

КНИГА ДЛЯ ЛЮБИТЕЛЕЙ КАЧЕСТВЕННОГО ЗВУКА

Гапоненко С. В.

ЛАМПОВО- ТРАНЗИСТОРНЫЕ УСИЛИТЕЛИ своими руками



Н и Т
ИЗДАТЕЛЬСТВО

Книга расскажет о том,
как соединить в одном усилителе
уникальные свойства ламп
как усилителей напряжения
и уникальные свойства транзисторов
как усилителей тока

С. В. Гапоненко

ЛАМПОВО- ТРАНЗИСТОРНЫЕ УСИЛИТЕЛИ СВОИМИ РУКАМИ



Наука и Техника, Санкт-Петербург
2012

Гапоненко С. В.

Лампово-транзисторные усилители своими руками. — СПб.: Наука и Техника, 2012. — 352 с.

ISBN 978-5-94387-858-9

Известно, что ламповые усилители — громоздкие, потребляющие много электроэнергии, но имеющие очень короткий электрический тракт, звучат лучше, чем сложные транзисторные аппараты. Эта книга поможет разобраться в причинах этого явления и предложит набор «бюджетных» решений гибридных усилителей для любителей музыки. Основной подход состоит в том, чтобы в одном усилителе соединить уникальные свойства ламп как усилителей напряжения и уникальные свойства транзисторов как усилителей тока.

Все схемы, описанные в главе «Практические конструкции гибридных усилителей», собраны и проверены автором, причем во многих экземплярах.

«Бюджетность» предлагаемых решений состоит в том, что потратив примерно студенческую стипендию на компоненты и приложив к ним свои умелые руки, можно сделать аппарат, звучащий не хуже, чем продукция известных «брендов» стоимостью выше профессорской зарплаты.

Книга предназначена для тех, кто любит музыку и умеет держать в руках паяльник.



ISBN 978-5-94387-858-9

Автор и издательство не несут ответственности за возможный ущерб, причиненный в ходе использования материалов данной книги.

Контактные телефоны издательства
(812) 412-70-25, 412-70-26
(044) 516-38-66

Официальный сайт: www.nit.com.ru

© Гапоненко С. В.

© Наука и Техника (оригинал-макет), 2012

ООО «Наука и Техника».

Лицензия № 000350 от 23 декабря 1999 года.

198097, г. Санкт-Петербург, ул. Маршала Говорова, д. 29.

Подписано в печать . Формат 70×100 1/16.

Бумага газетная. Печать офсетная. Объем 22 п. л.

Тираж 1500 экз. Заказ №

ЛП

Отпечатано с готовых диапозитивов

в ГП ПО «Псковская областная типография»

180004, г. Псков, ул. Ротная, 34

СОДЕРЖАНИЕ

От автора	7
Глава 1. Как мы воспринимаем музыку и каким мы видим идеальный аудиоусилитель	10
1.1. Что такое звук?	10
1.2. Что такое музыка?	13
1.3. Технические требования к звуковоспроизведению	17
1.4. Классы (типы) усилителей мощности	22
Усилители класса А	22
Усилители класса В	23
Усилители класса АВ	24
Усилители классов D, G, H, T	25
Мостовые усилители	25
Обратная связь	26
1.5. Электротехнические параметры качества	26
Как «поверить алгеброй гармонию»?	27
Выходная мощность	27
Коэффициент гармоник	28
Ауральный спектр гармоник и критерий Чивера	31
Коэффициент интермодуляционных искажений	33
Объективисты против субъективистов	33
Глава 2. Лампы или транзисторы: «за» и «против»	40
2.1. Как воспринимается громкоговоритель усилителем?	40
2.2. Ламповый ренессанс	43
2.3. Профессионалы и самодельщики	54
2.4. Можно ли приблизить «транзисторное» звучание к «ламповому», вводя искажения?	64
Увеличение выходного сопротивления усилителя	64
Создание «ламповых» предыскажений	65
«Мягкое» ограничение с ростом уровня входного сигнала	67
2.5. Почему же ламповые усилители звучат не так, как транзисторные?	71
Глава 3. Принципы построения высококачественных усилителей	75
3.1. Только вперед! Отсутствие общей обратной связи в усилителях мощности	75
3.2. Краткость — сестра таланта: схемотехнический минимализм	84
3.3. Хорошее питание	86
3.4. Разумная мощность и хорошие громкоговорители	88
3.5. Отказ от анализа объективных характеристик в пользу субъективного восприятия	93
3.6. Лампово-транзисторный «консенсус»: ламповый усилитель напряжения + транзисторный усилитель тока	93
Глава 4. Ламповые усилители напряжения	96
4.1. Как работает вакуумный триод	96
Сопоставление с транзисторами	97
Обозначения ламп	98

4.2. Схема с общим катодом	102
«Закон Ома» и другие важные формулы	106
Коэффициент усиления по напряжению	107
Выходное сопротивление	110
Режимы работы некоторых популярных триодов	111
«Батарейное» смещение	114
4.3. Нагрузочная прямая (для дополнительного чтения)	116
4.4. Катодный повторитель	122
4.5. Комбинация: каскад с общим катодом + катодный повторитель	126
Техника безопасности при наладке ламповых схем с непосредственной связью между каскадами	130
Ограничения на использование слаботочных триодов в катодных повторителях	130
Питание цепей накала в катодных повторителях	132
4.6. Улучшение схемы с общим катодом: каскад с динамической нагрузкой.	133
Принцип работы и основные свойства	133
Балансный усилитель, мю-повторитель или тотемный столб?	137
Несколько практических примеров	139
4.7. Каскодный усилитель (для дополнительного чтения)	142
4.8. Улучшение катодного повторителя	146
Применение источника тока вместо катодного резистора	146
Катодный повторитель Эрика Уайта	147
Катодный повторитель Джона Броски	149
4.9. Двухкаскадная схема «Айкидо»	151
Глава 5. Мощные транзисторные усилители тока	155
5.1. Чем отличается полупроводник от металла и диэлектрика	155
Как проводят ток металлы?	155
Почему диэлектрики не проводят ток?	157
Как проводят ток полупроводники?	158
Что такое «дырка»?	159
Полупроводники n- и p-типа	159
5.2. Как работает биполярный транзистор	162
Схема с общим эмиттером	163
Схема с общей базой	168
5.3. Эмиттерный повторитель	169
5.4. Параллельный усилитель тока	170
5.5. Как работает полевой транзистор	176
5.6. Мощные истоковые повторители с источниками тока	182
5.7. Лирическое отступление: классическая физика в сравнении с квантовой или почему транзисторы никогда не будут звучать так, как звучат лампы	187
Глава 6. Практические конструкции гибридных усилителей	189
6.1. Две серии усилителей	189
6.2. Техника безопасности превыше всего	190
6.3. Активные и пассивные компоненты: в большом деле не бывает мелочей.	192
Силовой трансформатор	192
Выпрямитель: диоды, кенотроны	193
Конденсаторы блока питания	193
Разделительные конденсаторы	194

Лампы	196
Транзисторы	196
Резисторы	196
Провода	197
Припой	197
Где купить хорошие радиокомпоненты	197
6.4. Особенности компоновки усилителя и монтажа	198
6.5. Чего никогда не следует делать	203
6.6. Начнем с конца! Выбор оконечного усилителя тока	215
6.7. Усилитель с выходным каскадом класса АВ по схеме Агеева	216
Описание схемы	216
Блок питания	220
Сборка и настройка	224
Изменение максимальной выходной мощности	226
6.8. Ламповые усилители напряжения	229
Меры безопасности	229
Бескомпромиссный одноламповый вариант	230
Один баллон — два триода: резистивный усилитель на двух триодах 6Н6П	241
Один баллон — два триода: каскад с динамической нагрузкой	242
Один баллон — два триода: каскад с общим катодом + катодный повторитель	245
6.9. Усилитель в сборе. Оценка качества звучания	248
6.10. Двухкаскадный усилитель типа «Айкидо»	252
6.11. Повышение мощности: мостовая схема	255
6.12. Усилитель с выходным каскадом класса А по схеме Чиффолли	261
Схема и конструкция	261
Ламповые усилители напряжения для истокового повторителя	266
Глава 7. Винил-корректоры	280
7.1. Вчера и сегодня	280
7.2. Подход профессионалов	281
7.3. Практические схемы	284
Корректоры на пальчиковых триодах	284
Корректоры на октальных триодах	289
Корректоры на сверхминиатюрных лампах	291
7.4. Особенности блока питания усилителя-корректора	297
Глава 8. Параметры ламп, транзисторов и трансформаторов	299
8.1. Параметры ламп	299
Триод 6СЗП	300
Триод 6С4П	301
Триод 6С6Б	303
Триод 6С7Б	304
Триод 6С45П	305
Триод 6С51Н	306
Триод 6С52Н	307
Триод — двойной диод 6Г2	308
Тетроды 6Э5П и 6Э6П-Е	309
Двойной триод 6Н6П	310
Двойной триод 6Н8С	311

Двойной триод 6Н9С	312
Двойной триод 6Н16Б	313
Двойной триод 6Н23П (ЕСС88, Е88СС, 6ДЖ8)	314
Двойной триод 6Н28Б	316
Двойной триод 6Н30П	317
Двойной триод 12АХ7 (ЕСС83, Е83СС)	318
Двойной триод 6072 (12АУ7)	319
Двуханодный кенотрон 6Ц5С	320
Двуханодный кенотрон 6Ц4П	321
Двойной диод 6Х2П	322
8.2. Параметры биполярных и полевых транзисторов	323
Биполярные комплементарные кремниевые транзисторы большой мощности для работы в параллельном выходном усилителе тока	323
Биполярные п-р-п кремниевые транзисторы средней мощности для работы в усилителе тока на полевых транзисторах	324
Полевые кремниевые транзисторы большой мощности для работы в усилителе тока на полевых транзисторах	324
8.3. Параметры интегральных полупроводниковых стабилизаторов напряжения	325
8.4. Серийные трансформаторы для применения в гибридных усилителях	326
Трансформаторы серии ТН мощностью 13—30 Вт для питания накальных цепей ламповых усилителей напряжения	326
Трансформаторы серии ТА мощностью 26—40 Вт для источника анодного напряжения ламповых усилителей напряжения	327
Трансформаторы серии ТАН мощностью 36—60 Вт для источника анодного и накального напряжений ламповых усилителей напряжения	328
Мощные трансформаторы ТН, пригодные для применения в блоке питания транзисторной части гибридных усилителей	330
Трансформаторы серии ТПП для блока питания транзисторной части гибридных усилителей	332
Глава 9. Обзор Интернет-ресурсов по аудиотехнике	333
9.1. Русскоязычные сайты	333
9.2. Англоязычные сайты	335
9.3. Покупка радиодеталей	336
9.4. Статьи по теории звукоусиления	337
Список сокращений	341
Список обозначений	341
Формулы, связывающие основные электро- и радиотехнические величины	342
Предметный указатель	344

ОТ АВТОРА

В начале прошлого века, в 1906 году американский физик Ли де Форест изобрел вакуумный триод. Началось развитие ламповой электроники, достигшее своего апогея, по-видимому, в 60-х годах. После этого периода лампы сохранили доминирующее положение лишь в некоторых специфических областях, таких как, **например**, высокочастотные устройства и устройства, устойчивые к воздействию радиации.

Роль **вакуумной** электроники была постепенно отодвинута на второй план с появлением в 1947 г. первого транзистора и созданием **твердотельной** электроники. Вторая половина прошлого века ознаменована развитием полупроводниковой электроники и ее проникновением во многие сферы нашей жизни.

Однако в конце прошлого века неожиданно для многих в звуко-технике произошел **ламповый ренессанс**. Оказалось, что ламповые усилители — громоздкие, потребляющие много электроэнергии, но имеющие **очень короткий** электрический тракт, уверенно «переигрывают» сложные транзисторные аппараты. Оказалось, что усилители, содержащие 2-3 лампы в сравнении с транзисторными схемами, содержащими десятки транзисторов, лучше передают «музыкальность» звуков. Ламповые усилители создают не только пространственную сцену, но и «вовлеченность» слушателя в музыкальное «действие».

Эта книга поможет разобраться в причинах этого явления и предложит набор «бюджетных» решений для любителей музыки, у которых нет возможности и желания тратить огромные деньги на приобретение эксклюзивного лампового «хай-энда».

Решение состоит в том, чтобы соединить в одном усилителе уникальные свойства ламп как усилителей напряжения и уникальные свойства транзисторов как усилителей тока. **«Бюджетность»** предлагаемых решений состоит в том, что потратив примерно студенческую стипендию на компоненты и приложив к ним свои умелые руки, можно сделать аппарат, звучащий не хуже, чем продукция известных «брендов» стоимостью выше профессорской зарплаты.

По-видимому, наиболее кратко личные ощущения автора можно передать следующим утверждением: по-настоящему хорошая аппаратура, воспроизводящая любимую музыку, не оставляет слушателю

возможности прослушивания в «фоновом режиме». Не получается что-то делать «под музыку». Музыка в вас проникает, увлекает и не отпускает.

Последовательные «твердотельщики», не владеющие основами ламповой схемотехники, ступив на тропу построения гибридных усилителей, смогут преодолеть определенный психологический барьер и ощутить своеобразие звучания лампово-транзисторных усилителей без общей отрицательной обратной связи.

Простота ламповых схем, их исключительная надежность, отсутствие сложных переходных процессов и минимальное число каскадов создают ощущение полного контроля над электронным устройством, понимания и предсказания его поведения в процессе его разработки, изготовления и наладки.

Ламповые «пуристы», не признающие полупроводниковой элементной базы, смогут использовать рекомендации, приведенные в книге, для построения входных и драйверных каскадов полностью ламповых усилителей мощности, а также для создания ламповых винил-корректоров.

Хочу подчеркнуть, что все схемы, описанные в главе 6, озаглавленной «Практические конструкции гибридных усилителей», собраны и проверены автором, причем во многих экземплярах.

Те, кто не решится взяться за самостоятельное изготовление описанных в книге усилителей, по-видимому, найдут для себя полезные размышления о развитии звукоусиления, различиях ламповой и полупроводниковой аппаратуры, особенностях восприятия музыки и принципах построения эксклюзивных Hi-End-усилителей.

Для повторения описанных в книге конструкций требуются внимательность, аккуратность и безусловное соблюдение правил техники безопасности .



Внимание.

Те, кто решится повторить конструкции, описанные в этой книге, помните: техника безопасности превыше всего. Таким шрифтом с пометкой «Внимание» в книге изложены рекомендации по технике безопасности при описании конструкций конкретных усилителей и советы по предотвращению различных «нештатных ситуаций» при сборке и наладке описанных схем. Внимательно их читайте!

Эта книга никогда не была бы написана, если бы в мои школьные годы (70-е годы прошлого века) мои родители не поддержали мой интерес к звукоусилению. Я благодарен им и моей жене за уважение к моему хобби и терпение. Я признателен также моим друзьям Александру Гурскому и Михаилу Захаричу за постоянные стимулирующие дискуссии о звукотехнике и критические замечания о качестве звучания моих усилителей.

Большую помощь на заключительном этапе оказала Тамара Чистая, согласившаяся тщательно вычитать всю книгу перед отправкой в издательство, а также подготовить часть иллюстраций, вошедших в главу 8.

Желаю всем читателям плодотворного аудиотворчества и удовлетворения от его результатов.

Ради того, что значит музыка в жизни каждого из нас.

Буду рад ответить на любые вопросы и замечания, присланные на адрес: audio-hobby@tut.by

С. В. Гапоненко, Минск, 2012.

КАК МЫ ВОСПРИНИМАЕМ МУЗЫКУ И КАКИМ МЫ ВИДИМ ИДЕАЛЬНЫЙ АУДИОУСИЛИТЕЛЬ

В этой главе обсуждаются особенности музыки как совокупности акустических сигналов, обладающих специфическими признаками и оказывающими особое воздействие на человека. Рассматриваются физические, т. е. объективные, характеристики музыкальных сигналов и их психоэмоциональные, т. е. субъективные, параметры. В результате формулируется своеобразное «техническое задание» на разработку идеального усилителя, который способен удовлетворить и «объективистов», и «субъективистов».

1.1. Что такое звук?

Ощущение звука есть особое, своеобразное ощущение, не сравнимое ни с каким другим из наших ощущений.

Лорд Рэлей, «ТЕОРИЯ ЗВУКА», 1877 г.

Звук — это распространяющиеся в виде волн упругие колебания в газе, жидкости или твердом теле, слышимые человеком. Частотный диапазон звуковых колебаний составляет 16—20000 Гц. Колебания с частотой ниже 16 Гц называют **инфразвуковыми**, с частотой выше 20 кГц — **ультразвуковыми** колебаниями.

Напомним, что **частота f равна числу колебаний в единицу времени** (секунду) и обратно пропорциональна **периоду колебаний T , измеряемому в единицах времени (секундах)**, $f = 1/T$.

Например, если период колебаний равен 1 секунде, то частота равна 1 Гц (герц), а если период колебаний равен 1 мс (миллисекунда), то частота колебаний равна 1 кГц (1 килогерц).

Звуковые колебания в газах и жидкостях являются **продольными** (направление колебаний сжатия-разрежения параллельно направлению распространения фронта волны). В твердых телах существуют также поперечные колебания (направление колебаний сдвига перпендикулярно направлению движения фронта волны).

Звук воспринимается человеком при помощи уха и мозга. Наружное ухо, состоящее из ушной раковины и слухового канала, улавливает колебания воздуха и передает их на барабанную перепонку. Механические колебания барабанной перепонки усиливаются в среднем ухе цепью сочлененных маленьких костей (молоточек, наковальня, стремечко) и передаются во внутреннее ухо, где имеется спиралевидная полость — улитка, переходящая в слуховой нерв.

Слуховыми рецепторами являются волосковые клетки, расположенные внутри улитки. Они превращают механическую энергию колебаний в электрический сигнал, поступающий в мозг по слуховому нерву. Внутреннее ухо также содержит рецепторы вестибулярного аппарата, подающие в мозг статические сигналы, связанные с положением тела, и динамические сигналы, связанные с ускорением.

Основными **физическими характеристиками звука** являются:

- ♦ **интенсивность**, определяющая мощность в расчете на единичную площадь (Вт/м^2);
- ♦ **спектральный состав** — распределение мощности по частоте.

По слуховому восприятию частота звука воспринимается как его высота (тон), а интенсивность — как громкость (амплитуда). Диапазон чувствительности человеческого органа слуха по интенсивности весьма широк — от 10^{-12} Вт/м^2 (порог слышимости) до 1 Вт/м^2 (болевого порог).

Соответствующий диапазон звукового давления составляет 10^{-5} — 10^7 Па. Используемые в звуковоспроизводящей аппаратуре уровни электрической мощности порядка 10 — 100 Вт при озвучивании помещений площадью 20 — 50 м^2 обусловлены низкой эффективностью электроакустических преобразователей (громкоговорителей), а также необходимостью иметь запас мощности для компенсации пониженной чувствительности человеческого слуха на очень низких частотах.

Воспринимаемый человеком уровень громкости пропорционален логарифму величины звукового давления. Поэтому силу звука I (уровень звукового давления P) измеряют в децибелах (дБ): $I = 10 \lg(P/P_0)$, где $P_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па — звуковое давление, условно принятое за нулевой уровень. Например, уровень звукового давления в 20 дБ соответствует 100 -кратному превышению значения P_0 .

Громкость симфонического оркестра доходит до уровня 110 дБ, а его динамический диапазон (отношение самого высокого уровня звукового давления P_{\max} к самому низкому P_{\min} , выраженное в децибелах, т. е. $10 \lg(P_{\max}/P_{\min})$) достигает 75 дБ.

Чувствительность уха максимальна в области частот 3—4 кГц и уменьшается на более низких и более высоких частотах. Неравномерность чувствительности растет с уменьшением громкости, поэтому при звуковоспроизведении на низких уровнях громкости часто используют коррекцию амплитудно-частотной характеристики звуковоспроизводящего тракта — т. н. тонкомпенсацию.

Зависимость чувствительности уха от частоты и уровня звукового давления характеризуют набором кривых равной громкости (рис. 1.1), которые показывают, насколько должен отличаться уровень звукового давления на данной частоте для субъективного восприятия с громкостью, равной громкости источника звука с частотой 1 кГц. В соответствии с ослаблением чувствительности слуха на краях звукового диапазона, кривые равной громкости испытывают подъем по сравнению с частотой 1 кГц.

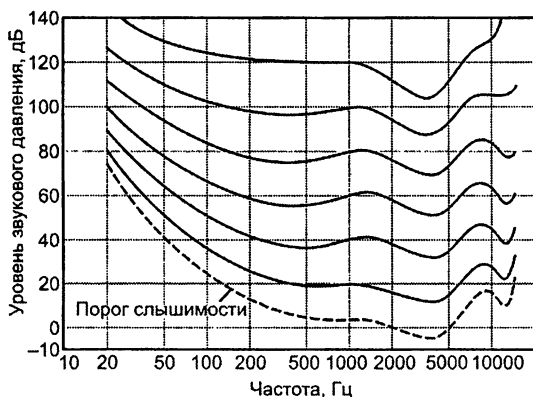


Рис. 1.1. Кривые равной громкости

Скорость звука в воздухе составляет $v = 330$ м/с. Длина волны λ равна произведению скорости звука на период колебаний, $\lambda = v T = v/f$. Иными словами, длина волны — это расстояние, проходимое волной за один период колебаний. Длина звуковых волн составляет в воздухе от 20,6 м (16 Гц) до 1,65 см (20 кГц). В жидкостях скорость звука выше, чем в газах, в твердых телах — выше, чем в жидкостях. Например, в воде скорость звука равна 1490 м/с, а в металлах может достигать 5000 м/с.

1.2. Что такое музыка?

... кроме звуков и слов там было что-то еще...

АНДРЕЙ МАКАРЕВИЧ

Музыка — это последовательность во времени особым образом соотнесенных по высоте (частоте) звуков, как правило, имеющих четкую временную организацию (такты), способная вызвать определенную позитивную психо-эмоциональную реакцию у человека.

Музыкальные звуки состоят из основного **тона**, определяющего **высоту звука**, и набора **обертонов**, частоты которых кратны частоте основного тона.

Интенсивность обертонов определяет окраску (тембр) звука. Диапазон основных тонов музыкальных звуков намного уже всего звукового диапазона и составляет приблизительно от 40 Гц до 2 кГц.



Пример.

Часто используемый в камертонах звук ноты ля первой октавы имеет частоту 440 Гц. Частотный диапазон звуков гитары — от 80 Гц до 1 кГц.

Высокочастотная часть звукового диапазона более 2 кГц воспринимается только через окраску звука.

Чувствительность слуха к изменению тона составляет примерно 0,3 %, т. е. человеческий слух различает, например, два тона 1000 и 1003 Гц, следующие один за другим. Чувствительность слуха к тембральной окраске звука порядка 0,01 %. На восприятие музыкальных звуков оказывает влияние и временная форма акустических колебаний — динамика нарастания и спада звука.



Пример.

В литературе описан такой опыт. В записи исполнения пьесы на фортепиано искусственно перевернули во времени каждый звук. Мелодия, определяемая частотой основного тона и последовательностью тонов, при этом не изменилась и была легко узнаваема, однако обращение во времени динамики нарастания и спада каждого звука привели к тому, что опознать фортепиано стало невозможно.

Интервал частот музыкальных звуков, на границах которого звуки по частоте отличаются в 2 раза, называют *октавой*. В пределах каждой октавы различают 12 *ступеней* (музыканты называют их полутонами), обозначаемых с помощью семи *нот (тонов)* и дополнительных полутонов (бемоли и диезы). Таким образом, 2 звука, обозначаемых одинаковыми нотами в разных октавах, отличаются по частоте в 2, 4, 8 и т. д. раз.

Последовательность нот и полутонов образует *музыкальный звукоряд*. Музыкальный звукоряд, сформированный в ходе культурной эволюции человека, имеет глубокую физическую основу. Разбиение звуков на октавы обусловлено слитным, гармоничным восприятием на слух одновременно двух типов колебаний с отношением частот, кратным двум.

Внутри октавы используются гармоничные созвучия двух или более звуков (*аккорды*), частоты которых соотносятся между собой как целые числа. Например, в мажорном аккорде частоты соотносятся как 1, 5/4, 3/2, (основной тон, большая терция, квинта), а в минорном — как 1, 6/5, 3/2 (основной тон, малая терция, квинта). Такие пропорции выполняются при голосовом пении, при игре на струнных смычковых инструментах (скрипка, альт, виолончель, контрабас), иногда на гитаре (т. н. «подтяжки» во время исполнения) и на некоторых духовых инструментах, где высота извлекаемого звука задается *исполнителем по его желанию*, а не настройщиком (как в фортепиано, в арфе, в цимбалах) и не изготовителем (как в органе).

Идеальные целочисленные пропорции могут нарушиться при выходе за пределы одной октавы.

Со времен Древней Греции существует проблема оптимального сочетания двух аспектов в музыке — психофизиологического (с точки зрения гармонии звучания) и функционального (исполнение на различных инструментах, транспонирование мелодии в различные тональности, т. е. линейное перемещение частоты звука по оси частот).

Эта проблема в определенной степени была разрешена в начале XVIII века в Западной Европе переходом к равномерному по логарифмической шкале ряду частот в пределах октавы — т. н. *темперированному звукоряду*.

