- $P_{a\max}$  – максимальная мощность анода.

Прежде всего определим оптимальное сопротивление анодной нагрузки  $R_a$ . Из теории усилителей мощности известно, что триодный каскад отдает в нагрузку наибольшую мощность при наименьших искажениях, когда  $R_a=2R_i$ . Для пентодов и тетродов  $R_a$  должна быть примерно в 8–10 раз меньше  $R_i$ .

Теперь необходимо выбрать ток покоя лампы  $I_o$ . Для каскадов, работающих в режиме А, этот ток примерно равен половине максимально допустимого тока анода  $I_{a\max}$ ,  $I_o=I_{a\max}/2$ . Следует отметить, что для многих ламп в справочниках указывается не максимальный ток анода, а максимально допустимый ток катода. Ток катода равен алгебраической сумме токов анода и всех сеток лампы

$I_k = I_a + I_c$ , значит, для триодов можно считать  $I_{k \max} = I_{a \max}$ , так как при работе в линейном режиме (без сеточных токов) ток управляющей сетки ничтожно мал, а у пентодов ток анода  $I_a = I_k - I_{c2}$ , где  $I_{c2}$  – ток второй сетки или, если ток второй сетки не указан,  $I_a = I_k / (1,05 - 1,1)$ .

Для каскадов, работающих в режиме АВ, ток покоя выбирают равным 5–15% от  $I_{a \max}$ .

От напряжения анодного питания каскада зависит максимальная неискаженная выходная мощность усилителя, поэтому напряжение анодного питания  $U_a$  нужно выбирать максимально возможным. Для надежной работы лампы должно соблюдаться условие  $P_{a \max} \leq U_a \cdot I_o$ . Конечно, превышение максимальных напряжений и токов у лампы не вызывает мгновенного разрушения, как у транзистора. Вакуумные приборы могут довольно долго работать в форсированном режиме, но превышение максимально допустимого тока или напряжения анода, а тем более обоих этих параметров приведет к перегреву баллона лампы и повышенному выделению газов из материалов баллона. Скопление газов ионизируется при работе лампы и, произвольно перемещаясь внутри баллона, вызывает "уханье" в колонках. Поэтому, если максимально допустимая мощность рассеивания анода оказалась слишком низкой, нужно уменьшить напряжение питания или ток покоя, хотя это и приведет к уменьшению выходной мощности, или же придется подобрать другую лампу для выходного каскада.

Выходная мощность в цепи анода определяется амплитудой переменного тока сигнала  $\Delta I_a$ ,  $P_{\text{вых } a} = \Delta I_a^2 \cdot R_a$ .

Для режима А  $\Delta I_a = I_o$ , для режима В  $\Delta I_a = I_{a \max} - I_o$ . Учитывая КПД выходного трансформатора, выходная мощность в нагрузке  $P_{\text{вых н}}$  будет на 5–15% меньше. Если расчетная выходная мощность окажется меньше ожидаемой, следует подобрать другую лампу для выходного каскада и повторить расчет.

Напряжение сигнала, необходимое для раскачки выходного каскада, определяется соотношением  $U_{\text{вх}} = \Delta U_{\text{вых}} / K$ , где  $\Delta U_{\text{вых}}$  – переменное напряжение сигнала в цепи анода лампы;  $K$  – коэффициент усиления лампы.

Статический коэффициент усиления лампы  $\mu$ , указываемый в справочниках или вычисляемый по формуле  $\mu = S \cdot R_i$ , справедлив лишь при неизменных напряжениях на электродах лампы. При работе с переменным сигналом, из-за падения напряжения на сопротивлении нагрузки, происходит соответствующее изменение напряжения анода. В результате динамический коэффициент усиления лампы  $K$  оказывается несколько меньше  $\mu$  и определяется по формуле  $K = \mu / (1 + R_i / R_a)$ . Так, для триодного выходного каскада, когда  $R_a = 2R_i$ ,  $K$  оказывается в 1,5 раза меньше статического коэффициента усиления  $\mu$ .

Переменное напряжение сигнала в цепи анода выходной лампы  $\Delta U_{\text{вых}}$  определяется соотношением  $\Delta U_{\text{вых}} = \Delta i_a * R_a$ .

Введение в выходной каскад отрицательной обратной связи по току через резистор  $R_k$ , а также использование ультралинейной схемы включения пентодов и тетродов, приводит к уменьшению чувствительности выходного каскада дополнительно в 1,2–1,5 раза, что также следует учитывать при расчете  $U_{\text{вх}}$ .

Если расчетная выходная мощность каскада недостаточна, можно прибегнуть к параллельному включению двух выходных ламп, что приведет к изменению некоторых параметров выходного каскада. У параллельно включенных ламп изменяется внутреннее сопротивление  $R_i$ . Поэтому при расчетах следует пользоваться эквивалентным сопротивлением  $R_{i \text{ экв}}$ . Для двух параллельных ламп, работающих в режиме А,  $R_{i \text{ экв}} = R_i / 2$ , для режима В  $R_{i \text{ экв}} = R_i / 4$ . Соответственно изменится оптимальное сопротивление анодной нагрузки  $R_a$ , а также увеличится в два раза максимальное значение анодного тока, что и позволит увеличить выходную мощность. На практике мощность увеличивается не в два раза, а немного меньше из-за неравномерного распределения токов между лампами. Для выравнивания токов можно включить в катодную цепь каждой лампы небольшое сопротивление порядка десятков-сотен Ом.

#### 4. ФАЗОИНВЕРТОР

Фазоинвертор является специфическим каскадом, применяемым в двухтактных усилителях для расщепления сигнала на две противофазные полуволны. Поскольку любой каскад с нагрузкой в анодной цепи инвертирует сигнал, очень часто применяется простая схема фазоинвертора на двух усилительных каскадах (рис. 5).

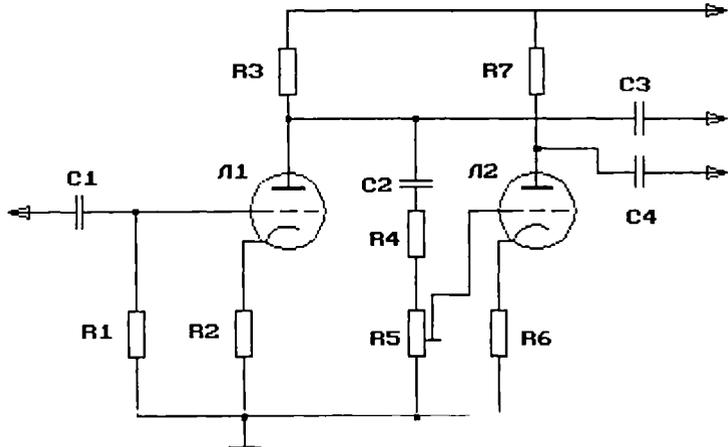


Рис. 5. Двухкаскадный фазоинвертор

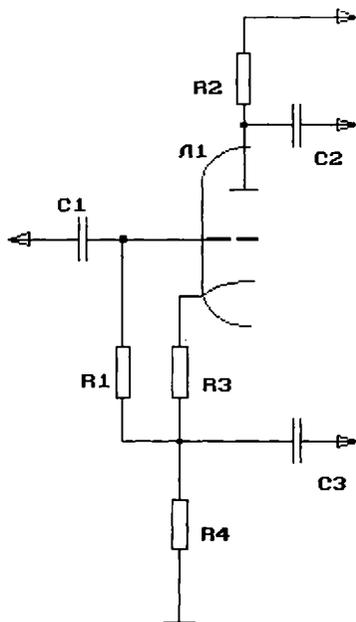
Рис. 6. Фазоинвертор на основе катодного повторителя

Фазоинвертор представляет собой два усилительных каскада с общим катодом, которые будут подробнее рассмотрены ниже. Сигнал с выхода первого каскада поступает на один из входов двухтактного каскада, а также через делитель напряжения R4R5 на вход второго инвертирующего каскада. Подстроечным резистором R5 уровень сигнала на входе устанавливается таким, чтобы выходные напряжения обеих половолн были равны. Достоинством схемы на рис.5 является усиление входного сигнала. К сожалению, эта схема имеет серьезные недостатки и не может быть использована в высококачественных усилителях.

Во-первых, она вносит больше фазовых и частотных искажений, чем другие схемы фазоинверторов, из-за наличия большего числа разделительных конденсаторов. Во-вторых, данная схема не обладает стабильностью параметров и нуждается в профилактических регулировках при старении ламп и при их замене.

Значительно большей стабильностью обладает схема на основе катодного повторителя с расщепленной нагрузкой (рис. 6).

В этой схеме резисторы R2 и R4 служат нагрузками каскада, на которых выделяется противофазный сигнал. Резистор автоматического смещения R3 задает ток покоя каскада, а сеточный резистор R1 определяет входное сопротивление. Так как падение напряжений на резисторах R2 и R4 создается одним и тем же током  $\Delta i_a$ , равенство напряжений половолн сигнала определяется только равенством сопротивлений этих резисторов и не зависит от параметров лампы. Применяв в качестве сопротивлений R2 и R4 прецизионные резисторы с допуском 0,5–1%, можно получить высокую точность половолн сигнала. Эта схема не требует регулировок при замене лампы. Недостатком этой схемы является то, что такой каскад имеет усиление меньше 1, что в ряде случаев можно компенсировать, применив в выходном каскаде лампы с большим коэффициентом усиления. Можно также ввести дополнительный драйверный каскад между фазоинвертором и выходным каскадом, однако дополнительный каскад внесет дополнительные частотные, фазовые и нелинейные искажения.



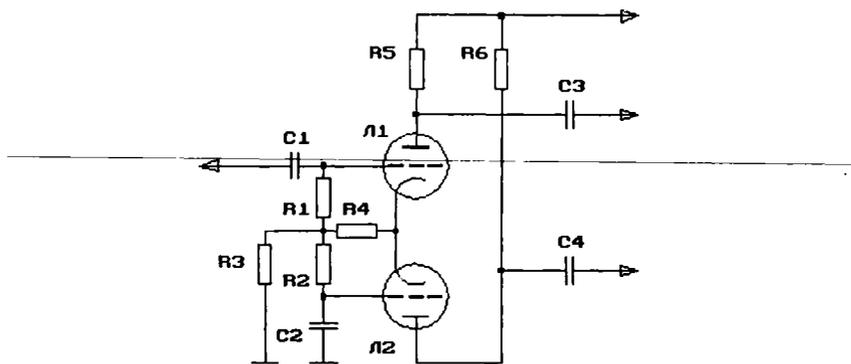


Рис.7. Фазоинвертор на основе балансного каскада

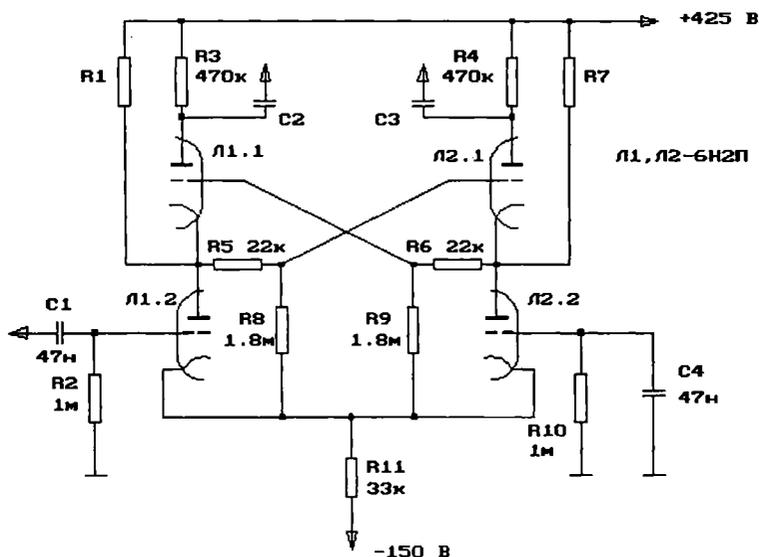


Рис.8. Самобалансирующий каскодный фазоинвертор

Гораздо совершеннее схема на основе балансного каскада усиления (рис.7). Данная схема является схемой самобалансирующегося фазоинвертора. Каскад на лампе Л1 – усилитель с общим катодом. Лампа Л2 включена по схеме с общей сеткой и управляется катодным током лампы Л1 через общий катодный резистор R3. Сетки обеих ламп подключены к общему резистору автоматического смещения R4, что обеспечивает равенство напряжению смещения и, следовательно, анодных токов покоя. Сетка лампы Л2 заземлена по переменному току через конденсатор C2. Для обеспечения высокой точности расщепленного сигнала в каче-

стве анодных сопротивлений  $R_5$  и  $R_6$  следует применить прецизионные резисторы. Такой фазоинвертор, обладая большим усилением, может сделать ненужным применение на входе усилителя предварительного каскада усиления.

Усовершенствовав схему на рис. 7 с помощью применения каскодных усилителей, можно получить фазоинвертор с выходным напряжением до 100 В. Схема такого фазоинвертора приведена на рис. 8.

Благодаря перекрестным связям эта схема автоматически балансируется по постоянному току. Введение резисторов  $R_1$  и  $R_7$  позволяет обеспечить большой динамический диапазон и высокий коэффициент усиления сигнала. Значения этих резисторов подбираются таким образом, чтобы ток через лампы  $L_1$ ,  $L_2$  и резисторы  $R_1$  и  $R_7$  был примерно равным. В схеме на рис. 8 коэффициент усиления составляет около 500. Такой фазоинвертор можно применить с выходным каскадом на лампах, предназначенных для источников питания. Такие лампы часто применяются в выходных каскадах из-за большой рассеиваемой мощности и большого анодного тока, однако они обладают очень низким коэффициентом усиления и требуют большого напряжения раскачки. Примером таких ламп являются триоды 6С19П, 6Н13С, 6С41С, 6С33С и др.

## 5. ВХОДНОЙ КАСКАД

Задачей входного каскада является обеспечение заданной чувствительности усилителя, т.е. усиление входного сигнала до уровня, необходимого для работы фазоинвертора или выходного каскада. Кроме того, входной каскад определяет уровень шумов всего усилителя, так как шумы первого каскада могут быть сопоставимы с уровнем входного сигнала и усиливаются последующими каскадами. Поэтому во входных каскадах нужно применять малошумящие лампы и принимать дополнительные меры по снижению шумов: экранировать входную лампу, удалять ее от выходных ламп и трансформаторов и т.д.

Обычно входной каскад строится на одном триоде по схеме с общим катодом (рис. 9).

Резистор автоматического смещения  $R_k$  определяет ток по-

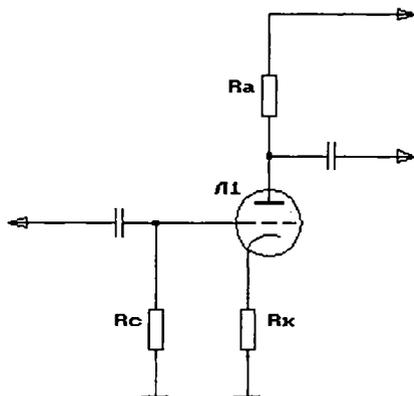


Рис. 9. Усилительный каскад с общим катодом

коя триода  $I_0$  и рассчитывается с помощью семейства анодных характеристик лампы. Падение напряжения на этом резисторе не должно быть меньше амплитуды входного сигнала, т.к. в противном случае на пиках сигнала появится сеточный ток, что ведет к увеличению нелинейных искажений.

На резисторе анодной нагрузки  $R_a$  выделяется напряжение выходного сигнала. От значения сопротивления этого резистора зависит коэффициент усиления каскада и полоса пропускания.

Амплитуда переменного тока сигнала в анодной цепи определяется по формуле  $\Delta i_a = (\mu * U_g) / (R_i + R_a)$ , где  $U_g$  – напряжение сигнала на сетке.

Переменное напряжение сигнала на сопротивлении анодной нагрузки  $\Delta U_n = \Delta i_a * R_a$ , поэтому коэффициент усиления  $K = U_n / U_g = \mu / (1 + R_i / R_a)$ .

Полоса пропускания частот  $\Delta f$  зависит от сопротивления анодной нагрузки и емкостей лампы. Для обеспечения заданной полосы пропускания  $\Delta f$  значение сопротивления нагрузки не должно превышать максимального значения  $R_{a \max} = 1 / (2 * \pi * \Delta f * (C_{вх} + C_{вых}))$ , где  $C_{вх}$  и  $C_{вых}$  – входная и выходная емкости лампы. Значение  $R_{a \max}$  уменьшается при учете емкости монтажа, входной емкости следующего каскада и других паразитных емкостей, подключенных параллельно нагрузке. Для триодов входная емкость равна емкости между сеткой и катодом, а для пентодов она равна емкости между первой сеткой и катодом, соединенным со второй и третьей сетками. Выходная емкость триодов равна емкости анод–катод, для пентодов она равна емкости между анодом и катодом, соединенным со второй и третьей сетками. Емкость монтажа можно принять равной 5–10 пФ.

Пентоды имеют гораздо больший коэффициент усиления, но обладают в несколько раз большим, по сравнению с триодами, уровнем шумов, поэтому не рекомендуется их применение во входных каскадах.

В случае необходимости получения большого коэффициента усиления, например для усиления сигнала от магнитных звукоснимателей, лучше применять каскодный усилитель на триодах. Типичная схема каскодного усилителя приведена на рис.10.

В приведенной на рис.10 схеме лампа Л1.1 включена по схеме с общим катодом, а лампа Л1.2 – по схеме с общей сеткой. Сетка лампы Л1.2 заземлена по переменному току через конденсатор С3. Смещение на сетке лампы Л1.1 создается за счет падения напряжения на резисторе автоматического смещения R2, а на сетке Л1.2 – жестко задано делителем анодного напряжения R4R5. Так как в этой схеме обе лампы включены последовательно по постоянному току, они работают при пониженном анодном напряжении, что следует учитывать при выборе типа ламп. Обычно в каскодных

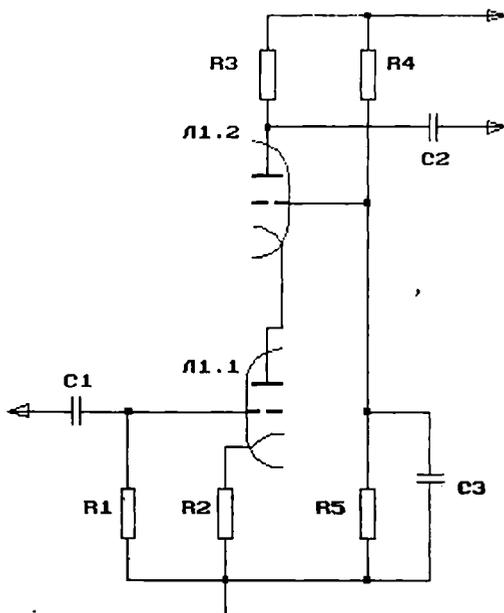


Рис.10. Каскодный усилительный каскад

усилителях применяют sdвоенные триоды, специально разработанные для этих целей. Примером такой лампы является двойной триод 6Н23П.

Все приведенные выше уравнения для триодного каскада справедливы и для каскодного усилителя при условии введения эквивалентных параметров  $R_{i3}$ ,  $\mu_3$ ,  $S_3$ .

В частном случае, когда каскад собран на двойном триоде или одинаковых лампах,  $\mu_3 = \mu(\mu + 1) \approx \mu^2$ ,  $R_{i3} = R_i(\mu + 2) \approx R_i * \mu$ ,  $S_3 = S * (\mu + 1) / (\mu + 2) \approx S$ .

Собственные шумы каскодного усилителя соответствуют шумам одного триода (лампы Л1.1).

Ток покоя входного каскада  $I_0$  выбирают, как правило, в 2–3 раза больше амплитуды тока сигнала в анодной цепи  $\Delta i_a$ , в пределах 0,5–5 мА. Рассчитав падение напряжения на сопротивлении нагрузки, определяют напряжение анодного питания и далее по графикам анодной характеристики находят напряжение падения на катодном резисторе автоматического смещения и рассчитывают его значение.

Очень часто возникает необходимость согласования выходного сопротивления одного каскада с входом другого каскада или устройства через длинный соединительный кабель. Для такого согласования на выходе каскада с высоким выходным сопротивлением

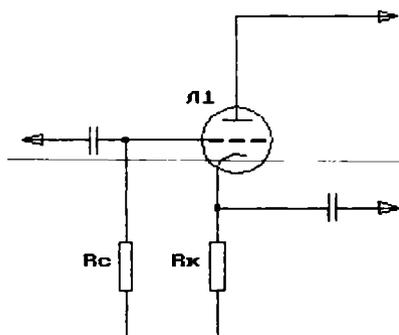


Рис.11. Катодный повторитель

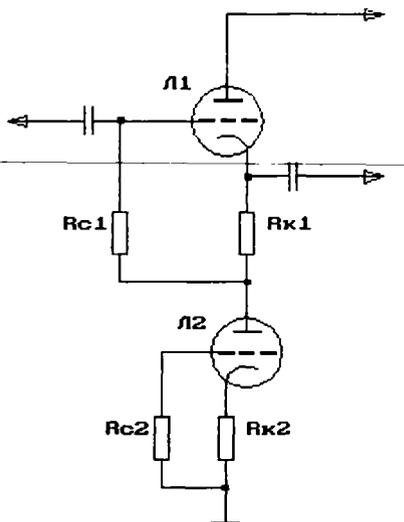


Рис.12. Катодный повторитель с активной нагрузкой

ставят катодный повторитель, обладающий высоким входным и низким выходным сопротивлением, обеспечивая усиление сигнала по току. Простейшая схема катодного повторителя приведена на рис.11.

Входное сопротивление катодного повторителя на низких частотах определяется величиной сеточного резистора  $R_c$ . На высоких частотах входное сопротивление снижается из-за шунтирующего действия внутриламповых емкостей. Катодный резистор  $R_k$  задает напряжение смещения и ток покоя лампы Л1. Падение напряжения на этом резисторе должно быть больше амплитуды выходного сигнала, чтобы не возникло ограничения отрицательной посылки сигнала.

Основным параметром катодного повторителя является выходное сопротивление  $R_{вых}$ . Для приведенной на рис.11 схемы оно составляет  $R_{вых} = 1/S$ . Для уменьшения выходного сопротивления можно включить параллельно два триода, что приведет к уменьшению выходного сопротивления в два раза. Коэффициент усиления катодного повторителя составляет  $K = \mu * R_k / (R_i + (1 + \mu) * R_k)$ . Обычно коэффициент усиления катодного повторителя составляет 0,8–0,9.

Увеличить коэффициент усиления катодного повторителя можно, применив в качестве нагрузки ламповый каскад. Такая схема приведена на рис.12.

Коэффициент усиления такого катодного повторителя определяется по формуле  $K = 1 / (1 + 1/\mu + (1/S * (R_{k2}(1 + \mu) + R_{i2})))$  и может достигать 0,99. Кроме того, схема на рис.12 отличается высокой линей-

ностью входной характеристики. Объясняется это тем, что коэффициент усиления  $\mu$  триодов практически не зависит от напряжения анод–катод при постоянном анодном токе. Так как в данной схеме анодный ток лампы Л1 стабилизирован лампой Л2, такой катодный повторитель будет иметь постоянный коэффициент усиления в значительном диапазоне изменений входного сигнала. Выходное сопротивление катодного повторителя с активной нагрузкой, такой же, как и у обычного катодного повторителя,  $R_{\text{вых}} = 1/S$ .

Катодные повторители, подобные приведенным на рис.11 и 12, в последнее время часто применяют в выходных каскадах CD-плееров для согласования с межблочным кабелем. Модернизировать таким образом можно практически любой готовый CD-плеер. Для этой задачи более всего подходят сверхминиатюрные низковольтные двойные триоды 6Н16Б, 6Н25Г, 6Н28Б и особенно 6Н27П, имеющий напряжение анодного питания не более 30 В, что позволяет обойтись штатным трансформатором, имеющимся в CD-приграмотеле.

## 6. БЛОК ПИТАНИЯ

Блок питания является одним из самых ответственных узлов высококачественного усилителя мощности. Он обеспечивает энергией все каскады усилителя. От качества его исполнения зависят выходная мощность, нелинейные искажения, уровень фона и внутренних наводок, уровень акустических шумов, температурный режим и другие качественные параметры усилителя. В идеале блок питания должен выдавать напряжения, свободные от каких бы то ни было пульсаций, импульсных помех и "просадок". Как известно, напряжение анодного питания должно подаваться на лампы только после того, как катод достаточно прогреется, так как присутствие высокого напряжения на аноде в холодном состоянии приводит к ускоренному разрушению катода. Поэтому для увеличения срока службы ламп блок питания должен иметь устройство задержки включения анодного питания. Электрические параметры и схема блока питания определяются схемой усилителя, рассчитанными значениями напряжений питания каскадов и потребляемыми ими токов.

В блок питания обязательно входят силовой трансформатор (один или два, по необходимости) и выпрямители с фильтрами анодных напряжений. Иногда применяют стабилизаторы анодных напряжений, если решено питать лампы стабилизированным напряжением. Если выпрямители и стабилизаторы выполнены на полупроводниковых приборах, а не на лампах, желательно сделать устройство задержки включения анодных напряжений, кото-

рое в этом случае также входит в блок питания. Цепи питания накалов входных ламп в некоторых случаях могут запитываться от отдельных накальных обмоток и выпрямителей для снижения фона переменного тока, проникающего из цепи накала.

### 6.1. РАСЧЕТ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Расчет силового трансформатора заключается в определении таких параметров, как габаритная мощность  $P_{\text{габ}}$ , площадь сечения сердечника  $S$ , число витков первичной и вторичных обмоток  $w_1, w_2, w_3, \dots$ , и диаметра провода обмоток  $d_1, d_2, d_3, \dots$

Габаритная мощность  $P_{\text{габ}}$  равна полусумме мощностей всех обмоток трансформатора:  $P_{\text{габ}} = (P_1 + P_2 + \dots + P_n) / 2$ . Мощность вторичных обмоток находится из произведения напряжения обмотки и силы тока, потребляемого нагрузкой:  $P_n = U_n \cdot I_n$ .

Мощность первичной обмотки, в зависимости от применяемой схемы выпрямителя, равна:

$$\text{для двухполупериодной } P_1 = (P_2 + P_3 + \dots + P_n) / 1,41,$$

$$\text{для мостовой } P_1 = (P_2 + P_3 + \dots + P_n).$$

Площадь сечения сердечника определяется габаритной мощностью трансформатора  $S(\text{см}^2) = \sqrt{P_{\text{габ}}} \text{ (Вт)}$ .

После этого рассчитывается число витков на один вольт:  $m = K / S(\text{см}^2)$ . Коэффициент  $K$  выбирается в диапазоне 35–60. Для получения трансформатора с малыми шумами и полями рассеивания  $K$  выбирается равным 45–60, однако это приведет к увеличению числа витков всех обмоток, что не всегда возможно. Поэтому, применяя сердечник из высококачественных сталей, можно принять  $K$  равным 35–45. Затем вычисляется число витков каждой обмотки:  $w = m \cdot U$ .

Диаметр провода обмоток определяется силой тока, потребляемой от обмотки. Для первичной обмотки сила тока вычисляется через габаритную мощность:  $I_1 = P_{\text{габ}} / U_1$ .

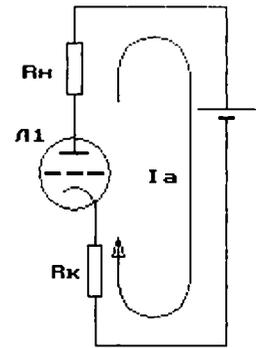
Для трансформаторов мощностью до 75 Вт  $d(\text{мм}) = 0,8 \sqrt{I(\text{А})}$ , до 300 Вт –  $d(\text{мм}) = 0,9 \sqrt{I(\text{А})}$ , 300–400 Вт –  $d(\text{мм}) = \sqrt{I(\text{А})}$ . Уменьшение диаметра провода обмоток ниже расчетного значения приведет к повышению сопротивления обмоток, большому падению напряжения при подключенной нагрузке и бесполезным потерям мощности на нагрев обмоток.

### 6.2. ВЫПРЯМИТЕЛИ

Выпрямители, используемые в высококачественных ламповых усилителях, строятся по двухполупериодной или мостовой схеме. Двухполупериодный выпрямитель требует увеличения числа вит-

Рис.13. Цепь прохождения выходного сигнала

ков вторичной обмотки силового трансформатора в два раза по сравнению с мостовой схемой, но зато число выпрямляющих элементов в нем в два раза меньше, что является важным преимуществом при использовании ламп в выпрямителе. В качестве выпрямляющих элементов используются кенотроны или полупроводниковые диоды и диодные сборки. Сторонники бескомпромиссных решений выбирают для своих усилителей только ламповые выпрямители, и, возможно, в этом есть смысл, так как ток выходного сигнала проходит по цепи анод – нагрузка – источник питания – катод – анод так, как это показано на рис.13.



Таким образом, если не хотите, чтобы сигнал хоть где-то проходил через полупроводниковый p-n переход, используйте выпрямители на кенотронах. К тому же применение кенотронов снимает проблему задержки включения питающих напряжений.

Однако применение кенотронов имеет и свои серьезные недостатки. Во-первых, кенотроны по сравнению с полупроводниковыми приборами имеют гораздо меньший допустимый выпрямленный ток и в сотни раз большие размеры и массу, а значит, их применение, особенно в мощных усилителях класса А, где может потребоваться не один кенотрон, сильно увеличит аппарат в размерах. Во-вторых, цепи накала мощных кенотронов потребляют значительную мощность, что заставляет увеличивать мощность силового трансформатора. И наконец, в-третьих, кенотроны имеют довольно высокое внутреннее сопротивление, измеряемое сотнями Ом. Поскольку усиление реального музыкального сигнала вызывает динамическое изменение тока потребления выходного каскада, этот ток, протекая через внутреннее сопротивление кенотрона, создаст на нем падение напряжения, вследствие чего напряжение питания окажется промодулированным напряжением сигнала. А изменение напряжения анода у триодов заметно влияет на анодный ток. В результате выходная характеристика триода становится нелинейной, и в выходном сигнале появляются дополнительные нелинейные искажения. Поэтому применение кенотронов для источников анодного напряжения можно рекомендовать только для пентодных каскадов, у которых анодный ток в гораздо меньшей степени зависит от анодного напряжения.

На рис.14 представлены схемы применяемых двухполупериодных выпрямителей на полупроводниковых диодах и на кенотро-

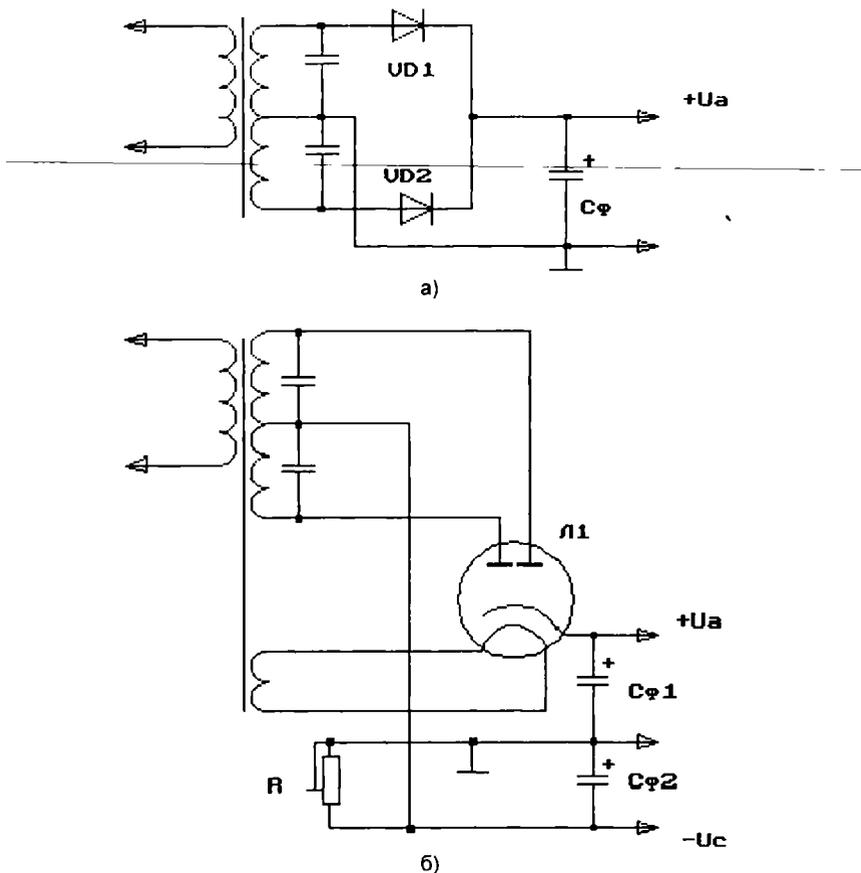


Рис.14. Двухполупериодные выпрямители:  
а – полупроводниковый; б – кенотронный

нах. Как видно, обе схемы аналогичны и отличаются лишь типом выпрямляющих элементов. На рис.14,б показано, как можно получить отрицательное напряжение смещения. Естественно, вторичная обмотка при этом должна быть рассчитана на напряжение, определяемое суммой анодного напряжения и напряжения смещения. Двухполупериодная схема не является эффективной в плане использования трансформатора, так как каждая половина обмотки используется только в одном полупериоде. Гораздо более эффективна мостовая схема выпрямителя (рис.15).

Применение ламп в мостовых выпрямителях совершенно неоправданно, так как привело бы к огромным потерям мощности на накал, поэтому в мостовых выпрямителях используют исключительно полупроводниковые диоды и сборки.

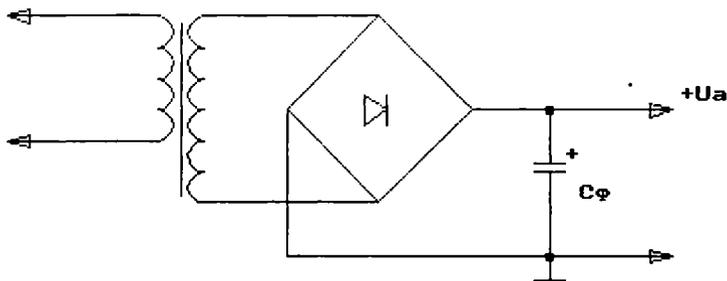


Рис.15. Мостовой выпрямитель

Пульсации выпрямленного напряжения на выходе выпрямителя зависят от тока, потребляемого нагрузкой, и емкости фильтрующего конденсатора  $C_\phi$ . Их можно определить по формуле  $\Delta U = I / (2f \cdot C_\phi)$ , где  $f$  – частота напряжения сети. Как видно из этой формулы, ослабить пульсации напряжения можно, увеличивая емкость конденсатора  $C_\phi$ , поэтому необходимо емкость  $C_\phi$  выбирать как можно большей, ориентируясь только на размеры конденсатора, допускаемые конструкцией усилителя. Конденсатор фильтрующей цепочки выбирают исходя из условия  $R_n \cdot C_\phi \gg 1/f$ , где  $f$  – частота пульсаций (100 Гц для двухполупериодной и мостовой схем выпрямления),  $R_n$  – сопротивление нагрузки, определяемое по закону Ома:  $R_n = U_n / I_n$ .

Дополнительно уменьшить уровень пульсаций можно с помощью простейших фильтрующих цепочек LC- и RC-типа. Учитывая, что на резисторе RC-фильтра будет теряться часть напряжения, следует намотать вторичную обмотку силового трансформатора с запасом.

### 6.3. СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПЯЖЕНИЯ

Стабилизаторы анодного напряжения оказывают положительное влияние на стабилизацию рабочих точек ламп устройства, практически полностью убирают пульсации выпрямленного напряжения, позволяя тем самым значительно уменьшить емкость конденсатора на выходе выпрямителя. Если в качестве регулирующего элемента в стабилизаторе применена лампа, то она так же, как и кенотроны, задерживает появление анодного напряжения.

Транзисторные стабилизаторы напряжения широко известны и здесь не рассматриваются. Следует только заметить, что в случае их применения они должны быть высоковольтными и выдерживать короткое замыкание.

Для стабилизации цепей с небольшим потребляемым током можно применять простой параметрический стабилизатор на специальных лампах – стабилитронах, аналогичный стабилизатору на полупроводниковом стабилитроне (рис.16).

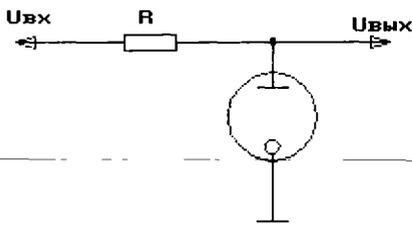


Рис.16. Параметрический стабилизатор

В качестве стабилизаторов в таких схемах могут применяться лампы СГ1П и СГ2П, имеющие напряжение стабилизации около 150 и 105 В соответственно при токе через стабилизатор

5–30 мА. Лампы-стабилизаторы входят в режим стабилизации при подаче на анод напряжения, несколько превышающего рабочее напряжение стабилизатора (обычно примерно 130–180 В), поэтому падение напряжения на гасящем резисторе R должно составлять не менее 30 В. Его значение рассчитывают исходя из тока потребления нагрузки.

Для более мощных цепей применяют более сложные стабилизаторы напряжения с регулирующим элементом на мощных триодах или пентодах. Схема такого стабилизатора приведена на рис.17.

В качестве регулирующих ламп применяют специальные мощные триоды с малым внутренним сопротивлением 6С19П, 6С41С, 6С33С, 6С56П, 6С66П, двойные триоды 6Н5С, 6Н13С и др. В качестве управляющего элемента применяют маломощные пентоды с большим коэффициентом усиления или каскодный усилитель на триодах. Стабилитрон ЛЗ можно заменить высоковольтным полупроводниковым стабилитроном.

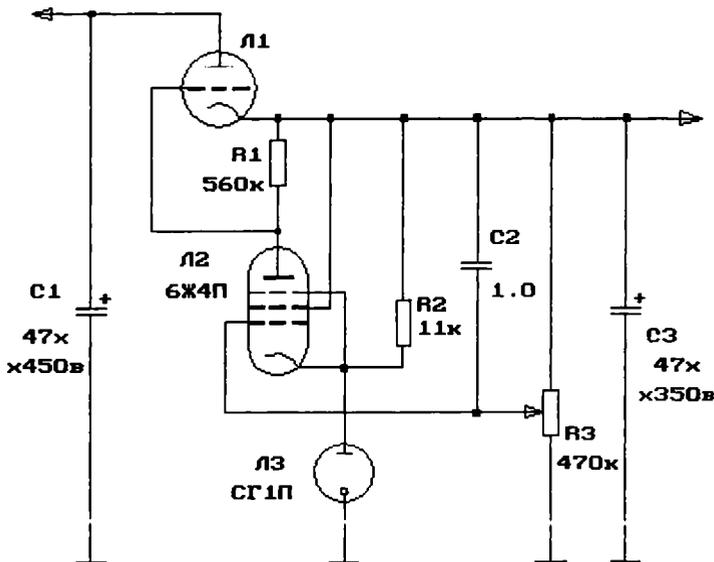


Рис.17. Стабилизатор напряжения

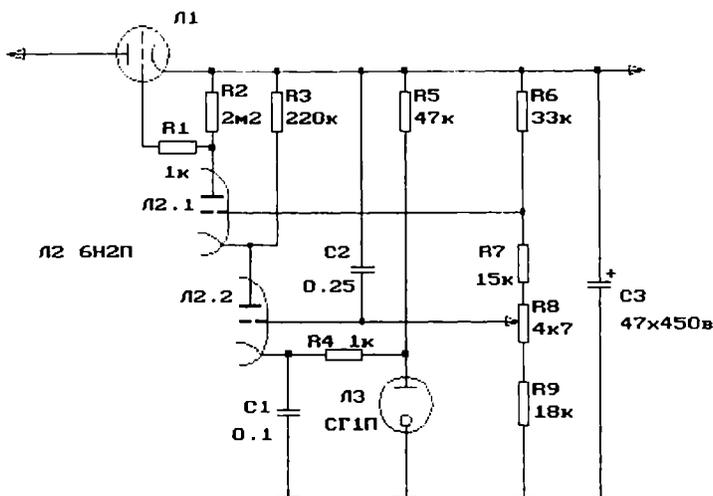


Рис.18. Применение каскодного усилителя в стабилизаторе напряжения

Несколько лучшими параметрами (в частности, меньшим выходным сопротивлением) обладает схема стабилизатора напряжения на рис.18 с каскодным усилителем в качестве управляющего элемента.

Резистор R3, включенный параллельно лампе Л2.1, увеличивает коэффициент усиления каскодного усилителя. Стабилитрон, создающий опорное напряжение, имеет достаточно большое внутреннее сопротивление, на котором создается обратная отрицательная связь по переменному току. Для устранения этой обратной связи стабилитрон зашунтирован конденсатором С1. Резистор R4 предотвращает возникновение паразитной генерации в схеме.

В связи с высоким коэффициентом усиления каскодного усилителя следует обратить внимание на защиту от наводок переменного тока. Наиболее уязвимым местом схемы является сеточная цепь лампы Л2.2. Для снижения наводок резисторы делителя напряжения R6–R9 сделаны относительно низкоомными. Конденсатор С2 следует припаять непосредственно к контакту ламповой панели, а резистор R8 соединить коротким экранированным проводом.

Выходное сопротивление стабилизатора напряжения по схеме на рис.18 составляет около 0,5 Ом.

#### 6.4. УСТРОЙСТВО ЗАДЕРЖКИ ВКЛЮЧЕНИЯ АНОДНОГО ПИТАНИЯ

Для задержки включения анодного питания могут использоваться самые различные схемные решения. Самым простым, наверное, будет использование реле и схемы, использующей кон-

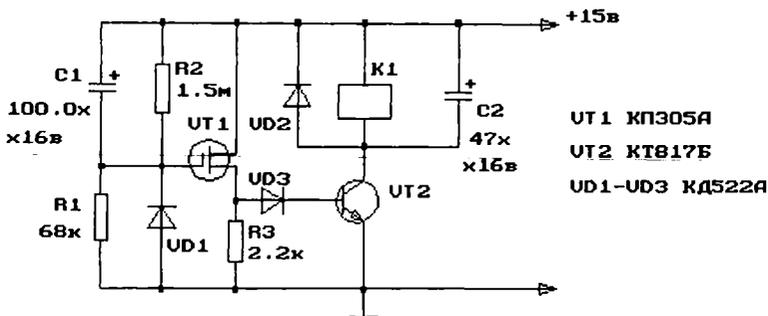


Рис.19. Устройство задержки включения анодного питания

денсатор в качестве времязадающего элемента. Для примера схема такого устройства, разработанного мною, приведена на рис.19.

При включении питания конденсатор C1 разряжен, транзисторы VT1 и VT2 открыты и через обмотку реле K1 идет ток. При этом нормально замкнутые контакты реле разомкнуты. Конденсатор C1, постепенно заряжаясь, закрывает транзисторы, и реле замыкает контакты через время, определяемое номиналами R1C1 и напряжением отсечки транзистора VT1. Конденсатор C2 необходим для устранения дребезга контактов реле, возникающего при медленном уменьшении тока через обмотку реле.

Достоинством этой схемы является то, что ток через реле идет только во время задержки и, следовательно, устройство не создает дополнительной нагрузки на блок питания. Питаться такое устройство можно от цепей накала ламп через простейший выпрямитель.

## 7. ВЫХОДНОЙ ТРАНСФОРМАТОР

Выходной трансформатор играет важную роль в достижении высокого качества звука и в обеспечении расчетной выходной мощности усилителя. Главной задачей выходного трансформатора является согласование сопротивления нагрузки с внутренним сопротивлением генератора тока (выходной лампы). При этом выходной трансформатор должен обеспечивать низкие нелинейные искажения и незначительные частотные искажения в рабочем диапазоне частот.

Расчет выходного трансформатора является довольно сложной задачей, требующей к тому же множества справочных или измеренных данных по применяемым сердечникам. Чтобы избежать перепечатки этих справочников, здесь приводятся только упрощенная методика расчета и общие соображения по изготовлению выходных трансформаторов.

В силу того, что выходному трансформатору приходится работать в широком диапазоне частот, принято рассматривать его поведение отдельно для низших, средних и высоких частот.

Завал частотной характеристики на нижних частотах зависит в основном от индуктивности и от активного сопротивления первичной обмотки. Увеличить индуктивность можно, увеличив число витков, но при этом увеличится и сопротивление обмотки, а значит, вырастут и потери сигнала. Необходимую индуктивность первичной обмотки можно рассчитать, задавшись уровнем ослабления сигнала на низшей частоте:

$$L_1 = R_a / (F_n * K_\ell),$$

где  $R_a$  – сопротивление нагрузки в анодной цепи лампы;  $F_n$  – низшая частота диапазона.

Коэффициент  $K_\ell$  определяется по формуле

$$K_\ell \geq 2 * \pi * \sqrt{(M_n^2 - 1)},$$

где  $M_n$  – снижение усиления на низшей частоте  $F_n$  по сравнению с усилением на средних частотах, вызванное выходным трансформатором. Этот коэффициент выбирается всегда больше 1. Например, при снижении усиления на 6 дБ коэффициент  $M_n = 2$ .

Для снижения активного сопротивления обмотки часто увеличивают диаметр провода, а для того, чтобы обмотки разместились в окнах трансформатора, берут сердечник большего сечения и габаритов. Вообще площадь сечения сердечника выходного трансформатора выбирают в несколько раз большей, чем это необходимо для обеспечения габаритной мощности. Делается это потому, что при нарастании магнитной индукции в сердечнике, вплоть до максимальной, параметры трансформатора существенно изменяются, а следовательно, меняются условия передачи сигнала и возникают нелинейные искажения. Чтобы снизить такие изменения параметров трансформатора, необходимо обеспечить значение магнитной индукции в сердечнике намного ниже максимально допустимого уровня, для чего и выбирают сердечник больших размеров.

Число витков первичной обмотки для обеспечения необходимой индуктивности  $L_1$  находят по формуле

$$w_1 = (9000 / \sqrt{\mu}) * \sqrt{(L_1 * \ell_m)} / S,$$

где  $\mu$  – магнитная проницаемость материала сердечника;  $S$  – площадь поперечного сечения сердечника ( $\text{см}^2$ );  $\ell_m$  – длина средней магнитной силовой линии магнитопровода (см), находится по справочнику или с помощью измерения конкретного магнитопровода.

Магнитная проницаемость материала сердечника  $\mu$  сильно зависит от напряженности магнитного поля, создаваемого током первичной обмотки. При увеличении тока магнитная проницаемость значительно уменьшается. Наличие постоянного тока через

обмотку также способствует снижению магнитной проницаемости. Следовательно, значение  $\mu$ , подставляемое в приведенную формулу расчета количества витков, должно зависеть от выходной мощности усилителя и от наличия постоянного тока подмагничивания. Так, при использовании в качестве сердечника электротехнических сталей для однотактных выходных каскадов с выходной мощностью 1,5–4 Вт  $\mu$  принимается равным 225–250, а для двухтактных с выходной мощностью до 30 Вт – около 400. При увеличении выходной мощности следует уменьшать значение  $\mu$ , подставляемое в формулу.

Для двухтактных выходных каскадов с выходной мощностью не менее 4 Вт число витков первичной обмотки трансформатора можно также рассчитывать по формуле  $w_1 = 3500 \cdot U_a / (F_n \cdot S)$ , где  $U_a$  – напряжение источника питания анодной цепи.

При использовании ультралинейной схемы включения пентодов и лучевых тетродов первичная обмотка должна иметь отводы для подключения экранирующей сетки. Расположение этого отвода определяют по формуле  $W_3 = K_3 \cdot w_1$ , где  $K_3$  – коэффициент, зависящий от конструкции лампы. Например, для пентодов 6П14П и лучевых тетродов 6ПЗС он равен 0,22, а для лучевых тетродов 6П6С и 6П1П  $K_3 = 0,11$ . Эта формула указывает расположение отвода от того вывода трансформатора, на который подается напряжение питания.

Если площадь сечения сердечника и размеры трансформатора не позволяют получить необходимую индуктивность первичной обмотки, необходимо подобрать трансформатор с большими размерами.

Коэффициент трансформации определяется соотношением

$$n = \sqrt{(R_a \cdot \eta_{тр} / R_n)},$$

где  $\eta_{тр}$  – КПД трансформатора;  $R_a$  – сопротивление нагрузки в анодной цепи;  $R_n$  – сопротивление нагрузки.

КПД трансформатора тем меньше, чем меньше выходная мощность. С достаточной точностью можно считать  $\eta = 0,8$  при  $P_{вых} = 1,5$ –4 Вт,  $\eta = 0,85$  при  $P_{вых} = 4$ –10 Вт,  $\eta = 0,9$  при  $P_{вых} \geq 10$  Вт.

Число витков вторичной обмотки  $w_2$  определяется отношением числа витков первичной обмотки к коэффициенту трансформации:  $w_2 = w_1 / n$ .

Диаметр провода обмоток зависит от режима работы выходного каскада:

$$\text{для режима А } d_1 = K_a \sqrt{(w_1 \cdot \ell_b) / R_a},$$

$$\text{для режима В } d_1 = K_b \sqrt{(w_1 \cdot \ell_b) / R_a}.$$

В обеих формулах  $\ell_b$  – средняя длина витка обмотки (см),  $K_a = 0,015 / \sqrt{0,5 \cdot (1 - \eta_{тр})}$ ,  $K_b = 0,015 / \sqrt{0,586 \cdot (1 - \eta_{тр})}$ .

Диаметр провода вторичной обмотки зависит также от способа намотки. Так, при намотке в один провод:

для режима А  $d_2 = d_1 * \sqrt{n}$ ,

для режима В  $d_2 = 0,84 * d_1 * \sqrt{n}$ .

Для вторичной обмотки из двух параллельных частей:

для режима А  $d_2 = 0,71 * d_1 * \sqrt{n}$ ,

для режима В  $d_2 = 0,6 * d_1 * \sqrt{n}$ .