Этот ряд содержит частоты, возрастающие в следующей последовательности: $1, 1 + \sqrt[12]{2}, 1 + (\sqrt[12]{2})^2, \dots$, что позволяет удовлетворить функциональному критерию, но одновременно приводит к незначительному, но, к сожалению, слышимому, диссонансу в звучании. Математически эта

проблема сводится к тому, что дробление октавы на отрезки с отношением $1 + (\sqrt[n]{2})^n$, $n = 1, 2, 3, \dots$ не дает в точности чисел $6/5, 5/4, 3/2$.

Для музыкальных инструментов с жесткой фиксированной настройкой (орган, фортепиано, арфа, цимбалы) такое несовпадение создает трудности при исполнении произведений с частотным диапазоном шире одной октавы. По-видимому, завораживающая притягательность пения и игры на смычковых инструментах обеспечивается за счет возможности вариативного, по выбору исполнителя, применения адекватного набора частот в звукоряде. Напомним, что у смычковых инструментов нет металлических порошков (ладов), как у гитары, поэтому высота звука полностью находится в руках (точнее — в пальцах) музыканта.

Если длина волны соизмерима или превышает расстояние между ушами, то по разности времени прихода сигнала к правому и левому уху человек способен определять направление источника звука. Такую способность называют **бинауральным эффектом** (от лат. *bini* — два и *auris* — ухо).

Бинауральный эффект проявляется в интервале частот приблизительно 300—3000 Гц (длины волн от 1,1 м до 11 см). В этом частотном диапазоне возможно получение стереоэффекта при воспроизведении звука по двум скоррелированным во времени каналам с использованием на выходе двух электроакустических систем (громкоговорителей), разнесенных на расстояние примерно 2 м.

Такой принцип записи и воспроизведения используется в **стереофонии**. Отсутствие стереоэффекта для больших длин волн (низких частот) позволяет использовать для воспроизведения стереофонограмм единый низкочастотный источник для правого и левого каналов совместно с отдельными средне- и высокочастотными каналами. Такую систему звуковоспроизведения называют **трифонической**.

Если частота раздела составляет 150—300 Гц, для формирования целостной звуковой картины у слушателя низкочастотный излучатель располагают посередине между средне- и высокочастотными излучателями.



Примечание.

Если частота раздела средних и низких частот ниже 150 Гц, место расположения низкочастотного источника колебаний не имеет значения. Такие излучатели называют **сабвуферами**.

В этом случае длина звуковой волны соизмерима с размерами помещения, используемого для прослушивания музыки, или даже превы-

шает эти размеры. Такие звуковые колебания полностью делокализованы в пределах помещения. Для скоррелированности излучения сабвуфера с излучением правого и левого громкоговорителей используют временную задержку, настраиваемую для конкретного помещения и места расположения сабвуфера.

Вызывает большие дискуссии вопрос, почему музыка занимает такое значительное место в жизни человека. Совершенно ясно, что такая селективная чувствительность по частоте ($\Delta f/f = 0,3\%$), такой широкий диапазон чувствительности по интенсивности (10^{12} раз), такой широкий диапазон чувствительности по частоте (10 октав), не являются необходимыми для биологического выживания человека в ходе эволюции.

Хорошо известно, что наиболее значительную, основную часть информации об окружающем мире мы получаем не при помощи слуха, а при помощи зрения. В то же время спектр чувствительности глаза составляет менее одной октавы: мы воспринимаем глазом электромагнитные волны, длина волны которых находится в интервале от 700 (красный свет) до 400 нм (фиолетовый свет), т. е. крайние значения длин волн (а значит — и частот) отличаются менее, чем в 2 раза!

Если отсчитывать от фиолетовой границы видимого диапазона, то 10 октав на шкале электромагнитных волн покрывают весь видимый диапазон плюс инфракрасное (тепловое) излучение, а также часть миллиметрового диапазона.

Широкий частотный диапазон восприятия звуков по сравнению со светом становится возможным вследствие того, что слух является чисто классическим с точки зрения физики процессом генерирования и приема механических колебаний, тогда как зрение связано с поглощением квантов электромагнитного излучения молекулами сетчатки.

Спектр поглощения молекул определяется набором энергетических состояний электронов. Существует всего 3 типа зрительных рецепторов, формирующих ощущение красного, зеленого и голубого цветов, а все многообразие цветов получается при их линейной комбинации.



Примечание.

Узкий спектр восприимчивости электромагнитного излучения присущ не только глазу человека, но и техническим приборам. Например, кремниевые детекторы в матрицах цифровых фотоаппаратов имеют чувствительность в интервале 0,4—1 мкм, т. е. немного более октавы.

Автору представляется, что особая роль слуха и, как следствие, особое место музыки в жизни человека, связаны с тем, что человек сам порождает звуки (в отличие от света: хоть мы и очень хорошо чувствуем свет, сами мы не светимся, а лишь пассивно рассеиваем свет, приходящий от Солнца или других источников).

Поэтому звуки используются для общения людей между собой в реальном времени, а музыка стала особым каналом для передачи от одного человека к другому в пространстве (на концерте) и во времени (через фонограммы) не просто информации, а эмоционального состояния или даже цепочки последовательно сменяющихся состояний.

1.3. Технические требования к звуковоспроизведению

Большинство высококачественных динамических головок диаметром 16—25 см имеют чувствительность 90—92 дБ/Вт/м. Такая же чувствительность и у абсолютного большинства высокочастотных купольных излучателей. Эти цифры означают, что при подведении к катушке головки электрической мощности величиной 1 Вт на расстоянии 1 м вдоль ее оси достигается уровень звукового давления 90—92 дБ.

Этого достаточно, чтобы воспроизвести в комнате звучание органа или струнного квартета с естественной громкостью (табл. 1.1). У хороших динамических головок диаметром 30 см и больше чувствительность обычно еще выше — 95...98 дБ/Вт/м. Поэтому для комфортного прослушивания музыки оказывается достаточной электрическая мощность всего 1—2 Вт на канал.

Динамический диапазон музыкальных инструментов*

Таблица 1.1

Источник звука	Минимальный/ максимальный уровни, дБ	Динамический диапазон, дБ
Гитара	40/55	15
Струнный квартет	35/75	40
Орган	50/85	35
Рок-группа	80/110	30
Симфонический оркестр	35/110	75

* А. А. Петров. Звуковая схемотехника для радиолюбителей. С-Петербург, Наука и Техника, 2003.

С учетом пиков громкости в сложных симфонических или рок-композициях можно иметь 3—5-кратный запас по мощности, т. е. довести мощность усилителя до 6—10 Вт. Мода на 30-ваттные (т. н. номинальная электрическая мощность) транзисторные усилители для прослушивания музыки в домашних условиях связана:

- с низкой эффективностью малогабаритных акустических систем;
- с необходимостью дополнительного подъема усиления на низких частотах для расширения спектра воспроизводимых частот в НЧ-области;
- с жестким ограничением сигнала при ничтожном превышении мощности над т. н. номинальной электрической мощностью в транзисторных усилителях.



Примечание.

Возникновение жесткого ограничения в транзисторных усилителях приводит к тому, что среднюю мощность при прослушивании музыки необходимо выбирать примерно в 10 раз ниже упомянутой номинальной электрической мощности.

Проигрыватель виниловых дисков с усилителем-корректором, магнитофон или проигрыватель компакт-дисков развивают на выходе переменное напряжение примерно $U = 1$ В и рассчитаны на нагрузку $R = 47$ кОм. Это соответствует мощности $W = U^2/R = 0,02$ мВт.

Таким образом, для создания нужного уровня громкости необходим усилитель мощности с коэффициентом усиления по мощности более 100 тысяч раз. Построению таких усилителей с использованием ламп и транзисторов как раз и посвящена настоящая книга. Указанное усиление можно осуществить за счет усиления тока и/или напряжения.

Так как сопротивление динамических головок составляет обычно 4—8 Ом (оптимальное сочетание сопротивления, массы и индуктивности медной катушки), распределение между усилением тока и усилением напряжения оказывается достаточно жестко детерминированным. Для 8-омной головки мощность 8 Вт требует подведения напряжения величиной 8 В, при этом ток составит 1 А. С учетом запаса по мощности, разброса источников по чувствительности, а иногда и различия среднего уровня записи в старых и новых фонограммах, от усилителя мощности требуется усиление по напряжению примерно в 10—15 раз и усиление по току около 100 тысяч раз.

Что такое высококачественное звуковоспроизведение?

Автор этой книги убежден, что существует только один критерий качества звуковоспроизведения — близость звуковой картины, создаваемой у слушателя при воспроизведении звукозаписи, к оригинальному (исходному) звуковому образу, возникающему при прослушивании в студии звукозаписи или в концертном зале. Любые отличия от этой картины следует считать искажениями.

Идеальная система звуковоспроизведения (источник сигнала + усилитель мощности + громкоговоритель) должна работать так, как будто ее вообще нет. С закрытыми глазами мы должны ощущать живое дыхание музыкальных инструментов и вокалистов в помещении, где происходит прослушивание.

Поэтому термин «высокое качество» (по-английски — «high fidelity», сокращенно Hi-Fi) логично заменить термином «высокая верность». В аудиоиндустрии высшей ценовой категории (можно шутя сказать: «и высшей наценочной категории») применяется термин «High End», который означает примерно «самый передовой», «наивысший» в смысле технических достижений, использованных при разработке. Надо отметить, что высшие технические достижения порождают и высший ценовой диапазон.

Специалисты в области звукозаписи, звукорежиссеры и звукооператоры пользуются большим набором существительных и прилагательных для описания качества звуковоспроизведения. Ниже приведен неполный перечень таких характеристик из книги Бена Дункана — английского эксперта по организации концертного звукоусиления*.

Вот как формулируется общая оценка звучания:

- ♦ **аналитичность** — если создается ощущение, что аппаратура слишком подчеркивает детали, выпячивая детали, которые, по-видимому, отсутствовали в оригинальном музыкальном материале;
- ♦ **артикулированность** — когда слышимыми оказываются тонкие особенности сложных звуков, особенно в области, соответствующей голосу (300 Гц — 3 кГц);
- ♦ **«грязный» звук** — хуже, чем «песочность»;
- ♦ **зернистость** — избыточная «текстура», обычно связана с искажениями в верхней части среднечастотного диапазона;
- ♦ **«клинический звук»** — когда создается ощущение, что комнату убрали в одном месте, но оставили грязь в других местах, от этого страдает эмоциональное наполнение музыкальной записи;

* B. Duncan, High Performance Audio Power Amplifiers for Music Performance and Reproduction. Newnes, Oxford 1996.

- ♦ *монотонный бас* — плохо демпфированный бас или присутствие выраженного резонанса на низких частотах;
- ♦ *«песочность»* — похожа на зернистость, но более неприятна при прослушивании;
- ♦ *«разболтанность», «непричесанность»* — плохо демпфированный бас;
- ♦ *распыленность* — присутствие выраженной, но мягкой «текстуры», обусловленной искажениями;
- ♦ *сверкающий звук* — искажения в нижней части высокочастотного диапазона;
- ♦ *сухость* — недостаток реверберации;
- ♦ *шершавость* — прослушивание вызывает неприятные ощущения;
- ♦ *благозвучность* — иногда может означать неточность в деталях;
- ♦ *прозрачность* — ощущение, что вы слушаете именно музыку, а не аппаратуру, как будто на пути между музыкой и вами ничего нет, заветная цель каждого любителя музыки.

Тональная достоверность **верхнего ВЧ** диапазона:

- ♦ *блеск, искристость* — повышенное содержание компонент выше 16 кГц;
- ♦ *металличность*;
- ♦ *стеклянность* — избыток в области 4—8 кГц;
- ♦ *тревожность, напряженность* — избыток в области 12—16 кГц, обычно завышает присутствие гармоник у тарелок;
- ♦ *тяжесть*;
- ♦ *яркость*;
- ♦ *воздушность* — свободное воспроизведение самых верхних частот, создающее ощущение, что полоса воспроизведения выходит за верхнюю границу звукового диапазона.

Тональная достоверность **нижнего ВЧ** — **верхнего СЧ** диапазона:

- ♦ *агрессивность* — избыток в области 3—6 кГц, часто искаженных;
- ♦ *«гнузавость»* — подъем примерно на частоте 1 кГц;
- ♦ *«коробчатость»* — как будто солист находится в картонной коробке, подъем в области 250—450 Гц;
- ♦ *повышенный эффект присутствия* — подъем примерно на частоте 2 кГц;
- ♦ *хрустящий звук* — избыток в области 3—4 кГц;
- ♦ *«чахоточность»* — избыток в области 200—400 Гц;

Тональная достоверность нижнего СЧ — НЧ диапазонов:

- ♦ **«бухающий» звук** — избыток около 80—90 Гц;
- ♦ **вялый, «бесхарактерный» звук** — недостаток нижнего баса;
- ♦ грубовато напористый звук;
- ♦ гулкость;
- ♦ острый, колкий звук (120—160 Гц).

Динамика звучания характеризуется так:

- ♦ **безжизненность** — излишне совершенный звук, отвлеченное воспроизведение, не содержащее эмоций и не вызывающее интереса, характерно для аппаратуры с безукоризненной частотной характеристикой при пренебрежении факторами, определяющими пространственное ощущение и динамику;
- ♦ **гулкость** — плохо задемпфированный бас, часто из-за плохого согласования усилителя с акустической системой;
- ♦ **смазанность** — много избыточных несогласованных призвуков, много гармонических или интермодуляционных искажений;
- ♦ **быстрый звук** — острая, резкая атака, особенно основных басовых звуков, признак хорошо демпфированного баса и хорошего временного согласования основных басовых тонов с их гармониками;
- ♦ **динамический контраст** — возможность хорошо слышать тихие звуки на фонограмме на фоне громких звуков;
- ♦ **микродинамика** — жизненность, реалистичность слабых звуков;
- ♦ **ритмичность** — способность увлечь, «заразить», то, что бывает на живых представлениях, когда хочется пританцовывать или двигаться в такт музыке.

Пространство звучания характеризуется так:

- ♦ **смазанность** — если звуковые образы, которые должны быть четкими, оказываются как будто за мутным стеклом;
- ♦ **звуковая сцена** — стереозвук исходит из пространства между двумя акустическими системами;
- ♦ **образность** — способность передать ширину, глубину, а иногда и высоту;
- ♦ **слоистость** — звуки имеют определенное положение по глубине сцены, создавая впечатление множественных уровней либо вообще бесконечной градации по глубине сцены;
- ♦ **сфокусированность** — четкость в деталях, может располагаться по всей сцене, в трех измерениях;
- ♦ **очерченность** — присутствие тонкой детализировки.

Как видим, в этом наборе негативных обозначений гораздо больше, чем позитивных. Это значит, неудовлетворение от звучания возникает гораздо чаще, чем удовольствие. Причем не только холодный язык технических параметров, но и заоблачные цены не могут заранее предсказать, какие из вышеприведенных ощущений возникнут у вас после включения клавиши «PLAY».

Вспоминается характеристика, данная экспертом одного из гляцевых журналов после прослушивания транзисторного усилителя стоимостью 5 тыс. евро: *«Слышно все, напор такой, что все вокруг улетает, но нет вовлеченности в музыкальный процесс, нет ощущения, что певец обращается именно к Вам».*

Концентрируясь на позитивных терминах из вышеприведенного списка, можем сказать, чего мы ждем от хорошей звуковоспроизводящей аппаратуры: воздушности, прозрачности, артикулированности в тональной передаче, динамического контраста и микродинамики, ритмичности и «заразительности» в динамике звучания, пространственной образности, слоистости, сфокусированности и хорошей звуковой сцены.

1.4. Классы (типы) усилителей мощности

Усилители класса А

Предварительные, маломощные каскады усиления напряжения и (или) тока не потребляют много электроэнергии и строятся поэтому с использованием самого простого, распространенного и хорошо понятного подхода. При этом все активные элементы схемы (т. е. транзисторы или лампы) потребляют от источника питания максимальный ток, независимо от того, присутствует ли на входе и выходе усилителя полезный сигнал. Усилители с таким режимом работы называют усилителями **«класса А»**.

Класс А обеспечивает наиболее высокое качество звуковоспроизведения и широко используется во всех каскадах современных ламповых усилителей, претендующих на категорию Hi-End. Недостатком усилителей класса А является низкий КПД: обычно не более 10 %.

Это значит, что усилитель с выходной мощностью 50 Вт будет непрерывно потреблять от домашней сети 500 Вт электрической мощности. Вся мощность, не преобразованная в звуковые колебания, выделяется на компонентах усилителя (транзисторы, лампы, резисторы и т. д.) в

виде тепла. Стереофонический усилитель класса А с мощностью по 50 Вт на канал превращается по своей тепловой эффективности в электроплитку или электрокалорифер. По этой причине усилители класса А часто проектируют с мощностью не более 10 Вт на канал.

Выходной каскад, работающий в классе А, содержит единственный активный элемент. Поэтому такой выходной каскад часто называют *однотактным*. Иногда для увеличения выходной мощности в однотактных усилителях применяют 2 или 3 одинаковых элемента, соединенных параллельно.

В усилителе с выходным каскадом, работающим в классе А, через выходную лампу или выходной транзистор постоянно протекает максимальный ток. При подаче полезного сигнала на вход этого каскада (сетка лампы, затвор или база транзистора) электрические характеристики активного элемента изменяются. Это приводит к перераспределению тока, потребляемого от источника питания, между выходным каскадом и подключенным к нему громкоговорителем.

Усилители класса В

Поскольку в усилителе мощности основная мощность потребляется оконечным каскадом, изменяя режим работы этого каскада, можно значительно уменьшить общую потребляемую мощность. Такой подход применяется для построения *двухтактных* усилителей.

В выходном каскаде двухтактного усилителя содержится минимум два активных элемента, один из которых усиливает только положительную, а второй — только отрицательную компоненты входного сигнала. В таком каскаде при отсутствии сигнала ток через выходные транзисторы или лампы вообще не протекает. Двухтактный каскад наиболее легко реализуется с помощью транзисторов с разным типом проводимости (электронного и дырочного типа).

Пару идентичных по характеристикам, но различных по типу проводимости транзисторов называют *комплементарными*. К сожалению, комплементарных пар ламп не существует, так как все лампы используют исключительно электроны, в отличие от полупроводниковых приборов, где возможна т. н. *дырочная проводимость* за счет направленной миграции вакансий в электронной подсистеме кристалла. Поэтому реализация двухтактного каскада на лампах требует применения специальных выходных трансформаторов с симметричными обмотками.

Усилитель с двухтактным выходным каскадом, работающим в указанном режиме, называют усилителем *«класса В»*. По-английски двухтактный усилитель называют *«push-pull amplifier»* (буквально — «тяги-толкай»).

Усилители класса АВ

Разновидность усилителя класса В с небольшим (менее 10 % от максимального) начальным током выходного каскада для уменьшения искажений называют усилителем *«класса АВ»*. К этому классу относится подавляющее большинство всех промышленных транзисторных усилителей, а также ламповых усилителей мощностью более 20 Вт. Типичное значение КПД усилителя класса В или АВ составляет примерно 50 %. То есть, усилитель, отдающий в нагрузку 50 Вт мощности, потребляет 100 Вт от домашней сети. Подчеркнем: в момент появления сигнала. При отсутствии сигнала и при его малых значениях потребляемая мощность задается током покоя выходных элементов и может составлять от 1 до 10 % от максимальной полезной мощности. Таким образом, двухтактные усилители класса В или АВ оказываются намного экономичнее усилителей класса А.

Двухтактный выходной каскад при высокой симметрии «плеч» обеспечивает подавление в выходном сигнале четных гармоник. Это существенно понижает общий коэффициент нелинейных искажений по сравнению с однотактными усилителями. Снижение уровня гармоник происходит, главным образом, за счет подавления второй гармоники, доминирующей обычно в спектре искажений «однотактников».

Иногда в двухтактных усилителях класса АВ используют большое значение тока покоя, переводя усилитель в класс А для малых сигналов, соответствующих выходной мощности около 1 Вт. Многие эксперты отмечают особую важность качества *«первого ватта»* для повышения естественности звуковоспроизведения.

Важность первого ватта связана с тем, что при типичной чувствительности головки громкоговорителя на уровне 90 дБ/Вт мощности в 1 Вт достаточно для комфортного прослушивания негромкой (камерной, джазовой) музыки. В рекламных целях некоторые производители объявляют усилители такого типа усилителями класса А, что не совсем верно, если не уточняется до какого уровня мощности действительно сохраняется режим класса А.

Усилители классов D, G, H, T

Существуют и другие классы усилителей, предназначенные для усиления звука с максимально возможным КПД. Они обозначаются буквами D, G, H, T. В высококачественной аппаратуре такие типы усилителей не используются. При этом некоторые из них могут иметь объективно высокие параметры (например, низкое значение коэффициента нелинейных искажений). Усилители класса H в виде мощных интегральных схем используются в некоторых конструкциях автомобильных сабвуферов.

Усилители класса D используют широтно-импульсную модуляцию (ШИМ): преобразование сигнала на входе в последовательность коротких импульсов различной длительности и обратное восстановление на выходе усилителя.

Несколько лет назад появились ШИМ-усилители с обозначением «класс T» в виде мощных интегральных схем и были разрекламированы как высококачественные системы. Автор этой книги приобрел такой усилитель. При напряжении питания 12 В усилитель отдавал в нагрузку до 10 Вт мощности, рассеивая на корпусе микросхемы всего 1 Вт (т. е. КПД около 90 %!). Однако звучание усилителя качественным назвать нельзя: при прослушивании создается впечатление, что кроме музыки в помещении непрерывно работает распылительный аэрозольный баллончик.

Мостовые усилители

Для повышения мощности (в 2—4 раза) при неизменном напряжении источника питания иногда применяют *мостовое* включение двух полноценных усилителей. В этом случае на вход каждого усилителя подаются в *противофазе* две полные копии входного сигнала, а на нагрузке выходные напряжения складываются, что и обеспечивает в идеале 4-кратное увеличение выходной мощности. Для формирования двух противофазных копий входного сигнала требуется дополнительный каскад. В мостовом усилителе так же, как и в двухтактном выходном каскаде, подавляются четные гармоники.

Мостовые усилители широко используются в автомобильной аудиотехнике, позволяя получать до 50 Вт выходной мощности на нагрузке 2—4 Ом при напряжении питания 14 В.

По мнению автора этой книги, сфера применения мостовых усилителей не должна ограничиваться низковольтными устройствами. Мостовые усилители хорошо звучат, и достигается это, по-видимому, не столько за счет снижения уровня четных гармоник, сколько из-за

исключения связи силовой «земли» с нагрузкой. В мостовой схеме катушка громкоговорителя подключается непосредственно к двум «горячим», т. е. «неземляным» клеммам каждого из усилителей. Как известно, гальваническая связь сигнальной и силовой «земли» порождает помехи, связанные с воздействием переходных процессов на выходе усилителя на форму сигнала на его входе.

Обратная связь

В абсолютном большинстве транзисторных усилителей достижение высоких объективных (т. е. измеряемых с помощью электронных приборов) характеристик (не звучания, а именно характеристик) достигается применением глубокой общей отрицательной обратной связи (ООС), охватывающей полностью усилитель мощности с входной чувствительностью около 1 В. Альтернативный подход, сторонником которого является и автор этой книги, состоит в отказе от общей ООС в аудиоусилителях. Поэтому, кроме классификации по режиму работы оконечного каскада (класс А, В, и т. д.), усилители классифицируют еще и по наличию-отсутствию общей ООС.

В настоящей книге все описанные в главе 4 и рекомендованные для повторения в главе 6 схемы являются без-ООС-ными. Все рекомендуемые ламповые каскады работают в классе А. А вот для оконечных транзисторных каскадов в главе 6 будут предложены варианты как класса А, так и класса АВ.

1.5. Электротехнические параметры качества

Попытка использовать технические характеристики, чтобы охарактеризовать нюансы звукопередачи, оказалась безуспешной. Усилители со схожими характеристиками неодинаковы, и аппараты с большей мощностью, более широкой полосой частот, более низкими искажениями не обязательно звучат лучше.

Нельсон Пасс*

* N. Pass, «Single ended class A». <http://www.passlabs.com/articles/seclassa.htm>. Нельсон Пасс — руководитель фирмы «Pass Labs», развивающий концепцию построения усилителей с максимально коротким трактом прохождения сигнала.

Как «поверить алгеброй гармонию»?

Поскольку коммерческая аппаратура для звуковоспроизведения разрабатывается не музыкантами и, как правило, даже не меломанами, производители характеризуют свой продукт набором технических параметров. И здесь возникают серьезные трудности. Как «поверить алгеброй гармонию»? Как определить на языке цифр, измерить с помощью приборов качество компонентов звукового тракта, чтобы можно было достоверно предсказать до прослушивания музыкальных записей, какое из устройств будет звучать лучше, а какое хуже?

Выходная мощность

Первичным параметром, характеризующим возможности усилителя, является его выходная мощность с указанием на каком **активном сопротивлении** нагрузки она развивается. Даже этот, казалось бы, интуитивно понятный параметр, может ввести в заблуждение слушателя. Различают номинальную, максимальную и музыкальную мощность. Все они измеряются при подаче на вход синусоидального сигнала постоянной амплитуды.

Номинальной мощностью называют мощность, при которой гарантируется нормированный коэффициент гармоник (например, 0,02 % на частоте 1 кГц и 0,05 % на частоте 10 кГц для хорошего транзисторного усилителя с ООС).

Максимальной мощностью называют мощность, при которой суммарный коэффициент гармоник на некоторой средней частоте (обычно 1 кГц) составляет 10 %.

Музыкальной называют мощность, которую способен развить усилитель в течение очень короткого времени, порядка 1 миллисекунды, и при этом не выйдет из строя.



Примечание.

Эти цифры всегда выше реальных потребительских параметров.

Учитывая динамичный характер музыкальных произведений с многократным изменением уровня громкости в пределах одной пьесы, **номинальную в электротехническом смысле мощность следует признать максимальной для воспроизведения музыки, а средняя мощность комфортного прослушивания окажется в несколько раз ниже.**

Это условие следует дополнительно ужесточить применительно к типичным транзисторным усилителям с глубокой ООС.



Примечание.

Дело в том, что для таких усилителей неуловимое на слух увеличение мощности на 10—15 % выше номинальной в электротехническом смысле, приводит к росту общего коэффициента нелинейных искажений до ста и более раз!

Что касается указанных выше электротехнических определений максимальной мощности и музыкальной мощности, то они характеризуют параметры усилителя как своеобразного «нагревательного прибора» и никакого отношения к его музыкальным характеристикам вообще не имеют. Общество защиты прав потребителей вправе подать иск на применение производителями аудиоаппаратуры в коммерческих целях параметров, вводящих в заблуждение покупателей и намеренно завышающих характеристики продукта с целью повышения его привлекательности.

Эксперты аудиожурналов при испытаниях промышленной аппаратуры учитывают это обстоятельство и обычно проводят технические испытания усилителей при мощности на уровне 0,1 от номинальной. Это соответствует реальным условиям прослушивания фонограмм.

Коэффициент гармоник

В первом приближении качество усилителя описывают введением общего коэффициента нелинейных искажений (КНИ), часто называемого *общим коэффициентом гармонических искажений* (по-английски — Total Harmonic Distortions, THD — общие гармонические искажения). Этот коэффициент определяется как отношение квадратного корня из суммы квадратов среднеквадратичных значений напряжений для всех возникающих на выходе усилителя частот, кратных частоте входного гармонического сигнала f , к напряжению входного сигнала U_f т. е.

$$КНИ = \frac{\sqrt{U_{2f}^2 + U_{3f}^2 + U_{4f}^2 + U_{5f}^2 + \dots}}{U_f}.$$

Этот параметр приводят в технических спецификациях всех промышленных усилителей. Более подробный анализ гармонических

искажений включает исследование относительного вклада различных гармоник в общий КНИ. У ламповых однотоктных усилителей обычно доминирует вторая гармоника (1—2 %), вклад всех остальных, вместе взятых, намного меньше, причем их амплитуда быстро убывает с номером гармоники.

В ламповых двухтактных усилителях четные гармоники, прежде всего вторая, подавлены, поэтому суммарный КНИ таких усилителей ниже 1 %. Это, однако, не приводит к повышению субъективно воспринимаемого качества звучания. В хороших транзисторных двухтактных усилителях с глубокой ООС суммарный КНИ может быть ниже 0,01 %. При этом качество звучания, как правило, субъективно оказывается ниже, чем ламповых *однотоктных* усилителей.

Субъективное восприятие нелинейных гармонических искажений существенно зависит от номера гармоники. Часто можно прочесть или услышать, что четные гармоники благозвучны, а нечетные — нет, а также о том, что заметность гармоник растет пропорционально их номеру или квадрату номера. Это не совсем верно.

Рассмотрим заметность гармоник в зависимости от их номера более подробно.

Четные гармоники, которые можно представить в виде 2^n , где n — *натуральное число* ($n = 1, 2, 3, \dots$), т. е. вторая, четвертая, восьмая, шестнадцатая и т. д. соответствуют изменению высоты звука на n октав. Такие искажения не вызывают дискомфорта при прослушивании.

Напротив, при сольном исполнении или в случае небольших ансамблей их присутствие может даже обогащать звучание, делать его более наполненным.



Пример.

Чтобы понять, как влияет на восприятие музыки вторая гармоника, сравните звучание шести- и двенадцатиструнной гитары. В последнем случае более толстые четвертая, пятая и шестая струны снабжены более тонкими струнами, настроенными на октаву выше каждой из основных струн. Звучание трех более толстых струн совместно с дополнительными соответствует доле второй гармоники в десятки процентов. А звучит отлично!



Примечание.

В дополнение к приведенным аргументам о влиянии четных гармоник на субъективные ощущения при звуковоспроизведении, необхо-

димо заметить, что присутствие благозвучных четных гармоник частично маскирует неприятные ощущения от наличия в выходном сигнале нечетных гармоник.

Нечетные гармоники также воспринимаются по-разному. *Менее всего заметна третья гармоника.* Это связано с тем, что увеличение частоты в три раза соответствует переходу к музыкальному интервалу, называемому квинтой, только в следующей октаве (см. принципы построения музыкальных аккордов на стр. 14). Можно предположить, что ее собственные четные гармоники (3×2^n , т. е. шестая, двенадцатая и т. д.), окажутся также менее заметными на слух. А вот ее собственная третья гармоника, т. е. девятая (квинта от квинты) уже выпадает из музыкального консонанса и может быть очень заметна на слух.

Таким образом, наиболее неприятными для слуха оказываются *пятая, седьмая, девятая, десятая, одиннадцатая, тринадцатая, четырнадцатая и др. гармоники* более высоких порядков (табл. 1.2).

Заметность гармонических искажений музыкального сигнала

Таблица 1.2

Степень заметности	Низкая заметность	Средняя заметность	Высокая заметность
Номер гармоники	2, 4, 8, 16, ... (2^n , $n = 1, 2, \dots$)	3, 6, 12, ... (3×2^n , $n = 1, 2, \dots$)	5, 7, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 25 и более высокие гармоники, не описываемые выражениями 2^n , 3×2^n

К сожалению, они присутствуют во многих транзисторных усилителях с глубокой ООС, включая не самые дешевые аппараты. Обратимся для примера к обзору транзисторных усилителей ценовой категории 1500 долл. США («Салон AV», №7, 2003, с. 41).

Усилитель «Van Medevoor MA230» номинальной мощностью 100 Вт при мощности 10 % от номинальной содержит в спектре выходного сигнала равномерный уровень гармоник вплоть до 20-й (!), хотя общий коэффициент гармоник при этом весьма невелик — 0,022 % для частоты 1 кГц. В то же время в 5 раз менее мощный транзисторный усилитель класса A Sugden A21 той же ценовой категории содержит лишь вторую, третью и шестую гармоники (каждая примерно по 0,01 %), а уровень остальных гармоник ниже чувствительности использованной для тестирования аппаратуры.

Ауральный спектр гармоник и критерий Чивера

Наше ухо тоже генерирует гармоники. Об этом можно прочитать, например, в книге Харрри Ольсона «Музыка, физика и техника»*. Зависимость относительной интенсивности гармоник, создаваемой нашим ухом, от частоты будем называть «ауральным спектром гармоник» от латинского *auris* — ухо, слух.

При средних и высоких уровнях громкости уровень второй гармоники составляет от 1 до 10 % (!), а уровень остальных гармоник резко понижается с ростом номера гармоники. Основываясь на результатах Ольсона по собственным гармоникам человеческого уха, Даниел Чивер** предложил удивительно простой, интуитивно ясный и научно обоснованный критерий для технического прогнозирования верности звуковоспроизведения:

чтобы звучание воспроизводимой фонограммы воспринималось как естественное, достоверное, высококачественное, спектр гармонических искажений звуковоспроизводящей аппаратуры должен быть ниже аурального спектра гармоник.

Ауральный спектр гармоник, построенный Д. Чивером по данным Х. Ольсона для диапазона уровней громкости от 70 до 100 дБ, представлен на рис. 1.2. Уровень основного тона, т. е. гармоники номер один, принят за 100 %.



Примечание.

Напомним, что используемые нами акустические системы, как правило, создают уровень примерно 86—90 дБ при подведении к ним электрической мощности 1 Вт.

Таким образом, диапазон 70—100 дБ примерно соответствует прослушиванию реальных записей в домашних условиях. Как видим, критерий Чивера в целом согласуется с известным мнением о том, что заметность гармонических искажений повышается с увеличением номера гармоники. Но в дополнение к этому утверждению критерий

* H. F. Olson. Music, Physics, and Engineering. Dover Publ., New York, 1967, 470 с.

** Daniel H. Cheever. A new methodology for audio frequency power amplifier testing based on psychoacoustic data that better correlates with sound quality. — Univ. New Hampshire Thesis, 2001. Русский перевод, сделанный Александром Гурским, доступен на сайте Евгения Карпова <http://www.next-tube.com/ru>

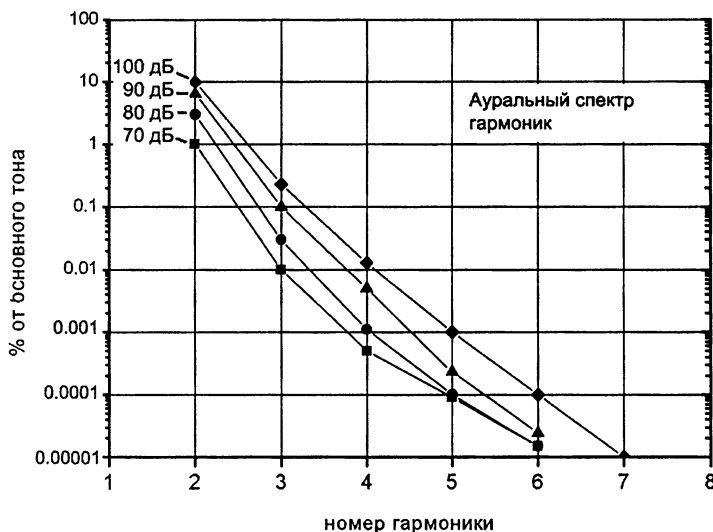


Рис. 1.2. Спектр гармоник, генерируемых ухом человека

Чивера указывает границы чувствительности уха к гармоническим искажениям: от 1—10 % для первой гармоники до 0,00001—0,0001 % для шестой и еще меньше — для более высоких. Последний интервал значений может оказаться за пределами чувствительности аппаратуры, используемой для тестирования усилителей.

Во всяком случае, рассуждения этого и предыдущего раздела указывают на то, что данные об общем низком коэффициенте гармоник на уровне примерно 0,01 % не могут *a priori* (т. е. заранее, до прослушивания) указать однозначно на высокую верность воспроизведения. Ведь чувствительность уха по отношению к высшим гармоникам находится на уровне 0,0001 % или даже ниже.

Совершенно очевидно, что и данные об общем высоком коэффициенте гармоник на уровне, скажем, 1—2 %, не могут *a priori* однозначно указать на низкое качество звуковоспроизведения. Более информативным для априорного оценивания аппаратуры и прогнозирования качества звучания является *анализ спектра гармоник*, который должен находиться ниже аурального спектра или, по меньшей мере, ниже чувствительности измерительной аппаратуры для той части спектрального диапазона, где чувствительность уха к гармоникам выше чувствительности измерительной аппаратуры.

Подобные соображения, кроме Дэниэла Чивера, были высказаны также Торстеном Лечем (Thorsten Loesch) в статье «Некоторые мысли о звучании

прямонакальных триодов». Так же, как и Чивер, он отметил, что прямонакальные триоды обладают спектром гармоник ниже аурального.

Отметим, что все выше приведенные рассуждения относятся исключительно к тестам с использованием модельного гармонического (т. е. синусоидального) испытательного сигнала. Такой сигнал имеет мало общего с реальным музыкальным материалом, но зато и сам сигнал, и его искажения хорошо поддаются математической обработке.

Коэффициент интермодуляционных искажений

Интермодуляционные искажения возникают при одновременной подаче на вход усилителя нескольких гармонических, т. е. синусоидальных сигналов. Они представляют собой напряжение суммарных, разностных и комбинированных частот по отношению к частотам, содержащимся во входном сигнале. Анализ интермодуляционных искажений — попытка приблизиться к реальному сложному сигналу при испытаниях усилителей. Для определения интермодуляционных искажений в одной из методик на вход подают два сигнала одинаковой амплитуды с частотами 19 и 20 кГц, а в другой методике — сигналы с частотами 7 кГц и 60 Гц.

Первая методика применяется экспертами многих журналов при тестировании усилителей. Вторая методика иногда входит в набор стандартных тестов, выполняемых производителем.



Примечание.

Математически доказано, что интермодуляционные искажения однозначно определяются спектром гармонических искажений. В связи с этим в дальнейшем в этой книге интермодуляционные искажения обсуждаться не будут.

Объективисты против субъективистов

Часто усилители с лучшими техническими характеристиками уступают другим аппаратам в естественности звучания, формировании пространственной сцены, в психо-эмоциональных и других недокументируемых ощущениях от прослушивания. Это приводит к недоверию к техническим тестам и открытому пренебрежению ими.

Можно привести множество примеров, когда техническое тестирование хорошего транзисторного усилителя и лампового однотактного

усилителя класса А по общему КНИ и интермодуляционным искажениям выявляет с большим перевесом превосходство транзисторной схемы, в то время как прослушивание явно выявляет преимущества ламповой схемы по сравнению с транзисторной.



Примечание.

К сожалению, подавляющее большинство конструкторов звукоусилительной аппаратуры до сих пор ориентируются на электротехнические характеристики и пренебрежительно относятся к поклонникам субъективного тестирования путем прослушивания фонограмм вместо электротехнических измерений.

Типичный пример такого технократического, электротехнического подхода к звукоусилению — 5 изданий опубликованной крупным научным издательством книги Дугласа Селфа — авторитетного в кругах звукоинженеров разработчика усилительной аппаратуры*. Автор этих строк приобрел эту книгу, прочитал и, поняв, что она ему никогда больше не потребуется, подарил знакомому инженеру-электронщику.

Желание воспроизвести хотя бы одну из приведенных в этой книге схем почему-то не возникло. Д. Селф в своей книге поставил задачу получить минимальное значение КНИ в звуковом диапазоне для транзисторного усилителя мощности с глубокой ООС, содержащего до полусотни элементов. При этом не анализируются ни интермодуляционные искажения, ни спектр гармонических искажений, ни переходные характеристики и, конечно же, ничего не сообщается о субъективном восприятии звучания предлагаемых усилителей.

Конструирование усилителей под заданные технические характеристики при полном игнорировании результатов сравнительных прослушиваний привело к разочарованию широких слоев меломанов в массе транзисторных аппаратов с заоблачной мощностью и ничтожно малыми нелинейными искажениями. Возникло недоверие к транзисторной технике и к современным технологиям. Получило распространение мнение, что измерения вообще бесполезны, а свойства аппаратуры, влияющие на верность звуковоспроизведения, не поддаются техническому анализу.

К сожалению, и в лагере субъективистов, и в лагере объективистов все чаще раздаются агрессивные, чересчур категоричные заявления,

* D. Self. Audio Power Amplifier Design Handbook. Elsevier 2009 (5th edition). 608 с.

отдаляющие их не только друг от друга, но и от прояснения истины. Наиболее печально, что в этих горячих дискуссиях оба лагеря отдаляются от музыки!

Объективистов, как правило, упрекают в увлечении цифрами в ущерб достоверности, натуральности воспроизведения. Субъективистов обвиняют в склонности к эзотеризму, в преклонении перед высокой стоимостью некоторых аудиокомпонентов, в фиктивной, кажущейся чувствительности к характеристикам звучания, не поддающейся рациональному, т. е. техническому объяснению.

Истина, как это часто бывает, находится посередине.

Приведу примеры, показывающие, как возникает непонимание при общении инженеров и любителей музыки. Одним из параметров звуковоспроизводящей аппаратуры является динамический диапазон. Он обычно определяется как отношение максимального уровня сигнала на выходе к минимальному, за который часто принимают уровень шума при отсутствии сигнала на входе.

Но дает ли такое определение реальный динамический диапазон звуковоспроизведения, т. е. соотношение между самым громким и самым тихим *музыкальным звуком*, а не амплитудами технических сигналов? Для винилового проигрывателя уровень шума определяется часто треском пластинки и гулом двигателя. На этом фоне вполне распознаются музыкальные звуки такого же уровня. Они распознаются мозгом как определенный образ, портрет, а если такие звуки образуют мелодию, то это дополнительно повышает распознавание.

Вспомните, как окулист проверяет распознавание пациентом цветов. Пятнистое изображение цифры, зашумленное разноцветными пятнами, узнаваемо не только потому, что отличается по цвету, но и потому что мы знаем цифры. Аналог технического параметра сигнал/шум — идентификация красных пятен на фоне зеленых. А распознавание цветного пятнистого образа — это уже шаг к аналогу музыкального динамического диапазона.

Таким образом, в случае винилового проигрывателя *музыкальный* динамический диапазон оказывается *шире* технического отношения максимального и минимального тестовых сигналов и отношения сигнал/шум.

Теперь перейдем к CD-проигрывателю — детищу прогресса, вызвавшему на фоне лампового ренессанса не менее неожиданный, драматичный и эмоциональный «виниловый» ренессанс. Для CD-проигрывателей тоже указывают соотношение сигнал/шум как

динамический диапазон. Это — если не обман покупателя, то, по меньшей мере — введение в заблуждение.

Ведь для цифрового источника отношение самого сильного сигнала к самому слабому задается разрядностью аналого-цифрового преобразования, а не шумами электронного тракта или наводками. В цифровой записи нет *звуков* тише, чем уровень первого цифрового разряда. Поэтому для CD-проигрывателя *музыкальный* динамический диапазон оказывается *более узким*, чем техническое отношение сигнал/шум.

Теперь сравним звучание винил-проигрывателя с паспортным динамическим диапазоном 60 дБ и CD-проигрывателя с динамическим диапазоном 90 дБ. Разница в цифрах колоссальная, однако, она в полной мере не проявляется при прослушивании *музыки*.

Подобные основания возникают и по отношению к мощности аппаратуры. Номинальная в электрическом смысле мощность для 99 % представленных на рынке транзисторных усилителей в 3—4 раза выше реальной мощности, которую они могут выдать при прослушивании музыки. Такая разница появляется из-за динамичности фонограмм и жесткого «транзисторного» ограничения сигнала с ростом мощности.

То есть получается, что объективная характеристика усилителя, влияющая на его привлекательность для покупателя, завышена производителем в несколько раз. Это неизбежно приводит и к разочарованию после покупки, и к недоверию к производителю, и к неверию в целесообразность применения технических характеристик в целом. Данная особенность транзисторных усилителей подробно обсуждается в следующей главе.

Эти примеры показывают, как инженеры дают *технически обоснованное и верифицируемое* основание не доверять «как бы объективным» параметрам. Так объективисты сами порождают субъективистов...

Действительно ли технические параметры полностью бессмысленны и бесполезны? Конечно, нет. Первичные параметры, такие как мощность и полоса пропускания указывают достаточно определенно на качество звучания. Если мощность усилителя 1 Вт, а полоса 100 Гц — 5 кГц, он всегда будет звучать хуже аппарата с мощностью 10 Вт и полосой 20 Гц — 20 кГц.

Но этим предсказательные возможности объективного тестирования не исчерпываются. О многом может сказать элементарное взвешивание. Малая масса означает слабый силовой трансформатор и, как следствие, — плохое воспроизведение низких частот. Хороший лампо-

вый усилитель, работающий в классе А, или его транзисторный «одно-классник» имеют около 1 кг массы на 1 Вт выходной мощности в каждом канале. Хороший ламповый или транзисторный усилитель класса АВ (насколько таковые могут считаться хорошими) легче — в 3—5 раз в случае лампового аппарата и в 5—8 раз в случае транзисторного.

**Примечание.**

Нет хороших усилителей весом 5 кг при мощности 50 Вт на канал.

Почти окончательный диагноз можно поставить при «вскрытии», если таковое допустимо. Типы ламп, транзисторов, конденсаторов, диодов (кенотронов) и даже резисторов могут указать на многое. **Размер радиаторов** в транзисторных усилителях весьма красноречив. Очень малая площадь радиаторов — признак жесткого класса В с минимальным током покоя (гарантировано «транзисторное звучание» да еще и слабая перегрузочная способность). Или еще хуже — признак несовместимых с высоким качеством звучания, но экономичных по энергопотреблению класса D или ШИМ-преобразования в тракте. Есть, к сожалению, и такие усилители, причем стоят более 1 тыс. долл.

Далее, по мнению автора, характер звучания усилителя можно с определенной достоверностью предсказать, исходя из схемотехнической концепции:

- ♦ лампы или транзисторы,
- ♦ одноктактный или двухтактный выходной каскад,
- ♦ есть ООС или нет,
- ♦ класс А или В.

На все эти вопросы можно ответить на основании внешнего осмотра «внутренностей» аппарата. И это будет также анализом объективных параметров усилителя. Устройство аппарата — это ведь тоже его техническая характеристика!

Если в пределах одной схемотехнической парадигмы принимать меры по улучшению технических характеристик, то с большой вероятностью можно предсказать изменение звучания. Например, в усилителе без ООС высокое выходное сопротивление порядка 10 Ом может приводить:

- ♦ к «рыхлому» и немного навязчивому басу;
- ♦ к некоторому «визжанию» медных духовых инструментов из-за роста звукового давления вследствие роста сопротивления нагрузки вблизи частоты раздела НЧ-СЧ и ВЧ головок в двухпо-

лосной акустической системе (в двухполосных системах индуктивность массивной НЧ-СЧ головки относительно велика).

В этой ситуации введение неглубокой отрицательной обратной связи в выходном каскаде дает предсказуемое изменение характера звучания, в чем автор этой книги имел возможность убедиться лично.

Приведу еще один **пример из личного опыта**. Многие транзисторные усилители мощности имеют схмотехнику, близкую к операционным усилителям, с дифференциальным усилителем на входе и неинвертирующим включением. Обратная связь заводится с выхода усилителя (клемма для подключения громкоговорителя) на инвертирующий вход дифференциального усилителя. При этом транзистор первого каскада дифференциального усилителя (неинвертирующий вход) оказывается вне петли обратной связи.

В литературе неоднократно высказывалось мнение, что переход к инвертирующему усилителю мощности с введением первого транзистора в петлю ООС и с добавлением входного буфера, не охваченного ОООС с клеммы громкоговорителя, улучшает качество звучания. Автор этих строк подтверждает, что такое улучшение действительно имеет место и оно вполне ощутимо на слух: появляется больше деталей и «воздуха» в звучании.

Более того, в рамках этой же схмотехнической концепции можно перейти к мостовому включению, удвоив количество блоков усилителя мощности в каждом канале и изменив схему включения входного буфера в одном из плеч каждого канала. Улучшение звучания может быть передано как большая мягкость и певучесть, примерно как сопоставление звука двигателя автомобиля до и после замены отработавшего масла.

Известно, что мостовое включение понижает общий коэффициент гармоник, **например**, за счет того, что компенсируются четные гармоники.



Примечание.

На взгляд автора, основное преимущество мостового усилителя состоит в том, что при мостовом включении акустическая система не подключена к общему проводу сигнальной цепи.

Поэтому электродинамическая «отдача» головки громкоговорителя при переходных процессах (см. подробнее в следующем разделе 2.1 «Как воспринимается громкоговоритель усилителем») возвращается только в усилитель мощности, не затрагивая входных сигнальных цепей.

Указанные примеры говорят о том, что контролируемое изменение глубины обратной связи (приводящее к уменьшению выходного сопротивления), уменьшение общего коэффициента гармоник без изменения концепции построения усилителя действительно соответствуют и измененным техническим характеристикам, и ожидаемым результатам.

Однако стоило автору перейти к другим концепциям построения усилителей, а именно — к ламповому одноканальному усилителю класса А без ООС, транзисторному усилителю класса АВ без ООС, транзисторному усилителю класса А без ООС — и звучание кардинально изменилось вне всякой корреляции с коэффициентом гармоник.

Впечатление такое, как будто на сцене раздвинули занавес, или как будто музыканты вышли из-за угла. В звучании появился особый «драйв», запели не только солисты, но и барабаны. Медные духовые инструменты зазвучали празднично и ярко, а струнные смычковые — глубоко и наполненно. И «сцена», и «слоистость», и «артикулированность», и «воздушность» обрели реальный, осязаемый смысл.

Все имевшиеся у автора ООС-ные усилители были после этого раздарены знакомым. Один из них у нового владельца сразу легко «переиграл» «Harman-Kardon», а другой — «Technics», причем оба — не самой низкой ценовой категории.

С тех пор автор не построил ни одного усилителя по традиционной концепции с глубокой ООС и предлагает читателям этой книги последовать его примеру.

ЛАМПЫ ИЛИ ТРАНЗИСТОРЫ: «ЗА» И «ПРОТИВ»

Из этой главы читатель узнает, как и почему в аудиотехнике возник ламповый ренессанс, могут ли самодельщики конкурировать с профессиональными разработчиками и почему нельзя приблизить звучание транзисторного усилителя к ламповому, вводя искажения.

2.1. Как воспринимается громкоговоритель усилителем?

Проблема создания высококачественного аудиоусилителя во многом сводится к обеспечению достоверного воспроизведения импульсного электрического сигнала на реактивную (комплексную) нагрузку. Однако все испытания усилителей для определения их технических характеристик проводятся, *во-первых*, в стационарных условиях, *во-вторых*, с использованием синусоидальных сигналов и, *в-третьих*, при работе усилителя на чисто активную нагрузку. Именно так определяются:

- ♦ мощность;
- ♦ полоса пропускания;
- ♦ суммарный коэффициент нелинейных искажений (КНИ);
- ♦ зависимость КНИ от частоты и от номера гармоники;
- ♦ коэффициент интермодуляционных искажений;
- ♦ выходное сопротивление.