Как уже говорилось, у однотактного выходного каскада всегда присутствует ток покоя, протекающий через первичную обмотку выходного трансформатора. Действие этого тока снижает магнитную проницаемость материала сердечника, что приводит к уменьшению индуктивности первичной обмотки и к ухудшению передачи нижних частот. Чтобы снизить этот эффект, сердечник трансформатора собирают с зазором между разъёмными частями. Для создания зазора применяют прокладку из картона, бумаги или других изоляционных материалов.

Для данного числа витков  $w_1$  и для данной величины постоянного тока  $I_0$  существует наиболее выгодная величина зазора  $l_3$ , при которой индуктивность первичной обмотки получается наибольшей.

Для сердечников из электротехнических сталей  $l_3 = 8 * w_1 * I_0 (\text{мА}) * 10^{-7} (\text{мм})$ . Если в результате получится  $l_3 \leq 0,1 \text{ мм}$ , сердечник можно собрать без зазора.

На средних частотах потери сигнала определяются в основном только величинами активных сопротивлений обмоток. При применении обмоточного провода из обычной электротехнической меди сопротивление обмотки может быть рассчитано по формуле  $r = 22 * 10^{-5} * w * l_B / d^2$ .

Передача трансформатором высших частот диапазона зависит от величины индуктивности рассеивания трансформатора, от взаимных емкостей между обмотками и от собственных емкостей обмоток. Индуктивность рассеивания можно снизить уменьшением числа витков первичной обмотки, уменьшением толщины прокладок между слоями обмотки, а также увеличением отношения  $h/l$  (рис.20).

Кроме того, уменьшить все перечисленные паразитные факторы можно усложнением конструкции обмоток трансформатора. Так, расположение вторичной обмотки между частями первичной (рис.21, а) уменьшает индуктивность рассеивания в 4 раза. Для двухтактных выходных каскадов необходимо также соблюдать высокую степень симметричности двух частей обмоток. Поэтому катушку транс-

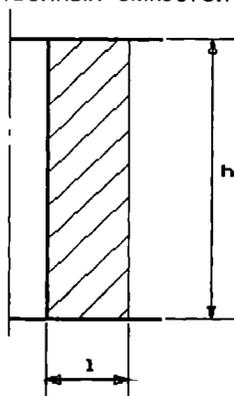


Рис. 20

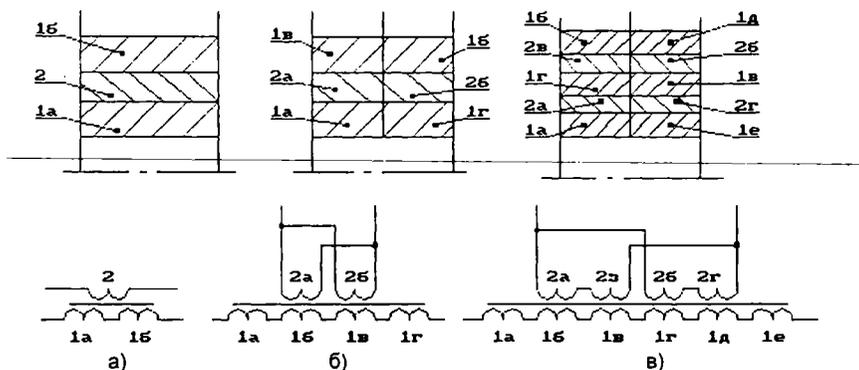


Рис. 21. Конструкции выходных трансформаторов

форматора разделяют перегородкой на две части и ведут намотку в два провода. Трансформатор по схеме на рис. 21, б обеспечивает хорошую передачу до частот примерно 7 кГц. Для увеличения передаваемого диапазона следует применить намотку по схеме на рис. 21, в. В этой конструкции секции 1 а, 1 б, 1 д и 1 е первичной обмотки содержат по 1/8, а секции 1 в и 1 г по 1/4 части ее витков. Секции вторичной обмотки содержат равное число витков.

В заключение необходимо напомнить об электрической прочности трансформатора. Боковые щечки каркасов для обмоток трансформаторов ламповых усилителей при питающих напряжениях до 250 В должны иметь толщину 1,5–2,5 мм, а толщина изоляции между обмотками должна быть около 0,3–0,5 мм. При напряжении 300–600 В щечки должны иметь толщину 2,5–3,5 мм, а изоляция между обмотками около 0,5–0,8 мм.

Каркасы изготавливают из гетинакса, текстолита или плотного картона, склеивая их клеем БФ. Картонные каркасы после склейки рекомендуется пропитать тем же клеем или лаком.

Через каждые 40–50 В следует прокладывать изоляцию из папиросной или конденсаторной бумаги.

При изготовлении трансформаторов в домашних условиях необходимо пропитать готовый трансформатор парафином, расплавленным на водяной бане. Трансформатор опускают в расплавленный парафин и выдерживают в течение нескольких минут, до полного прогревания сердечника. Обработанные таким образом трансформаторы, кроме повышенной электропрочности, обладают также пониженным уровнем акустических шумов.

# КОНСТРУИРОВАНИЕ ЛАМПОВЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Процесс конструирования электронного устройства, помимо проектирования и расчетов, включает в себя два основных этапа: макетирование и доводка параметров устройства на макете и разработка конструктивного оформления устройства. Рассмотрим особенности конструирования высококачественных ламповых усилителей.

## 1. МАКЕТИРОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЯ

После расчета всех узлов усилителя его собирают на макетной плате, изготавливают силовой и выходные трансформаторы и проверяют фактические параметры усилителя. Макетирование позволяет заранее обнаружить недостатки конструкции, отклонение параметров от расчетных значений и принять соответствующие меры. Рассмотрим наиболее часто встречающиеся отклонения параметров от расчетных и меры по их устранению.

**1. Недостаточная выходная мощность.** Чаще всего причиной недостаточной выходной мощности и большого коэффициента нелинейных искажений является неоптимальное согласование сопротивления нагрузки. Дело в том, что усилитель отдает максимальную мощность при минимальных искажениях только при сопротивлении нагрузки, равном определенному оптимальному значению. Из-за разброса параметров это сопротивление может быть разным для разных ламп. Добиваются оптимального согласования с помощью изменения коэффициента трансформации выходного трансформатора. Для этого можно сделать вторичную обмотку выходного трансформатора с несколькими отводами и при наладке усилителя найти экспериментально тот отвод, при подключении к которому получается максимальная выходная мощность в нагрузке.

Все параметры лампы, а значит, и выходная мощность сильно зависят от напряжения накала. Это понятно – чем большая энергия приложена к катоду и чем больше его температура, тем больше поток электронов от катода к аноду. Однако **увеличивать** напряжение накала сверх номинального значения не следует, так как

при этом резко увеличивается интенсивность износа катода и отказов лампы. Хорошим решением было бы питание цепей накала стабилизированным напряжением, хотя это связано с некоторыми техническими трудностями (применение фильтрующих конденсаторов большой емкости и большие потери мощности в самом стабилизаторе – ведь цепи накала мощных ламп потребляют ток в несколько ампер).

Еще одной причиной недостаточной выходной мощности может быть недостаточное напряжение анодного питания выходного каскада. Для пентодов и лучевых тетродов в большей степени, чем анодное напряжение, оказывает влияние напряжение на экранирующей сетке. Измерив напряжение на аноде и на экранирующей сетке относительно катода и убедившись, что эти напряжения меньше максимально допустимых, можно увеличить напряжение питания, домотав обмотку силового трансформатора, или снизить сопротивление резистора развязывающего фильтра в цепи питания, что, однако, может привести к увеличению фона. В этом случае следует пропорционально увеличить емкость конденсатора фильтра.

Увеличивая напряжения на электродах лампы, следует помнить, что пентоды и лучевые тетроды гораздо чаще выходят из строя при перегрузке экранирующей сетки, чем при перегрузке анода. Учитывая возможную нестабильность напряжения питания, особенно при отсутствии стабилизатора анодного напряжения, не рекомендуется повышать напряжение на экранирующей сетке более чем на 90–95% от максимально допустимого значения.

Другим способом повышения выходной мощности может быть регулировка тока покоя выходного каскада и, возможно, перевод его режима в режим АВ в случае двухтактного каскада. Для этого следует подать на вход выходного каскада сигнал от генератора и, наблюдая на осциллографе амплитуду выходного сигнала, подобрать напряжение отрицательного смещения на управляющей сетке лампы или значение резистора автоматического смещения.

Довольно часто причина недостаточной выходной мощности заключается в недостаточном напряжении раскачки, т.е. ограничении сигнала при этом раньше происходит в каскаде предварительного усиления или в фазоинверторе. Убедиться в этом можно, наблюдая одновременно на осциллографе сигнал на выходе и на входе выходного каскада. В этом случае повысить напряжение раскачки можно, увеличивая напряжение питания каскадов, подбирая токи покоя или вводя дополнительный каскад усиления между управляющей сеткой выходных ламп и предыдущим каскадом. Кроме того, увеличить в некоторых пределах усиление предварительных каскадов можно, увеличив сопротивление анодных нагрузок, однако надо учитывать, что это приведет к сужению полосы пропускания усилителя.

**2. Ограничение полосы пропускания.** При недостаточной полосе пропускания следует проверить все каскады усилителя от выхода к входу, отыскивая "узкое место". Ограничение нижних частот в предварительных каскадах и фазоинверторе происходит только из-за недостаточной емкости разделительных конденсаторов. В таком случае достаточно увеличить их емкость.

В выходном каскаде завал нижних частот, вероятнее всего, происходит из-за недостаточной индуктивности первичной обмотки выходного трансформатора. Данный недостаток можно устранить только переделкой трансформатора. Для этого нужно увеличить на 20–50% число витков всех обмоток и, возможно, применить сердечник с большими размерами. Надо также помнить, что наличие даже небольшого тока подмагничивания через обмотку трансформатора может значительно снизить магнитную проницаемость сердечника и стать причиной ослабления уровня низких частот. Поэтому двухтактные каскады следует тщательно сбалансировать после прогрева в течение 15 мин и только после этого проверять частотную характеристику.

Полоса пропускания верхних частот в предварительных каскадах, как говорилось, зависит от величины сопротивления анодной нагрузки каскада и от емкости монтажа и соединительных проводов. Для расширения полосы частот можно уменьшить сопротивление анодной нагрузки, применить более рациональный монтаж. Следует избегать применения в сигнальных цепях экранированных проводов, так как их емкость значительна. Для защиты проводов от наводок лучше применять неэкранированные витые пары.

В выходном каскаде причиной ограничения верхних частот в основном является выходной трансформатор. О способах расширения полосы пропускаемых частот выходного трансформатора говорилось в главе, посвященной их расчету.

Компенсировать спад верхних частот можно, применив корректирующие цепочки в предварительных каскадах. Пример такой корректирующей цепочки приведен на рис. 22.

Частота среза такой цепи  $f_c = 1/(2 \cdot \pi \cdot R_k \cdot C_k)$ . Степень подъема усиления определяется отношением  $R_a$  и  $R_k$ ,  $m = (R_a + R_k)/R_a$ . Для сохранения полосы пропускания каскада величина  $R_a$  должна быть уменьшена на значение  $R_k$ .

Расширить полосу пропускания усилителя можно, также охватив весь усилитель неглубокой отрицательной обратной связью.

**3. Большой уровень фона и собственных шумов.** Прежде всего надо найти источник повышенного шума. Чаще всего такими источниками являются входные цепи и первый каскад усилителя. Чтобы убедиться в этом, можно, во-первых, заземлить сетку первого каскада, во-вторых, замкнуть анод первой лампы на землю

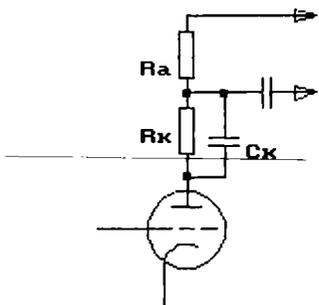
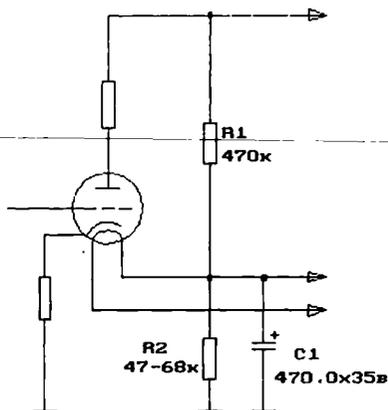


Рис. 22. Подъем высших частот с помощью корректирующей цепочки

Рис. 23. Снижение фона с помощью делителя



через конденсатор емкостью 100–200 мкФ с соответствующим напряжением. Пропадание фона позволит определить источник.

Причинами повышенного фона могут являться: проникание фона из цепи накала в цепь катод–анод; недостаточная фильтрация питающих напряжений; электромагнитные наводки и неоптимальное заземление каскадов усилителя.

Устранить проникание фона из цепи накала можно, подав на эту цепь постоянное напряжение порядка 25–30 В. Сделать это можно с помощью делителя анодного напряжения, схема которого приведена на рис. 23.

Снижение фона в этом случае сильно зависит от емкости конденсатора С1, поэтому его емкость нужно выбирать по возможности большей. При применении такого делителя в схеме каскодного усилителя или в схеме стабилизатора напряжения следует проявлять осторожность, так как катод одной из ламп в этих схемах находится под высоким напряжением, а цепь накала – под напряжением около 25–35 В, в то время как у многих ламп разность этих напряжений не должна превышать 100–200 В.

При невозможности применить указанную на рис. 23 схему можно питать цепь накала первого каскада постоянным током от отдельной обмотки трансформатора. При этом следует применять фильтрующие конденсаторы большой емкости и, возможно, микросхемные стабилизаторы на выходное напряжение 6–6,5 В. Питание цепи накала выпрямленным или стабилизированным напряжением целесообразно лишь в предварительных каскадах, у которых ток накала не превышает 300–350 мА. При большем токе накала величина емкости и размеры фильтрующих конденсаторов несоразмерно высоки.

Вследствие того что входные сопротивления ламповых каскадов составляют обычно 100–1000 кОм, входные цепи очень чувствительны к внешним наводкам. Для уменьшения этих наводок входные цепи необходимо делать максимально короткими, располагая входные лампы рядом с входными разъемами и удаляя их от силового трансформатора. При невозможности укоротить соединительные линии следует применять катодные повторители, которые обладают низким выходным сопротивлением и, шунтируя входное сопротивление следующего каскада, способствуют снижению наводок. Во входных цепях лучше всего применять витые пары, экранируя их при необходимости. Разделительные конденсаторы на входе усилителя также подвержены наводкам. Для снижения наводок на конденсаторы можно экранировать их, например, обернув металлической фольгой и заземлить ее, или же совсем исключив входные конденсаторы. При этом, однако, необходимо помнить, что постоянное напряжение на выходе источника сигнала попадет на сетку входной лампы и может полностью нарушить работу усилителя. В крайнем случае для уменьшения наводок можно снизить входное сопротивление усилителя.

Причиной повышенного шума и нелинейных искажений может быть также неоптимальное заземление каскадов, входных и выходных цепей и шасси усилителя. Для избежания этого следует заземление входных цепей, каждого из каскадов, выходных цепей и шасси выполнять отдельными проводниками с минимальным сопротивлением, соединив их в одной точке, лучше всего у конденсатора выпрямителя источника питания.

Другой причиной фона могут служить большие пульсации анодного напряжения. Для уменьшения пульсаций применяются развязывающие RC- и LC-цепочки. На выходе выпрямителя лучше всего применить П-образный фильтр. Для того чтобы пульсации анодного напряжения не создавали дополнительных наводок, можно проводники питания сделать экранированными, соединив экранирующие оплетки с общей точкой заземления отдельным проводником.

Большой шум в широкой полосе частот может быть следствием самовозбуждения усилителя. Для устранения самовозбуждения следует последовательно с сетками ламп включать резисторы сопротивлением 1–10 кОм, припаявая их непосредственно к контактам ламповых панелей. Устранить самовозбуждение усилителя на сверхзвуковых частотах можно ограничив полосу пропускания усилителя. Для этого можно, например, параллельно сопротивлениям анодных нагрузок включить корректирующие RC-цепочки или включить конденсатор небольшой емкости параллельно резистору общей обратной отрицательной связи.

## 2. КОНСТРУКТИВНОЕ ОФОРМЛЕНИЕ УСИЛИТЕЛЯ

Конструкция аппарата зависит от возможностей разработчика и дает широкое поле для творчества. Разрабатывая конструкцию, необходимо выполнять некоторые обязательные условия, так как неудачная конструкция может свести на нет все усилия по достижению высокого качества звука. Предварительно рекомендуется провести компоновку изделия. Для этого на миллиметровке вычерчиваются в натуральную величину трансформаторы и кожухи, платы, если применяется печатный монтаж и другие важные компоненты усилителя, имеющие значительные габариты. При компоновке следует стремиться к тому, чтобы узлы усилителя соединялись по возможности короткими проводниками. Силовой и выходные трансформаторы следует располагать взаимно перпендикулярно для снижения наводок от полей рассеивания. Входные лампы нужно удалять от силового трансформатора и располагать их как можно ближе к регулятору громкости и входным разъемам. Для входных ламп желательно предусмотреть возможность экранирования с помощью стандартных или специально изготовленных экранов.

Следует учитывать и то, что входные сопротивления ламповых каскадов составляют сотни килоом и могут совместно с относительно небольшими емкостями и индуктивностями соединительных проводов образовывать фильтры звуковых частот, искажающих АЧХ устройства. Поэтому весьма желательно проектировать весь тракт прохождения сигнала максимально коротким и наиболее симметричным для двухканальных усилителей. Сокращению длины звукового тракта может способствовать, например, расположение входных гнезд на передней стенке корпуса усилителя, а выходных – на задней.

Кроме того, нужно определить способ крепления трансформаторов, крупногабаритных конденсаторов, плат и других массивных узлов усилителя. При этом надо учитывать, что конструкция усилителя должна быть простой для разборки и сборки. Для трансформаторов следует предусмотреть кожухи, которые выполняются из немагнитных металлов (медь, алюминий и их сплавы). Кожухи трансформаторов обязательно должны иметь вентиляционные прорезы или отверстия, так как во время работы они неизбежно будут нагреваться, а это приведет к увеличению сопротивления проводов обмоток и следовательно, к изменению параметров трансформаторов. Достаточно сказать, что изменение сопротивления обмоток составляет примерно 1% на каждые 10°C. Кроме того, трансформаторы могут нагревать и близко расположенные детали схемы, которые также чувствительны к изменениям температуры.

Температура баллонов ламп может достигать 100–200 °С, поэтому для них необходимо предусмотреть возможность эффективной вентиляции. При использовании дерева для изготовления корпуса лампы следует располагать на достаточном удалении от деревянных частей.

Все эти соображения учитываются при компоновке, которую приходится иногда проводить несколько раз, чтобы обеспечить простоту и надежность изделия.

После определения взаимного расположения всех узлов усилителя и способа их крепления вокруг них вычерчиваются контуры корпуса, определяются его габаритные размеры и все необходимые технологические отверстия. Далее, исходя из компоновочного чертежа, вычерчиваются рабочие чертежи корпуса и трансформаторных кожухов.

### **3. ТРИОДНЫЙ ДВУХТАКТНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТЬЮ 8 Вт**

Усилитель на рис. 24 конструктивно весьма прост и доступен в повторении любому радиолюбителю и обладает тем не менее очень красивым звуком. Он прост в налаживании, надежен в работе и собран из недефицитных деталей, что является немаловажным фактором при повторении и тем более при ремонте и замене деталей усилителя. Можно сказать, что применение недефицитных комплектующих и являлось главным критерием при разработке данного аппарата. В качестве силового и выходных трансформаторов можно применить стандартные изделия.

Оконечные каскады на триодах обладают низким уровнем нелинейных искажений даже без введения обратной отрицательной связи, малым выходным сопротивлением, благодаря чему уменьшаются переходные искажения и могут быть существенно сокращены габариты выходных трансформаторов. Большим достоинством триодов является и то, что при значительных отклонениях величины анодной нагрузки от оптимальных значений характеристики усилителей меняются мало. Так, описываемый усилитель может работать на нагрузку сопротивлением 2–10 Ом без заметного снижения мощности и роста искажений, что предоставляет большую свободу в выборе акустических систем.

Усилитель построен по классической схеме и имеет три каскада усиления – предварительный каскад на половине двойного триода 6Н2П (Л1.1), фазоинвертор на основе катодного повторителя на другой половине двойного триода (Л1.2) и двухтактный выходной каскад на двойных триодах 6Н6П. Применение в выходном каскаде двойных триодов 6Н6П, помимо уменьшения габаритов, позволяет добиться большей симметричности сигнала, поскольку двойные триоды имеют большую идентичность параметров, чем два независимых триода. Для увеличения выходной мощности в выходном

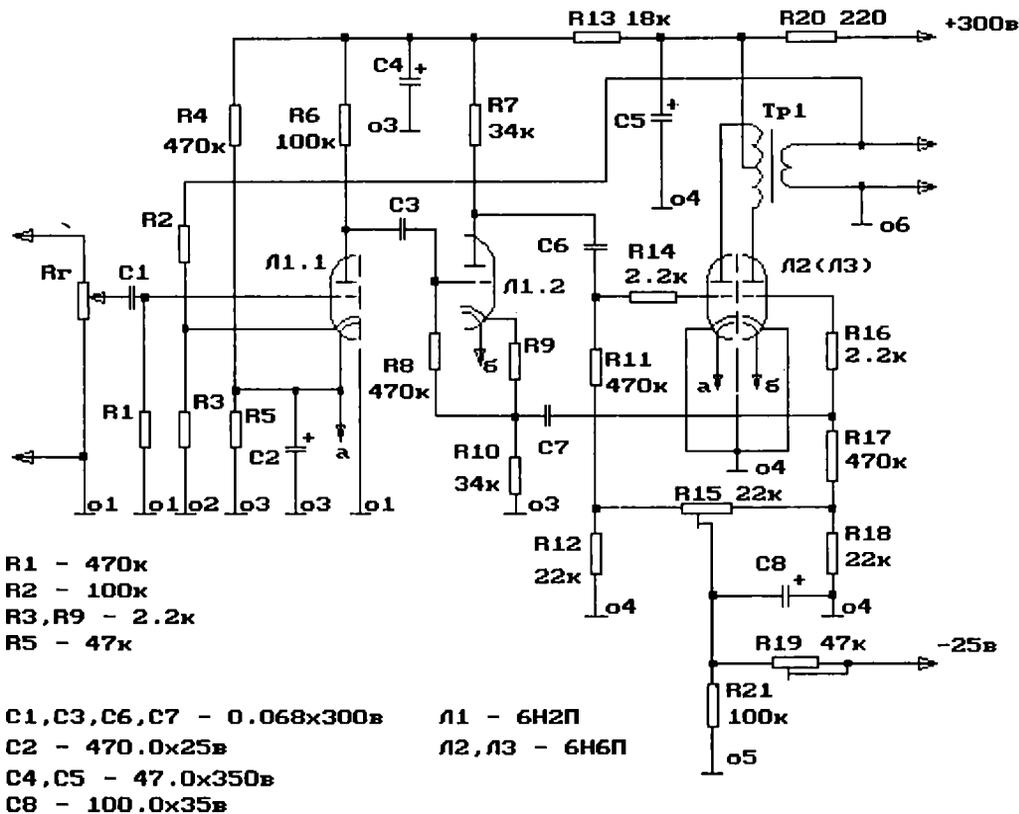


Рис. 24. Триодный двухтактный усилитель

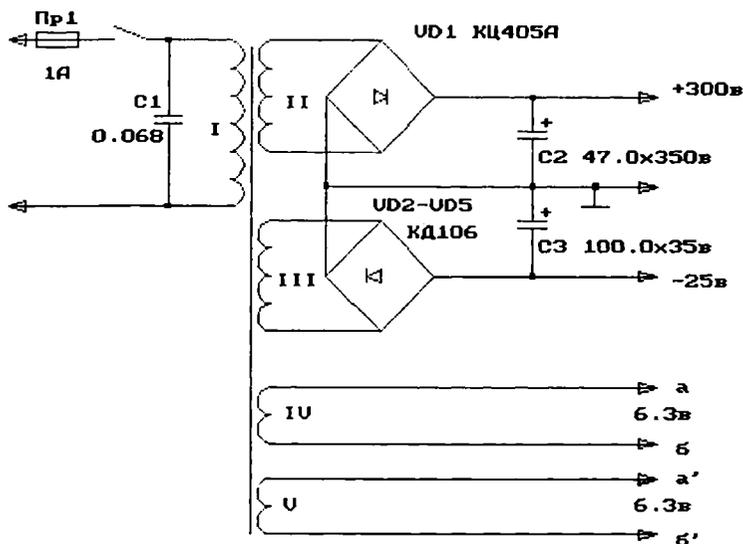
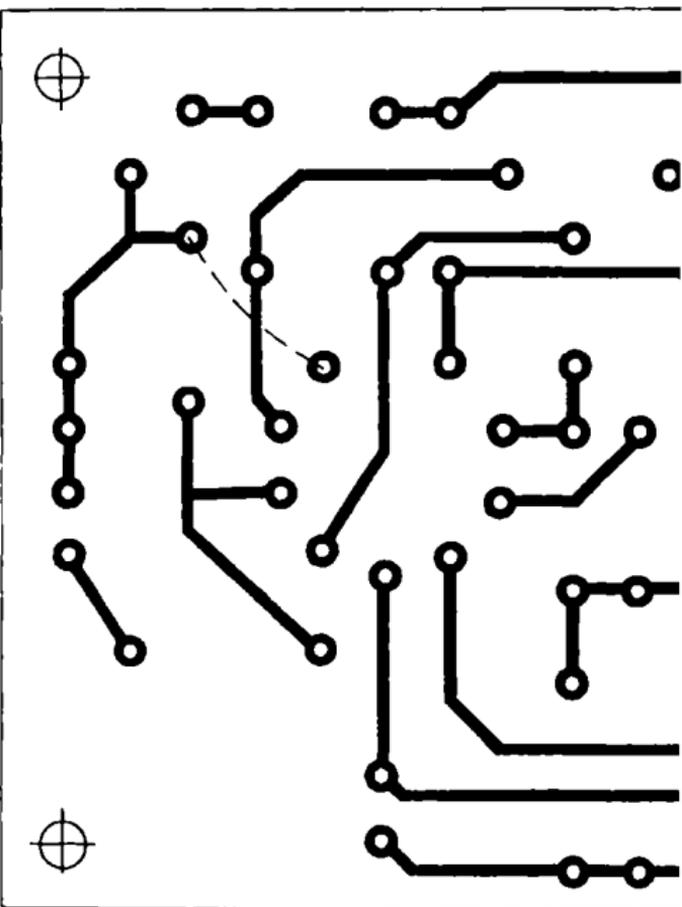


Рис. 25. Блок питания

каскаде применено параллельное включение ламп Л2 и Л3. Лампа Л3 на схеме рис. 24 условно не показана. Усилитель охвачен общей отрицательной обратной связью, вводимой в катодную цепь входного каскада через резистор R2, что позволяет снизить нелинейные искажения до 0,7–1%.