В то же время, *реальный музыкальный сигнал имеет очень мало общего с синусоидой, а реальные громкоговорители очень мало похожи на активные сопротивления.*

На рис. 2.1 представлена типичная зависимость сопротивления от частоты для громкоговорителя в акустическом оформлении типа «фазоинвертор». Номинальное сопротивление для такой акустической системы указано «8 Ом». Однако, как видно из рис. 2.1, зависимость

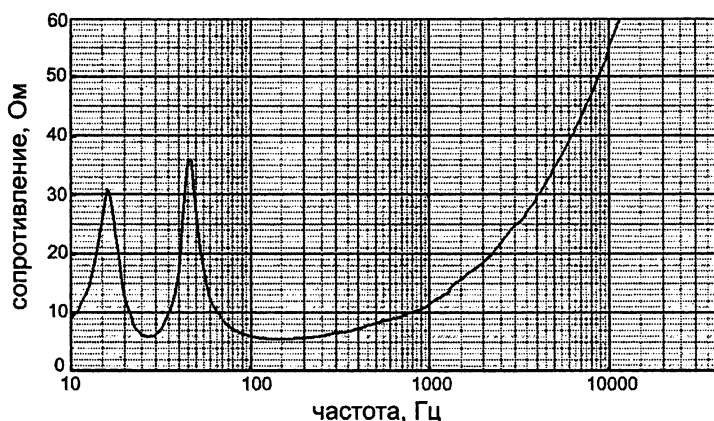


Рис. 2.1. Зависимость от частоты сопротивления громкоговорителя в акустическом оформлении типа «фазоинвертор»

сопротивления от частоты немонотонна, его значение в полосе частот от 10 до 2000 Гц изменяется от 5 до 30 Ом. Вблизи 2000 Гц обычно находится частота разделения сигнала между низко- и высокочастотным громкоговорителями.

Два низкочастотных пика вызваны взаимодействием громкоговорителя для частот, близких к его резонансной частоте (45 Гц) с колебаниями воздуха в трубе фазоинвертора, настроенного на эту же частоту. При отсутствии фазоинвертора, например, в оформлении типа «закрытый ящик», громкоговоритель имеет один высокий пик до 50 и даже более ом на частоте резонанса.

Монотонный рост сопротивления с ростом частоты выше 150 Гц — следствие индуктивности $L = 1\text{—}2$ мГн катушки громкоговорителя.



Примечание.

Напомним, что сопротивление катушки индуктивностью L на частоте f равно $R_L = 2\pi Lf$. С ростом частоты индуктивность катушки громкоговорителя снижается в 2 и более раз вследствие снижения магнитной проницаемости материала, из которого изготовлен постоянный магнит.

В двух- и трехполосных системах вблизи частот раздела появляются дополнительные пики сопротивления. При этом абсолютные значения сопротивления в высокочастотной области уменьшаются, так как индуктивность высокочастотных громкоговорителей значительно ниже индуктивности низкочастотных головок.

Реактивная нагрузка затрудняет нормальную работу усилительного тракта. При возбуждении тока в катушке громкоговорителя возникает переходный электромагнитный процесс. Вызванный этим процессом импульс тока, проходя через выходное сопротивление усилителя, попадает в цепь обратной связи. Такое «дополнение» к собственным переходным процессам охваченного обратной связью усилительного тракта приводит к негативным последствиям.

Очень низкое выходное сопротивление порядка $10^{-1} \dots 10^{-2}$ Ом, присущее транзисторным усилителям с глубокой отрицательной обратной связью, приводит к большим значениям переходных токов.

Частотную характеристику громкоговорителя можно, в принципе, линеаризовать, вводя корректирующие индуктивности, емкости и резисторы. Пример такой коррекции для низкочастотного громкоговорителя показан на рис. 2.2.

Читателю предлагается самостоятельно мысленно экстраполировать эту схему для двух- и трехполосной акустической системы, т. е. добавить к цепям линеаризации еще и разделительные фильтры, а количество динамических головок увеличить до двух или трех.

Цепочки L1C1 и L2C2 компенсируют низкочастотные резонансы, а R3C3 компенсирует рост сопротивления на высоких частотах (сопротивление конденсатора емкостью C равно $R_C = 1/(2\pi fC)$). Не будем подробно анализировать работу такой схемы, так как автор является явным противником какого-либо усложнения тракта на пути от выхода усилителя к звуковой катушке громкоговорителя. Рис. 2.2 приведен только для того, чтобы отметить нецелесообразность такой коррекции.

Действительно, комбинация «громкоговорители + фильтры + цепи линеаризации» будет «видна» усилителем как чисто активное сопротивление и он, по-видимому, обеспечит *электрические* характеристики (выходную мощность, коэффициент гармоник, их спектр, интермодуляционные искажения), соответствующие испытаниям с чисто активной нагрузкой.

Усилителю будет работать легче. Но как насчет *акустических* характеристик? Как будет *звучать* громкоговоритель? Что услышит слушатель от системы «громкоговорители + фильтры + цепи линеаризации»? Ведь сигнал на выходе

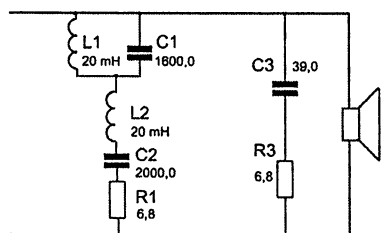


Рис. 2.2. Громкоговоритель с LC- и RC-цепочками для выравнивания зависимости его сопротивления от частоты

усилителя теперь будет распределен между громкоговорителями и почти десятком пассивных реактивных элементов! Они явно исказят работу громкоговорителя, особенно его импульсный отклик.

На другом «полюсе» подходов к конструированию акустических систем находятся системы с единственным широкополосным громкоговорителем либо двухполосные, иногда коаксиальные, системы с единственным конденсатором для разделения низких и высоких частот. На них и следует ориентироваться при конструировании усилителей для высококачественного звуковоспроизведения.

2.2. Ламповый ренессанс

Вместо усложнения схемы акустической системы без гарантии улучшения качества звучания системы «усилитель + акустическая система» представляется целесообразным попробовать отказаться от глубокой общей отрицательной обратной связи в усилителе. Так и получилось в истории развития звукотехники. Именно с таким, хотя, по-видимому, и не вполне осознанным подходом, связано явление в развитии звукотехники, обозначаемое термином «ламповый ренессанс».

В середине прошлого века доминирование инженерно-технического мышления при конструировании аудиоаппаратуры привело к тому, что совершенствование усилителей шло по пути снижения *общего* коэффициента гармонических искажений, измеряемых с помощью синусоидального сигнала при работе усилителя на активную нагрузку. Снижение общего коэффициента гармоник до значений 0,1 % и менее достигалось глубокой отрицательной обратной связью.

Глубокая отрицательная обратная связь понижает выходное сопротивление. Поэтому одновременно возрастал *демпинг-фактор* — отношение сопротивления нагрузки к выходному сопротивлению усилителя. Рост демпинг-фактора однозначно воспринимался как прогресс в развитии усилителей.



Примечание.

При высоком выходном сопротивлении усилителя воспроизведение самого нижнего частотного диапазона затрудняется тем, что после подачи низкочастотного импульса головка громкоговорителя продолжает колебаться, но уже не с частотой сигнала, а со своей

собственной резонансной частотой. Низкое выходное сопротивление усилителя приводит к быстрому затуханию этих колебаний.

Однако для введения ООС требовался большой исходный коэффициент усиления, т. е. надо было наращивать число каскадов. Но это, в свою очередь, увеличивало искажения не охваченного ООС тракта.

Такая тенденция в конструировании аудиоусилителей началась не в транзисторную эпоху, а гораздо раньше, в 50-е годы, когда в схемотехнике господствовали лампы, и связана с ламповой схемой двухтактного усилителя, известной как схема Вильямсона*. Эта схема содержала несколько каскадов:

- ♦ входной усилитель напряжения, фазоинверсный каскад и затем два работающих в противофазе плеча, в каждом из которых имелся каскад усиления напряжения (т. н. драйверный каскад);
- ♦ выходной каскад, нагруженный на выходной трансформатор.

В выходном каскаде предпочитали устанавливать не триоды, имевшие минимальный коэффициент гармонических искажений, а пентоды (EL34, 6550, KT88), имевшие больший коэффициент усиления по напряжению.

Появление и широкое распространение в аудиотехнике транзисторов серьезно усугубило тенденцию к применению ООС. С транзисторами получить высокий коэффициент усиления стало проще, а все искажения, как казалось, устраняются введением обратной связи. Транзисторные усилители стали компактны, ток покоя выходных транзисторов уменьшали до минимума. Благодаря этому уменьшались и габариты, и среднее энергопотребление при растущей мощности. Возникающие при этом искажения «убивали» обратной связью.

Коэффициент гармонических искажений достигал небывало низких, а демпинг-фактор — небывало высоких значений. Магические цифры « 2×100 Вт, 0,001 % (КНИ), 1000 (демпинг-фактор)» ласкали взгляд (но не слух!) покупателей аудиоаппаратуры и пополняли банковские счета ее производителей.

Эта тенденция породила еще один феномен, отдаливший любителей музыки от музыки при воспроизведении звукозаписей. Получили распространение малогабаритные акустические системы, в которых динамические головки имели диаметр диффузора примерно 10 см. За счет целенаправленного увеличения массы подвижной системы такие головки

* D.T.N. Williamson. Design for a High-Quality amplifier. — Wireless World, April-May 1947.

могут иметь относительно низкую резонансную частоту. Недостаток эффективности из-за возросшей массы компенсировали большей амплитудой колебаний. И, соответственно, большими искажениями.

Если низких частот все равно мало — воспользуемся регуляторами тембра, т. е. поднимем усиление на нижних частотах раз в десять. Тогда почему не поднять и на высоких? А для самых «искушенных» установим 7-полосный эквалайзер! Сформировалось мнение, что хороший усилитель должен иметь мно-о-го регулировок. Возникло ощущение, что для полноценного воспроизведения музыки в жилом помещении необходима мощность усилителя 50 Вт на канал и более, хотя раньше, с обычными, но большими динамиками, такой мощности хватало для озвучивания танцплощадки.

Хотелось создать аппаратуру High Fidelity (Hi-Fi), т. е. высокого качества, а получили феномен «транзис-с-торного» звучания:

- ♦ свист и шелест вместо звона;
- ♦ сухость вместо мягкости;
- ♦ «буханье» вместо тонального баса и т. д.

Многие в те годы понимали неверность такого пути. Например, в 1986 г. вышла книга «Практические схемы высококачественного звуковоспроизведения»*, в которой просто и четко было написано:

«В последние годы резко улучшились параметры высококлассной звуковоспроизводящей аппаратуры. Особенно заметна тенденция к снижению нелинейных искажений. Появились усилители, у которых коэффициент гармоник меньше 0,0005 %. Достижение чрезвычайно малых нелинейных искажений связано с применением большого числа транзисторов с высоким коэффициентом усиления и установлением глубокой отрицательной обратной связи. Последнее обстоятельство приводит к ухудшению динамических (скоростных) характеристик, заключающемуся в том, что резкий скачок напряжения на выходе запаздывает по отношению к вызывающему его скачку на входе. Это приводит к «жесткому», «транзисторному» звучанию».

Эти рассуждения ясно указывают на присутствие т. н. *переходных интермодуляционных искажений* при работе неидеального усилителя, охваченного глубокой отрицательной обратной связью, на *идеальную резистивную* нагрузку. С учетом *реальной комплексной* нагрузки, каковой является головка громкоговорителя, нарушение достовер-

* Д. И. Атаев, В. А. Болотников «Практические схемы высококачественного звуковоспроизведения», Москва, «Радио и связь», 1986, 135 с.

ности передачи импульсных сигналов усилителем с глубокой общей отрицательной связью дополнительно увеличится.

У глубокой отрицательной обратной связи есть и еще одно отрицательное последствие. Оказалось, что *общая отрицательная обратная связь подавляет гармоники низких порядков, но при этом вызывает появление широкого набора гармоник высших порядков*. Чтобы это увидеть, требуется не простое измерение общего коэффициента гармоник, а детальный анализ спектра выходного сигнала. Сегодня расширение спектра гармоник измерить намного проще, чем зарегистрировать искажение импульсного сигнала при работе на реальную нагрузку. Компьютерные программы совместно со звуковой картой делают такие измерения доступными любому радиолюбителю, не говоря о профессиональных инженерах.

Если бы в 60-е годы прошлого столетия инженерам были доступны анализаторы спектра, конструирование аудиоусилителей, по-видимому, развивалось бы по иному пути. Надо добавить: и если бы в те годы был сформулирован критерий Чивера о том, что спектр гармоник звуковоспроизводящей аппаратуры должен быть ниже аурального спектра гармоник. Но поскольку персональных компьютеров не было, а Даниел Чивер, по-видимому, в те годы, даже еще и не родился, получилось то, что мы наблюдаем последние десятилетия.

Массовый спрос продолжал править бал на рынке аудиоаппаратуры. Дальше — больше. «Поскольку аппаратура не воспроизводит тонких нюансов голоса, будем «раскручивать» средних, но эффектных исполнителей», — рассуждали продюсеры. «А голос подтянем электроникой», — поддерживали их инженеры. Если барабаны при звуковоспроизведении не «поют», а стучат, можем заменить их электронной «drum-машиной», если от басовых инструментов остается только буханье — заменим их электроникой. Когда слушаете такие фонограммы, попробуйте ответить на вопрос: Как выглядит музыкальный инструмент, издающий «бухающие» и «стукающие» звуки? И наконец, апофеоз «музыкальной трагедии» — живое исполнение начали подменять прокручиванием «подтянутых» фонограмм во время концертов!

То, что произошло впоследствии, сейчас представляется вполне закономерным.

Произошел «ламповый ренессанс».

Транзисторные схемы с фантастически высокими электрическими характеристиками при работе на резистор, подключенный вместо громкоговорителя, стали постепенно вызывать разочарование аудио-

филов. Разочарование возникло из-за несоответствия высоких электрических характеристик и реально воспринимаемых музыкальных, акустических параметров. Ведущее место в секторе аудиофильской аппаратуры, т. е. в аппаратуре верхнего ценового диапазона стали постепенно занимать ламповые системы, причем построенные не по схеме Вильямсона, содержащей как минимум 6 ламп, а по старым добрым схемам, преимущественно одноктактным, 2—3-каскадным, и без общей отрицательной обратной связи.

**Примечание.**

Важно подчеркнуть, что произошло не столько возвращение к ламповой элементной базе, сколько переход к минимальной протяженности усилительного тракта и отсутствию общей отрицательной обратной связи.

Лампы без ООС «звучат»! Для многих ламповых триодов коэффициент гармоник не превышает 1—2 %, причем эта величина определяется второй гармоникой, присутствует также третья гармоника, а гармоники более высоких порядков отсутствуют. А вот идеология построения транзисторных схем усиления звука без глубокой общей отрицательной обратной связи до сих пор находится в недостаточно развитом состоянии.

Автору представляется, что именно отказ от общей отрицательной обратной связи в оконечном блоке усилителя, непосредственно нагруженном на акустическую систему, развитие соответствующей схемотехники и совершенствование полупроводниковой элементной базы являются ключевыми в лампово-транзисторном «соревновании», происходящем на наших глазах.

Попробуем сравнить типичный хороший ламповый усилитель с типичным хорошим транзисторным усилителем. Стоимость таких усилителей на рынке аудиоаппаратуры составляет от 1500 до 5000 долл. США.

**Примечание.**

Обратим внимание на отличия, которые могут помочь выявить причину различий в звучании ламповых и транзисторных усилителей. Рассмотрим возможности приближения транзисторных устройств по принципам построения и количеству элементов к ламповым с целью приближения их качества звучания к ламповым усилителям.

Параметры типичных ламповых и типичных транзисторных усилителей
ценовой категории 1500—5000 долл. США

Таблица 2.1

Технические характеристики	Ламповые усилители	Транзисторные усилители
Выходная мощность	8—20 Вт	50—100 Вт и более
Суммарный коэффициент гармонических искажений	1—3 %	0,01 % и менее
Спектральное распределение гармонических искажений	см. рис. 2.3, а—в	см. рис. 2.3, г—е
Полоса пропускания	25 Гц ... 25 кГц	2 Гц ... 100 кГц
Выходное сопротивление	3—10 Ом	менее 0,1 Ом
Режим работы выходного каскада	А — рис. 2.3, а, б АВ — рис. 2.3, в	В или АВ, близкий к В
Число усилительных каскадов	2 или 3	более 3
Общее число элементов в тракте от источника до громкоговорителя (в одном канале)	5-6	Более 20, не считая интегральных микросхем
Общее число элементов без блока питания	8—10	50—100
Ценовой диапазон	1500—5000 тыс. долл. США	

Анализируя табл. 2.1, можно заметить следующее.

Во-первых, мощность ламповых усилителей в среднем примерно в 5 раз ниже мощности транзисторных аппаратов.

Во-вторых, суммарный коэффициент гармоник ламповых усилителей в десятки и даже сотни раз выше, чем транзисторных усилителей.

В-третьих, полоса частот лампового усилителя обычно уже, чем у транзисторного.



Примечание.

Полоса пропускания ламповых усилителей ограничивается выходным трансформатором. Лампы способны усиливать сигналы в более широкой полосе частот, чем транзисторы. Именно поэтому лампы сохраняют свои позиции в высокочастотной аппаратуре вне связи с ламповым ренессансом в аудиотехнике.

В-четвертых, выходное сопротивление ламповых усилителей в десятки и более раз выше, чем транзисторных. Высокое выходное сопротивление может привести к «рыхлому», нечеткому воспроизведению басов.

Для ламповых усилителей характерно малое число элементов в звуковом тракте, меньшее число элементов в усилителе в целом (но при этом в среднем значительно больший вес — часто более 1 кг на 1 Вт).

Читатель, по-видимому, заметил, что сравнение проведено не вполне корректно: сравниваются ламповые усилители мощностью

менее 10—20 Вт и транзисторные усилители мощностью 50—100 Вт. Однако, во-первых, такие усилители находятся на рынке аудиофильской аппаратуры в одной ценовой категории, во-вторых, качественные транзисторные усилители мощностью менее 50 Вт практически отсутствуют на рынке.

И, наконец, хорошо известно, что ламповые усилители обеспечивают сопоставимый с транзисторными усилителями уровень громкости при прослушивании музыки при гораздо меньшей *номинальной* паспортной мощности, измеряемой при подаче на вход стационарного синусоидального испытательного сигнала.

Эта особенность восприятия звукозаписей подробно обсуждается далее в этой главе в разделе 2.4 («Мягкое ограничение с ростом уровня выходного сигнала»).

Как видно из таблицы, *все* объективные параметры транзисторного усилителя выше, чем лампового. Однако при субъективных оценках усилителей по достоверности передачи музыки, включая формирование пространственного звукового поля в стереофонических системах звуковоспроизведения, в большинстве случаев хороший ламповый усилитель уверенно «переигрывает» хороший транзисторный.

При этом используются такие характеристики восприятия как «прозрачность», «динамичность», наполненность, хорошая звуковая сцена, «певучесть». Последняя, однако, может быть связана с присутствием второй гармоники в выходном сигнале. Иногда, говоря о звучании ламповых усилителей, говорят о некоторой рыхлости, размытости басов, иногда о навязчивых средних частотах. Оба недостатка связаны с высоким выходным сопротивлением усилителя.

Наиболее приветствуются аудиофилами ламповые усилители с одноканальным оконечным каскадом, работающим в режиме класса А. На рынке представлены стереофонические усилители этого типа, цена которых может достигать и даже превышать 20 тыс. долл. США при выходной мощности до 20 Вт на канал. Таким образом, аудиофилам предлагается заплатить до 1 тыс. долл. США за 1 Вт выходной мощности!

К таким аппаратам относится, например, ламповый усилитель «LAMM ML2.1» (США) с советскими лампами 6С33С в выходном каскаде. Суммарный КНИ усилителя — 0,7 % при мощности 1 Вт и 3 % при мощности 18 Вт. Стоимость — 36 тыс. долл. США. Экстремальный случай — усилитель «Ongaku» фирмы «Audio Note» стоимостью более 100 тыс. долл. с использованием провода из чистого серебра в выходных трансформаторах. Укажем для сравнения другой, нижний, цено-

вой предел: 1 долл. США за 1 Вт выходной мощности усилителей для клубов и дискотек с мощностью несколько сотен ватт.

В усилителях класса А через выходную лампу и первичную обмотку выходного трансформатора при отсутствии управляющего сигнала на сетке в цепи катод-анод выходной лампы протекает непрерывно ток величиной 50—100 мА, а при появлении сигнала величина этого тока модулируется изменением напряжения на сетке лампы.

Ток величиной 100 мА при напряжении питания 300—400 В означает 30—40 Вт непрерывно потребляемой электрической мощности. КПД усилителей класса А составляет примерно 10 %. В таком же режиме работают и лампы (иногда всего одна!) в предварительном каскаде усиления с той разницей, что величина анодного тока обычно не превышает 10 мА.

На рынке аудиофильской аппаратуры представлены также ламповые усилители с двухтактным выходным каскадом, работающим в режиме В, или в близком к нему режиме АВ. В этих усилителях при отсутствии сигнала ток выходной лампы весьма мал, а при появлении сигнала он сильно увеличивается. Обычно двухтактный выходной каскад применяют для увеличения мощности. Представленные на рынке модели имеют мощность от 10 Вт на канал при стоимости от 1500 долл. США до 100 Вт на канал при стоимости более 3000 долл. США.

Серьезные указания на скрытые особенности ламповых усилителей содержатся в *спектре гармонических искажений*. Спектр гармонических искажений обычно не приводится в спецификации производителя, однако в последние годы эта характеристика усилителя подвергается тщательному анализу в различных Hi-Fi-изданиях. Характерные примеры гармонических искажений ламповых и транзисторных аппаратов приведены на рис. 2.3, где показаны уровни мощности гармоник в спектре выходного сигнала по результатам тестирования экспертами журналов «Салон Audio Video» и «Stereofile».

Присмотримся к этим графикам внимательнее. Начнем с транзисторных усилителей (правая часть рис. 2.3). На рис. 2.3, 2 показан спектр гармоник усилителя Krell 400 при мощности 6,5 Вт. Этот усилитель весом 15 кг и стоимостью 3150 долл. имеет «номинальную» мощность на канал 200 Вт на нагрузке 8 Ом при суммарном коэффициенте нелинейных искажений КНИ = 0,04 %.

При мощности 6,5 Вт, однако, суммарный КНИ = 0,3 %, а спектр гармоник имеет весьма характерный вид: четные гармоники отсутствуют, зато нечетные просматриваются до 21-ой!

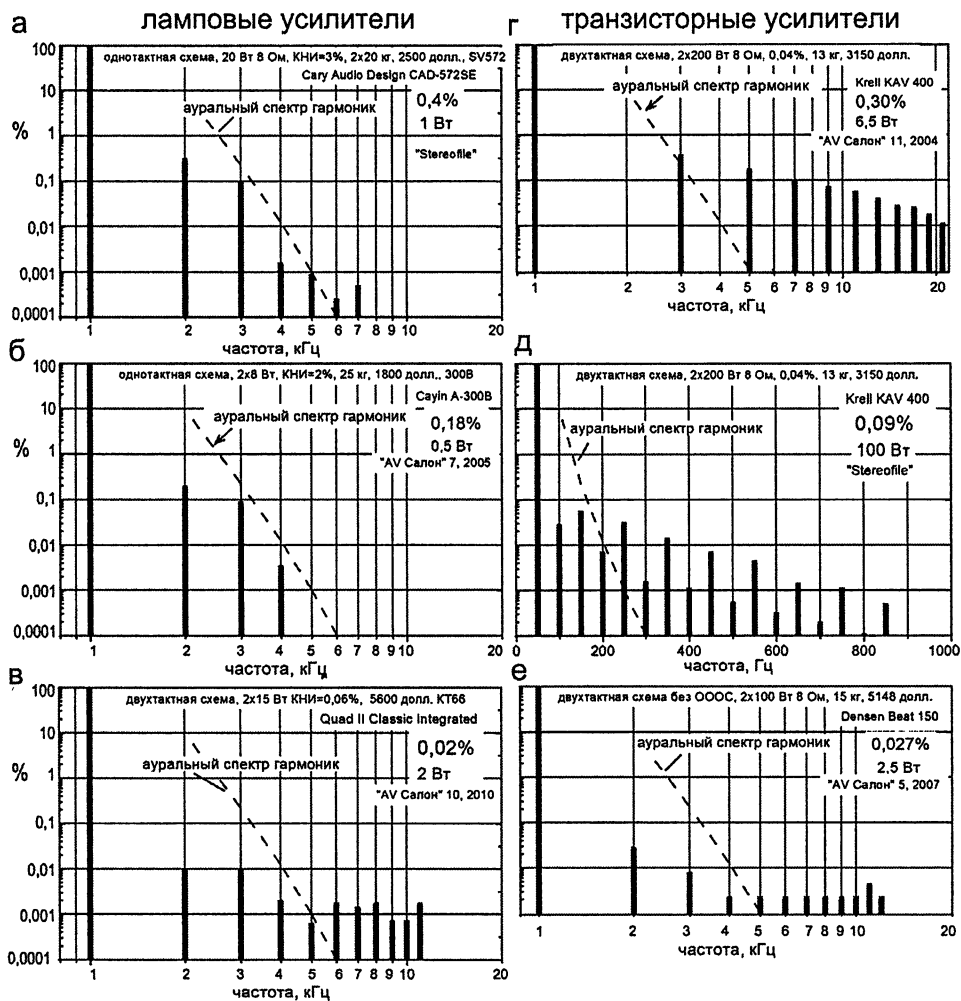


Рис. 2.3. Спектральное распределение коэффициента гармонических искажений транзисторных и ламповых усилителей:

а — «однотактник» на триоде SV572; б — «однотактник» на триоде 300В; в — «двухтактник» на тетрадах KT66; г — усилитель «Krell», 6,5 Вт; д — усилитель «Krell», 100 Вт; е — усилитель «Densen»

Такая картина типична для двухтактных транзисторных усилителей, работающих в режиме В: четные гармоники подавлены вследствие двухтактной работы транзисторов выходного каскада, нечетные понижаются с помощью глубокой общей отрицательной обратной связи, которая, однако, расширяет спектр гармоник. Кроме того, в режиме В сильно увеличиваются искажения с уменьшением мощности. Именно поэтому результирующий КНИ = 0,3 % многократно превышает КНИ = 0,04 %, заявленный производителем.