Для повышения КПД и избежания потерь мощности на катодных резисторах фиксированное напряжение смещения на сетки ламп выходного каскада подается от отдельного источника отрицательного напряжения. Чтобы устранить протекание постоянного тока через первичную обмотку выходного трансформатора из-за неидентичности параметров выходных ламп, выходной каскад балансируется резистором R15 по нулевому падению напряжения на анодах выходных ламп. Данную операцию желательно производить периодически по мере износа ламп и обязательно при их замене. Резистором R19 устанавливается ток покоя выходного каскада.

Фазоинвертор, выполненный на лампе Л1.2, представляет собой каскад с расщепленной нагрузкой. Достоинством такой схемы является высокая симметричность полуволн сигнала при равенстве анодного и катодного сопротивлений нагрузок. Эти сопротивления должны иметь разброс не более 0,5–1%. Симметричность расщепленного сигнала сохраняется при износе лампы и при ее замене. Ослабление сигнала в фазоинверторе в данном случае компенсируется сравнительно большим коэффициентом усиления ламп выходного каскада.



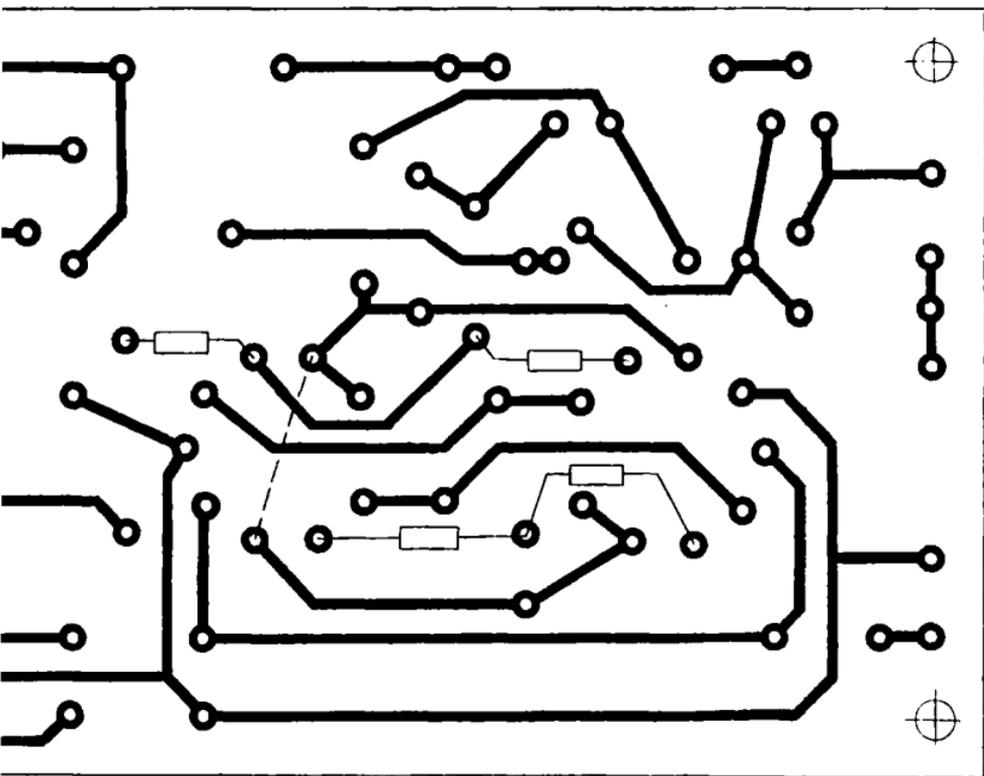


Рис. 26. Плата усилителя

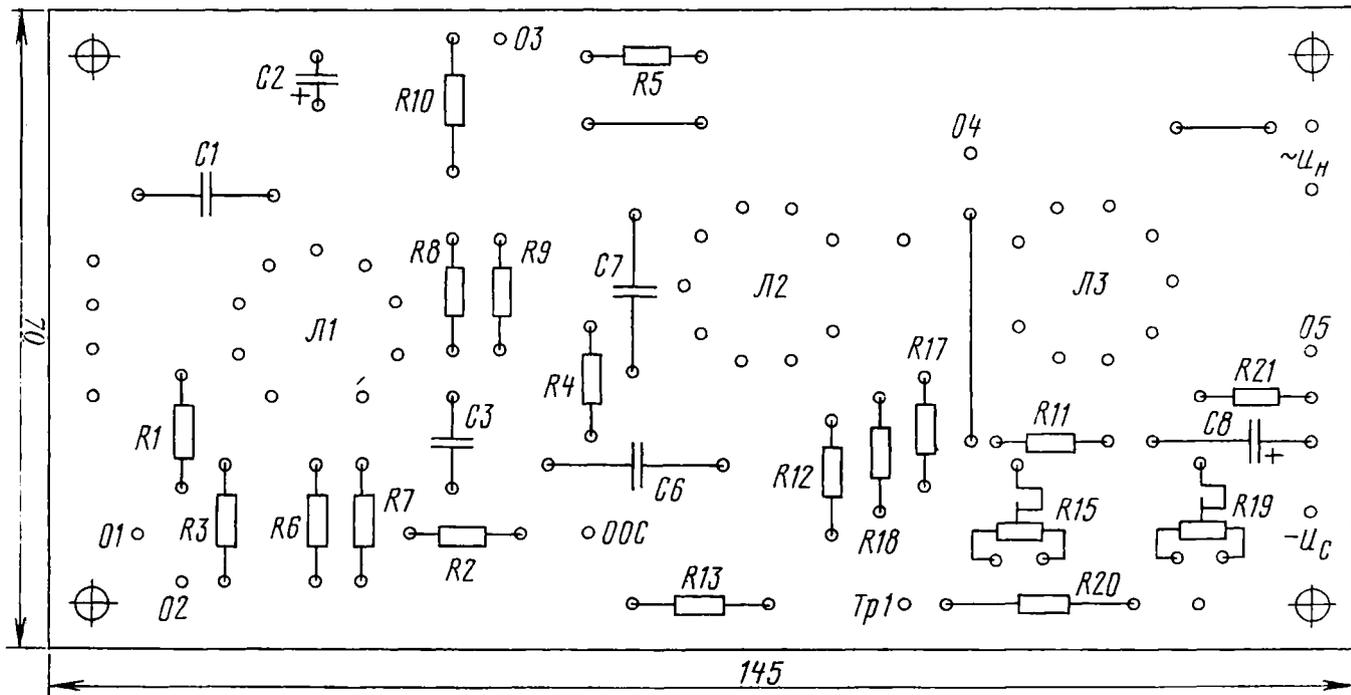


Рис. 26. (Окончание)

Входной каскад усиления выполнен по схеме с общим катодом и особенностей не имеет. Его назначение – усиление входного сигнала до уровня, необходимого для работы выходного каскада. Полоса пропускания входного каскада при указанном сопротивлении анодной нагрузки составляет не менее 50 кГц.

Оба канала усилителя питаются от общего блока питания, схема которого приведена на рис.25.

Усилители и выпрямители блока питания собраны на печатных платах, изображенных на рис.26 и 27.

Качество звучания усилителя в наибольшей степени зависит от подбора комплектующих и рационального монтажа. Разделительные конденсаторы С6 и С7 на входе выходного каскада следует подобрать так, чтобы отличие их емкостей не превышало 5%. Эти конденсаторы совместно с сеточными резисторами образуют частотно зависимые делители. Различие емкостей приведет к тому, что на самых низких частотах полуволны сигнала окажутся разными по амплитуде, т.е. возникнут нелинейные искажения. Сеточные резисторы выходного каскада также желательно подобрать с точностью 1–2%.

В качестве разделительных емкостей применены конденсаторы типа К73-11. Конденсаторы С4, С5 усилителя и С2 в блоке выпрямителей – электролитические конденсаторы типа К50-27. Все остальные – типа "Jamicon" или другие электролитические конденсаторы. Все резисторы – типа МЛТ, С2-14, С2-33. Конденсаторы фильтров питания С4 и С5 устанавливаются на платы усилителей со стороны печатных проводников. Резисторы R14 и R16 (R14 и R16 для лампы Л3) также устанавливаются со стороны печатных проводников и припаиваются непосредственно к контактам ламповых панелей так, как это показано на чертеже платы усилителя рис.26. В качестве ламповых панелей используются керамические панельки типа ПЛК-9. В крайнем случае можно использовать пластмассовые панельки типа ПЛП-9. Входные гнезда – типа RCA или "тюльпан".

Силовой трансформатор можно использовать готовый –ТАН-51 или намотать самодельный на сердечнике сечением 9–10 см<sup>2</sup>. В этом случае первичная обмотка должна иметь 1200 витков провода диаметром 0,33 мм, вторичная –1350 витков провода диаметром 0,27 мм, третья обмотка –100 витков провода диаметром 0,1 мм, четвертая и пятая – по 34 витка провода диаметром 1 мм.

Выходные трансформаторы – стандартные ТВ3-1-6, от ламповых телевизоров. Их первичная обмотка состоит из двух секций по 1250 витков провода диаметром 0,1 мм. вторичная – из двух секций по 73 витка провода диаметром 0,5 мм. Сначала наматывается одна секция первичной обмотки, затем одна секция вторичной, затем

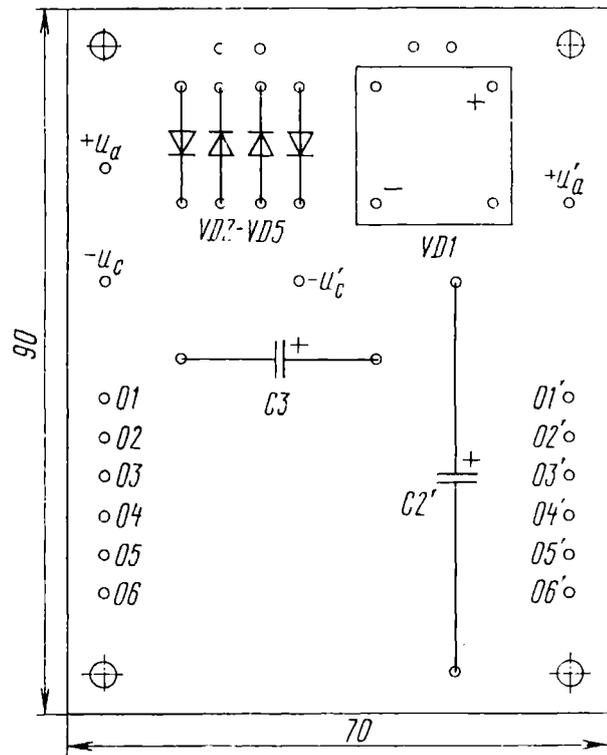
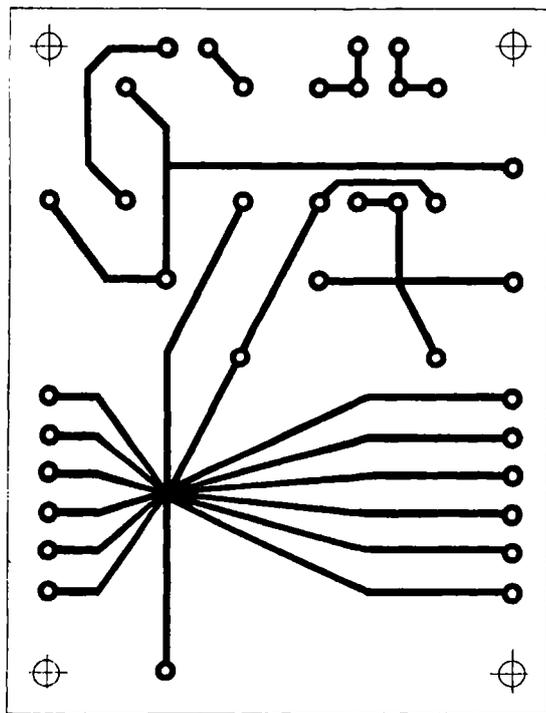
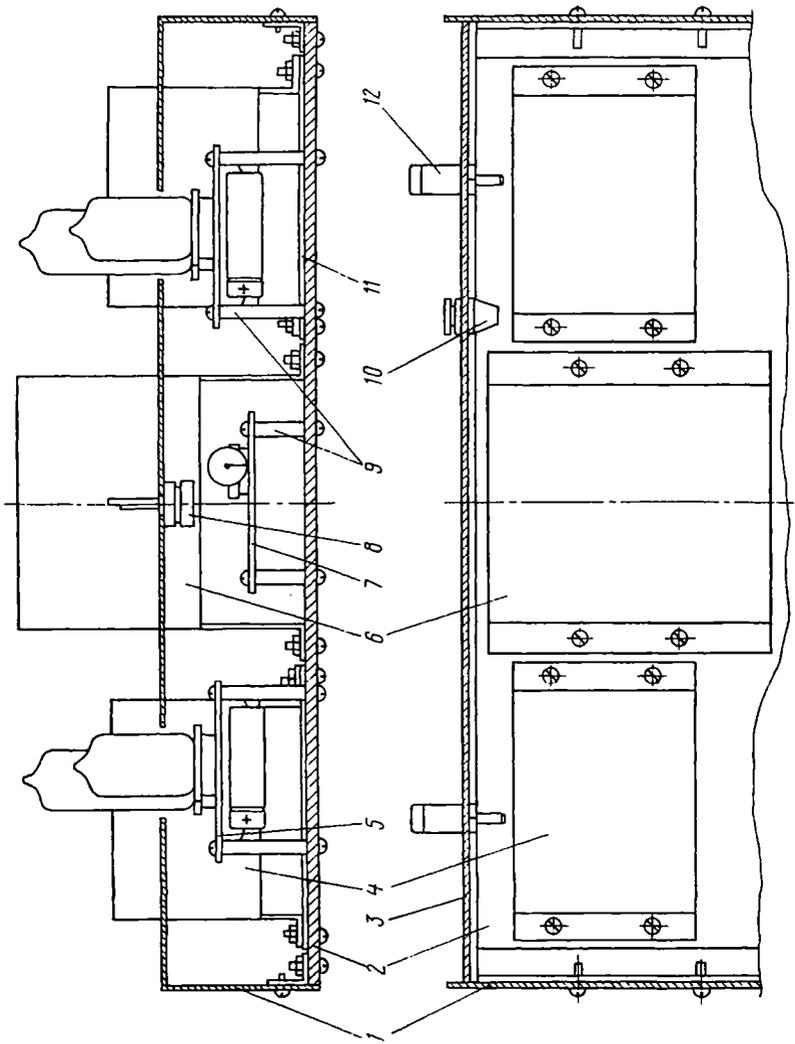
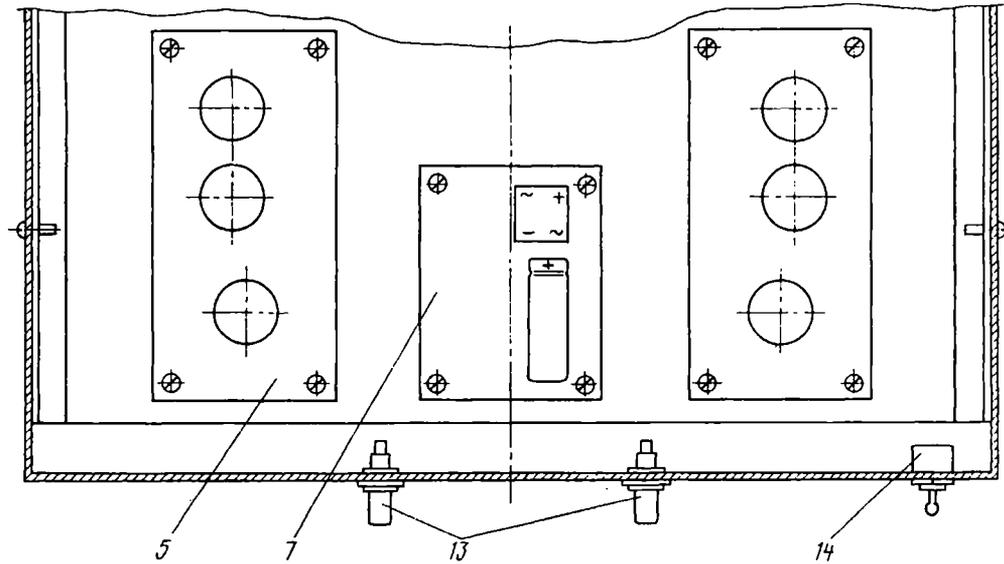


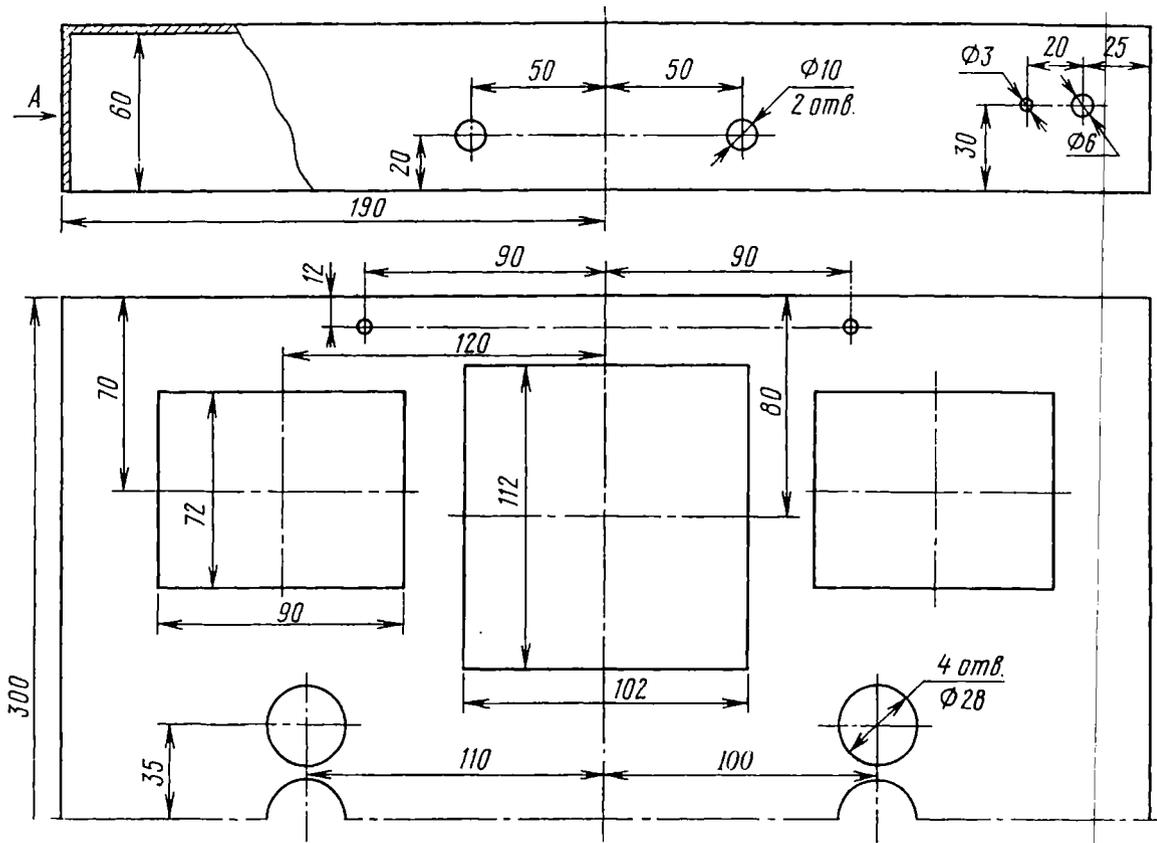
Рис. 27. Плата выпрямителей блока питания

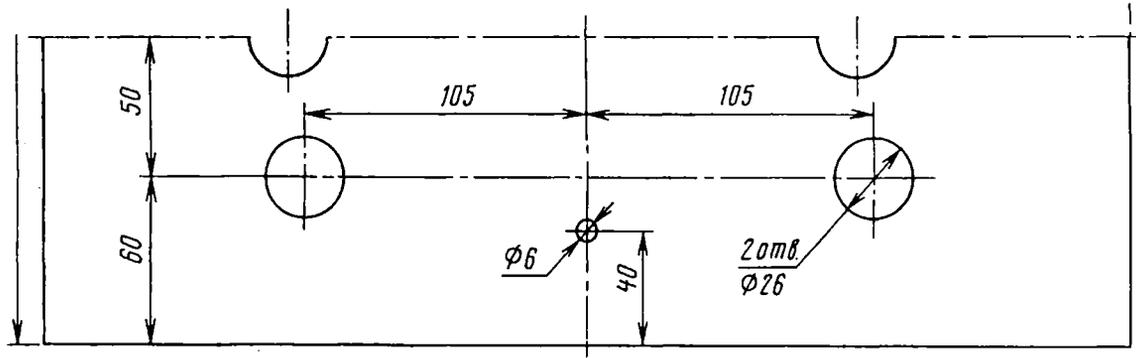




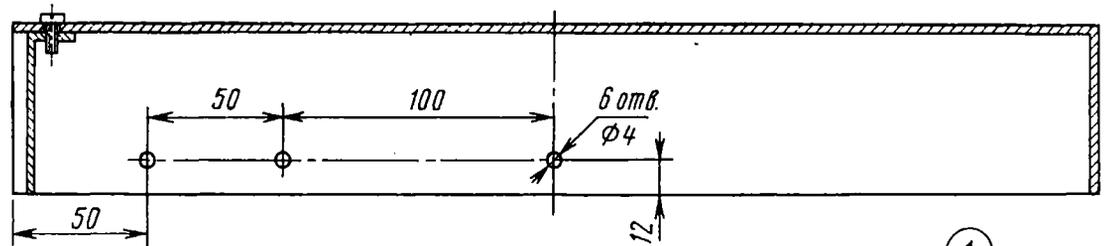
**Рис. 28. Компоновочный чертеж усилителя:**

- 1 – крышка корпуса; 2 – днище корпуса; 3 – задняя стенка; 4 – выходной трансформатор;  
 5 – плата усилителя; 6 – силовой трансформатор; 7 – плата выпрямителей;  
 8 – регулятор громкости; 9 – монтажная стойка; 10 – гнездо предохранителя;  
 11 – пластина крепления выходного трансформатора; 12 – разъем выходной;  
 13 – разъем входной; 14 – тумблер питания