На рис. 2.3, д показан спектр гармоник того же усилителя при выходной мощности 100 Вт (измеренный, правда, не на частоте 1 кГц, а на частоте 50 Гц). Суммарный КНИ уменьшился до 0,09 % и приблизился к цифре, указанной производителем. Однако «шлейф» гармоник по-прежнему необычайно широк: отчетливо видны 17 гармоник, причем нечетные выше четных.

Доминирование нечетных гармоник (следствие двухтактного выходного каскада) и их широкий спектр (следствие глубокой общей отрицательной обратной связи) в течение как минимум 20 лет считаются основными признаками транзисторных усилителей, обуславливающих неестественное, т. н. транзисторное звучание.

В попытке сузить спектр гармоник, обеспечить «разумное» (как бы «ламповое»?) соотношение четных и нечетных гармоник современные конструкторы разрабатывают новые усилители, применяя различные схемотехнические приемы. Пример спектрального распределения коэффициента гармонических искажений такого усилителя представлен на рис. 2.3, е. Усилитель Densen Beat 150 стоимостью более 5 тыс. долл. США имеет доминирующую вторую гармонику, при этом все гармоники, начиная с 4-ой, имеют уровень меньше -90 дБ, т. е. ниже 0,003 %. По сообщению журнала «Stereofile» это достигнуто благодаря отказу от общей отрицательной обратной связи.

Обратимся теперь к ламповым аппаратам. Рис. 2.3, а представляет спектр гармоник однотактного лампового усилителя Cary Audio Design CAD-572SE класса А с выходными прямонакальными триодами 6X572 Санкт-Петербургского предприятия «Светлана». При общем относительно высоком значении КНИ = 0,4 % отчетливо видно резкое уменьшение относительного вклада гармоник с ростом их номера. Этот аппарат номинальной мощностью 20 Вт на канал предлагается по цене 2500 долл. США.

Рис. 2.3, б представляет спектр искажений другого однотактного лампового усилителя класса А с прямонакальными триодами на выходе — лучшими, по мнению многих экспертов, лампами 300В. Мощность усилителя Caryn A-300B — 8 Вт канал, а масса равна 25 кг. Это — без преувеличения «честный» (и по качеству, и по цене) ламповый однотактник начала XXI века. В этом усилителе гармоники выше четвертой вообще не детектируются.

Достаточно легко провести проверку рассмотренных усилителей на соответствие критерию Чивера: спектр гармоник усилителя должен быть ниже спектра ауральных гармоник (собственных гармоник чело-

веческого уха). Ауральный спектр гармоник показан на рис. 2.3 для всех усилителей пунктиром. Выбран ауральный спектр для уровня 100 дБ. Четко видно, что ниже аурального спектра находятся гармоники только усилителя на лампах 300В (рис. 2.3, б). Для лампового однотактника на рис. 2.3, а первые 5 гармоник находятся ниже аурального спектра.

Для усилителя Densen первые четыре гармоники удовлетворяют критерию Чивера. Для усилителя Krell, несмотря на 3-тысячную цену в долларовом выражении, при мощности 6,5 Вт ни одна гармоника выше второй не укладывается внутрь аурального спектра.

Следует отметить, что на волне лампового ренессанса определенную популярность стали приобретать и двухтактные ламповые усилители. Однако, надо отметить, что двухтактный ламповый усилитель, работающий в режиме А, обеспечивает лишь двухкратное увеличение мощности по сравнению с однотактным. Многие разработчики, например, фирма Audio Note, предпочитают использовать не двухтактное, а параллельное однотактное включение двух выходных ламп.

Значительное увеличение мощности можно получить, если применить в двухтактном ламповом выходном каскаде режим, близкий к режиму В. Примером может служить новый усилитель Quad II Classic Integrated (рис. 2.3, в). Заявленная производителем мощность — 15 Вт на канал при КНИ = 0,06 %. Видно, однако, что в этом аппарате спектр гармоник значительно шире, чем в ламповых однотактниках, представленных на рис. 2.3, а, б. Он весьма близок к хорошему транзисторному усилителю Densen Beat 150 (рис. 2.3, е).

Надо отметить, что в 60-е — 70-е годы прошлого столетия ламповые усилители с двухтактным выходным каскадом воспринимались не просто как более мощная и экономичная (не по стоимости, а по КПД) альтернатива однотактным ламповым усилителям, а еще и как шаг вперед на пути повышения качества звуковоспроизведения. Это связано с тем, что в двухтактном выходном каскаде подавляются четные гармоники, возникающие на выходе каждой из двух ламп выходного каскада при преобразовании исходного сигнала. Обратите внимание, что именно четные (точнее — только вторая) гармоники определяют суммарный коэффициент гармонических искажений элементарных ламповых каскадов (см. рис. 2.3, а, б).

Однако в наше время, в эпоху аудиофильского лампового ренессанса, объективные электротехнические параметры оказываются вторичными по отношению к субъективному восприятию качества

аппаратуры. Поэтому двухтактные ламповые усилители (стоимостью 2—5 тыс. долл. США за аппарат мощностью 10—30 Вт на канал) следует рассматривать сегодня как попытку продвижения на рынок психологически привлекательного лампового продукта. При этом расчет делается на то, что большая мощность и более низкий коэффициент гармонических искажений двухтактного усилителя по сравнению с однотактным повысят вероятность его продажи при одновременном снижении себестоимости. Себестоимость понижается за счет более высокого КПД (можно уменьшить габариты силового трансформатора) и лучшего подавления пульсаций (можно уменьшить емкость высоковольтных конденсаторов и индуктивность дросселя в блоке питания).

Хотя некоторые транзисторные усилители характеризуются производителем как усилители класса А, реально речь идет о режиме АВ с повышенным током покоя, позволяющим сохранить класс А при малых уровнях мощности, обычно порядка 1 Вт. Такие усилители в режиме молчания потребляют мощность порядка 20—40 Вт на канал. Транзисторные усилители с полноценным режимом класса А во всем номинальном диапазоне мощности весьма редки.

2.3. Профессионалы и самодельщики

Принципы построения ламповых аудиофильских усилителей, разработанных профессионалами, предельно ясно изложены фирмой «Audio Note» — «законодательницей мод» в мире аудиотехники за предельной стоимости*:

- ♦ работа всех каскадов в классе А;
- ♦ нулевая общая отрицательная обратная связь;
- ♦ однотактный выходной каскад;
- ♦ использование ламп в выпрямителях тока;
- ♦ использование прямонакальных триодов в выходном каскаде;
- ♦ высокое качество всех компонентов и материалов.

На рис. 2.4 приведена в качестве примера схема лампового однотактного усилителя Conquest фирмы «Audio Note».

* См. [http:// www.audionote.co.uk](http://www.audionote.co.uk)

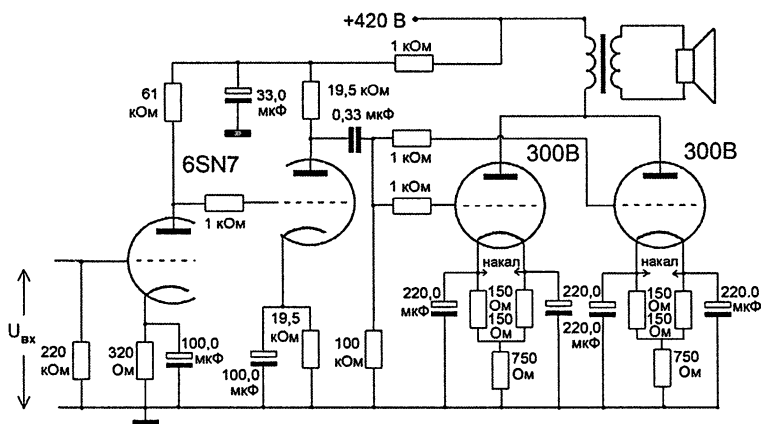


Рис. 2.4. Схема усилителя «Conquest» фирмы «Audio Note» (один канал).
Блок питания и цепи накала не показаны

Схема усилителя содержит 3 каскада, используются только триоды, связь между первым и вторым каскадами — непосредственная (без разделительного конденсатора), для увеличения выходной мощности использовано параллельное соединение выходных триодов. Мощность каждого канала этого усилителя — 18 Вт.

Чтобы обеспечить непосредственное соединение первого и второго триодов, используется повышенное напряжение питания обоих триодов лампы 6SN7, при этом увеличено сопротивление резистора в цепи анода первого триода (61 кОм) и сопротивление резистора в цепи катода второго триода (19,5 кОм). Все каскады работают в классе А. В качестве выходных ламп используются прямотоковые триоды 300В, заслужившие высокую репутацию в среде аудиофилов благодаря очень естественному звучанию.

Можно отметить как не совсем удачное решение автоматическое смещение в выходном каскаде (резисторы по 750 Ом в катодных цепях ламп 300В). Во-первых, известно, что эти триоды лучше звучат при использовании фиксированного смещения. Во-вторых, при токе около 100 мА на каждом из них падает более 70 В (это и есть необходимое напряжение смещения). На эту величину (т. е. на 20 %) приходится увеличивать напряжение питания.

Соответственно, увеличивается и потребляемая мощность. Она составляет для данного усилителя 135 Вт на канал. Масса одного моноблока — 20 кг.

Мощность усилителя «Ankoru» (рис. 2.5) — 70 Вт на канал при коэффициенте нелинейных искажений 5 % (с пометкой «вторая гар-

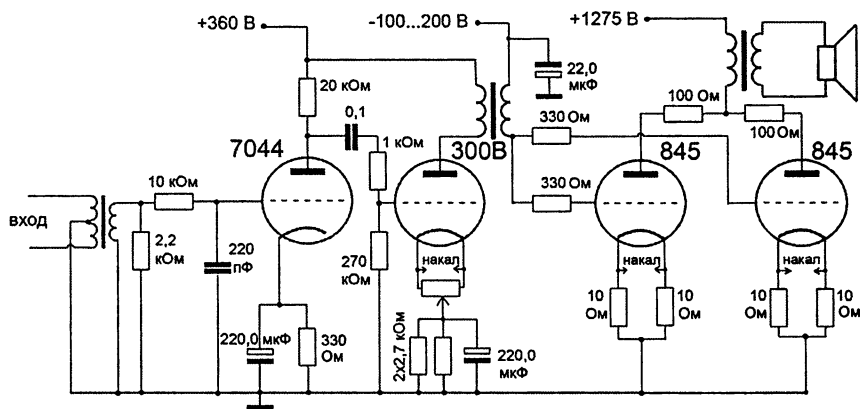


Рис. 2.5. Схема усилителя «Ankoru» фирмы «Audio Note» (один канал).
Блок питания и цепи накала не показаны

моника»), чувствительность 1,6 В. Масса одного моноблока 44 кг, потребляемая мощность 550 Вт. Такая высокая мощность в ламповых однотактных усилителях — большая редкость. Усилитель также содержит 3 каскада, причем между вторым и третьим каскадами — трансформаторная связь (именно связь, без повышения напряжения, коэффициент трансформации равен 1).

Использование трансформатора не только позволяет исключить разделительный конденсатор, но также позволяет уменьшить напряжение питания по сравнению с каскадом с резистивной нагрузкой, так как на резисторе в данном случае падение напряжения составило бы около 100 В. В выходном каскаде, как и в предыдущем случае, использовано параллельное соединение выходных триодов для получения удвоенной мощности. Все каскады работают в классе А.

Но в отличие от предыдущего усилителя, в «Ankoru» использовано фиксированное смещение выходных триодов с помощью слаботочного внешнего источника с регулируемым напряжением 100—200 В. Применяется также трансформатор и на входе усилителя — для получения балансного входа. Последнее ослабляет влияние наводок и внешних помех и используется не только в ламповых, но и в транзисторных усилителях высшего качества.

В качестве еще одного примера схемотехнических решений приведем схему выходного блока усилителя М-10 этой же фирмы. Усилитель М-10 содержит фоновый корректор, переключатель входов, регулятор громкости и усилитель напряжения с трансформаторным выходом. Он предназначен для совместной работы с мощным оконечным уси-

лителем. На рис. 2.6 показана схема выходного каскада этого усилителя. Его номинальное входное напряжение — 120 мВ, выходное — 1 В.

Характерной особенностью этого усилителя является отсутствие разделительного конденсатора между каскадами, применение триодов в каждом каскаде, использование «номерных» ламп, разработанных для промышленного и военного применения, отличающихся улучшенными характеристиками и повышенной надежностью, использование на выходе не конденсатора, а трансформатора для связи с последующим усилителем мощности.

Первый каскад построен по схеме, получившей название в русскоязычной литературе «каскад с динамической нагрузкой». Особенность этого каскада заключается в том, что верхний по схеме триод V1b создает очень высокоомную нагрузку для нижнего триода V1a, который усиливает входной сигнал. Работа такого каскада подробно обсуждается в главе 4.

Для того, чтобы исключить применение разделительного конденсатора («лучшая деталь — та, которой нет, так как только такая деталь не вносит искажений»), на катодах параллельно соединенных выходных триодов создается постоянное положительное напряжение величиной порядка сотни вольт за счет применения катодных резисторов большой величины (15 кОм). Такой подход позволяет укоротить усилительный тракт за счет исключения разделительного конденсатора и уменьшить стоимость. Высококачественный высоковольтный конденсатор может стоить от нескольких до нескольких десятков долл. США.

Это, однако, приводит и к нежелательным последствиям:

- ♦ к дополнительному потреблению около десяти ватт мощности от источника питания, рассеиваемой на катодных резисторах выходного каскада;
- ♦ к некоторой потере «динамики» звучания из-за большого сопротивления в цепи катода.

По мнению многих разработчиков, выигрывая в отсутствии межкаскадного конденсатора, мы проигрываем из-за необходимости шунти-

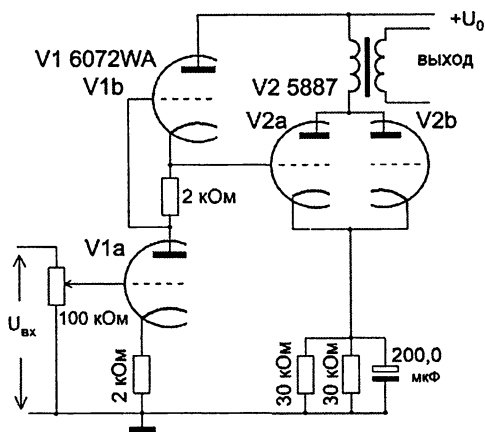


Рис. 2.6. Выходной блок усилителя М-10 фирмы «Audio Note». Цепи накала не показаны

рования катодного резистора выходного каскада высококачественным и высоковольтным конденсатором большой емкости, определяемой приблизительно из условия $RC > 1$ с (R в омах, C в фарадах).

Без этого конденсатора сильная местная отрицательная обратная связь, образуемая катодным резистором в выходном каскаде, в несколько раз снизит коэффициент усиления каскада по напряжению.



Примечание.

Надо отметить, что в усилителях фирмы «Audio Note», как и в абсолютном большинстве современных аудиофильских ламповых усилителей, нет новых схемотехнических решений.

Двухкаскадный усилитель с непосредственной связью между каскадами и катодным резистором большой величины во втором каскаде был предложен в 1930 г. Е. Лофтином и С. Уайтом* и известен как «усилитель Лофтина-Уайта». Каскад с динамической нагрузкой предложен в 1940 г. сотрудником американской фирмы RCA М. Артцем**. Используемые в рассмотренных схемах лампы существуют многие десятки лет.

В рассмотренных схемах четко видны основные признаки современной промышленной ламповой усилительной аппаратуры высшего класса:

- ♦ применение известных схем и известных ламп;
- ♦ краткость тракта при тщательном отборе компонентов;
- ♦ предпочтительное использование во всех каскадах триодов, а не тетродов или пентодов;
- ♦ минимизация числа разделительных конденсаторов, применение вместо них трансформаторов.

Использование давно известных схем и давно разработанных, а часто — и давно изготовленных, ламп дополнительно усиливает оттенок возрождения ранее созданных, но уже забытых достижений в выражении «ламповый ренессанс». Напомним, что французское слово «renaissance» означает «возрождение».

* Loftin, E.H. and White, S.Y. Cascaded Direct-Coupled Tube Systems Operated from Alternating Current. Proceedings of the Institute of Radio Engineers, 1930, V. 18, №4, p. 669.

** M.Artzt. Balanced direct and alternating current amplifiers. USA Patent No 2,310,342 (1943).

Срок службы мощных выходных ламп составляет в лучшем случае несколько тысяч часов. При замене ламп неквалифицированным пользователем в процессе эксплуатации необходимо обеспечить гарантированное воспроизведение их режимов работы. Поэтому многие фирмы отдают предпочтение автоматическому смещению в выходном каскаде с использованием катодного резистора (как на рис. 2.4).

Воспроизведение и поддержание режима лампы обеспечивается благодаря тому, что увеличение тока через резистор вызывает соответствующий рост разности потенциалов на нем, а поскольку это напряжение является отрицательным смещением на сетке по отношению к катоду, рост анодного тока прекращается.

Уменьшение тока через катодный резистор вызывает уменьшение отрицательного смещения на сетке и приводит к восстановлению исходного значения тока. В этом и состоит местная отрицательная обратная связь. Однако, хорошо известно, что большинство мощных ламп звучат лучше при фиксированном смещении, когда отрицательное смещение на сетку лампы подается от независимого внешнего источника (на рис. 2.5 — через вторичную обмотку согласующего трансформатора).

В схеме Лофтина-Уайта исключение катодного резистора возможно за счет применения дополнительного источника питания в выходном каскаде. Однако при этом вырастает себестоимость усилителя. Появляется необходимость подстройки внешнего фиксированного смещения при каждой замене лампы. Это требует участия специалиста либо введения электронной системы подстройки режимов лампы, что также увеличивает себестоимость аппарата.

Здесь мы явно видим преимущества конструкторов-самодельщиков над конструкторами-профессионалами. Конструктор-самодельщик в состоянии отрегулировать режимы лампы при ее замене, а добавление еще одного силового трансформатора (или дополнительной обмотки) мощностью не более 1 Вт — не самая дорогая и трудоемкая операция.

Предлагаем вниманию читателей две схемы ламповых двухкаскадных усилителей на триодах, не содержащих разделительных межкаскадных конденсаторов, предложенные уважаемыми в среде радиолюбителей на постсоветском пространстве конструкторами ламповой аудиоаппаратуры.

Усилитель Евгения Комиссарова (рис. 2.7), как видно, похож на схему усилителя М-10 фирмы «Audio Note». Используются только триоды, в усилителе только два каскада, первый каскад построен по

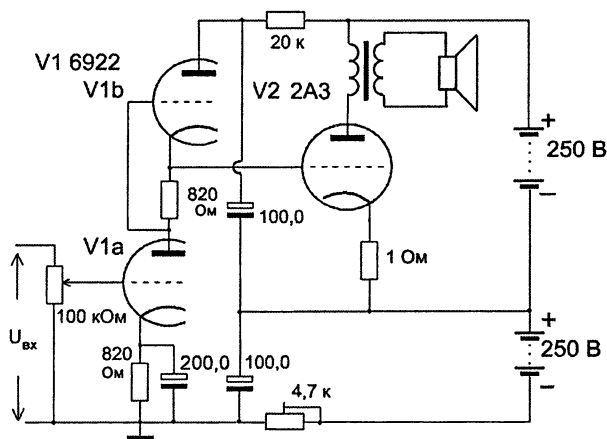


Рис. 2.7. Двухламповый однотоктный усилитель
Е. Комиссарова (Радиолюбби, 2003, №5, с. 53).
Цепи питания накала прямонакального триода 2А3 не показаны

схеме с динамической нагрузкой, между каскадами нет разделительного конденсатора. Но в выходном триоде 15-килоомный катодный резистор и шунтирующий его конденсатор исключены.

Резистор сопротивлением 1 Ом в цепи катода используется для контроля тока выходной лампы при наладке усилителя и замене лампы. Как видим, сигнальный тракт оптимизирован за счет усложнения источника питания. В этом — один из существенных принципов «хай-энда»: *максимальное внимание источнику питания при минимизации непосредственного тракта прохождения сигнала.*

Двухламповый усилитель на триодах, предложенный Анатолием Манаковым* (рис. 2.8), содержит вместо разделительного конденсатора согласующий трансформатор. Трансформатор не только обладает более низкими искажениями по сравнению с конденсаторами, но также позволяет уменьшить напряжение питания входного каскада.

Трансформатор выполнен повышающим (в 2 раза), чтобы с двумя каскадами получить достаточное усиление по напряжению от всего усилителя в целом, ядром которого является прекрасно звучащий, но имеющий низкий коэффициент усиления по напряжению прямонакальный триод 300В.

* Приводится по книге М.В. Торопкина «Ламповый Hi-Fi усилитель своими руками» («Наука и Техника», С.-Петербург, 2008).

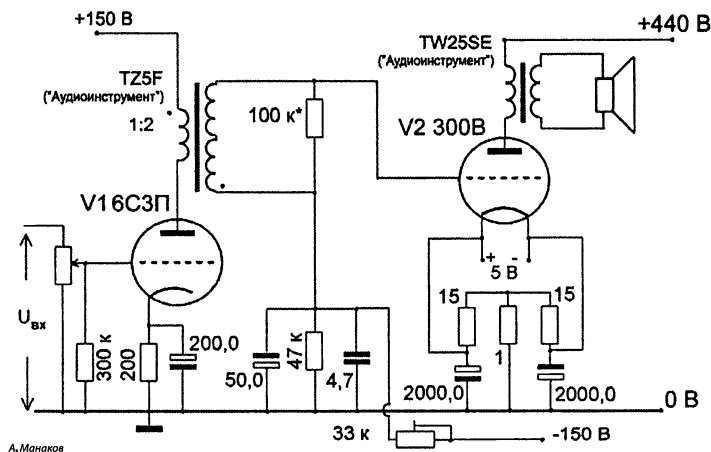


Рис. 2.8. Двухламповый одноканальный усилитель А. Манакова

Входной каскад имеет отдельный источник питания +150 В. Смещение на сетку выходной лампы подается от внешнего источника (–150 В), что позволяет не только полностью использовать напряжение питания, но и получать более высокое качество звучания. При организации смещения с помощью катодного резистора падение напряжения на нем составило бы примерно 70 В.

Конструкция А. Манакова с двумя триодами и трансформаторной связью между каскадами, без сомнения, может быть отнесена к лучшим аудиофильским решениям. «Минималистский» усилитель Манакова на двух триодах, не содержащий ни одного конденсатора в тракте прохождения сигнала, требует от 5 до 10 независимых источников питания. Нижняя граница этого диапазона соответствует общим источникам питания для обоих каналов: 1 — анодное питание выходного триода, 2 — анодное питание входного триода, 3 — накал выходного триода (5 В), 4 — накал входного триода (6,3 В), 5 — смещение выходного триода. Верхняя граница $5 \times 2 = 10$ соответствует варианту «двойное моно» по всем источникам питания.

Использованные в схемах на рис. 2.7 и рис. 2.8 лампы 2A3 и 300B являются прямотоковыми триодами. Благодаря весьма низким искажениям они стали в определенном смысле «культовыми» представителями лампового ренессанса. Лампа 2A3 (советские аналоги — 2C3, 6C4C) в выходном каскаде позволяет получить не более 5 Вт выходной мощности, что часто недостаточно для полноценной раскачки средних динамиков в помещении более 20 м² и требует применения специальных громкоговорителей большого диаметра с чувствительностью 94—98 дБ/В/м.

Лампа 300В обеспечивает до 9 Вт выходной мощности, но имеет низкий коэффициент усиления по напряжению. Эти триоды выпускаются сегодня российскими предприятиями «Рефлектор» (Саратов) и «Светлана» (С.-Петербург). Поэтому в некоторых схемах используют повышающий трансформатор (как на рис. 2.8), а в некоторых — двухкаскадный предварительный усилитель напряжения на лампах 6SN7 (как на рис. 2.4). Советский аналог этих двойных триодов — 6Н8С, или 6С2С (один триод в баллоне). Иногда используют сочетание «пентод(тетрод) на входе + триод на выходе» (например, 6Э5П совместно с 300В или EF860 совместно с 6С19П).

Но чаще и профессиональные разработчики, и радиолюбители для построения усилителя мощности всего с двумя каскадами применяют сочетание «триод на входе + пентод (тетрод) на выходе». Две такие схемы показаны на рис. 2.9 и рис. 2.10.

В первом усилителе, построенном по схеме Лофтина-Уайта, в каждом канале используется половинка двойного триода 6Н8С в сочетании с лучевым тетродом EL34 (советский аналог — 6П27С). Мощность такого усилителя около 4 Вт.

Второй усилитель имеет триод 6С2С (может быть замещен половинкой 6Н8С с несколько худшим результатом) в сочетании с мощным лучевым тетродом КТ88. Советских аналогов у этого тетрода нет, но клоны этой лампы, а также ее аналога — лампы 6550 — выпускаются упомянутыми выше российскими предприятиями. Усилитель построен по классической схеме с разделительным конденсатором между каскадами и фиксированным смещением. Он обеспечивает выходную мощность около 12 Вт.

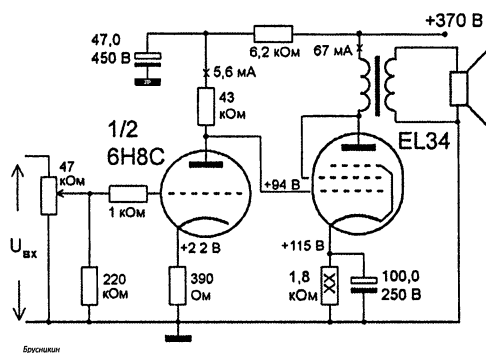


Рис. 2.9. Двухламповый одноканальный усилитель на лучевом тетроде EL34, предложенный В. Брусникиным (Радиолюбитель, 2000, №3, с.53). Цепи накала не показаны

Этот усилитель работает у автора несколько лет, отличается нейтральным и в то же время наполненным звуком с хорошей пространственной сценой. Именно этот усилитель «отбил» желание у автора этой книги заниматься усовершенствованием полностью полупроводниковых усилителей с ООС и побудил перейти к гибридным схемам с транзисторным выходным каскадом, не охваченным ООС.

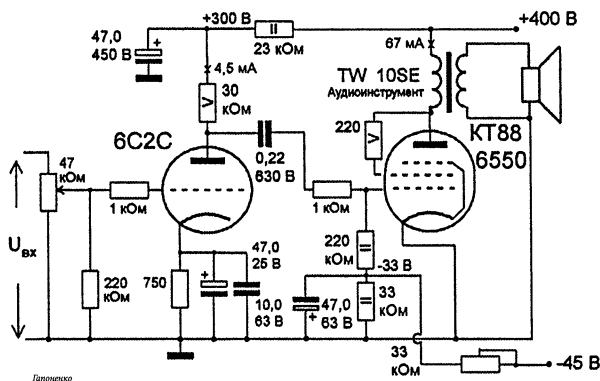


Рис. 2.10. Двухламповый одноканальный усилитель с выходным каскадом на лучевой трубке KT88 (6550) с фиксированным смещением. Цепи накала не показаны

Отметим, что простота всех приведенных в этом разделе ламповых усилителей кажущаяся. Например, усилитель, представленный на рис. 2.10 имеет:

- ♦ силовой трансформатор мощностью 140 Вт с отдельными повышающими обмотками для питания каждого канала;
- ♦ дроссели и электролитические высоковольтные высококачественные конденсаторы в каждом канале;
- ♦ отдельный трансформатор (60 Вт) для питания накала ламп с отдельными обмотками для входных и выходных ламп, причем напряжение накала входных ламп стабилизировано;
- ♦ отдельный маломощный трансформатор и выпрямитель для обеспечения фиксированного смещения выходных ламп.

Усилитель потребляет непрерывно мощность более 80 Вт и имеет массу более 12 кг. Однако достаточно было автору один раз его услышать, чтобы навсегда «заболеть» ламповым звуком.

Предыдущие опыты с тем же «базовым набором» компонентов, но с выходными лампами 6ПЗС (две параллельно соединенные, испытано много ламп разных производителей и годов выпуска), EL34 («новоделы» Саратовского завода) такого эффекта не смогли произвести. Не зазвучали в качестве ламп первого каскада ни 6Н23П, ни их зарубежные аналоги ECC88, ни ECC85, ни 12AX7 немецкого и английского производства, ни триоды из 6Ф12П.

**Примечание.**

В моем домашнем «рабочем журнале» того времени осталась запись: «Все время не покидает ощущение, что полученный результат не стоит затраченных усилий и денег».

«Базовый набор» компонентов во всех случаях: силовые трансформаторы серии ТА с большим запасом по мощности, выходные — от «Аудиоинструмента», электролитические конденсаторы «Mundorf», «Rubycon», пленочные — «Wima» MKS, «Phillips» MKT, МКР неизвестного производителя, слюдяные советские 0,1—0,2 мкФ, потенциометр «Alps», монтаж навесной на керамических панельках и стойках, пайка оловянно-серебряным припоем. Для прослушивания использовались акустические системы типа «трансмиссионная линия», в каждой из которых установлено по две 8-дюймовые бумажные НЧ-СЧ головки «Hertz» и по одной высокочастотной «Morel», соединенные последовательно с использованием фильтров первого порядка.

Так что правы по-своему и те, кто убежден, что лампы лучше транзисторов, и те, кто им не верит.

2.4. Можно ли приблизить «транзисторное» звучание к «ламповому», вводя искажения?

В поисках причины лучшего психоакустического восприятия музыкальных записей при использовании ламповых усилителей по сравнению с транзисторными усилителями многие конструкторы-самодельщики и профессионалы анализируют формально различия в параметрах как ламповых, так и транзисторных усилителей, ищут подобным способом пути улучшения звучания транзисторных усилителей.

Увеличение выходного сопротивления усилителя

Самое простое предложение — *увеличить выходное сопротивление* транзисторного усилителя до величины 2—4 Ом. Для этого достаточно просто последовательно с громкоговорителем включить резистор указанного сопротивления. При такой «доработке» в соответствии с распределением выходного напряжения между громкоговорителем и резистором уменьшается громкость звучания. При этом

само звучание приобретает некоторую мягкость (можно сказать даже «рыхлость», размытость) при воспроизведении низкочастотных звуков, например, контрабаса или большого барабана.

Если искать возможность сравнения качества воспроизведения с ламповыми усилителями, то можно говорить о конкурентоспособности такого подхода по отношению к средним ламповым усилителям. Но ясность, воздушность, «открытость», динамизм, «осязаемость», «рельефность» звуков, присущие по-настоящему хорошим ламповым усилителям, при этом, увы, не воспроизводятся. Автор убедился в этом, используя относительно неплохой усилитель на интегральной микросхеме LM3886, а для сравнения — однотактный двухкаскадный ламповый усилитель мощностью около 10 Вт (рис. 2.10), условно рассматриваемый как «хороший», и двухтактный усилитель мощностью 10 Вт на лампах 6П14П и трансформатором ТН36 в качестве выходного, условно рассматриваемый как «средний».

Исходный самодельный усилитель на микросхеме LM3886 уверенно «переигрывал» транзисторные «Technics» и «Harman Cardon» ценовой категории 400—500 долл. США. Микросхемы LM3886 фирмы «National Semiconductors», ее предшественники LM1875, LM3876, а также последующая двухканальная версия LM4870 стоимостью 3—5 долл. США приобрели популярность не только у радиолюбителей, но и у профессиональных разработчиков.

Так, например, фирма «Sapura Systems» (Япония) предлагает усилитель мощностью 25 Вт на канал по цене выше 1 тыс. долл. США на микросхемах LM1875, а фирма «Jeff Rowland» (США) — усилитель мощностью 300 Вт на канал с использованием 6 корпусов LM3886 в каждом канале (мостовое включение трех параллельных каналов усиления в каждом из стереоканалов) по цене 12 тыс. долл. США. Обе упомянутые разработки получили восторженные отзывы профессиональных экспертов и журналистов, а для радиолюбителей была написана даже специальная книга по разработке усилителей на этих микросхемах.

Создание «ламповых» предсказаний

Более серьезное предложение заключается в получении на выходе транзисторного усилителя *спектра гармоник, близкого к таковому для лампового усилителя*. Однако предлагается сделать это довольно примитивным, если не сказать грубым, способом. Предлагается уста-

новить на входе транзисторного усилителя ламповый предусилитель, который часто называют «облагораживающим».

В транзисторных усилителях глубокая ООС охватывает обычно весь оконечный усилитель, чувствительность которого составляет около 1 В. Это значит, что при использовании CD-проигрывателя или магнитофона никаких дополнительных каскадов усиления на входе не требуется. Введение лампового предусилителя в тракт потребует ослабления его выходного сигнала до начального уровня и таким образом понизит соотношение сигнал-шум.

Чтобы этого избежать, предлагают устанавливать на входе транзисторного усилителя не усилительный каскад, а катодный ламповый повторитель с единичным коэффициентом усиления по напряжению. Установка лампового каскада на входе транзисторного усилителя действительно может оказать некоторое положительное влияние на воспроизведение музыки за счет увеличения входного сопротивления, хотя повышает чувствительность к электромагнитным наводкам.

Формирование «ламповых» предискажений с большим удельным вкладом второй гармоники может замаскировать (но не устранить!) нечетные гармоники на выходе транзисторного усилителя.

Такой прием используют не только радиолюбители, но и некоторые фирмы. Например, фирма «Vacuum State Electronics» (Австралия)

предлагает усилитель на интегральных микросхемах LM3886 с входным ламповым буфером (катодный повторитель на лампе 6DJ8, аналог 6Н23П) по цене 1150 Евро. Фотография этого усилителя со снятой верхней крышкой показана на рис. 2.11.

При самостоятельном изготовлении стоимость деталей такого усилителя в стереоварианте (без учета стоимости корпуса) не превысит 100 долл. США, включая

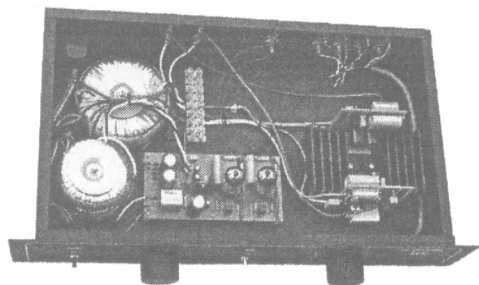


Рис. 2.11. Усилитель на мощных интегральных микросхемах с ламповым буферным каскадом на входе

силовой трансформатор (до 30 долл.) и качественный потенциометр «Alps» (25 долл.), а трудозатраты составят несколько рабочих дней.

Вынужден разочаровать любителей легких решений в звуковоспроизведении. Не только простое включение LM3886 совместно с ламповым буфером, но даже более «продвинутый вариант» не позво-

лили получить звучание, близкое по естественности и динамичности к моему упомянутому 10-ваттному ламповому однотактному усилителю. Самый «продвинутый вариант» — мостовой усилитель* мощностью до 100 Вт на канал на паре LM3886 в инвертированном включении с использованием электролитических конденсаторов Elna Silmic в блоке питания, тороидального трансформатора мощностью 300 Вт, предельно краткого тракта обратной связи в виде резистора на ножках микросхемы и лампового буфера с использованием зарубежных ламп ECC88.

Примечание.



Завышенная по сравнению с выходной мощностью в несколько раз мощность силового трансформатора — одна из рекомендаций фирмы «Sacura Systems». Предельное укорочение проводников в цепи общей отрицательной обратной связи — рекомендация многих разработчиков.

Сравнение происходило в помещении площадью 25 м² при одинаковых уровнях громкости. Ламповый усилитель явно обеспечивал более яркий, насыщенный, «выпуклый» звук. Правда, компоненты лампового усилителя при мощности в несколько раз меньшей, чем лампово-транзисторного «конкурента», стоят в несколько раз дороже (более 300 долл. США для лампового усилителя при использовании российских ламп КТ88 и выходных трансформаторов «Аудиоинструмент» в сравнении с примерно 120 долл. США для лампово-полупроводникового варианта).

«Мягкое» ограничение с ростом уровня входного сигнала

Еще одно предложение по приближению звучания транзисторных усилителей к ламповым состоит в использовании дополнительного преобразования входного сигнала в предварительных каскадах усиления с целью обеспечения т. н. «мягкого» ограничения. В ламповых усилителях с ростом мощности по достижении уровней, близких к максимальным, выходной сигнал не обогащен высшими гармониками. Применительно к синусоиде это означает «мягкое» (и на вид, и на слух) ограничение (рис. 2.12).

* Мостовой усилитель звучит мягче и натуральнее исходного, см. с. 25.

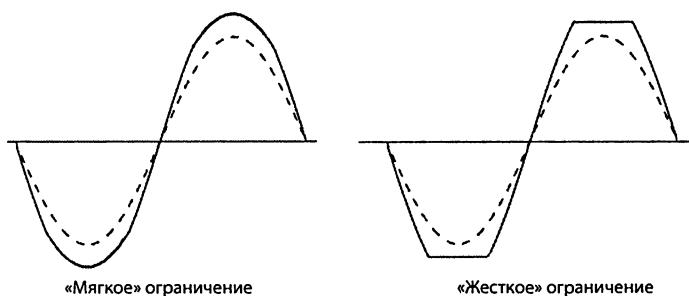


Рис. 2.12. «Мягкое» и «жесткое» ограничение (clipping)

В транзисторных усилителях наличие глубокой отрицательной обратной связи позволяет удерживать низкий суммарный коэффициент гармонических искажений с ростом выходной мощности. Но по достижении некоторого критического, порогового значения спектр выходного сигнала резко обогащается высшими гармониками, а суммарный коэффициент гармонических искажений увеличивается в тысячи раз (рис. 2.12).

Различный характер искажений с ростом уровня сигнала приводит к различной зависимости общего КНИ от выходной мощности для лампового и транзисторного усилителей (рис. 2.13).

На рис. 2.13, а ламповый усилитель имеет выходную мощность 7 Вт при коэффициенте гармоник около 2 % в полосе от 100 Гц до 10 кГц. Такой усилитель в стереоварианте может комфортно озвучить помещение площадью до 30 м² при использовании акустических систем с чувствительностью не менее 90 дБ/Вт/м.

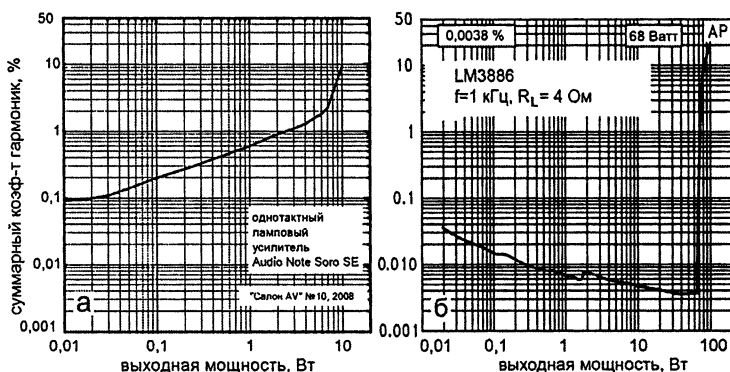


Рис. 2.13. Зависимость суммарного коэффициента гармонических искажений от мощности для лампового (слева) и полупроводникового (справа) усилителей*

* LM3886 Overture™ audio power amplifier. National Semiconductors, August 2000.

**Примечание.**

Отметим, что рост гармоник в спектре сигнала является естественным для музыкальных звуков: чем громче звук музыкального инструмента, тем больше в нем высокочастотных составляющих.

Транзисторный усилитель (рис. 2.13, б) имеет номинальную мощность 68 Вт при КНИ $< 0,004\%$ на частоте 1 кГц. Транзисторный усилитель, однако, в отличие от лампового, имеет возрастающий КНИ с ростом частоты. Начиная от 500 Гц, увеличение в 10 раз частоты приводит к увеличению в 10 раз КНИ (на рис. 2.13 не показано).

Такое поведение типично для транзисторных усилителей с глубокой частотно-зависимой ООС. Так как с ростом частоты глубина ООС уменьшается, обратная связь уже не может обеспечить на высоких частотах такое же значение КНИ, как на низких частотах. Конечно, такой усилитель не сможет воспроизвести музыкальную запись с мощностью 60 Вт.

Разумная оценка средней мощности при прослушивании музыки — менее 10 Вт, чтобы обеспечить примерно 10-кратный запас по динамике и ни в коем случае не допустить жесткого ограничения на кратковременных пиках фонограммы.

Для транзисторного усилителя с глубокой отрицательной обратной связью **номинальную** по электротехническим стандартам мощность следует рассматривать как **максимальную** применительно к прослушиванию музыкальных записей.

Если рекомендовать указанные усилители для прослушивания музыки, можно называть 3—4 Вт для лампового и 6—10 Вт для транзисторного с учетом негативного субъективного восприятия грубого резкого ограничения и динамического характера музыкальных произведений. Напомним, что типичное изменение уровня сигнала во время воспроизведения фонограммы составляет примерно 10 раз по отношению к среднему уровню.

**Примечание.**

Как видим, разница в реальной «музыкальной» мощности лампового и транзисторного усилителей составила 2—3 раза при 10-кратном различии их номинальных в электротехническом смысле мощностей.

Есть много схемных предложений о введении в предварительные каскады усиления транзисторных усилителей устройств, обеспечива-

ющих «мягкое» ограничение сигнала на входе оконечного усилителя, охваченного глубокой отрицательной обратной связью. Эти устройства отодвигают наступление жесткого, «транзисторного» ограничения сигнала в область больших амплитуд входного сигнала.

Легко видеть, что, во-первых, такие устройства заведомо создают дополнительные искажения, во-вторых, при этом происходит фактически уменьшение реального динамического диапазона. Это значит, что громкие звуки станут менее искаженными по тембру, но при этом более тихими.

Наконец, в транзисторных усилителях, в отличие от ламповых, не составляет труда поднять выходную мощность, увеличивая напряжение питания или используя мостовое включение. Тогда наступление жесткого ограничения по амплитуде просто отодвигается в область больших мощностей.

Таким образом, введение мягкого ограничения заранее ориентировано на приближение звучания транзисторного усилителя к ламповому за счет создания «как бы ламповых» искажений. Уважаемые любители подобных «трюков»! Поверьте, что не благодаря специфическим искажениям, а благодаря *их отсутствию* ряды поклонников лампового звука ширятся и крепнут год от года.

Мягкое ограничение, часто называемое музыкантами «овердрайв» от английского «overdrive» — перегрузка, приемлемо и даже приветствуется в гитарных усилителях для создания певучести, экспрессии и известного психологического «драйва». Однако такое намеренное искажение сигнала совершенно недопустимо при прослушивании записей симфонической, джазовой или хоровой музыки.

На рис. 2.14 показана блок-схема гипотетического транзисторного усилителя, усовершенствованного с целью введения искажений, похожих на искажения ламповых усилителей. Концепция такого усилителя с «как бы ламповым» звучанием представляется тупиковой и бессмысленной.

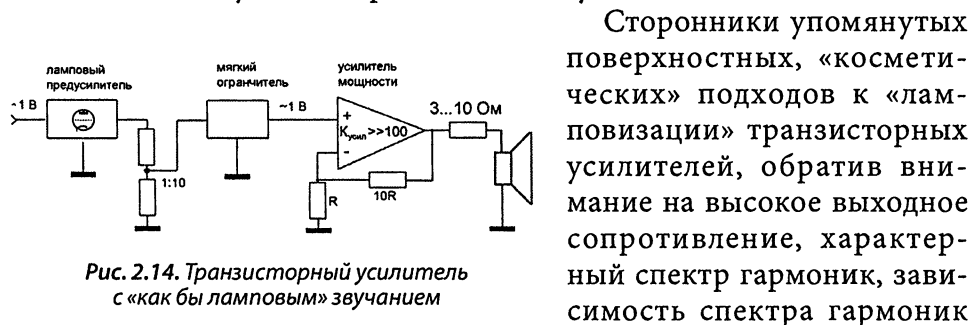


Рис. 2.14. Транзисторный усилитель с «как бы ламповым» звучанием

Сторонники упомянутых поверхностных, «косметических» подходов к «ламповизации» транзисторных усилителей, обратив внимание на высокое выходное сопротивление, характерный спектр гармоник, зависимость спектра гармоник

от амплитуды, мягкое ограничение в ламповых усилителях, «за деревьями не увидели леса», т. е. пропустили главное.

2.5. Почему же ламповые усилители звучат не так, как транзисторные?

Присущее однотоктным ламповым усилителям большое значение второй гармоники в выходном спектре исходно синусоидального сигнала не может считаться ни критерием, ни условием верности воспроизведения и естественности звучания. Вторая и третья гармоники просто мало заметны, так как:

- удвоение частоты соответствует повышению тона на октаву;
- увеличение частоты в три раза — переходу к музыкальному интервалу, называемому квинтой, только в следующей октаве.

Эти гармоники просто не вызывают дискомфорта и раздражения при прослушивании музыки. При элементарных музыкальных пьесах вроде сольного исполнения на фортепиано, вокала или вокального дуэта эти гармоники могут даже приукрашивать, «обогащать» звучание инструмента или голоса.

Но наличие любых, даже благозвучных на первый взгляд (слух), но все-таки *искажений*, не может рассматриваться как цель или условие высококачественного звуковоспроизведения. Тогда таковыми придется считать все электронные ухищрения по доводке и подтяжке голосов солистов!*

Многие аудиофилы обращают внимание на выраженное различие в зависимости уровня нелинейных искажений от выходной мощности. Коэффициент гармоник лампового усилителя линейно снижается с уменьшением мощности, а транзисторного, наоборот, возрастает. На рис. 2.13 при мощности 0,01 Вт ламповый усилитель имеет значение общего КНИ около 0,1 % — близко к значению КНИ для этой мощности транзисторного усилителя с «номинальной» мощностью 60 Вт и КНИ = 0,0038 %.

* Интересно, что эти ухищрения и натяжки часто хорошо слышны при воспроизведении таких записей с помощью качественного звукоусилительного тракта.



Примечание.

Заметим, что чувствительность уха к присутствию гармонических искажений растет с понижением мощности. Это связано с тем, что ухо при низких уровнях звука само производит более низкий уровень гармоник (см. рис. 1.2). Эта динамическая особенность нашего восприятия музыки привела к утверждению, что очень важным для оценки качества усилителя является его способность достоверно передавать «первый ватт» звуковой мощности.

И здесь к транзисторным усилителям возникает много вопросов, при ответе на которые они явно проигрывают ламповым.

Вернемся к характеристикам транзисторного усилителя Krell 400 (стоимость более 3000 долл.), спектр искажений которого представлен ранее на рис. 2.3, г, д. Видно многократное возрастание с искажений при мощности 6,5 Вт по сравнению с мощностью 100 Вт.

Усилитель, однако, по спецификации производителя имеет мощность 300 Вт. При испытаниях в лаборатории журнала «Stereofile» этот усилитель не выдержал 15-минутной работы с выходной мощностью 67 Вт, т. е. менее 25 % от заявленной номинальной мощности.

Таким образом, получается, что 300-ваттный показатель указывает лишь на способность к передаче кратковременных уровней сигнала, что никак нельзя рассматривать как номинальную мощность. Истинная номинальная мощность составляет не 300 и даже не 60 Вт, а значительно ниже.

Но с понижением мощности этот усилитель дает недопустимые для высококачественной техники искажения! Таким образом, транзисторные усилители, не удовлетворяющие критерию Чивера (см. стр. 31) при номинальной мощности, с понижением мощности еще в большей степени отстают от этого критерия.

Надо понимать, что и большое значение второй гармоники, и высокое выходное сопротивление, и «короткий» спектр гармоник, и «мягкое» ограничение с ростом мощности являются *следствием отсутствия в хороших ламповых усилителях глубокой общей отрицательной обратной связи*.

Общая отрицательная обратная связь уменьшает коэффициент гармоник исходного усилителя, но приводит к возникновению высших гармоник, отсутствовавших в исходном усилителе. Это — хорошо установленный факт, расширение спектра гармоник в усилителе с обратной связью подробнее будет обсуждаться в следующем разделе. И, наконец, как

уже упоминалось в начале этой главы, общая отрицательная обратная связь осложняет протекание *переходных процессов* как в самом усилителе, внутри петли обратной связи, так и при работе усилителя на *комплексную нагрузку*, каковой является реальная акустическая система.

К положительным эффектам следует отнести снижение выходного сопротивления усилителя, что способствует четкости при воспроизведении самого нижнего частотного диапазона. Кажущееся увеличение номинальной мощности за счет удержания низкого коэффициента гармоник вплоть до начала жесткого ограничения, как показано на рис. 2.13 (правая часть), следует признать «отвлекающим», если не сказать обманным, приемом электроинженеров по отношению к слушателям. Ведь *удержание низкого значения коэффициента нелинейных искажений за счет глубокой обратной связи не повышает реальную громкость воспроизведения при прослушивании музыки*.

В этом смысле, и это уже давно поняли эксперты многочисленных аудиожурналов, *номинальную в электротехническом смысле мощность* (68 Вт для усилителя в правой части рис. 2.13) следует считать *максимальной музыкальной мощностью*.

Подводя итоги сравнения хорошего лампового и хорошего транзисторного усилителя, можно сделать вывод, что их *коренное, принципиальное различие состоит в отсутствии у хороших ламповых усилителей глубокой общей отрицательной обратной связи*. Ее наличие у транзисторных усилителей, к сожалению, хотя и позволяет получить более привлекательные технические характеристики (низкий общий коэффициент нелинейных искажений, низкое выходное сопротивление), кардинально изменяет в худшую сторону характер звучания вследствие расширения спектра гармонических искажений, ухудшения переходной характеристики, особенно при работе на комплексную нагрузку. Собственно, аудиоусилитель всегда работает на комплексную нагрузку, а с активной нагрузкой можно только определить его электрические параметры.