*Вид по А*



1

Рис. 29. Чертеж корпуса усилителя:  
1 – крышка; 2 – днище; 3 – задняя стенка

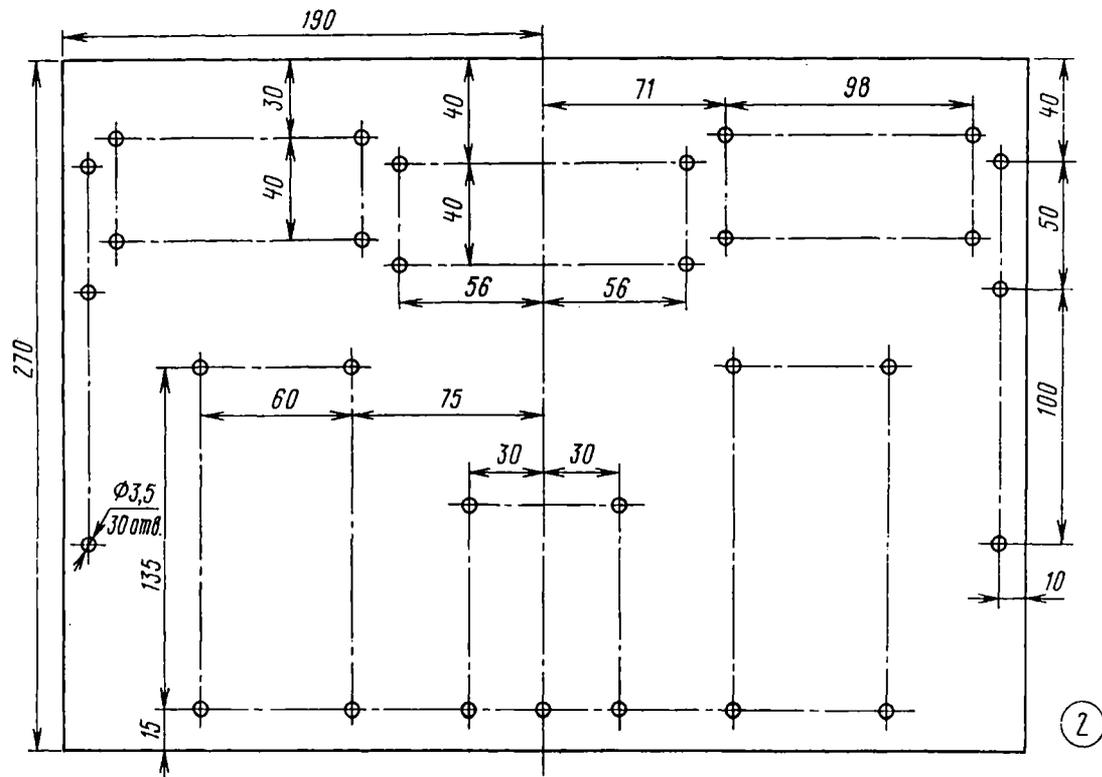


Рис. 29. (Продолжение)

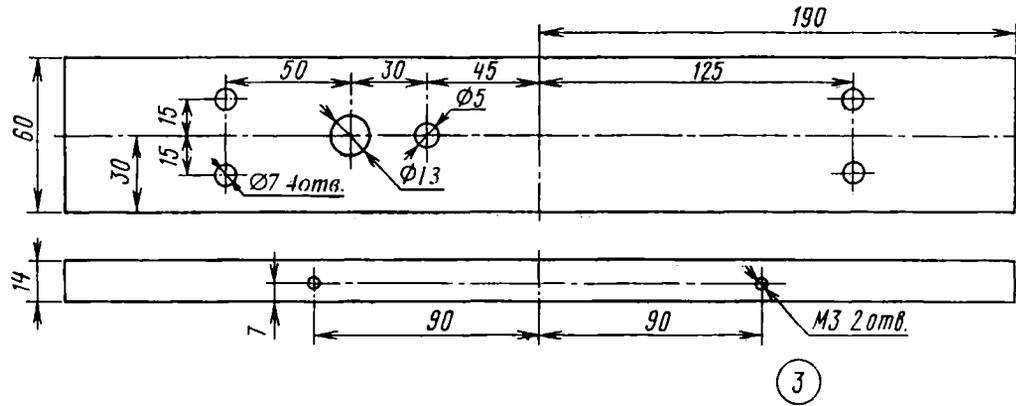


Рис. 29. (Окончание)

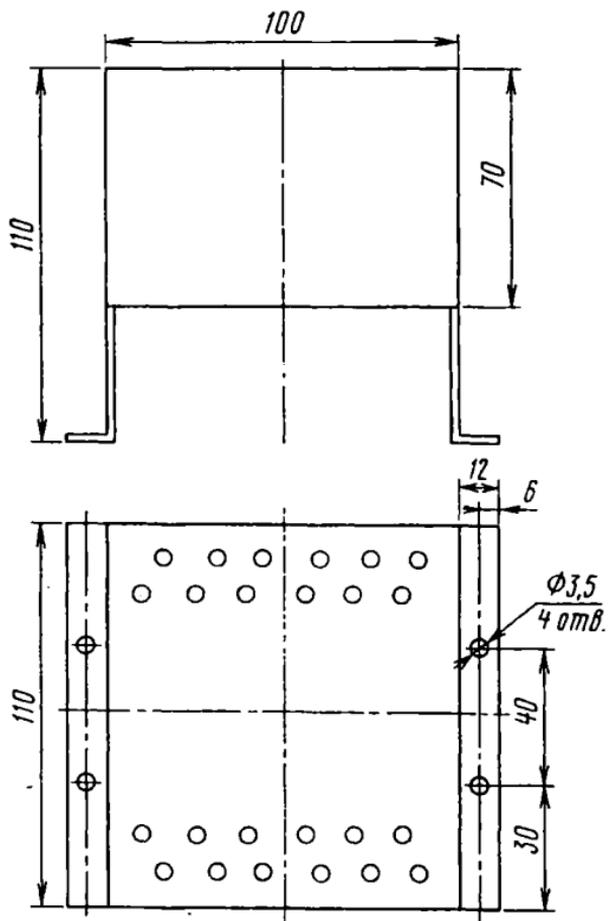


Рис. 30. Чертеж кожуха силового трансформатора

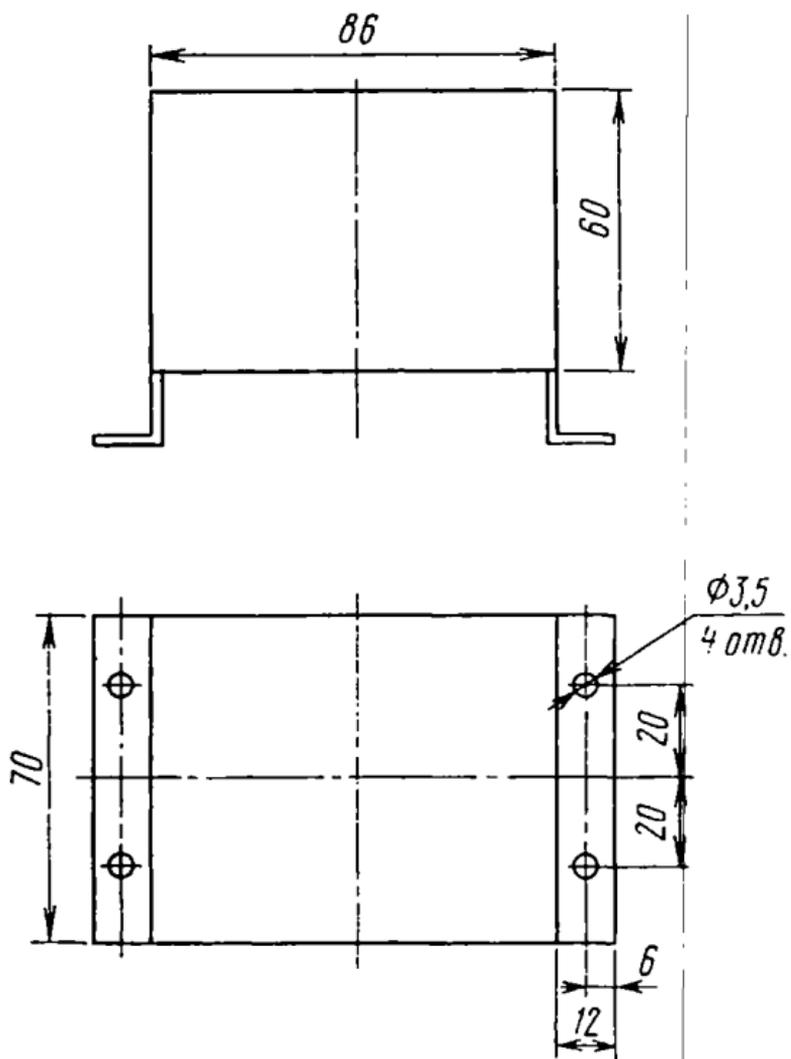


Рис. 31. Чертеж кожуха выходного трансформатора

опять первичная и опять вторичная. Секции первичной обмотки соединены последовательно, а вторичной – параллельно. Сечение сердечника  $5,75 \text{ см}^2$ .

Для снижения перекрестных искажений и наводок все каскады усилителя, входные и выходные цепи соединены с источником питания отдельными проводниками, что условно показано на схеме рис.24 обозначениями О1-О6. Объединение общих проводов не допускается. Соединение регулятора громкости с входными разъемами и с платами выполнено незкранированными витыми парами. Эти пары оказывают влияние на АЧХ усилителя. Подбором числа витков и длины витых пар корректируется АЧХ усилителя в области средних и высших частот. Экранировать входные провода не рекомендуется, так как усилитель заметно теряет в "прозрачности" звука. В качестве регулятора громкости использован сдвоенный переменный резистор типа СПЗ-4ВМ номиналом 470 кОм. Резисторы этого типа обладают заметным преимуществом в передаче звука по сравнению с резисторами других типов.

На рис.28 приведен компоновочный чертеж усилителя, а на рис.29 – чертеж корпуса. В домашних условиях корпус может быть изготовлен из фольгированного текстолита, при этом отдельно вырезаются верхняя, боковые и передняя стенки корпуса и спаиваются между собой. Задняя стенка для удобства делается съемной и крепится к верхней крышке с помощью металлических уголков с резьбой. Днище корпуса несет на себе массивные трансформаторы и должно обладать достаточной прочностью. Его можно изготовить из дюралевой пластины толщиной 3 мм или в крайнем случае из 10-миллиметровой многослойной фанеры. На чертеже днища корпуса не указаны отверстия для крепления силового трансформатора, так как расстояния между этими отверстиями и их размеры определяются типом применяемого трансформатора. Верхняя часть корпуса крепится к днищу с помощью металлических уголков с резьбой. После изготовления корпус окрашивается аэрозольной автоэмалью.

Выходные трансформаторы ТВЗ-1-6 крепятся загибанием лапок, имеющихся на обойме трансформатора, к специальной пластине из мягкого металла или текстолита, а затем вместе с кожухом привинчиваются к днищу корпуса. Силовой трансформатор устанавливается на днище и накрывается экранирующим кожухом. Чертежи кожухов трансформаторов приведены на рис. 30–31.

Корпус усилителя и днище, если они изготовлены из металла и фольгированного текстолита, должны быть соединены с общей точкой заземления у минусового вывода конденсатора фильтра выпрямителя.

После изготовления корпуса устанавливаются силовой и выходные трансформаторы и плата выпрямителей. Перед подключе-

нием плат усилителей необходимо проверить питающие напряжения на выходе выпрямителей и накальных обмоток. Напряжение накала не должно превышать номинальное значение более чем на 10%, так как при повышении напряжения накала резко возрастает интенсивность отказа ламп и изменяются основные параметры лампы (крутизна характеристики, внутреннее сопротивление и др.).

После этого присоединяются платы усилителей обоих каналов. При этом резисторы регулировки тока покоя устанавливаются на минимальное сопротивление. Платы усилителей присоединяются к плате выпрямителей пайкой. Применение внутри усилителя разъемов недопустимо из-за того, что они являются источником повышенного шума и наводок.

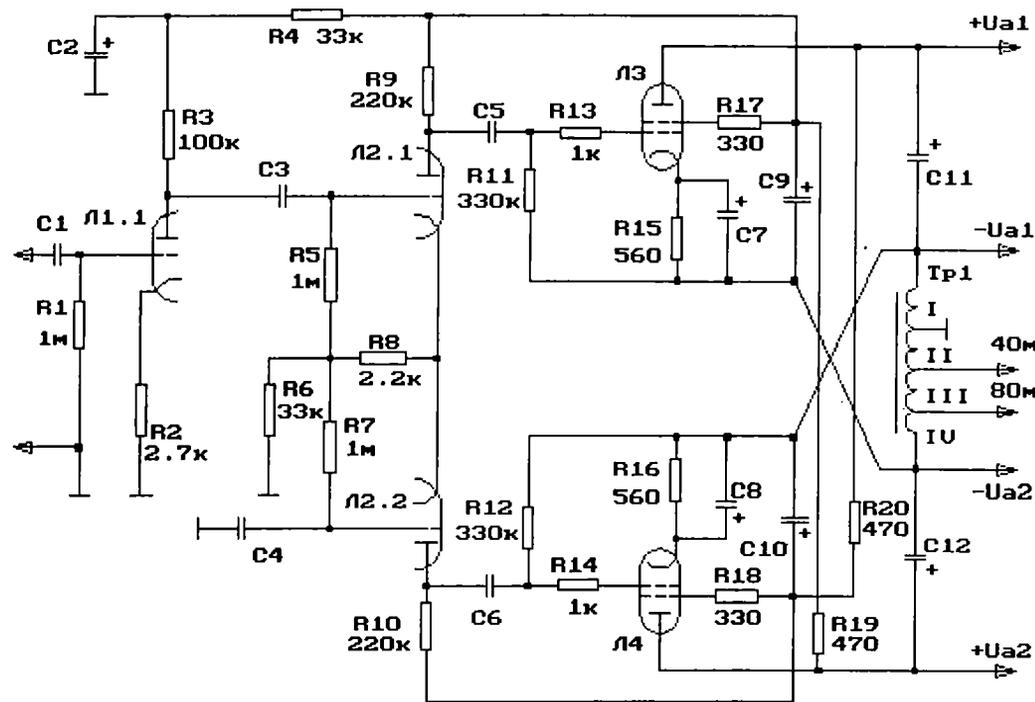
Из-за того, что усилители питаются от одного источника питания, наблюдается взаимная зависимость их токов покоя, поэтому рекомендуется проводить регулировку усилителя в следующей последовательности: сначала поочередно установить токи покоя обоих усилителей около 55 мА, контролируя токи по падению напряжений на резисторах R20 и добиваясь минимальной разницы. Затем установить на анодах выходных ламп нулевое падение напряжения с помощью балансировочного потенциометра и опять уравнять токи покоя усилителей.

После окончания регулировки устанавливаются входные и выходные разъемы, тумблер питания и регулятор громкости. В отверстие рядом с тумблером устанавливается светодиод и подключается к цепи накала через резистор сопротивлением 510 Ом.

Предложенную схему усилителя можно немного усовершенствовать, если в качестве фазоинвертора применить фазоинвертор на основе балансного каскада по схеме на рис.7. В этом случае благодаря большому усилению фазоинвертора исключаются входной каскад и один разделительный конденсатор, что благоприятно скажется на величине фазовых искажений на низших частотах.

#### **4. МОСТОВОЙ ДВУХТАКТНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТЬЮ 25Вт**

Одной из главных проблем, с которой сталкивается разработчик ламповых усилителей, является изготовление выходных трансформаторов. В то время как силовой трансформатор должен лишь обеспечивать необходимые напряжения и токи и может быть намотан, в крайнем случае даже вручную, выходной трансформатор оказывает огромное влияние на характеристики усилителя. Способ намотки обмоток, размеры сердечника, даже толщина пластин сердечника и толщина прокладок между обмотками – все влияет на такие важные параметры усилителя, как выходная мощность, полоса пропускания частот и нелинейные искажения.



- |                             |                     |                     |
|-----------------------------|---------------------|---------------------|
| C1, C3, C5, C6 – 0,068×300B | C7, C8 – 470,0×35B  | Л1 – 6H8C           |
| C4 – 0,22×300B              | C9, C10 – 47,0×400B | Л2 – 6H9C           |
| C2, C11, C12 – 47×350B      |                     | Л3, Л4 – 6П6C(6П3C) |

Рис. 32. Мостовой усилитель мощности

Желание сделать выходной трансформатор менее критичным к качеству его изготовления или вообще отказаться от его применения привело к появлению схем мостовых усилителей, в которых выходные лампы по постоянному току включены последовательно, а по переменному – параллельно. Поскольку выходные лампы в такой схеме работают в режиме катодного повторителя, а постоянная составляющая на нагрузке исключена, появляется возможность согласовать сопротивление нагрузки с помощью простого автотрансформатора, имеющего всего одну обмотку.

Схема такого мостового усилителя мощности приведена на рис.32.

Входной каскад на лампе Л1.1 построен по схеме с общим катодом и особенностей не имеет. Его назначение – обеспечить необходимый уровень чувствительности. Если источник сигнала имеет выходное напряжение не менее 4 В, то входной каскад можно исключить и подавать входной сигнал прямо на вход фазоинвертора.

Фазоинвертор (лампа Л2) построен на основе балансного каскада аналогично изображенному на рис.7. Такой фазоинвертор отличается большим усилением и симметричностью разделенного сигнала. При желании иметь в усилителе балансный вход типа XLR, обладающий большей помехозащищенностью по сравнению с однотактным входом RCA, можно убрать конденсатор, заземляющий второй вход фазоинвертора, и подать на него сигнал.

Выходной каскад выполнен на двух лучевых тетрадах Л3 и Л4. В качестве выходных ламп можно применять лампы 6П6С или 6П3С. С первыми выходная мощность составит около 12–13 Вт, со вторыми – до 25 Вт на канал. Еще более увеличить выходную мощность можно, применив лампы 6П27С, которые имеют максимальное анодное напряжение до 800 В и гораздо больший ток анода. Но для этого придется увеличить мощность силового трансформатора и изменить конструкцию усилителя.

Из-за параллельного включения ламп по переменному току оптимальное сопротивление нагрузки уменьшается в 4 раза и составляет для данной схемы около 900 Ом.

Выходной автотрансформатор намотан на сердечнике от стандартного трансформатора ТП-208-6 сечением 7,0 см<sup>2</sup>. Первичная обмотка имеет 650 витков провода диаметром 0,33 мм, вторичная – 84, третья – 35 витков провода диаметром 1,0 мм, четвертая – 531 виток провода диаметром 0,33 мм. Все обмотки должны быть намотаны в одну сторону. Их расположение на катушке показано на рис.33.

Плечи выходного каскада питаются от отдельных выпрямителей. При изготовлении двухканального усилителя потребуются четыре обмотки анодного питания, что необходимо учитывать при подборе трансформатора.

Схема блока питания двухканального усилителя приведена на рис. 34.

Силовой трансформатор намотан на сердечнике сечением не менее  $16 \text{ см}^2$  и имеет восемь обмоток. Первичная обмотка имеет 650 витков провода диаметром 0,5 мм; вторая, третья, четвертая и пятая обмотки имеют по 700 витков провода диаметром 0,2 мм; накальные обмотки – шестая и седьмая – имеют по 19 витков провода диаметром 1,0 мм; восьмая обмотка имеет 36 витков провода диаметром 0,2 мм и используется для питания устройства задержки включения анодного питания.

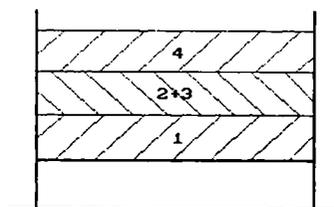


Рис. 33. Расположение обмоток выходного трансформатора

Устройство задержки включения питания выполнено по схеме на рис.19. Для двухканального усилителя это устройство должно иметь два реле типа РЭС22. В зависимости от рабочего напряжения реле их обмотки включаются параллельно или последовательно.

Выпрямители и устройство задержки включения питания собраны на общей плате, рисунок которой приведен на рис. 35.

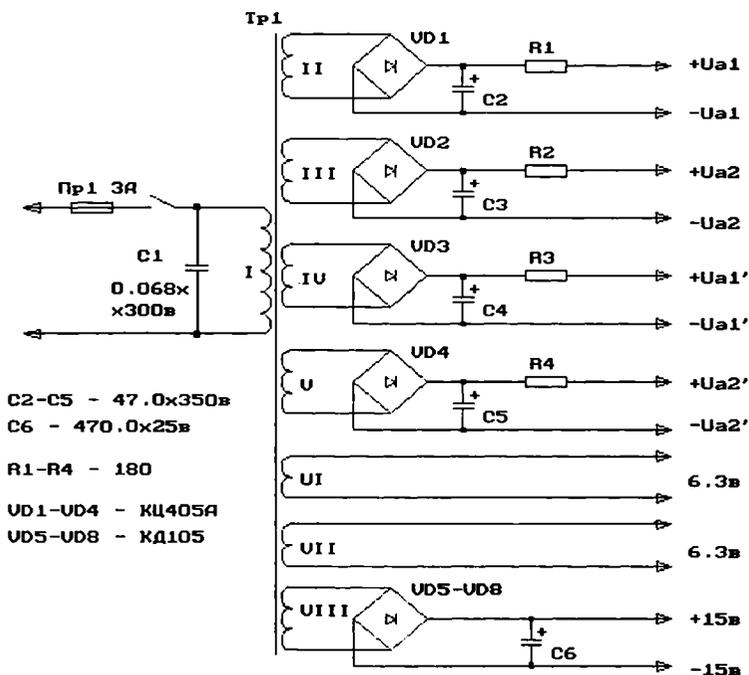


Рис. 34. Блок питания

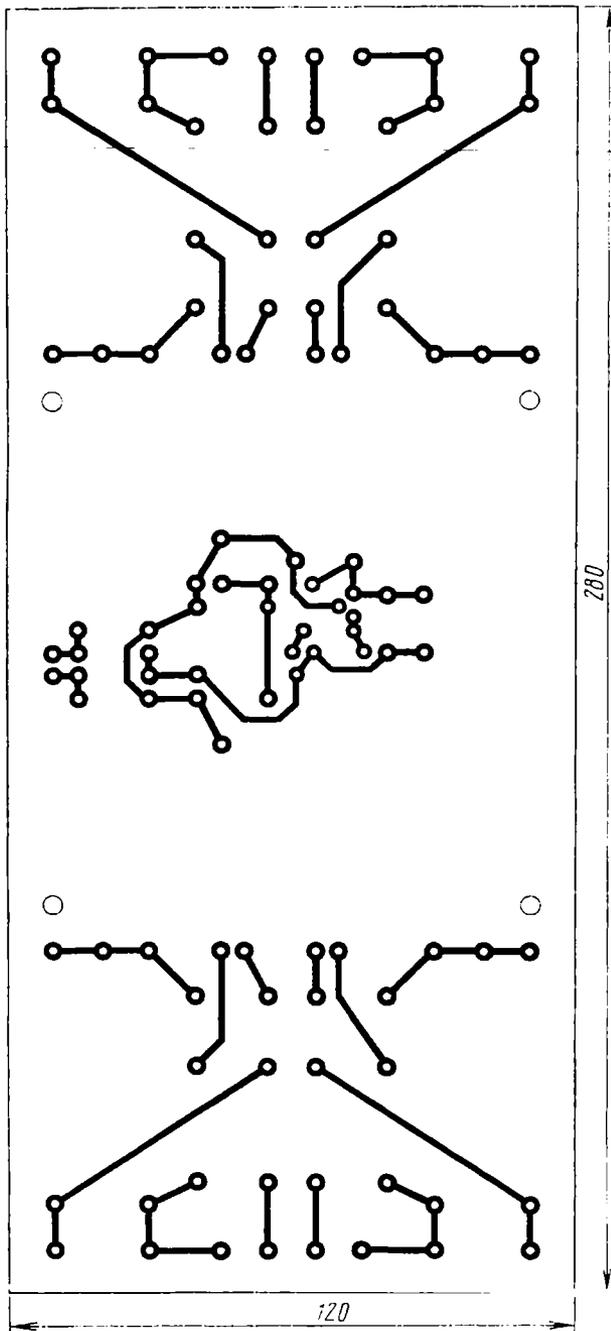
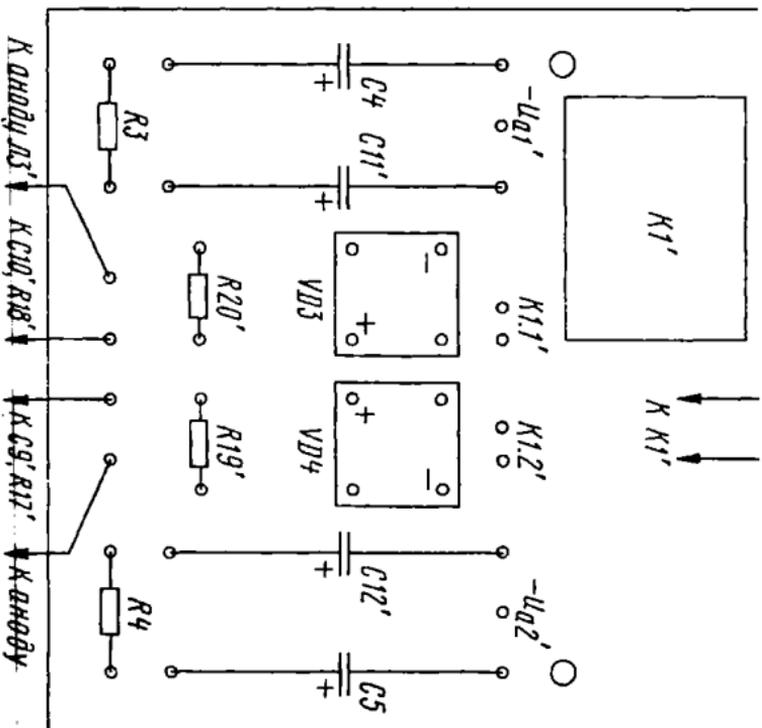
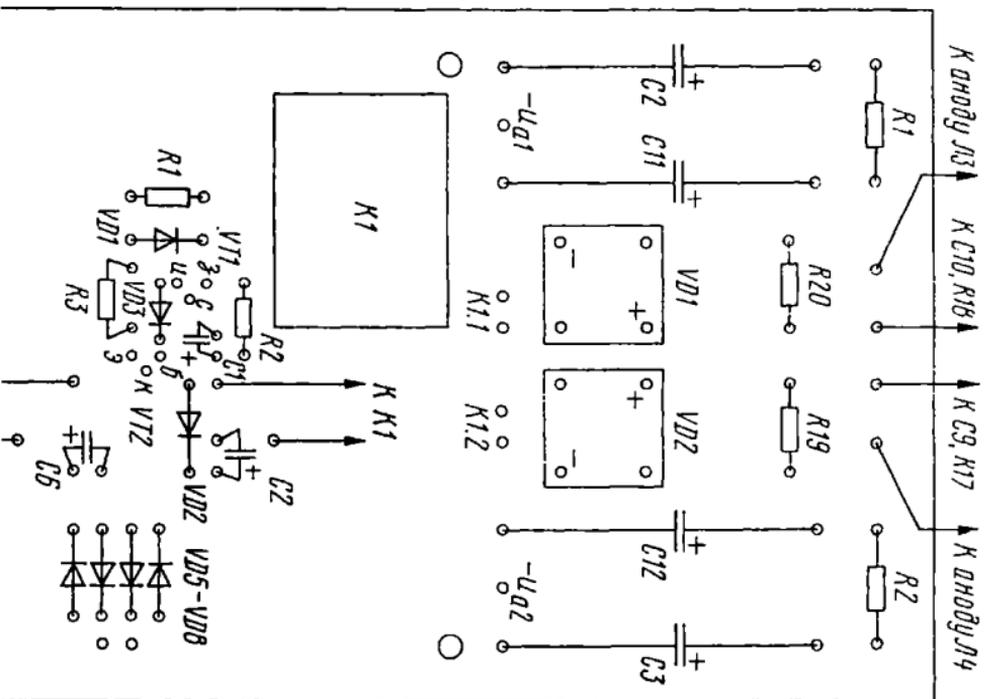


Рис. 35. Плата блока питания





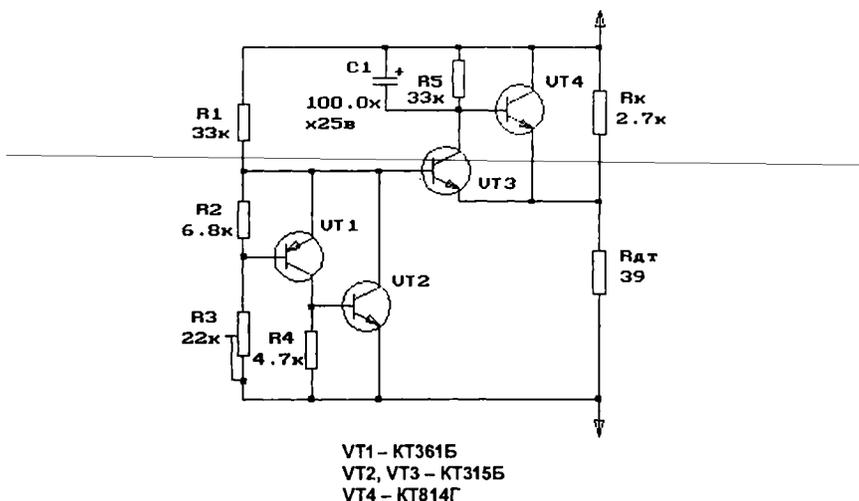


Рис. 36. Стабилизатор тока покоя

Как известно, главным недостатком ламп по сравнению с транзисторами является довольно низкая стабильность параметров. Так, ресурс большинства ламп составляет 500–1000 часов непрерывной работы. За этот период значительно изменяются основные параметры лампы – уменьшается крутизна характеристики, падает выходная мощность, изменяется внутреннее сопротивление. Особенно неприятно этот эффект проявляется в двухтактных выходных каскадах, так как изменение параметров ламп приводит к разбалансировке плеч двухтактного каскада, появлению постоянного тока через выходной трансформатор и увеличению нелинейных искажений. Стабилизация анодного питания в данном случае не помогает, поскольку лампа по постоянному току представляет собой сопротивление и изменение внутреннего сопротивления лампы вызывает нестабильность тока покоя. Большинство усилителей либо регулируется только один раз при изготовлении, либо имеет подстроечные элементы для установки тока покоя в течение срока службы усилителя, что требует периодического проведения профилактических работ с применением специального оборудования и некоторой квалификации от пользователя ламповой аппаратуры.

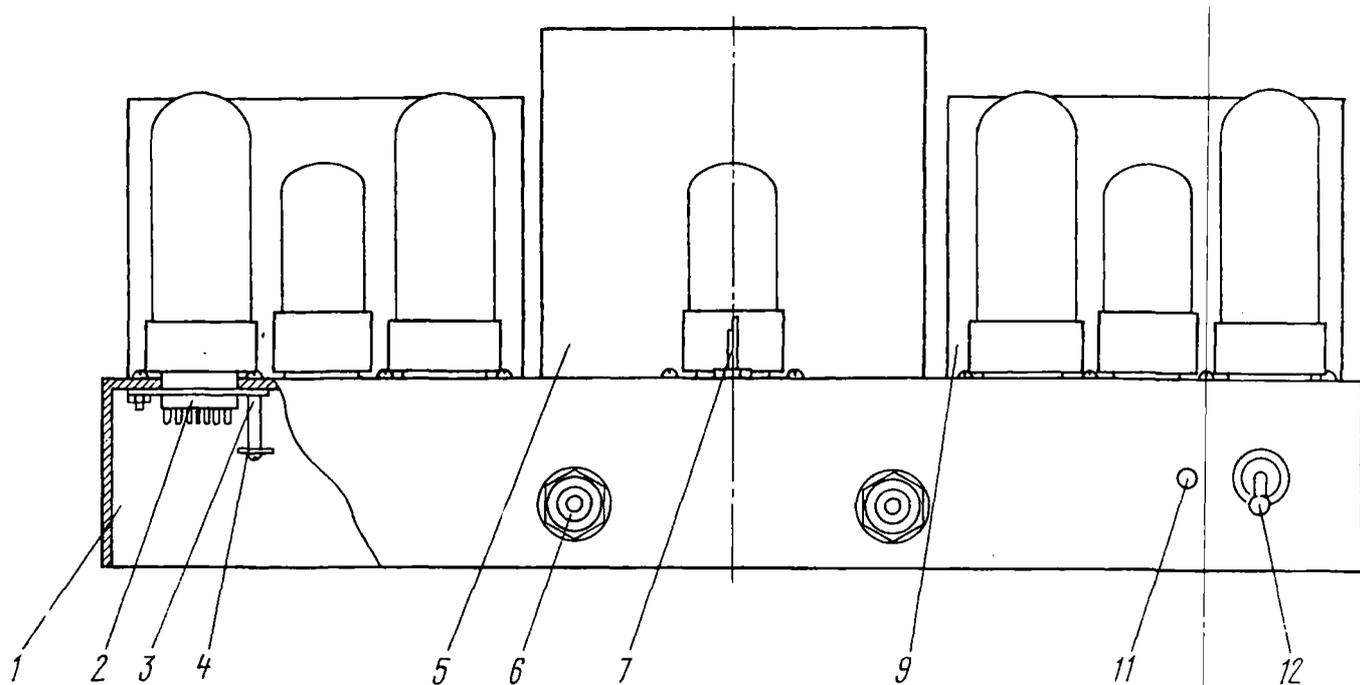
Для описанного усилителя мною было разработано простое устройство, автоматически поддерживающее заданный ток покоя выходных ламп. Схема этого устройства приведена на рис. 36.

Устройство представляет собой стабилизатор тока и состоит из нескольких функциональных узлов. Резистор  $R_{дт}$  представляет собой датчик тока, на котором создается напряжение падения, про-

порциональное току покоя лампы. На транзисторах VT1 и VT2 собран маломощный источник опорного напряжения, с помощью которого задается ток покоя лампы. Данная схема источника опорного напряжения отличается малым потреблением тока (0,5–0,7 мА), что немаловажно, так как ток источника опорного напряжения не проходит через датчик тока и, следовательно, приводит к небольшой погрешности установки тока покоя. При желании источник опорного напряжения можно заменить светодиодом, который будет индцировать нормальный режим лампы. В этом случае нужно применить светодиод с рабочим током не более 1 мА. На составном транзисторе VT3VT4 собрано устройство сравнения и управления током. При уменьшении тока покоя лампы уменьшается падение напряжения на резисторе датчика тока  $R_{дт}$ . Поскольку напряжение на базе транзистора VT3 стабилизировано источником опорного напряжения, уменьшение напряжения на эмиттере VT3 вызывает открывание транзисторов VT3 и VT4, которые шунтируют резистор  $R_k$  и уменьшают общее сопротивление в цепи катода лампы, тем самым увеличивая ее анодный ток. При повышении анодного тока транзисторы VT3 и VT4 закрываются и увеличивают сопротивление в цепи катода. Для исключения влияния переменной составляющей катодного тока на постоянный ток покоя резистор R5 зашунтирован конденсатором большой емкости C1.

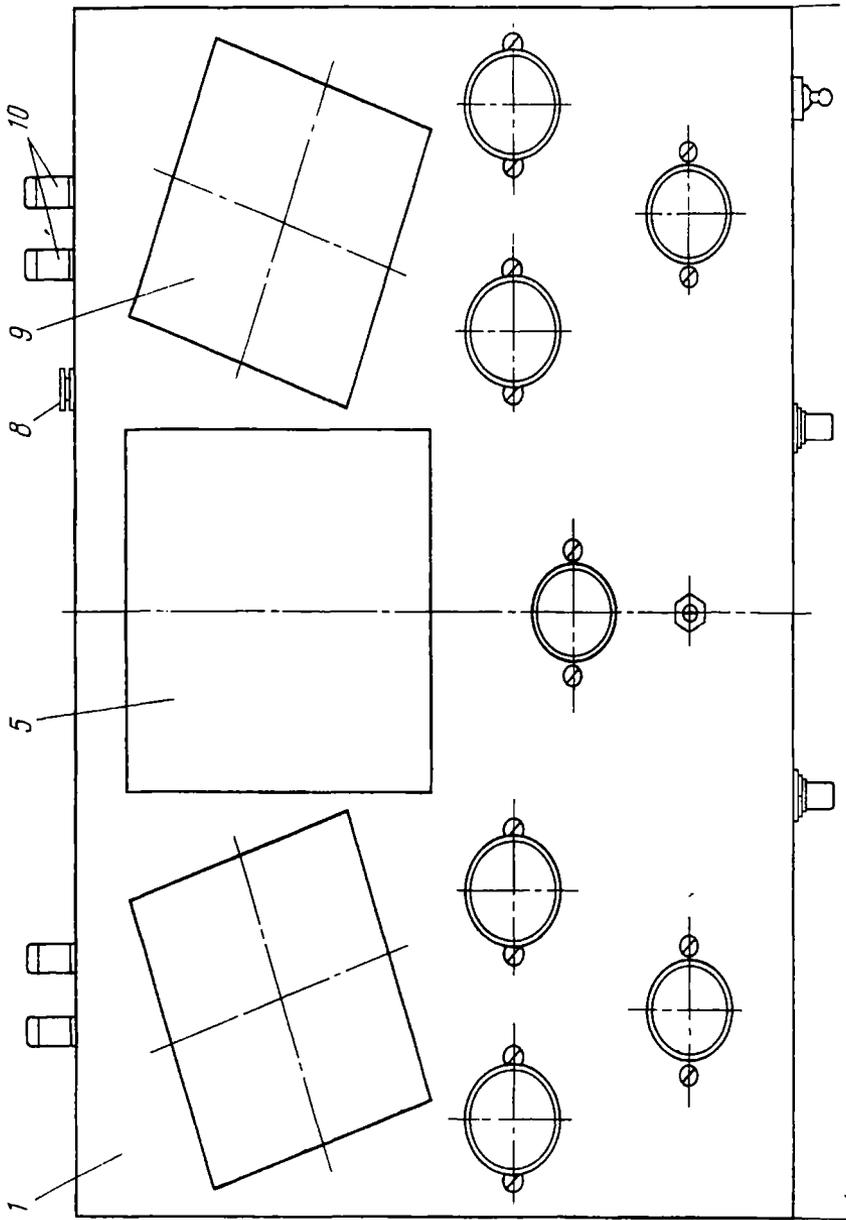
Это устройство включается в катодную цепь лампы вместо резистора автоматического смещения и питается за счет напряжения смещения. При испытании с несколькими лампами типа 6П6С и 6ПЗС такой стабилизатор тока обеспечивал постоянство тока покоя с точностью до 2%. По переменному току это устройство зашунтировано конденсатором большой емкости и не оказывает никакого влияния на усиление звуковых частот. Для каждой выходной лампы изготавливается такой стабилизатор тока на небольшой печатной плате и устанавливается вместо катодного резистора. Установив ток покоя выходного каскада равным 25–30 мА, можно использовать усилитель в классе А или АВ, устанавливая в выходном каскаде соответственно лампы 6П6С или 6ПЗС. Никаких регулировок при замене ламп при этом не нужно.

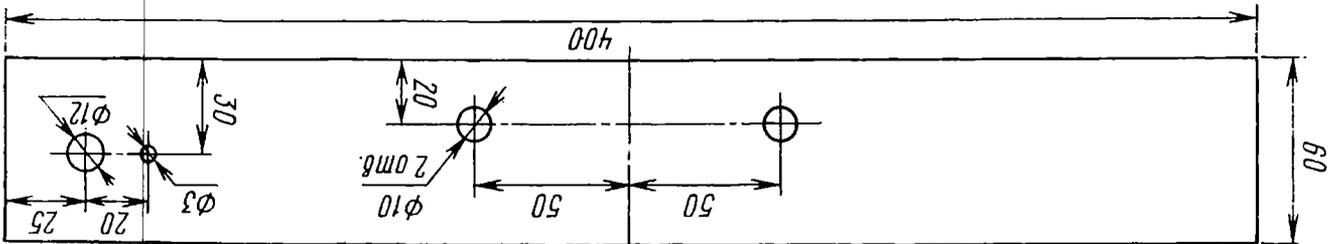
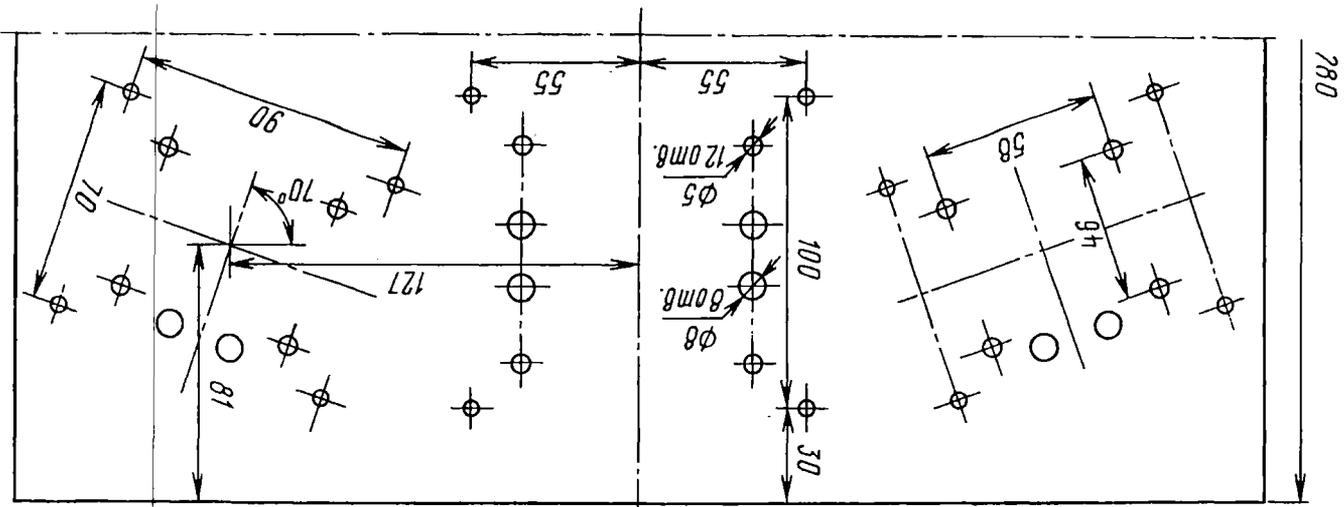
Все трансформаторы и лампы установлены непосредственно на корпусе усилителя. Трансформаторы закрыты кожухами, которые также крепятся к корпусу. Установочные размеры силового трансформатора зависят от конструкции самого трансформатора и поэтому не указаны на чертеже корпуса усилителя. Около всех трансформаторов должны быть просверлены отверстия для прокладки проводов. Их размеры и положение также достаточно произвольны. Плата блока питания крепится в подвале корпуса под силовым трансформатором на винтах крепления кожуха трансформатора. Монтаж каскадов усилителя выполнен навесным способом на выводах ламповых панелей. На винтах крепе-



**Рис. 37. Компоночный чертеж усилителя:**

- 1 – корпус; 2 – ламповая панель; 3 – стойка монтажная; 4 – планка монтажная; 5 – силовой трансформатор;  
 6 – разъем входной; 7 – регулятор громкости; 8 – гнездо предохранителя; 9 – выходной трансформатор;  
 10 – разъем выходной; 11 – светодиод; 12 – тумблер питания





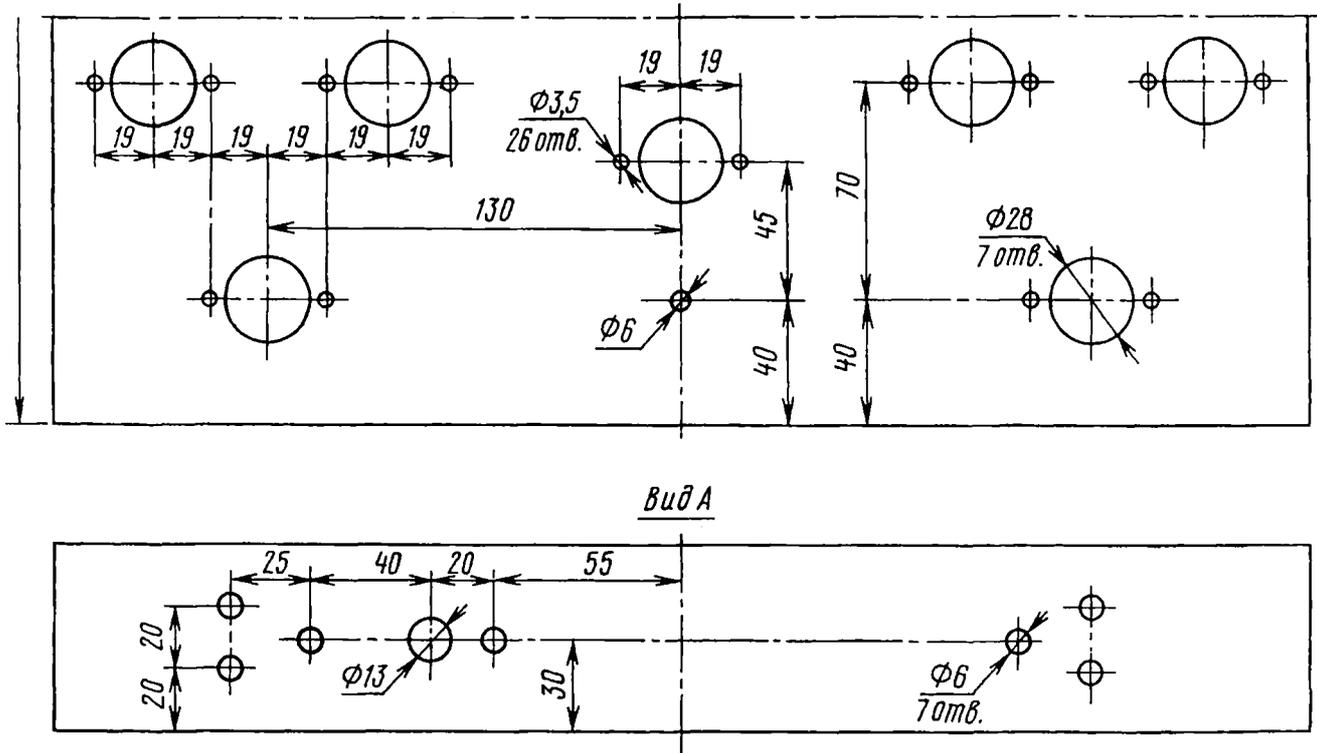


Рис. 38. Чертеж корпуса усилителя

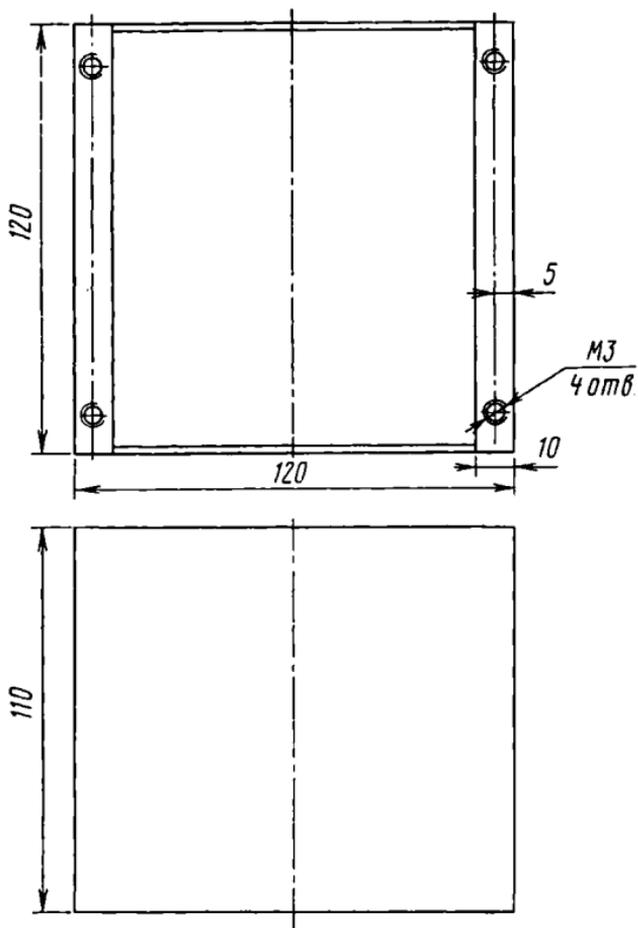


Рис. 39. Чертеж кожуха силового трансформатора

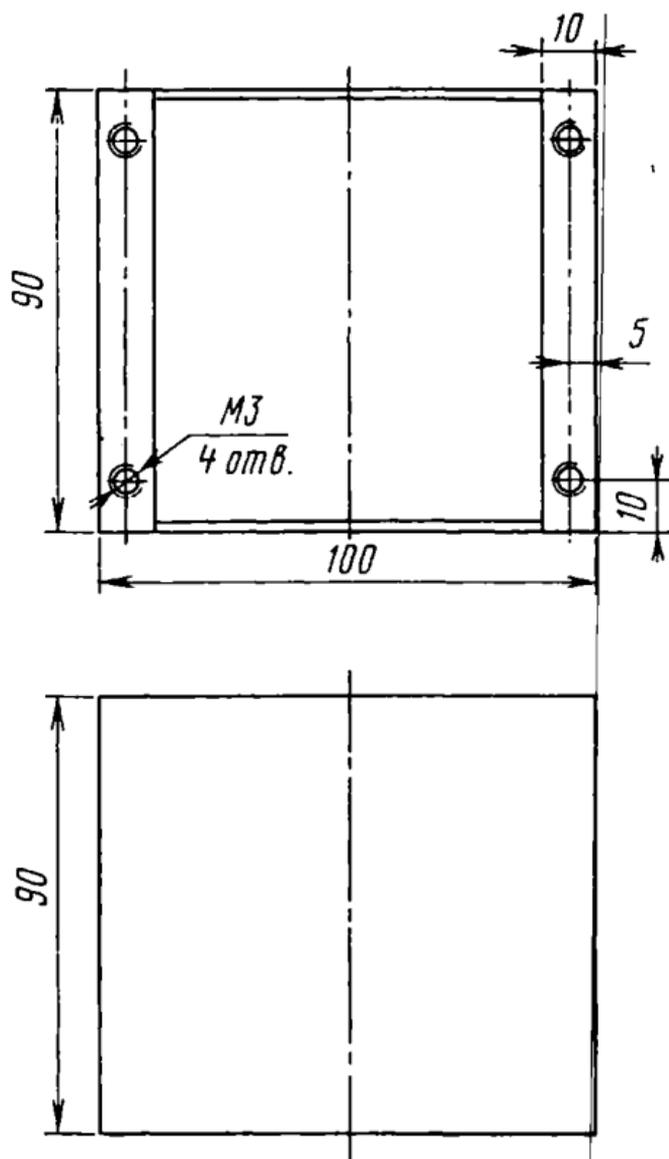


Рис. 40. Чертеж кожуха выходного трансформатора

ния ламповых панелей закреплены дополнительные контактные пластины из текстолита, на которых резакон прорезаны контактные площадки. Компонировочный чертеж усилителя приведен на рис.37. На рис.38–40 приведены чертежи корпуса и кожухов трансформаторов.