Примечание.

Именно в отказе от применения в выходных каскадах усилителя глубокой общей отрицательной обратной связи и следует искать путь приближения звучания транзисторных усилителей к ламповым.

Это утверждение не является открытием автора настоящей книги. Оно является его твердым убеждением, которое, кстати, поддержи-

вается и разделяется многочисленными любителями и профессионалами высококачественного звуковоспроизведения.

К сожалению, как уже отмечалось, высококачественные ламповые усилители, несмотря на малое число элементов, недешевы даже при самостоятельном изготовлении. Например, в усилителе А. Манакова (рис. 2.8), стоимость одной лампы 300В завода «Рефлектор» (г. Саратов) составляет 50 долл. США, выходного трансформатора фирмы «Аудиоинструмент» (г. Москва) — более 100 долл., согласующего трансформатора этой же фирмы — 30 долл., а стоимость аналогичных компонентов, предлагаемых зарубежными фирмами и их дилерами, еще выше.

Конечно, можно в выходном каскаде применить более дешевые лампы. Лампы 6ПЗС или EL34 позволяют получить в классе А выходную мощность до 4 или 6 Вт, соответственно, а стоят в несколько раз дешевле, чем 300В или уже упоминавшиеся КТ88.

Можно также заменить согласующий трансформатор конденсатором (не у каждого найдется 100 долларов для приобретения бумажно-масляных конденсаторов с медной или серебряной фольгой Solen или Jensen, но старые советские слюдяные КС, фторопластовые ФТ, а также К40у, К73 звучат очень неплохо, а современные полипропиленовые МКР различных производителей не так уже и дороги) или использовать схему Лофтина-Уайта, не содержащую ни разделительного конденсатора, ни трансформатора между каскадами.

Тогда самым дорогим элементом, определяющим стоимость усилителя, останется только выходной трансформатор. Можно, в принципе, изготовить выходные трансформаторы самостоятельно, однако научиться этому достаточно сложно. Именно отсутствие необходимого опыта и знаний для самостоятельного изготовления ламповых аудио-трансформаторов и их высокая стоимость на рынке не позволяет многим радиолюбителям вступить в ряды «ламповых аудиофилов».

В следующей главе будет обоснована концепция построения высококачественных усилителей для звуковоспроизведения путем лампово-транзисторного «консенсуса» с использованием принципов построения лучших ламповых усилителей, но с меньшей стоимостью компонентов, часто с более высокой эффективностью (КПД), меньшей массой за счет замены выходного лампового каскада с трансформатором бестрансформаторным *транзисторным усилителем тока*. Затем в последующих главах будут описаны конкретные схемотехнические решения и практические конструкции таких усилителей.

ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

В этой главе анализируются базовые принципы построения ламповых усилителей класса «Hi-End» и показывается, как объединяя лампы и транзисторы в одном устройстве, можно соблюсти эти принципы, сэкономив значительную часть времени и денег при самостоятельном изготовлении аудиоусилителя.

... следует упрощать конструкцию усилителя до мыслимого предела и тщательно отбирать детали и элементы высочайшего качества, чтобы воспроизвести «качество живого звука», свободного от «механичности». Это наиболее важные соображения при создании идеального усилителя.

Хирояши Кондо, «Audio Note»

3.1. Только вперед! Отсутствие общей обратной связи в усилителях мощности

Как уже отмечалось, в ламповых усилителях мощности высшей ценовой категории, олицетворяющих ламповый ренессанс в аудиотехнике, используются схемы, не содержащие общей отрицательной обратной связи (ОООС). Основные конструктивные недостатки усилителей с ОООС состоят в следующем.

Во-первых, в усилитель вводятся дополнительные каскады усиления, необходимые для работы обратной связи. Чем глубже обратная

связь, тем больше должен быть запас по усилению. Дополнительные каскады увеличивают как линейные (неравномерность амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик), так и нелинейные искажения исходного усилительного тракта.

Во-вторых, исходный усилитель (до замыкания цепи обратной связи) имеет, как правило, частоту среза ниже желаемой полосы пропускания усилителя. Упомянутая только что избыточность каскадов усиления прямо способствует этому. В результате обратная связь получается частотно-зависимой: ее глубина уменьшается с ростом частоты.

Это означает, что для конкретного музыкального импульса, имеющего обычно достаточно широкий частотный спектр, разные его компоненты будут обрабатываться в результате действия обратной связи по-разному. Более того, уменьшение усиления с ростом частоты неизбежно влечет за собой появление *фазового сдвига*, увеличивающегося с частотой.

Это означает, что уже после первого прохода сквозь такой усилительный тракт выходной сигнал будет отличаться от входного, даже если коэффициент нелинейных искажений *равен точно нулю*.



Примечание.

Речь идет о линейных искажениях, изменяющих форму исходного импульса вследствие неравномерности фазочастотной характеристики.

Влияние фазовых искажений на форму исходного импульса иллюстрируется на рис. 3.1. На рис. 3.1 сверху сплошной линией показан гипотетический музыкальный сигнал, состоящий из основного тона частотой 100 Гц и набора обертонов: последовательно убывающих по амплитуде 2, 4, 8, 16, 32 и 64-ой гармоник. Такой спектр имеют простые электронно-музыкальные инструменты. Спектр сигнала показан внизу в виде вертикальных «столбиков».

Предполагается, что этот сигнал один раз проходит через усилительный тракт, у которого спад коэффициента усиления 6 дБ/октаву и сдвиг фазы начинаются после 500 Гц.

Таким образом, верхняя граничная частота усилителя в 5 раз выше частоты музыкального сигнала. Однако вследствие нелинейной фазочастотной характеристики разные компоненты сигнала приобретают разный фазовый сдвиг, причем высокочастотные компоненты еще и

ослабляются. Форма импульса искажается при отсутствии в тракте гармонических искажений!

Прошедший импульс, нормированный по амплитуде, показан пунктиром в верхней части рис. 3.1. Видимое на графике изменение формы импульса будет восприниматься на слух как потеря «воздушности» (смазывание тонких деталей, определяемых высокочастотными компонентами сигнала), а также как искажение «динамики» звука из-за примерно 20 %-ного и более отклонения формы от исходной для отдельных моментов времени.

Узость полосы пропускания исходного усилителя и неравномерность его фазовой характеристики усугубят ситуацию после замыкания цепи отрицательной обратной связи (ООС). Коэффициент ООС будет частотно зависимым, а нарушение фазовой целостности при проходе через тракт сделает невозможным восстановление исходной формы импульса с помощью ООС. При этом измерения, проведенные в стационарном режиме с использованием гармонического синусоидального сигнала, никаких искажений не выявят: синусоидальный сигнал останется синусоидальным.

В-третьих, общая отрицательная обратная связь, хотя и уменьшает *общий* коэффициент нелинейных (гармонических) искажений, порождает гармоники, которые отсутствовали на выходе усилительного тракта до включения ООС. Об этом написано много разными авторами.

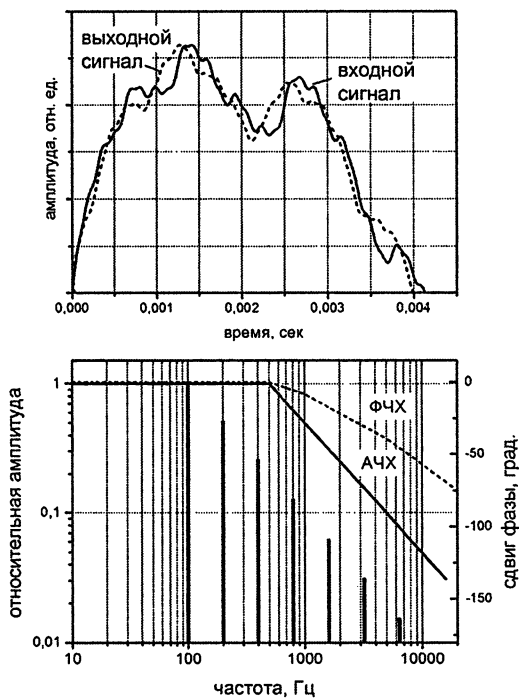
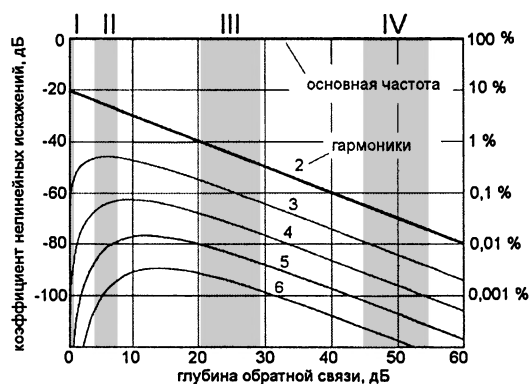


Рис. 3.1. Изменение формы импульса при прохождении через усилительный тракт с конечной полосой пропускания. Вверху: исходный импульс (сплошная линия) и прошедший импульс (пунктир). Внизу: спектр импульса (вертикальные линии), амплитудно-частотная (АЧХ) и фазочастотная (ФЧХ) характеристики усилительного тракта



- I - ламповый усилитель класса А без ООС
 II - двухтактный ламповый усилитель с небольшой ООС
 III - транзисторный усилитель, верхний диапазон частот
 IV - транзисторный усилитель, нижний диапазон частот

Рис. 3.2. Вклад различных гармоник в общий коэффициент нелинейных искажений усилителя для различной глубины общей отрицательной обратной связи

Мы воспользуемся результатами из уже упоминавшейся диссертации Даниэла Чивера (см. стр. 31). Рассчитанное им изменение спектра гармоник гипотетического усилителя, в исходном спектре которого до включения ООС, кроме основной гармоники, присутствует только вторая гармоника, показано на рис. 3.2.

В этом усилителе предполагается наличие только второй гармоники величиной 10 % (–20 дБ) в спектре на выходе исходного усилителя, т. е. усилитель имеет параболическую,

квадратичную нелинейность, присущую лампам и полевым транзисторам (режим I). Введение небольшой обратной связи приводит к уменьшению второй гармоники и одновременно к резкому увеличению высших гармоник (режим II).

Такой режим часто используют в промышленных, но не «аудиофильских», ламповых двухтактных усилителях. Одновременно уменьшается выходное сопротивление, что благоприятно влияет на артикулированность басовых звуков. *Объективные характеристики улучшаются, но естественность звучания снижается.*

Режимы III и IV соответствуют типичному транзисторному усилителю, где вводится глубокая общая отрицательная обратная связь глубиной более 40 дБ, постепенно ослабевающая с ростом частоты из-за снижения коэффициента усиления исходного, не охваченного обратной связью, усилителя. Эксперименты Д. Чивера с ламповым одноктактным усилителем подтвердили результаты моделирования.

В-четвертых, реальный усилитель всегда подключен к динамической головке или акустической системе со сложной зависимостью сопротивления от частоты и большой неравномерностью этой зависимости. Реальное воспроизведение музыки является, по сути, непрерывным развитием во времени *переходных процессов в системе «усилитель+громкоговоритель»*. Этот процесс не оптимизируется обратной связью. Наоборот, обратная связь многократно его усложняет.

В дополнение ко всему, электромагнитные импульсы, генерируемые в катушке громкоговорителя, вызывают импульсные токи через выходные клеммы в силу наличия у усилителя выходного сопротивления. Чем больше глубина ООС, тем ниже выходное сопротивление, а значит — больше эти токи. Они засоряют тракт обратной связи, подмешиваются к сигналу и приводят к дополнительным искажениям, не возникающим в случае чисто активной нагрузки.

В качестве примера реального транзисторного тракта усиления, разработанного в расчете на применение глубокой ООС, на рис. 3.3 показаны АЧХ и ФЧХ широкополосного интегрального операционного усилителя ОРА604 без ООС. Как видно, его полоса пропускания составляет всего 200 Гц по уровню -3 дБ, а фазочастотная характеристика сильно неравномерна в полосе от 100 до 3000 Гц, т. е. там, где как раз сосредоточены основные частоты музыкальных звуков и где в наибольшей степени проявляется стереоэффект при воспроизведении.

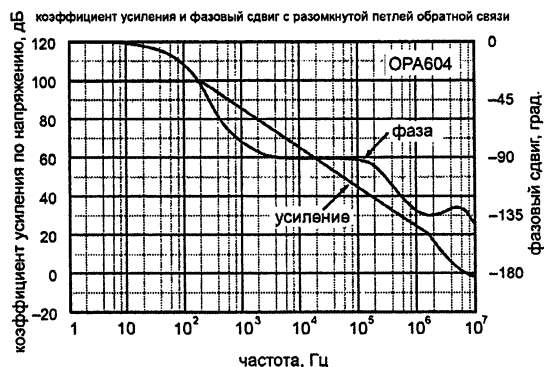


Рис. 3.3. Зависимость усиления и фазового сдвига от частоты не охваченного общей отрицательной обратной связью широкополосного интегрального операционного усилителя ОРА604, рекомендуемого производителем («Burr Brown — Texas Instruments») для применения в профессиональной аудиотехнике



Примечание.

Отметим, что этот усилитель считается широкополосным. Коэффициент усиления на частоте 100 кГц равен 42 дБ, т. е. более 100. Он рекомендован для применения в серьезной аудиотехнике.

Например, микросхема ОРА604 установлена в выходном каскаде CD-проигрывателя «Evolution» фирмы «Creek» (Великобритания) стоимостью 1 тыс. долл. и во входном каскаде интегрального усилителя «SV-234» фирмы «Vincent» стоимостью более 1,5 тыс. долл. (журнал «Stereo&Video», июнь 2007).

Автор не является категоричным противником использования отрицательной обратной связи в звукоусилении. ООС имеет право

на использование в высококачественных усилителях, но при нескольких условиях:

- ♦ полоса пропускания усилителя, не охваченного ОООС, должна быть шире рабочего диапазона, а его фазовая характеристика в рабочем диапазоне должна быть линейной;
- ♦ глубина ОООС не должна быть большой, т. е. коэффициент усиления УНЧ с обратной связью не должен быть во много раз меньше коэффициента усиления исходного усилителя, не охваченного ОООС;
- ♦ нагрузка усилителя с ОООС не должна быть комплексной, т. е. должна быть чисто активной, насколько это возможно.

Первые два условия означают, что *включение ОООС не должно рассматриваться как необходимое условие* для работы усилителя. Третье условие означает: *нельзя охватывать отрицательной обратной связью выходной каскад усилителя, непосредственно работающий на громкоговоритель!*

К сожалению, в литературе часто встречаются весьма категоричные высказывания сторонников чисто ламповой аппаратуры и не менее воинственные заявления сторонников чисто транзисторной техники.

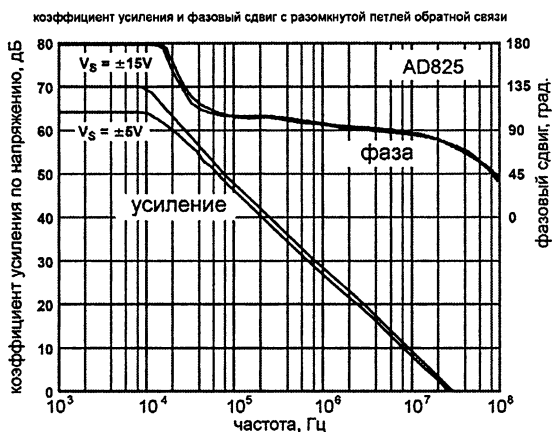
Первые обычно избегают технических терминов, используя впечатления от прослушивания, за что вторые активно обвиняют поклонников лампового звука в технической неграмотности и непонимании достоинств отрицательной обратной связи. На взгляд (и слух) автора этой книги истина, как это часто бывает, находится посередине.

Использование исходного (т. е. при работе без общей обратной связи) широкополосного и максимально фазолинейного транзисторного тракта с внешней ОООС при работе на чисто активную нагрузку (например, в *предварительных* каскадах усиления напряжения) может оказаться вполне приемлемым для аппаратуры высшего уровня.

Однако надо понимать, что на нынешнем уровне развития полупроводниковой элементной базы этим критериям удовлетворяет весьма ограниченный набор интегральных маломощных операционных усилителей (например, AD825, возможно LM7171, AD797), причем не самых дешевых и не самых доступных.

Можно рекомендовать изготавливать предварительные усилители напряжения на подобных микросхемах (автор проверял и подтверждает хорошее качество звучания), или, еще лучше — на дискретных элементах. Что касается глубокой ОООС в *выходных* каскадах транзисторных усилителей, то, по мнению автора настоящей книги, *проц*

Рис. 3.4. Зависимость усиления и фазового сдвига от частоты не охваченного общей отрицательной обратной связью широкополосного интегрального операционного усилителя AD825 (фирма «Analog Device»), рекомендуемого автором для применения в высококачественной аудиоаппаратуре



и эффективнее от нее отказаться, чем бороться с ее отрицательными последствиями.



Пример 1.

Микросхема AD825 — редкий пример интегрального операционного усилителя с полосой пропускания до охвата ООС шире 15 кГц. Его амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики показаны на рис. 3.4. Предлагаем читателю сравнить их с характеристиками ОУ ОРА604 (рис. 3.3).



Пример 2.

Схема очень простого, но хорошо звучащего усилителя мощности полностью на полупроводниковых компонентах показана на рис. 3.5. Усиление напряжения осуществляется усилителем с глубокой ООС на микросхеме AD825, у которой при разомкнутой ООС спад усиления начинается после 10 кГц, а изменение фазового сдвига — после 16 кГц (рис. 3.4).

Выходной каскад — двухтактный усилитель тока на четырех транзисторах (класс АВ) — не охвачен общей обратной связью. Схема не требует настройки, кроме подбора транзисторов выходного каскада по коэффициенту усиления для обеспечения нулевого потенциала на выходе, и выдерживает короткое замыкание на выходе.

Выходные транзисторы VT3, VT4 установлены на индивидуальных радиаторах площадью не менее 300 см². Транзисторы VT1 и VT2 установлены на тех же радиаторах через изолирующие прокладки: VT1 совместно с VT4, VT2 — с VT3.

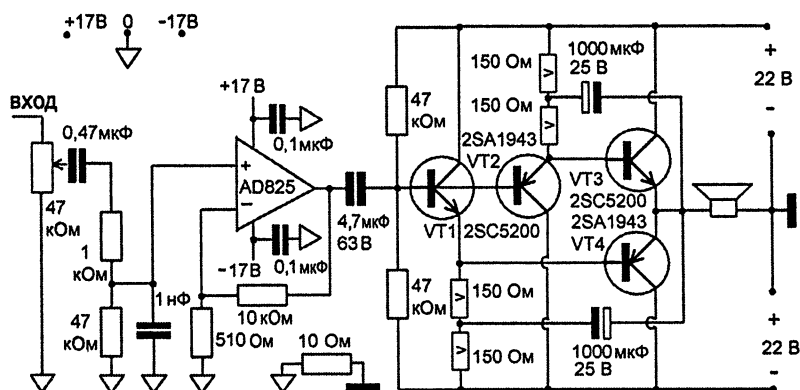


Рис. 3.5. Схема простого, но хорошо звучащего полупроводникового усилителя



Примечание.

Подробно схема выходного каскада рассмотрена в разделе 5.4.

При повторении желательно использовать полностью раздельное питание входного и выходного каскадов от независимых вторичных обмоток, а еще лучше — от различных силовых трансформаторов. Питание входного каскада должно быть стабилизировано, например, с помощью микросхемных интегральных стабилизаторов LM337, LM317.

Все элементы должны быть максимально высокого качества. Можно попробовать заменить ОУ AD825 на AD797.

Усилитель звучит лучше многочисленных схем на основе мощного интегрального ОУ фирмы «National Semiconductors» LM3886 с ООС, лучше многих ламповых однотактных усилителей (например, 6Н23 + 6П3С, 6Н8С + 2 × 6П3С), однако уступает в динамике и «вовлеченности», «открытости» ламповому однотактнику 6С2С + КТ88 (рис. 2.10), а также *всем* гибридным усилителям, описанным в главе 6.

Максимальная мощность этого усилителя ограничивается напряжением питания операционного усилителя ($U_{max} = \pm 18$ В) и составляет около 25 Вт на нагрузке 4 Ом и 12,5 Вт на нагрузке 8 Ом. Этого вполне достаточно для комфортного прослушивания музыки в помещении площадью до 30 м².

При использовании операционного усилителя с линейной фазо-частотной характеристикой ОРА551 или ОРА552 фирмы «Burr Brown» напряжение питания можно увеличить до ± 28 В, а выходного каскада — до ± 30 —35 В, при этом выходная мощность возрастет пропорционально квадрату напряжения питания.

Однако «прозрачность» звучания и звуковая сцена несколько ухудшаются, что коррелирует со спадом усиления этих микросхем, начиная с 100 Гц (у AD825 спад начинается после 10 кГц). Другие распространенные и популярные среди радиолюбителей микросхемы, в том числе с повышенным значением допустимых напряжений питания (например, NE5532 с $U_{max} = \pm 22$ В, ОРА604 с $U_{max} = \pm 25$ В, ОРА445 с $U_{max} = \pm 45$ В), в данном усилителе не рекомендуются, а TL072 и им подобные использовать недопустимо. Необходимым параметром операционных усилителей, пригодных для работы в данной схеме, является не только широкополосность и линейность фазовой характеристики ОУ без ООС, но и возможность работать на нагрузку порядка 1 кОм.



Пример 3.

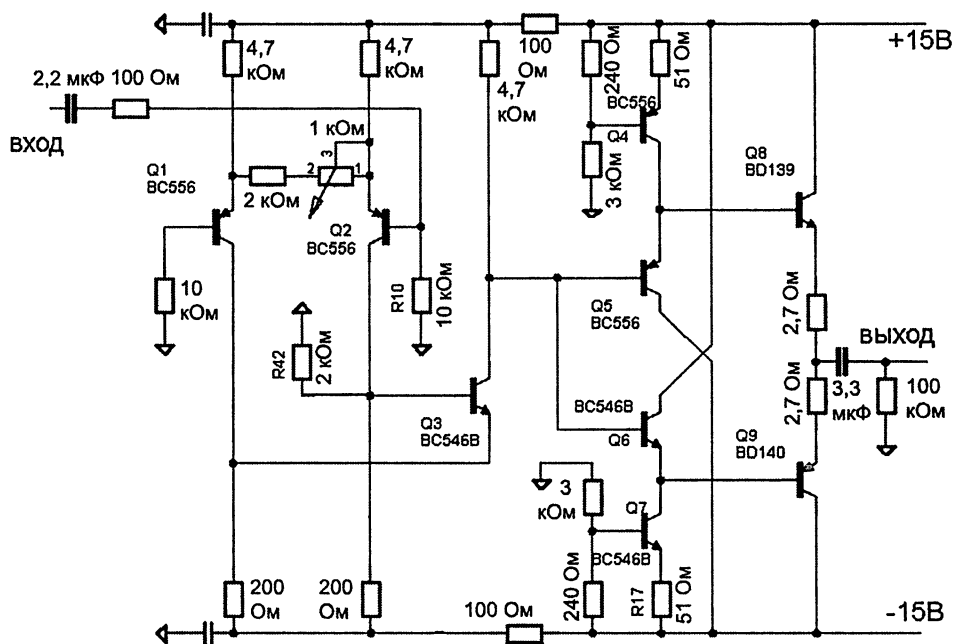
Можно построить транзисторный усилитель, в котором усиление сигнала по напряжению осуществляется без применения ООС. При этом можно использовать схемотехнические решения, применяемые в интегральных операционных усилителях. Такой усилитель показан на рис. 3.6. Это разработка чешского конструктора-любителя Павла Мацеры (P. Macura). Схема может использоваться как усилитель напряжения в составе усилителя мощности совместно с выходным каскадом — усилителем тока (например, с таким, как в усилителе на рис. 3.5).*

Усилитель содержит входной дифференциальный каскад (транзисторы Q1, Q2), усилитель напряжения (Q3) и выходной двухтактный параллельный усилитель тока на транзисторах Q5, Q6, Q8, Q9, работающих в классе А. Схема выходного каскада аналогична таковому на рис. 3.5. На транзисторах Q4 и Q7 выполнены генераторы тока, задающие начальный ток транзисторам выходного каскада.

Такой усилитель имеет явные преимущества перед узкополосными интегральными ОУ. Но... в усилителе П. Мацеры — 9 нелинейных активных элементов (транзисторов) и в несколько раз больше пассивных элементов, которые, хотя и рассматриваются в идеале как линейные, но тоже могут вносить искажения. Плюс около сотни паяных соединений в случае применения печатной платы.

В то же время, функция, выполняемая этим усилителем — усиление сигнала по напряжению в 10—50 раз — может быть реализована на

* Сайт www.pha.inecnet.cz/macura/audiopage.html (P. Macura).



П. Мауры

Рис. 3.6. Схема транзисторного усилителя без ООС Павла Мауры

одном триоде с «обвязкой» из трех деталей! Причем ламповый усилитель за счет более высокого напряжения питания будет иметь многократный запас по максимальному выходному напряжению!

3.2. Краткость — сестра таланта: схемотехнический минимализм

Краткость тракта прохождения электрического сигнала от источника до громкоговорителя рассматривается как признак талантливо сконструированной схемы аудиоусилителя. «Не навреди» — эта заповедь Гиппократа относительно врачевания в полной мере исповедуется многими конструкторами аппаратуры класса «Hi-End».