Порядок монтажа и регулировки усилителя такой же, что и у предыдущего усилителя.

## 5. ТЕЛЕФОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Несомненно, одним из самых простых способов для того, чтобы убедиться в преимуществах лампового звука, является прослушивание музыки через наушники с помощью простого и недорогого усилителя, обеспечивающего тем не менее высококачественное воспроизведение.

Прослушивание музыкальных программ через головные телефоны пользуется большой популярностью прежде всего из-за того, что в этом случае достичь высокого качества звука гораздо проще, чем при использовании громкоговорителей. К тому же цена высококачественных наушников на порядок ниже, чем у акустических систем. В принципе для подключения стереонаушников можно использовать любой описанный аппарат, сделав дополнительный вывод от вторичной обмотки выходного трансформатора. Однако вряд ли целесообразно использовать мощный усилитель, когда необходимая выходная мощность составляет всего 0,1–0,01 Вт. Гораздо проще применить специально разработанный для наушников усилитель, задачей которого является не столько усиление мощности, сколько усиление сигнала по току и согласование с сопротивлением нагрузки.

Учитывая, что сопротивление большинства наушников составляет 32–100 Ом, можно применить бестрансформаторный выходной каскад и тем самым снизить габариты и массу усилителя, улучшить технологичность и простоту изготовления и добиться более высокого качества воспроизведения.

На рис.41 изображена схема однотактного бестрансформаторного усилителя для наушников. Все каскады усилителя работают в режиме А.

Выходной каскад представляет собой катодный повторитель с активной нагрузкой и выполнен на двойном триоде 6Н6П. Для уменьшения выходного сопротивления до 32 Ом выходной каскад охвачен положительной обратной связью через конденсатор С4. Глубина обратной связи и величина выходного сопротивления зависят от величины сопротивления R7. Увеличивая величину сопротивления, можно уменьшить выходное сопротивление усилителя, но при этом будет увеличиваться неравномерность АЧХ усилителя.

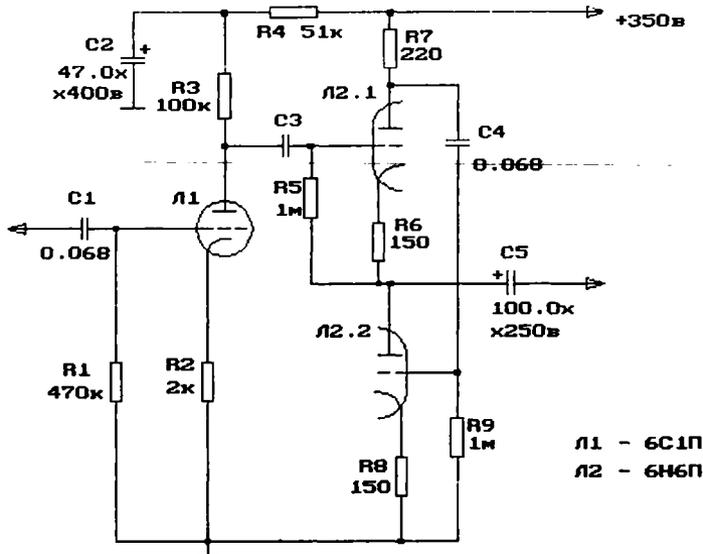


Рис. 41. Телефонный усилитель

Входной каскад сделан на триоде с небольшим коэффициентом усиления 6С1П. Уровень шумов телефонного усилителя должен быть сведен к минимуму, так как шумы усилителя при прослушивании не маскируются посторонними звуками и поэтому особенно заметны. По этой причине коэффициент усиления входного каскада нужно делать небольшим и применять многозвенные фильтры по цепям питания.

Триод 6С1П можно заменить более распространенным пентодом 6Ж1П в триодном включении. Для этого экранирующую сетку пентода нужно подключить к аноду через резистор сопротивлением 1кОм. Характеристики пентода 6Ж1П в триодном включении близки к характеристикам триода 6С1П.

Оба канала стереофонического усилителя питаются от общего выпрямителя, схема которого приведена на рис. 42.

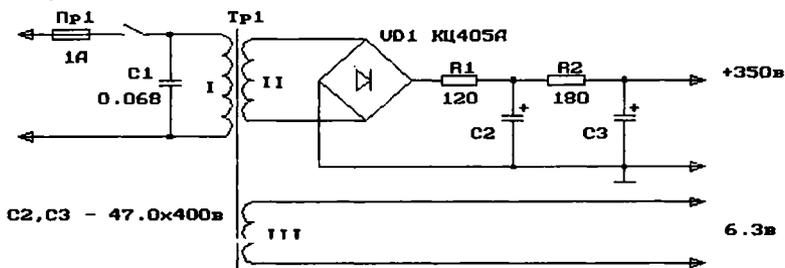


Рис. 42. Блок питания телефонного усилителя

В качестве силового трансформатора можно применить любой стандартный или самодельный трансформатор с напряжением вторичной обмотки 250–300 В и одной накальной обмоткой, рассчитанной на ток накала 1,8–2 А. Сердечник трансформатора должен иметь сечение 5,5–6,5 см<sup>2</sup>.

Напряжение на катоде одного из триодов выходного каскада составляет около 150–200 В, поэтому напряжение антифонной цепочки, подключенной к цепи накала, лучше повысить примерно до 50 В.

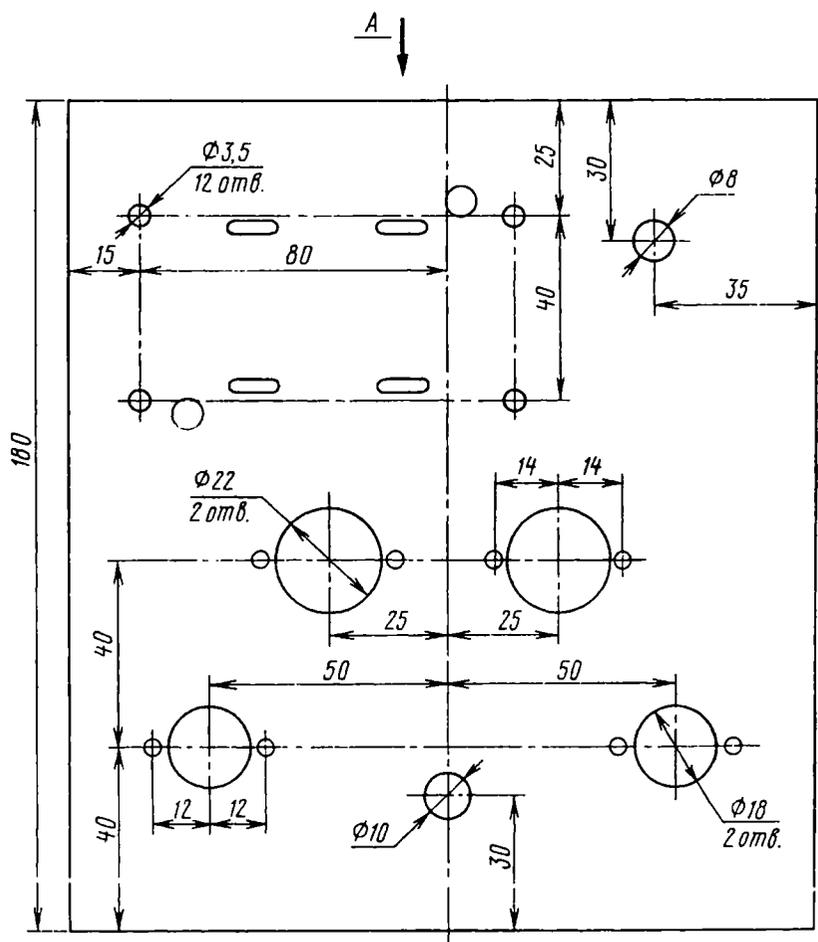
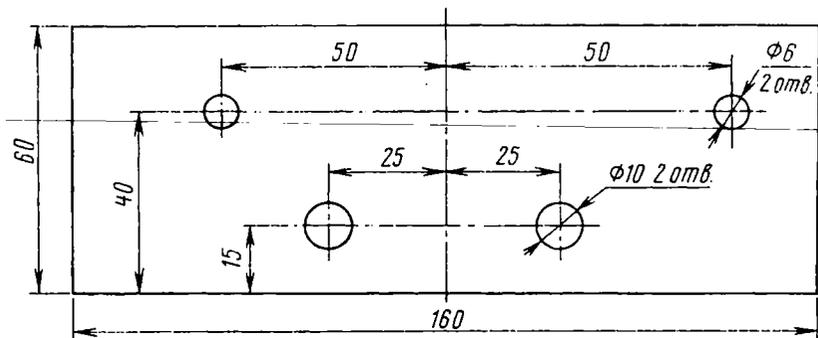
Трансформатор и панели ламп крепятся на корпусе сверху. Монтаж усилителей и выпрямителя – навесной. Выпрямительный мостик КЦ405 крепится винтом к задней стенке корпуса. Для этого в середине корпуса выпрямительного мостика нужно аккуратно просверлить отверстие диаметром 3,5 мм.

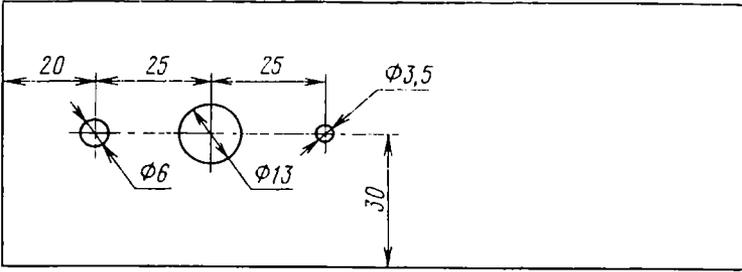
Чертеж корпуса усилителя приведен на рис. 43. На передней стенке корпуса устанавливаются входные разъемы и отдельные регуляторы громкости. Выходное гнездо типа «Jack» устанавливается в отверстие на верхней стенке между входными лампами усилителя. В отверстие рядом с силовым трансформатором устанавливается тумблер питания. На задней стенке корпуса имеются отверстия для прокладки сетевого кабеля, крепления гнезда предохранителя и выпрямляющего мостика. Установочные размеры силового трансформатора не указаны на чертеже, так как они целиком определяются конструкцией трансформатора. Кроме установочных отверстий рядом с силовым трансформатором находятся два отверстия для укладки проводов, идущих к обмоткам трансформатора. Ламповые панельки должны быть типа ПЛК-9-Э и ПЛК-7-Э. Эти панельки имеют фланцы для крепления с размерами, указанными на чертеже. Применение экранов для выходных ламп необязательно, для входных – желательно.

Регулировка усилителя сводится к установке тока покоя выходного каскада в пределах 20–25 мА подбором резистора автоматического смещения R8.

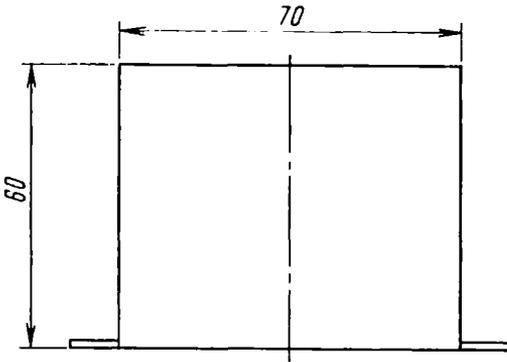
## 6. БУФЕРНЫЙ ПРЕДУСИЛИТЕЛЬ

Высококачественный звуковоспроизводящий комплекс, как правило, состоит из отдельных компонентов, каждый из которых выполняет свою узкую задачу. Так, например, такой комплекс может состоять из CD-транспорта, цифроаналогового преобразователя, усилителя-корректора для магнитного звукоснимателя, каскадной дека, оконечного усилителя и т.д. Это позволяет собирать и модифицировать комплекс по мере возможностей и на вкус пользователя. Однако это приводит к тому, что все компоненты приходится соединять с оконечным усилителем с помощью длинных





1



2

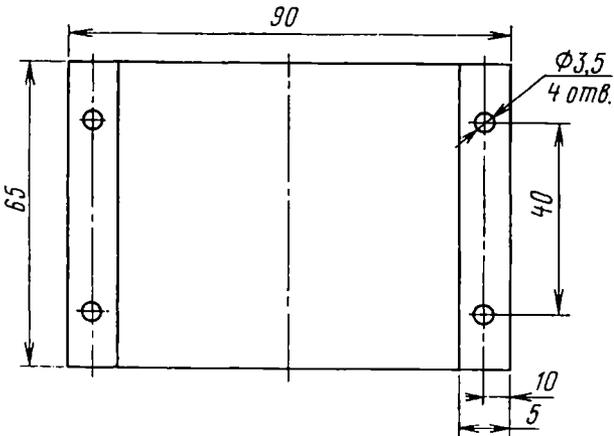


Рис. 43. Чертеж корпуса телефонного усилителя:  
1 – корпус; 2 – кожух трансформатора

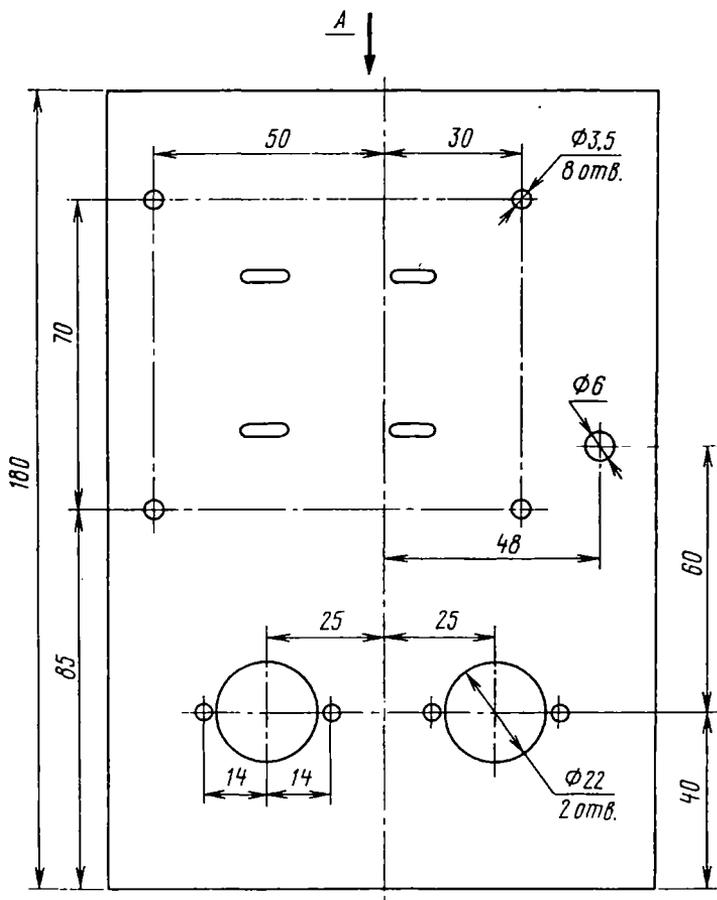
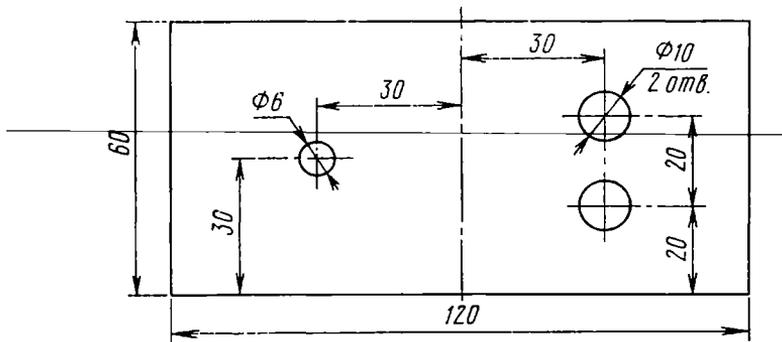
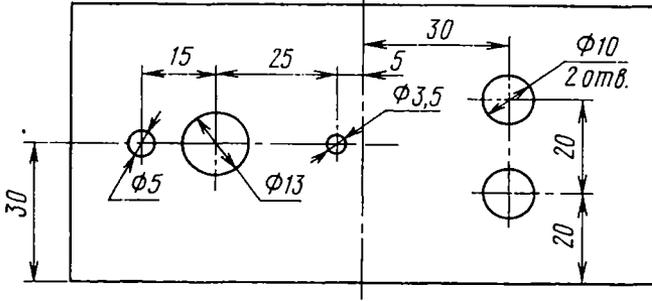
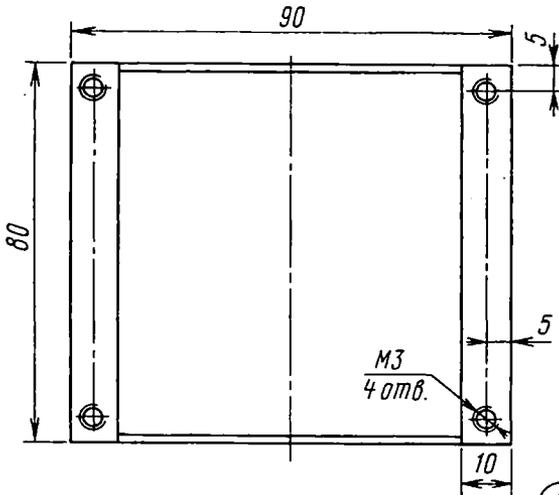


Рис. 44. Чертеж корпуса предусилителя:  
1 – корпус; 2 – кожух трансформатора

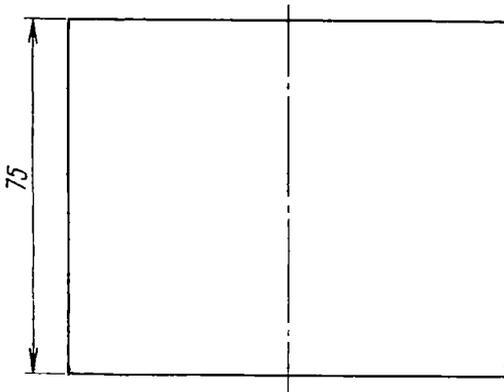
Вид А



1



2



межблочных кабелей, которые могут служить источниками дополнительных шумов и искажений. К тому же входные и выходные сопротивления не всегда оптимально согласованы между собой, из-за чего возникают переходные искажения.

— Задачу согласования выходных и входных сопротивлений с длинными линиями выполняют буферные предусилители; которые могут быть повторителями напряжения или усиливать сигнал.

Предусилитель собран навесным способом в корпусе, чертеж которого приведен на рис. 44.

Предлагаемый буферный предусилитель был использован в комплексе с высококачественным транзисторным услителем "Bryston" и позволил добиться значительного повышения качества звуковоспроизведения (см. рис. 45).

Предусилитель выполнен по схеме катодного повторителя с активной нагрузкой на двойном триоде 6Н23П. Благодаря большой крутизне характеристики этой лампы выходное сопротивление предусилителя составляет 85–100 Ом. Низкое выходное сопротивление предусилителя, шунтируя высокое входное сопротивление последующего усилителя, способствует снижению наводок на соединительный кабель, а высокое входное сопротивление, на порядок большее, чем у транзисторных усилителей, лучше согласуется с выходным сопротивлением источника сигнала и устраняет переходные искажения сигнала.

Предусилитель можно использовать и для усиления входного сигнала. Для этого сигнал нужно подать на сетку нижней по схеме лампы.

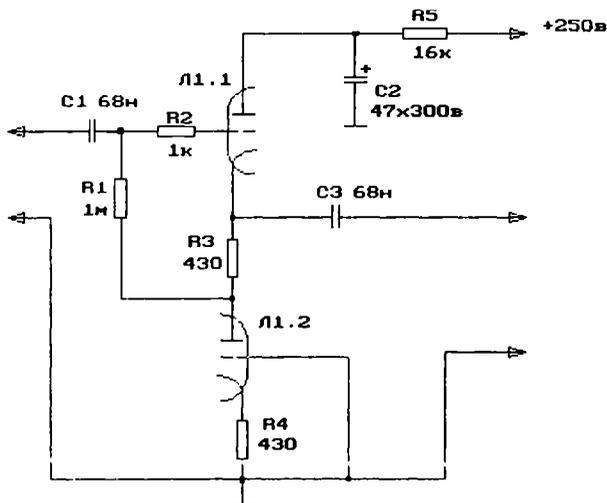


Рис. 45. Буферный предусилитель

Для питания предусилителя используется простейший мостовой выпрямитель и трансформатор с напряжением вторичной обмотки около 200 В.

Ток покоя лампы устанавливается в пределах 8–10 мА.

В качестве регулятора уровня входного сигнала применяется сдвоенный переменный резистор типа СПЗ-4ВМ номиналом 470–1000 кОм, который устанавливается на передней стенке предусилителя, рядом с входными гнездами. Тумблер питания устанавливается на верхней стенке корпуса рядом с силовым трансформатором. На задней стенке крепятся гнездо предохранителя, выпрямляющий мостик блока питания, а также два выходных разъема, аналогичные входным.

## ГЛАВА 3 АКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Качество и параметры акустических систем, несомненно, решающим образом определяют возможность высококачественного звуковоспроизведения. По моему убеждению, акустические системы и весь звуковоспроизводящий комплекс никогда не смогут математически точно воспроизвести звучание записанных инструментов в силу свойств материалов, применяемых при изготовлении динамиков, акустических свойств помещения, искажений, вносимых при записи (компрессия, введение спецэффектов и т.д.), и множества других причин. Поэтому при выборе акустических систем следует ориентироваться на достижение наибольшей комфортности звука и, конечно же, на свой вкус. Один и тот же усилитель может звучать совершенно по-разному при работе на разные колонки, которые тоже имеют свои жанровые предпочтения – одни лучше воспроизводят симфоническую музыку, другие – джаз и рок. Однако все усилия и расходы по подбору акустических систем стоицей вознаграждаются удовольствием, получаемым от прослушивания музыкального произведения.

В последнее время рынок звуковоспроизводящей техники просто наводнен различными моделями зарубежных и отечественных акустических систем, обладающих сколь угодно разными параметрами и назначением. В таких условиях подбор акустических систем, удовлетворяющих ваши вкусы и пристрастия, может стать весьма долгим и кропотливым занятием. Несмотря на весьма широкий спектр предлагаемых моделей, а может быть, благодаря этому, не переводятся и никогда не переведутся люди, занимающиеся самостоятельным изготовлением и доводкой имеющихся моделей акустических систем.

При самостоятельном изготовлении акустических систем приходится принимать компромиссные решения, так как многие требования, предъявляемые к ним, противоречивы.

Идеальным излучателем мог бы быть одиночный широкополосный громкоговоритель, одинаково хорошо воспроизводящий как низкие, так и высокие частоты звукового диапазона. Однако на практике создание такого идеального излучателя совершенно невозможно. Низкочастотные громкоговорители должны иметь диф-

фузор из мягкого материала с большой массой для снижения резонансной частоты, а высокочастотные, наоборот, должны иметь диффузоры с минимальной массой и максимальной жесткостью.

Для обеспечения воспроизведения всего диапазона частот акустические системы делают двух- или трехполосными. Требования к воспроизводящим головкам разные для разных частот.

Одним из основных параметров низкочастотного динамика является резонансная частота, которая однозначно определяет низшую воспроизводимую частоту. Резонансная частота определяется соотношением

$$f_p = 1 / (2 * \pi * \sqrt{(m * c)}),$$

где  $c$  – гибкость подвеса диффузора (см/дин);  $m$  – масса диффузора, звуковой катушки и воздуха, приложенного к диффузору (г).

Как видно из этой формулы, снизить резонансную частоту можно, во-первых, увеличив массу диффузора, во-вторых, увеличив гибкость подвеса. В последние десятилетия разработчики акустической техники шли в основном по первому пути снижения резонансной частоты, увеличивая массу диффузора и звуковой катушки. Однако это приводит к сильному снижению звукового давления, развиваемому головкой, снижению КПД и, как следствие, к необходимости увеличения выходной мощности усилителей.

По закону Ампера сила  $F$ , действующая на проводник в магнитном поле, определяется равенством

$$F = B * L * I,$$

где  $B$  – магнитная индукция;  $L$  – длина проводника;  $I$  – сила тока в проводнике.

С другой стороны, по второму закону Ньютона известно, что

$$F = m * a,$$

где  $m$  – масса диффузора, звуковой катушки и воздуха;  $a$  – колебательное ускорение диффузора с катушкой.

На нижних частотах, в зоне поршневого действия диффузора (до 200–500 Гц), звуковое давление, создаваемое излучателем, прямо пропорционально колебательному ускорению диффузора. Составив уравнение, получим  $a = B * L * I / m$ , т.е. при увеличении массы диффузора звуковое давление уменьшается. Для снижения резонансной частоты в два раза потребуется увеличить массу диффузора в 4 раза, и во столько же раз уменьшится звуковое давление излучателя. Для компенсации ослабления звукового давления потребуется в 4 раза увеличить силу тока в катушке, а т.к. выходная мощность усилителя  $P = I^2 R_{н.}$ , то выходную мощность усилителя нужно увеличить в 16 раз! Такова цена сравнительно небольшого расширения низкочастотного диапазона.

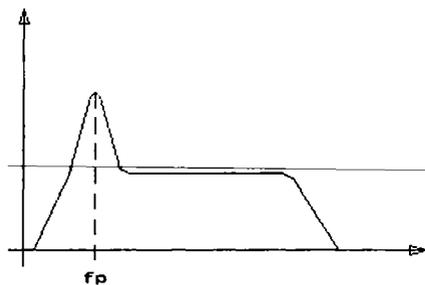


Рис. 46. АЧХ излучения громкоговорителя

Конечно, при разработке громкоговорителей используют и другие методы по снижению резонансной частоты и компенсации снижения чувствительности: увеличивают гибкость подвеса, увеличивают длину провода звуковой катушки, при-

меняют магнитные системы с большей магнитной индукцией. Тем не менее современные акустические системы требуют применения усилителей с выходной мощностью 100–200 Вт, а низкочастотные сабвуферы – 300–400 Вт!

Приведенные выше соотношения показывают, что повысить чувствительность акустических систем можно в основном за счет ограничения низкочастотного диапазона.

На средних и высоких частотах основные трудности возникают из-за резонанса подвижных частей излучателей и создаваемых им призвуков. В общем виде АЧХ излучения громкоговорителя, изображенная на рис. 46, представляет собой АЧХ фильтра низких частот.

Резонанс подвижной системы обусловлен возрастанием добротности на частоте резонанса и вызывает неприятные призвуки, особенно заметные при воспроизведении симфонической музыки, духовых и струнных инструментов. Борются с резонансными явлениями, во-первых, выбирая нижнюю частоту среза разделительного фильтра намного выше резонансной частоты, так, чтобы ослабить напряжение звуковых частот, вызывающих резонанс, во-вторых, снижая добротность колебательной системы с помощью демпфирования.

Применяются три способа демпфирования головок – механический, акустический и электрический.

При механическом демпфировании обычно используют нанесение вязкого состава, пропитывающего верхнюю часть диффузора.

Акустическое демпфирование производят установкой вблизи диффузора панели акустического сопротивления (ПАС), заполнением объема ящика звукопоглощающим материалом, изготовлением акустической системы в виде фазоинвертора и другими приемами акустического оформления.

Электрическое демпфирование может быть достигнуто применением усилителя с отрицательным выходным сопротивлением или шунтированием излучателя последовательным LC-контуром, настроенным на резонансную частоту.

Для высокочастотного громкоговорителя установка ПАС не применима, так как вследствие малой длины излучаемых волн ПАС пришлось бы устанавливать практически вплотную к диффузору. Поэтому для высокочастотного звена более всего подходит шунтирование LC-контуром. При этом, чтобы контур не был причиной возникновения дополнительных призвуков, его добротность совместно с головкой не должна превышать 0,7, т.е. должно соблюдаться отношение:  $1/(2 \cdot \pi \cdot f_p \cdot C) = 2 \cdot \pi \cdot f_p \cdot L \leq 0,7 R_0$ . Так, например, для высокочастотной головки 10ГД-35, у которой сопротивление постоянному току  $R_0 = 12,7$  Ом, а частота резонанса  $f_p = 3000$  Гц, можно применить последовательный контур с  $L = 0,93$  мГн и  $C = 3,0$  мкФ.

Для среднечастотных головок этот способ практически не применим, так как их частота резонанса на порядок ниже и пришлось бы применять конденсатор слишком большой емкости и габаритов. Поэтому среднечастотные головки обычно демпфируют установкой ПАС и заполнением бокса ватой. Устанавливать ПАС лучше всего как можно ближе к диффузору, не допуская, конечно, касания диффузора. Например, часто ПАС устанавливают непосредственно в окнах диффузородержателя. Кроме того, для некоторых головок возможно и нанесение вязкого состава на верхнюю часть подвеса диффузора.

У низкочастотных головок резонансная частота не может быть срезана фильтром, так как входит в рабочую полосу частот, поэтому прибегают к демпфированию за счет акустического оформления и применения усилителя с отрицательным выходным сопротивлением. У усилителя с отрицательным выходным сопротивлением, в отличие от обычного, напряжение на выходе уменьшается при увеличении сопротивления нагрузки. Поскольку модуль полного сопротивления головки на резонансной частоте резко возрастает, происходит соответствующее уменьшение амплитуды выходного напряжения усилителя. Очевидно, что параметры такого усилителя должны настраиваться на конкретную акустическую систему.

Для акустического демпфирования низкочастотного громкоговорителя чаще всего применяют акустическое оформление в виде фазоинвертора, настроенного на частоту резонанса. Другим вариантом акустического оформления является изготовление ящика в виде ПАС. В этом случае в задней стенке ящика просверливаются отверстия небольшого диаметра, которые изнутри затягиваются марлей. Демпфирования низкочастотного громкоговорителя добиваются также с помощью звукопоглощающего материала, размещая его внутри ящика.

Ящик акустической системы также имеет собственные резонансы и может служить источником призвуков. Для уменьшения резонансных явлений ящик изготавливают из толстой фанеры, устанавливают на боковых стенках бруски для придания большей жесткости и оклеивают изнутри войлоком.

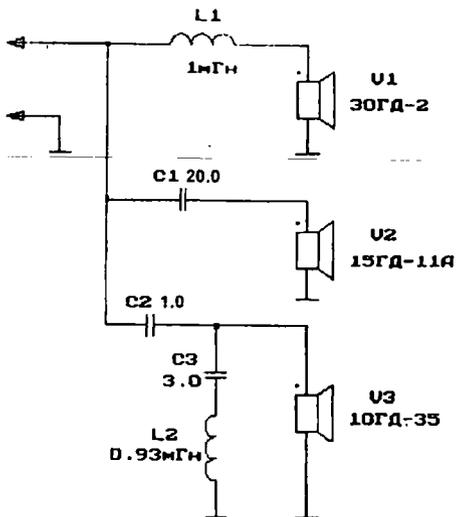


Рис. 47. Электрическая схема акустической системы

Для разделения полосы частот в многополосных акустических системах применяют пассивные LC-фильтры различных порядков. Фильтры большого порядка обеспечивают большее затухание сигнала вне полосы пропускания, но вносят большие фазовые искажения, которые приводят к искажению и размыванию стереопанорамы. Испытав и сравнив различные фильтры, я рекомендую использовать фильтры 1-го порядка, которые вносят наименьшие фазовые искажения. Номинальные значения элементов разделительных фильтров рассчитываются по формулам

$$L = 0,16 * R / f_c, \quad C = 160 / R * f_c,$$

где  $R$  – номинальное сопротивление фильтра (равное сопротивлению нагрузки), Ом;  $f_c$  – частота среза, кГц;  $L$  – индуктивность, мГ;  $C$  – емкость, мкФ.

На рис. 47 приведена электрическая схема акустической системы, которая была опробована с описанными выше ламповыми усилителями.

Акустическая система была изготовлена на основе набора, включающего в себя склеенный ящик, переднюю стенку с прорезанными отверстиями и фланцами для крепления громкоговорителей, указанные громкоговорители и детали фильтра. Такие наборы в свое время выпускались промышленностью и предназначались для самостоятельного изготовления колонок типа S-90. Аналогичную систему можно сделать на основе готовых акустических систем 35АС-1, 35АС-212 и им подобных.

Как известно, головка 15ГД-11 не обеспечивает достаточного качества воспроизведения. Поэтому прежде всего необходимо ее доработать. Для этого изготавливается колпачок из половины теннисного шарика, покрытого тонким слоем эпоксидной смолы и графитового порошка. Этот колпачок герметично приклеивается на пылезащитный колпачок в центре головки клеем "Момент". Такая доработка позволяет расширить диапазон воспроизводимых головкой частот до 6,5 кГц, а также устраняет искажения, возникающие при воспроизведении сигнала с большой амплитудой.

Внутренняя поверхность ящика оклеена синтетическим войлоком толщиной 10–15 мм. Изолирующий бокс среднечастотной головки также оклеен войлоком изнутри и снаружи. Внутренняя часть бокса заполнена ватой. Место соединения бокса с головкой тщательно загерметизировано с помощью пластилина.

Частоты раздела фильтров составляют 500 Гц и 6,5 кГц. Соединение акустической системы с усилителем выполнено по двухпроводной схеме.

Такая акустическая система намного превосходит по качеству звучания колонки типа S-90.

Еще более высокое качество звучания было достигнуто при использовании высокочувствительных головок 6ГД-2, 3ГД-1 и 1ГД-3. Акустическая система на их основе обеспечивала озвучивание комнаты средних размеров при подведении мощности 3–4 Вт.

Важным вопросом является подбор головок по сопротивлению и чувствительности. Ламповый усилитель отдает максимальную мощность при наименьших искажениях только при оптимальном сопротивлении нагрузки. Особенно важен точный подбор сопротивления нагрузки для пентодных выходных каскадов. Характеристика зависимости величины нелинейных искажений от сопротивления нагрузки у пентодов представляет довольно острый пик, и отклонение сопротивления нагрузки более чем на 10% от номинальной величины вызывает резкое увеличение нелинейных искажений. Триоды лучше переносят отклонение сопротивления нагрузки, чем пентоды. При уменьшении сопротивления выходная мощность триодных каскадов падает и увеличиваются нелинейные искажения, зато при повышении сопротивления нагрузки нелинейные искажения уменьшаются, но при этом уменьшается и выходная мощность.

Вместе с тем головки, входящие в состав многополосных акустических систем, обладают не только разными сопротивлениями, но и различаются по чувствительности. Так, например, головки 35ГД-1, 15ГД-11 и 10ГД-35 имеют соответственно сопротивления 3,2, 7,8 и 12,7 Ом по постоянному току и обладают чувствительностью 86, 90 и 92 дБ/Вт/м соответственно. Для выравнивания чувствительности эти головки обычно включаются через гасящие резисторы, т.е. чувствительность среднечастотной и высокочастотной головок приводится к уровню чувствительности низкочастотной. Все это приводит к тому, что ламповый усилитель при работе с такими колонками может обеспечить качественную работу лишь в одной полосе частот. Поэтому при подборе головок для акустических систем желательно подбирать их примерно одинаковыми по сопротивлению и по чувствительности, включая головки параллельно или последовательно для выравнивания сопротивлений.

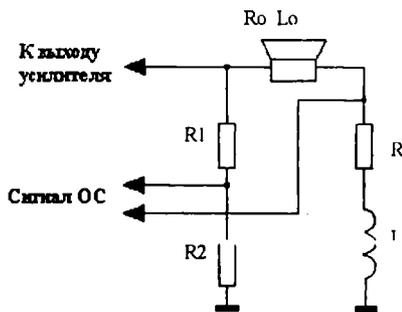
Кроме того, можно сделать отводы во вторичной обмотке выходного трансформатора, рассчитанные, например, на нагрузки сопротивлением 4, 8 и 16 Ом, и подключать головки отдельно по двух- или трехпроводной схеме.

Можно ли предпринять еще что-либо для улучшения качества звучания? Несомненно, можно. Для этого прежде всего надо рассматривать усилитель и акустическую систему не по отдельности, а как единый комплекс, преобразующий электрический сигнал в звуковые волны. А раз так, значит, можно охватить этот преобразователь обратной связью и тем самым увеличить точность преобразования. Такой способ известен давно под названием электромеханической обратной связи (ЭМОС). Смысл этой обратной связи заключается в получении электрического сигнала, пропорционального скорости и ускорению диффузора, и введении его во входную цепь усилителя.

Отрицательная обратная связь по ускорению диффузора и звуковой катушки позволяет снизить резонансную частоту громкоговорителя, но при этом увеличивает его добротность, что ухудшает равномерность АЧХ излучателя. Обратная же связь по скорости не влияет на резонансную частоту, но снижает добротность громкоговорителя. Таким образом, используя комбинированную обратную связь, сигнал которой будет пропорционален и скорости, и ускорению звуковой катушки, можно снизить резонансную частоту громкоговорителя и уменьшить неравномерность АЧХ излучения. Кроме того, такая обратная связь в несколько раз уменьшает нелинейные искажения громкоговорителя и улучшает передачу сигналов с резко изменяющимся уровнем, т.е. увеличивает коэффициент демпфирования громкоговорителя.

Для получения такого сигнала в 70-х годах предлагалось использовать противо-ЭДС звуковой катушки, которая выделялась с помощью мостовой схемы, в одно плечо которой включалась сама звуковая катушка (рис. 48).

В приведенной схеме резистор  $R$  и индуктивность  $L$  компенсируют сопротивление и индуктивность громкоговорителя. Сигнал ОС



на выходе мостового датчика пропорционален скорости диффузора, поэтому для получения сигнала комбинированной ОС на выходе датчика необходимо ввести дифференцирующую цепочку. На практике мостовая схема ЭМОС почти не используется из-за сложности балансировки.

Рис. 48. Мостовой датчик ЭМОС

ровки и нестабильности настройки. Дело в том, что во время работы катушка громкоговорителя разогревается и изменяет свои параметры. В результате сигнал обратной связи перестает соответствовать скорости диффузора.

Существует еще один способ получения сигнала обратной связи, пропорционального ускорению диффузора. Он заключается в получении напряжения ОС от пьезокерамического вибродатчика, установленного на ребре звуковой катушки, в месте ее соединения с диффузором. Сигнал, пропорциональный ускорению, получают, в данном случае с помощью интегрирующей RC-цепочки. Этот способ не имеет недостатков, присущих мостовой схеме, но сложнее в реализации.

На рис.49 показана структурная схема ЭМОС, полученной с помощью вибродатчика. Вследствие большого внутреннего сопротивления пьезокерамического преобразователя катодный повторитель должен иметь входное сопротивление не менее 20 Мом. Провод, соединяющий датчик с катодным повторителем, и сам датчик должны быть тщательно экранированы. Кроме того, датчик необходимо накрыть колпачком, чтобы исключить внешние акустические воздействия. С помощью переменного резистора устанавливается необходимый уровень суммирования напряжений обратной связи по скорости и ускорению. В общем случае может потребоваться усиление сигнала обратной связи и его частотная коррекция.

Введение ЭМОС по звуковому давлению эквивалентно увеличению массы диффузора, а значит, снижает чувствительность акустических систем. Следовательно, при ее использовании нужно повышать выходную мощность усилителя и применять громкоговорители, выдерживающие большую электрическую мощность.

Стремление упростить настройку мостового датчика и вообще отказаться от его балансировки привело к появлению схем с положительной обратной связью по току (ПОСТ). Введение ПОСТ позволяет снизить нелинейные искажения и увеличить степень демпфирования громкоговорителя. Из-за значительной реактивной составляющей сопротивления звуковой катушки форма тока в нагрузке сильно отличается от формы напряжения, подаваемого на нее. Если же использовать ток в нагрузке в качестве сигнала обратной связи, можно значительно уменьшить эти искажения. ПОСТ снижает выходное сопротивление усилителя до отрицательных значений. Подбором оптимального отношения выходного сопротивления усилителя и сопротивления нагрузки можно улучшить пе-

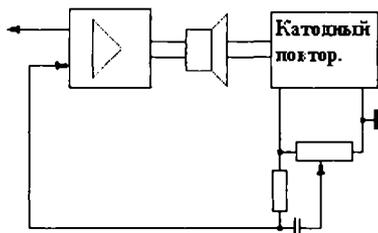


Рис. 49. ЭМОС по ускорению диффузора

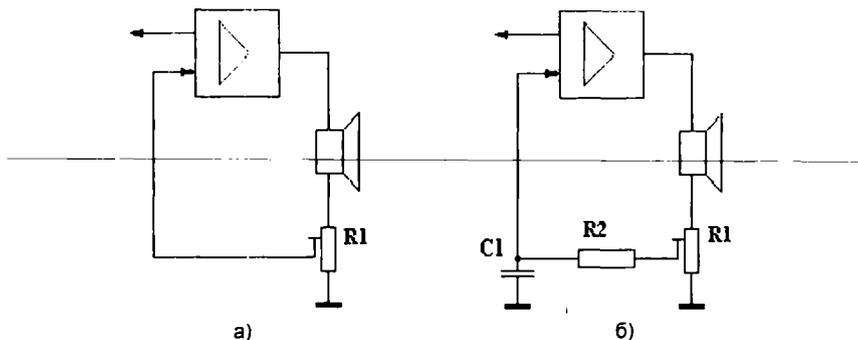


Рис. 50. Схемы ПОСТ

реходные характеристики системы усилитель–громкоговоритель. Схемы реализации простейших ПОСТ показаны на рис. 50.

В схеме на рис.50,а на резисторе R1 создается напряжение обратной связи, пропорциональное току, проходящему через звуковую катушку громкоговорителя. Значение сопротивления резистора R1 выбирают обычно в пределах 0,1–0,8 Ом. Сигнал обратной связи должен суммироваться с входным сигналом, т. е. обратная связь должна быть положительной. При этом выходное сопротивление усилителя становится отрицательным. Регулируя глубину обратной связи, можно подобрать оптимальное демпфирование громкоговорителя. Введение положительной обратной связи по току сглаживает АЧХ системы усилитель–громкоговоритель в области резонансной частоты громкоговорителя и создает нежелательный спад в области высоких частот. Это происходит из-за того, что модуль полного сопротивления громкоговорителя на частотах выше резонансной плавно увеличивается из-за индуктивного характера нагрузки. Выходное же напряжение усилителя с отрицательным выходным сопротивлением уменьшается при увеличении сопротивления нагрузки. Недостатком простейшей ПОСТ является и то, что она склонна к самовозбуждению на высоких частотах.

Показанная на рис.50,б схема ПОСТ более устойчива благодаря тому, что в ней глубина обратной связи снижается на высоких частотах (начиная с 300–3000 Гц). Однако и в ней могут появляться нежелательные подъемы АЧХ громкоговорителя в области частот чуть выше резонансной частоты.

Избавиться от этих недостатков ПОСТ можно, применяя, как и ранее, комбинированную обратную связь, т.е. суммируя определенным образом положительную обратную связь по току и отрицательную обратную связь по напряжению. Схема такой обратной

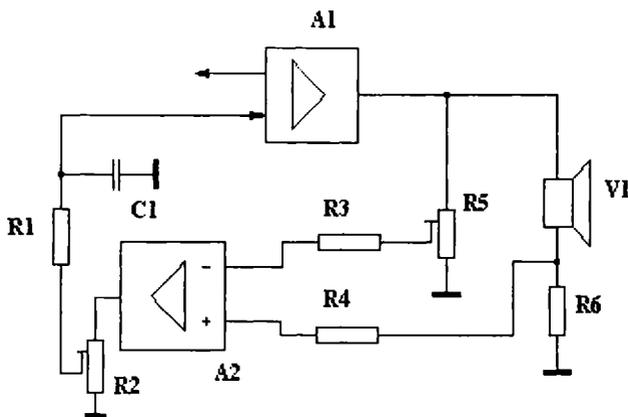


Рис. 51. Схема комбинированной обратной связи

связи показана на рис. 51. Как видно из схемы, напряжения обратной связи по току и по напряжению снимаются с диагонали мостового датчика, образованного элементами R5R6V1. Работоспособность такого датчика сохраняется в широкой полосе частот и не изменяется во время работы. Оба сигнала суммируются в сумматоре A2 и через цепь R1C1 вводятся во входную цепь усилителя мощности A1. Параметры этой цепи выбираются таким образом, чтобы глубина обеих обратных связей плавно уменьшалась, начиная с частоты 100–200 Гц.

Глубину ПОС по току, т.е. величину выходного сопротивления усилителя, устанавливают резистором R2, а глубину ООС по напряжению – резистором R5.

Налаживать подобный комплекс можно, подключив к резистору R6 вольтметр и подав на вход усилителя сигнал с линейно изменяющейся частотой. Подбирая глубину обратных связей, добиваются максимальной равномерности АЧХ комплекса.



Рис. 52. Структурная схема звукопроизводящего комплекса

Из приведенных описаний систем с электромеханической обратной связью и обратной связью по току видно, что для их реализации могут потребоваться дополнительные усилительные каскады с частотной коррекцией. Эти каскады можно включить в состав усилителя или объединить в отдельном блоке. Тогда с помощью такого блока можно регулировать параметры практически любой пары усилитель–громкоговоритель. Структурная схема звуковоспроизводящего комплекса с таким блоком обработки сигналов показана на рис. 52.

Блок обработки сигналов может содержать цепи ЭМОС, ПОСТ и ООСН, а также цепи предварительной обработки сигнала – регуляторы тембра, баланса и др.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Всему на свете приходит конец, и вот готовый усилитель стоит на вашей стойке. Можно поставить на проигрыватель свой любимый диск и нежно щелкнуть выключателем. Чашка кофе или чая, ровный рубиновый свет от ламп и музыка, такая, какой вы ее еще не слышали. Можно расслабиться и, забыв обо всем, отдохнуть под чарующие звуки.

Но человек творческий никогда не останавливается на достигнутом. Практически сразу же по окончании работы возникают новые идеи по усовершенствованию аппаратуры.

Ни к чему давать советы и предложения. Конструктор радиоаппаратуры не имел бы права называться конструктором, если бы лишь слепо повторял предлагаемые схемные и конструктивные решения. К тому же по-настоящему высококачественная звуковоспроизводящая техника не может быть конвейерной сборкой, а является результатом кропотливого труда и отбора. Но все же позволю себе высказать собственные взгляды на дальнейшее развитие ламповой техники.

На мой взгляд, улучшения качества звука можно добиться, во-первых, за счет еще более жесткой стабилизации режимов работы всех ламп. Разработка стабилизаторов режима, подобных приведенному в описании одного из усилителей, не должна составить серьезной проблемы для настоящего инженера. Могу сказать лишь, что я, прочитав в журнале "Stereophile" о применении в зарубежных усилителях таких устройств, за пару дней разработал и изготовил свое устройство. Как видите, важна лишь идея. Весьма желательно также стабилизировать и напряжения накала ламп, что приведет не только к продлению срока их службы, но и уменьшит флуктуации анодного тока, неизбежно возникающие из-за неравномерного прогрева катода.

Во-вторых, следует стремиться к уменьшению количества пассивных и активных радиоэлементов на пути прохождения сигнала. Помните, что любой элемент, будь то резистор, конденсатор, катушка индуктивности, лампа или даже соединительный проводник, вносит в сигнал искажения. В частности, в некоторых усилителях можно полностью исключить проходные конденсаторы между каскадами, подобрав режимы работы ламп таким образом, чтобы напряжение на аноде предыдущего каскада совпадало с напряже-

нием смещения на управляющей сетке последующего. Избежать дрейфа токов и напряжений в этом случае можно, применяя местные обратные связи по постоянному току через катодные резисторы и, конечно же, стабилизируя анодные токи ламп с помощью стабилизаторов токов.

И наконец, то, что называется "ловлей блох". Несмотря на пренебрежительное название, дело это довольно серьезное. Я имею в виду качество проводников, комплектующих, тщательный подбор режимов ламп и т.п. При расчете схемы условно принимают, что все элементы являются идеальными, т.е. резисторы и конденсаторы, например, не обладают индуктивностью, катушки индуктивности и проводники не имеют собственных емкостей и сопротивлений и т.д. Определение и учет таких паразитных параметров элементов – дело довольно сложное и не является темой этой книги. Желаящие приблизить параметры своего усилителя к идеальным неизбежно должны заняться изучением многих предметов, составляющих основу радиолюбительского творчества. Только такой подход позволит добиться достижения целей и выделит ваш аппарат из множества существующих.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	3
<b>Глава 1. Проектирование и расчет ламповых усилителей</b> ....	5
Постановка задачи.....	5
Блок схемы ламповых усилителей мощности.....	6
Выходной каскад.....	8
Фазоинвертор.....	12
Входной каскад.....	15
Блок питания.....	19
Выходной трансформатор.....	26
<b>Глава 2. Конструирование ламповых усилителей</b> .....	31
Макетирование усилителей.....	31
Конструированное оформление усилителя.....	36
Триодный двухтактный усилитель мощности 8 Вт.....	37
Мостовой двухтактный усилитель мощности 25 Вт.....	52
Телефонный усилитель.....	65
Буферный усилитель.....	67
<b>Глава 3. Акустические системы</b> .....	74
<b>Заключение</b> .....	85

Научно-популярное издание

Климов Дмитрий Александрович

**ЛАМПОВЫЕ УСИЛИТЕЛИ.**

**Методика расчета и проектирования**

Художественный и технический редактор *Т.Н. Зыкина*

Корректоры *Т.Г. Тertyшная, Т.В. Дземидович*

Компьютерная верстка *Р.А. Сафина*

ЛР № 010164 от 29.01.97 г.

Подписано в печать 18.02.2002

Формат 60×90/16

Усл.печ.л. 5,5

Изд. № 24334

Печать офсетная

Тираж 2000 экз.

Гарнитура Arial

Усл.кр.-отт. 6

Тип. заказ № 3

Издательство "Радио и связь", 103473 Москва, 2-й Щемилковский пер., 4/5.

Типография издательства "Радио и связь", 103473 Москва, 2-й Щемилковский пер. 4/5