Можно сказать, при конструировании такой аппаратуры соблюдается принцип разумного минимализма, не переходящего в крайний аскетизм.

Во-первых, минимум элементов в тракте прохождения сигнала при максимальном качестве каждого элемента.

**Примечание.**

Речь идет именно о минимальном количестве активных и пассивных элементов в тракте, а также о минимальном количестве контактных или паяных соединений, а не просто о компактности конструкции и малой длине соединительных проводов.

Во-вторых, максимум внимания к источнику питания:

- ♦ запас по мощности силового трансформатора;
- ♦ большая, часто очень большая емкость конденсаторов в блоке питания;
- ♦ использование дросселей в фильтрах в блоках питания ламповых каскадов.

В-третьих, в усилителях ценовой категории выше 1 тыс. долл. не применяют *никаких регулировок частотной характеристики*. Если у слушателя ощущается потребность в коррекции частотной характеристики, рекомендуется сменить акустические системы или поработать над акустическим оформлением помещения для прослушивания музыки.

В-четвертых, о регуляторе стереобаланса речь также не идет. Ведь ставится цель максимально достоверного воспроизведения звукового поля в пространстве перед слушателем. А для этого необходимо:

- ♦ обеспечить одинаковое время прохождения звука от левого и правого каналов;
- ♦ обеспечить внутри каждого канала — одинаковое время прохождения звуковых колебаний, излучаемых ниже-, средне- и высокочастотными громкоговорителями.

**Примечание.**

Условие одновременного прихода к слушателю сигналов левого и правого каналов важно в частотном диапазоне от 150—200 Гц до 3—5 кГц. Вне этого диапазона очень большая (ниже 150 Гц) и очень малая (выше 10 кГц) длина звуковой волны по сравнению с расстоянием между нашими ушами не позволяет человеку определить положение источника звука. Поэтому наилучших результатов можно добиться, если использовать для интервала 200—3000 Гц одну динамическую головку.

3.3. Хорошее питание

Правильное питание — залог не только человеческого здоровья, но и нормальной работы усилителя. Большой запас по мощности силового трансформатора — неременное условие достоверного воспроизведения пиков музыкального сигнала. Предпочтение отдается трансформаторам с тороидальным сердечником, создающим меньшие помехи.

В ламповых схемах предпочтение отдается наиболее линейным, но наименее экономичным по КПД однотактным усилителям класса А. Для повышения мощности используют не переход к двухтактной схеме, а параллельное соединение выходных ламп в однотактном каскаде. КПД усилителя с выходным каскадом в классе А в среднем составляет менее 10 %.



Примечание.

Обратите внимание на выходные каскады всех приведенных в главе 2 (рис. 2.4—2.6) усилителей фирмы «Audio Note»: в каждом используется параллельное соединение двух выходных ламп.

В ламповых конструкциях для выпрямления переменного тока используют вакуумные выпрямительные диоды — **кенотроны**, не создающие высокочастотных помех при переключении. Полупроводниковые диоды применяют только в цепях накала ламп.

Для транзисторных конструкций кенотроны не пригодны, так как не могут обеспечить необходимый ток в несколько ампер. Вместо обычных диодов в транзисторных усилителях рекомендуется использовать диоды Шоттки с выпрямляющим переходом металл-полупроводник или специальные «быстрые» полупроводниковые диоды.

Во многих публикациях сообщается о лучшем звучании усилителя с двухполупериодным, а не мостовым выпрямителем. Это может быть связано с подавлением помех вследствие противофазного включения секций вторичной обмотки. Для такого выпрямителя, однако, требуется удвоенное количество вторичных обмоток трансформатора.

Двухполупериодное выпрямление почти всегда используется в ламповых усилителях. Не сообщается, однако, выбрано ли двухполупериодное, а не мостовое, выпрямление из-за того, что двухполупериодная схема лучше, или просто из соображения удобства (два диода содержится обычно в одном баллоне кенотрона, например, в популяр-

ном 5Ц3С) и уменьшения числа ламп в схеме. Известны случаи применения мостовых схем выпрямления на вакуумных диодах, включая знаменитый «Ongaku».

Конденсаторы в блоке питания рассматриваются не столько как фильтры для уменьшения пульсаций сетевого напряжения частотой 50 Гц (после выпрямления — 100 Гц), сколько как импульсные источники электроэнергии, способные выдать большой ток при «всплесках» сигнала. Например, в некоторые ламповые усилители стали устанавливать конденсаторы общей емкостью несколько тысяч микрофард при напряжении $U = 400\text{—}500\text{ В}$, что соответствует запасенной энергии $E = CU^2/2 > 100\text{ Дж}$.



Внимание.

К сожалению, такие конденсаторы многие профессиональные разработчики часто выставляют «напоказ» рядом с лампами, что следует признать неправильным с позиций техники безопасности.

Используют электролитические конденсаторы со специальными электролитами, не теряющими своих диэлектрических свойств на высоких частотах: «Rubycon» Black Gate, «Elna» Cerafine, «Elna» Silmic, а также «Nichicon» и «Panasonic» с пометкой «for audio».

Эти конденсаторы (в отличие от конденсаторов массового применения, т. н. «computer grade» — компьютерного уровня) не теряют своих свойств на высоких частотах и имеют низкое паразитное последовательное сопротивление. Некоторые производители (например, «Mundorf») выпускают конденсаторы с пониженной паразитной индуктивностью за счет встречного расположения идентичных свернутых фольговых лент, разделенных диэлектриком. Часто применяют шунтирование электролитических конденсаторов пленочными емкостью в 10—100 раз меньшей.

Раздельное питание, как в некоторых диетах у человека, широко используется в высококачественной аудиотехнике. Причем разделение идет:

- ♦ по «горизонтали» — отдельный блок питания для каждого канала, вплоть до изготовления стереоусилителя в виде двух моноблоков;
- ♦ по «вертикали» — раздельное питание для предварительных и окончного каскадов.

3.4. Разумная мощность и хорошие громкоговорители

Большинство однотактных ламповых усилителей высшего ценового диапазона имеет мощность 8—12 Вт, лишь небольшая часть усилителей развивают до 20 Вт за счет параллельного соединения ламп в выходном каскаде.

Этой мощности хватает для помещений до 40 м². Однако малогабаритные акустические системы с компрессионными головками диаметром 10—13 см в этом случае непригодны, т. к. требуют большей подводимой мощности и, вдобавок, дополнительного усиления на низких частотах введением соответствующей частотной коррекции.



Примечание.

По-видимому, поэтому распространилось мнение, что ламповые усилители требуют каких-то особых акустических систем. На самом деле речь идет о динамических головках размером не менее 20 см (больше — лучше) с относительно легкой подвижной системой и малой амплитудой колебаний, чувствительностью не менее 90 дБ/Вт/м.

Громкоговорители с такими параметрами следует признать нормальными для высококачественного воспроизведения, а не чем-то сверхъестественным, требующимся исключительно для ламповой аппаратуры.

Автор этих строк убежден, что размер динамической головки во многом определяет естественность звучания и пространственную сцену. Переход от оглушающего звука симфонического оркестра к комнатным условиям путем простого «масштабирования» источника звука (от большого зала — к комнате, от контрабаса и барабана — к небольшим коробочкам акустических систем с маленькими динамиками) без потери достоверности воспроизведения осуществить нельзя.

Дело в том, что в звуковом сигнале есть характеристика, задаваемая размером. Это длина звуковой волны.

Во-первых, для воспроизведения самых низких частот требуется определенный размер помещения.

Во-вторых, у динамиков есть два режима работы. На самых низких частотах подвижная система (диффузор и катушка) совершает поступательное движение вперед-назад с частотой сигнала.

Этот режим называют *поршневым*. С повышением частоты начинает вибрировать поверхность динамика, пространственная картина колебаний поверхности зависит от частоты звука и размера динамика. Многие высококачественные акустические системы содержат купольные среднечастотные головки, вообще не имеющие поршневого режима.

У автора есть субъективное, но устойчивое ощущение: маленькие динамики и акустические системы — «маленький» звук, большие динамики и акустические системы — «большой» звук, т. е. *широкая и глубокая звуковая сцена не возникает с маленькими динамиками*.

Четыре причины, почему маленькие динамики звучат не так, как большие

Можно в качестве предположения указать следующие возможные причины ухудшения пространственной картины при использовании громкоговорителей малого размера:

- ♦ иное частотное соотношение между поршневым и поверхностным режимами колебаний;
- ♦ фазовый сдвиг в области средних частот при больших амплитудах перемещения диффузора;
- ♦ свипирование (изменение во времени) частоты из-за эффекта Допплера;
- ♦ изменение диаграммы направленности для нижнего СЧ диапазона.

Рассмотрим каждую из возможных причин подробнее.

Причина №1. Различия в модовой структуре колебаний малых и больших динамических головок. Динамики разных размеров могут иметь различающуюся модовую структуру колебаний при воспроизведении одного и того же музыкального сигнала. Динамик малого размера может иметь более поздний с ростом частоты переход от поршневого к «поверхностному» режиму колебаний, так как длина волны поверхностной моды не может превышать размера диффузора.

Большой динамик может обрабатывать низкочастотную часть среднечастотного диапазона (около 300 Гц) в поверхностном режиме, а малый вынужден это делать в режиме поступательного движения, который из-за большой амплитуды еще и увеличивает искажения. Эта особенность имеет место всегда, так как определяется только размером диффузора.

Причина №2. Изменение во времени положения источника звука в СЧ-диапазоне. Еще одна причина неполноценной пространственной сцены при воспроизведении фонограмм с помощью маленьких динамиков может быть связана с изменением во времени положения источника звука среднечастотного диапазона при одновременном воспроизведении низко- и среднечастотных колебаний одним динамиком малого размера. Она связана с большой амплитудой низкочастотных колебаний. Малогабаритный динамик развивает в поршневом режиме колебания с амплитудой примерно ± 5 мм.

Амплитуда низкочастотных колебаний ± 5 мм означает, что кажущийся источник звука с основным тоном, соответствующим поверхностному режиму колебаний, за время порядка 10 мс (соответствует частоте 100 Гц) изменил свое положение на 1 см. А 1 см — это 10 % от длины звуковой волны для частоты 3 кГц, т. е. на такую же величину по сравнению со значением 2π изменится и фаза колебаний.

Таким образом, большая амплитуда низкочастотных колебаний может разрушать пространственную звуковую картину из-за разрушения когерентности колебаний в верхнем среднечастотном диапазоне, участвующем в формировании стереоэффекта. Подчеркнем еще раз, что этот эффект будет иметь место только при одновременном воспроизведении низких и средних частот одним динамиком малого размера.

К сожалению, именно так и бывает: большинство колонок с малым НЧ-динамиком (и полочных, и напольных) — двухполосные с частотой раздела примерно 2 кГц, т. е. основному динамику отводится и НЧ- и нижний СЧ-диапазоны. Возможно, при переходе к трехполосным системам этот эффект ослабнет, однако трехполосных систем с малыми динамиками обычно не делают.

Причина №3. Проявление эффекта Допплера. Цельность, слитность, «музыкальность» звучания может нарушиться и в результате повышенного эффекта Допплера для малых динамиков. Эффект Допплера состоит в изменении частоты звука при относительном движении источника и приемника: при их сближении частота увеличивается, при удалении — уменьшается.

Связано это с тем, что приемник (в данном случае — наше ухо) принимает больше звуковых колебаний в единицу времени в первом случае и меньше — во втором случае по сравнению со случаем неподвижного источника относительно приемника. Поступательное движение диффузора на низких частотах может повлиять на восприятие частот, соответствующих поверхностным колебаниям диффузора. Причем

при воспроизведении звуковых колебаний одной и той же частоты в поршневом режиме с одинаковой громкостью диффузор малого динамика вынужден ускоряться быстрее, чем диффузор большого динамика, так как для обеспечения равной громкости его амплитуда колебаний должна быть больше. Отсюда и повышенное проявление эффекта Допплера.

Небольшое, но все-таки искажение воспроизведения сигналов среднечастотного диапазона 1000—3000 Гц разрушает когерентность (т. е. пространственно-временное согласование) звуковых импульсов сложной формы с широким спектром как в пределах одного канала, так и между каналами. Заметим, что именно среднечастотный диапазон и определяет пространственную картину, так как длина волны СЧ-колебаний соизмерима с расстоянием между нашими ушами.

Отсюда и нечеткость пространственной картины с малыми динамиками: звук «не хочет» выходить из колонок. Например, малогабаритный динамик, развивающий в поршневом режиме колебания с амплитудой $S = \pm 5$ мм на частоте $f = 100$ Гц, имеет скорость поступательного движения в крайних положениях примерно 4 м/с, т. е. более 1 % по отношению к скорости звука. Такое изменение скорости будет присуще всем звукам за пределами поршневого режима, т. е. примерно начиная от ноты «ми» первой октавы (первая, самая тонкая струна гитары) и выше. Как уже отмечалось, человек различает относительное изменение частоты 0,3 %, а это значит, что эффект Допплера действительно можно услышать.

Причем, поскольку эффект имеет место для всех частот выше некоторой, изменяться во времени будет не только тон, но и тембр звучания. Это может вполне привести к разрушению «консонанса» — слитности, созвучности, гармоничности музыкальных звуков. Этот эффект, как и предыдущий, будет проявляться в двухполосных акустических системах, где одному динамику отводится и НЧ-диапазон, и значительная часть СЧ-диапазона. Он будет нарастать с увеличением громкости воспроизведения.

Причина №4. Повышенная дифракция для нижнего СЧ-диапазона.

Маленькие динамики обычно помещают в маленькие ящики («По Сеньке и шапка»). В напольном исполнении ящики относительно высокие, но узкие. Малые размеры ящика в горизонтальной плоскости приводят к изменению диаграммы излучения вследствие дифракции звуковой волны на краях ящика. Влияние дифракции в звуковоспроизведении надежно установлено.

Для акустических систем с корпусом шириной менее 40 см, но более 25 см, дифракция (огибание краев ящика) звуковых волн приводит к снижению низкочастотных составляющих. Это происходит оттого, что самые низкочастотные колебания, т. е. колебания с длиной волны 0,5 м и более, излучаются и вперед, и назад, огибая ящик акустической системы, тогда как более высокочастотные — только вперед.

В результате дифракции ослабляются, а затем, отразившись от стен, доходят до слушателя, но уже, конечно без какого-либо фазового согласования, низкочастотные составляющие, не влияющие на стереоэффект. Такое ослабление, если оно влияет на тональный баланс, успешно корректируют простым LCR-фильтром на входе акустической системы (т. е. понижением СЧ-ВЧ-составляющих до уровня реальной громкости НЧ-составляющей).

В случае ящика шириной 15—20 см назад начнут излучаться и волны более высоких частот, соизмеримые с расстоянием между нашими ушами и поэтому участвующие в формировании стереоэффекта. Это означает, что стереоэффект при использовании ящиков малого размера может ухудшаться.

Дифракция обусловлена исключительно малыми размерами корпуса, причем не внутренними, а именно внешними размерами. Поэтому дифракцию можно ослабить, увеличив размеры передней стенки акустической системы. От громкости воспроизведения дифракционный эффект не зависит.

Таким образом, желательно, чтобы все размеры акустической системы, а еще лучше — и размеры НЧ-СЧ головки были не меньше, чем расстояние между нашими ушами!

Подытоживая все выше приведенные рассуждения, можно сделать вывод и предположение.



Вывод.

Существует как минимум четыре причины, приводящие к ухудшению звучания динамиков малого размера (менее расстояния между нашими ушами). Три из них в принципе неустранимы, а четвертая может быть устранена увеличением размеров передней панели акустической системы.

Предположение: возможно потому, что ламповые усилители почти всегда используют совместно с большими динамиками, качество звуковой картины дополнительно улучшается.

3.5. Отказ от анализа объективных характеристик в пользу субъективного восприятия

Разногласия инженеров и меломанов — «объективистов» и «субъективистов» — анализировались подробно в главе 2. Дискуссии объективистов и субъективистов применительно к аппаратам высшей ценовой категории все чаще разрешаются в пользу субъективной оценки от прослушивания аппаратуры не только экспертами аудио-журналов и музыкальными журналистами, но и обычными любителями музыки.

Понятно, что даже при уважении к техническим характеристикам аппарата, личные впечатления от прослушивания или мнения друзей, основанные на личном опыте, являются определяющими при его приобретении или изготовлении его копии.

У профессиональных и самодеятельных разработчиков высококачественных усилителей целью становится не достижение технического параметра, а создание действительно «звучащего» аппарата, при этом мотивом для повторения чужой конструкции чаще всего выступают впечатления, опубликованные в журналах и в Интернете. Поэтому во многих таких публикациях отсутствуют технические данные, кроме выходной мощности.

3.6. Лампово-транзисторный «консенсус»: ламповый усилитель напряжения + транзисторный усилитель тока

В последующих главах этой книги подробно описаны принципы конструирования и практическая реализация гибридных усилителей мощности. В этих усилителях используются основные принципы конструирования высококачественных ламповых усилителей. Но стоимость их компонентов и объем трудозатрат оказываются ниже за счет того, что *выходной ламповый каскад с трансформатором заменяется бестрансформаторным транзисторным усилителем тока*.

Предварительный усилитель напряжения в таком усилителе — полностью ламповый и принципиально не отличается от входных и драйверных каскадов лучших ламповых усилителей.

Автор убежден, что при нынешнем развитии полупроводниковой элементной базы, включая транзисторы и микросхемы, разумным и экономически оправданным выходом из «лампово-транзисторной дискуссии» может быть **конструирование гибридных усилителей без общей отрицательной обратной связи**, в которых:

- усиление напряжения осуществляется лампами;
- финишное усиление тока до уровня, необходимого для раскачки громкоговорителя, осуществляется транзисторным усилителем тока.

При таком разделении функций используются преимущества ламп как очень линейных приборов для усиления напряжения и транзисторов как приборов, способных отдавать большой ток непосредственно в катушку громкоговорителя без применения согласующего трансформатора. Таким способом легко решаются и задача согласования высокоомного лампового каскада с низкоомной нагрузкой, и задача усиления напряжения источника сигнала с минимальными искажениями.



Примечание.

Важно, что современная элементная база позволяет построить такие усилители без применения общей отрицательной обратной связи.

По сравнению с полностью транзисторными усилителями с ООС гибридные усилители обеспечивают более ясное, чистое, динамичное звучание и лучшую пространственную звуковую картину. По сравнению с чисто транзисторными усилителями без ООС гибридные усилители имеют более короткий тракт прохождения сигнала, меньшее количество активных и пассивных компонентов.

По сравнению с чисто ламповыми усилителями гибридные усилители могут иметь значительно большую выходную мощность при тех же массогабаритных параметрах, а также более низкое выходное сопротивление (т. е. лучший демпинг-фактор), благоприятное для воспроизведения низких частот.



Примечание.

Важно, что такие гибридные конструкции могут быть легко разработаны и изготовлены радиолюбителями. Ведь для них, в отличие от полностью ламповых конструкций, не требуется изготовление сложных выходных трансформаторов или приобретение дорого-

стоящих фирменных трансформаторов, а в отличие от полностью транзисторных с большим числом активных и пассивных компонентов — не требуется изготовление сложных печатных плат.

Гибридные усилители дешевле полностью ламповых не только за счет исключения выходного трансформатора, но также за счет отказа от применения дорогостоящих мощных выходных ламп. Кроме того, лампы, используемые в гибридных усилителях для усиления напряжения, имеют часто значительно больший срок службы, чем мощные лампы, применяемые в выходных каскадах полностью ламповых схем. Для некоторых таких ламп срок службы исчисляется многими тысячами часов.

ЛАМПОВЫЕ УСИЛИТЕЛИ НАПРЯЖЕНИЯ

Эта глава содержит краткий курс ламповой схемотехники, включая все типы элементарных ламповых каскадов, применяемых в гибридных лампово-транзисторных усилителях. Приводятся простые формулы, позволяющие оценить параметры каскадов и выбрать режимы ламп, а также таблицы параметров и режимов для некоторых популярных ламп.

4.1. Как работает вакуумный триод

Вакуумный триод представляет собой стеклянный, металлический, реже керамический баллон, из которого откачан воздух, а внутри находятся три металлических электрода: катод, анод и сетка (рис. 4.1).

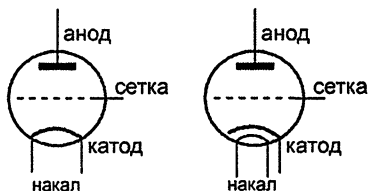


Рис. 4.1. Вакуумный триод прямого (слева) и косвенного (справа) накала

Катод является источником электронов, которые испускаются вследствие термоэлектронной эмиссии. Для этого катод подогревают. Различают катоды прямого и косвенного накала. В первом случае непосредственно к катоду подводится напряжение накала, и он разогревается. Во втором случае в баллон в непосредственной близости от катода устанавливают нить накала, к которой подводят напряжение для разогрева.

На **анод** подается положительное напряжение относительно катода U_A , под действием которого электроны, испущенные катодом, ускоряются навстречу аноду. В цепи катод — анод возникает электрический ток.



Примечание.

В отличие от полупроводниковых приборов, в которых носителями тока могут быть как электроны (основные носители заряда в полупроводниковых материалах n-типа), так и положительно заряжен-

ные «дырки» (основные носители заряда в материалах *p*-типа), в вакуумных приборах ток создается только электронами.

Поскольку ток, создаваемый электронами, может течь только в одном направлении — от катода к аноду — вакуумный прибор, содержащий только катод и анод, может использоваться для выпрямления тока. Такой прибор называют вакуумным *диодом*. Вакуумный диод, предназначенный для выпрямления переменного тока в блоках питания радиоаппаратуры, называют *кенотроном*.

В вакуумном *триоде* для управления анодным током между катодом и анодом устанавливают *сетку*, сквозь которую могут пролетать электроны. На сетку подают небольшое постоянное отрицательное напряжение относительно катода U_c . Его называют *напряжением смещения*.

Анодный ток при этом сильно уменьшается. Изменение напряжения на сетке вызывает изменение анодного тока. Если между анодом и положительным электродом источника питания включить резистор, изменение анодного тока будет сопровождаться изменением падения напряжения на этом резисторе, а также на аноде относительно катода. Поэтому *переменное напряжение на сетке будет порождать переменное напряжение на аноде*, но с большей амплитудой. В этом и состоит принцип работы вакуумного триода.

Сопоставление с транзисторами

Если сравнивать вакуумный триод с транзисторами, сразу можно отметить ряд отличий. Во-первых, вакуумные триоды всегда униполярны (т. е. электрический ток обеспечивается только носителями заряда одного знака — электронами). Поэтому в ламповой технике, в отличие от транзисторной, не существует понятия «комплементарные вакуумные триоды».

Во-вторых, в вакуумных триодах электроны движутся в вакууме, а в транзисторах — в полупроводниковом кристалле. В полупроводниках прохождение тока неизбежно приводит к нагреву кристалла, что увеличивает его электрическое сопротивление, так как электроны рассеиваются на колебаниях решетки, возрастающих с ростом температуры.

Температура кристалла, собственно, и есть величина, характеризующая амплитуды и частоты колебаний атомов относительно своих равновесных положений в узлах кристаллической решетки. Поэтому в транзисторах неизбежно возникают т. н. *тепловые искажения* —

изменение тока, не связанное с изменением управляющего сигнала, а обусловленное изменением температуры кристалла в процессе работы. Необратимый разогрев приводит к электрическому *пробую* и *выходу из строя* полупроводникового прибора. С вакуумным триодом такого произойти не может.

В-третьих, вакуумный триод является *полевым прибором*. В цепи сетка-катод ток не протекает. Изменение анодного тока не связано с изменением сеточного тока, а обусловлено изменением электрического поля на сетке относительно катода. Этим вакуумный триод похож на *полевой транзистор* и существенно отличается от *биполярных транзисторов*.

В-четвертых, так как размер вакуумных приборов намного больше размера транзисторов, вакуумные приборы работают при плотностях тока в сотни и тысячи раз меньшей, чем транзисторы. Большой размер прибора и вакуум между электродами в сотни и тысячи раз уменьшают электрические емкости анод-катод, анод-сетка, сетка-катод по сравнению с транзисторами. Это позволяет лампам успешно работать в области высоких частот, где они не могут быть заменены транзисторами. Применительно к звуковому диапазону, по-видимому, невозможно представить ситуацию, где бы вакуумные приборы ограничивали полосу пропускания.

Обозначения ламп

В большинстве принятых систем обозначения ламп первая цифра (цифры) обозначают напряжение накала в вольтах. Например, лампа 12AX7 имеет напряжение накала 12,6 В, а лампы 6DJ8, 6H8C — 6,3 В.

Советские (российские) триоды имеют после первой цифры буквы «С» (одиночные триоды, например, миниатюрные 6С51Н, 6С52Н, маломощные пальчиковые 6С1П, 6С2П, маломощные октальные 6С2С, средней мощности пальчиковые 6С45П, мощные пальчиковые 6С19П, мощные октальные 6С4С) или «Н» (двойные триоды, например, маломощные пальчиковые 6Н1П, 6Н2П, 6Н6П, миниатюрные 6Н16Б, маломощные октальные 6Н8С, 6Н9С, мощные октальные 6Н5С, 6Н13С).

Существуют лампы, у которых в одном баллоне установлен и триод, и пентод. Они имеют после первой цифры букву «Ф» (например, 6Ф1П, 6Ф3П, 6Ф12П).

После цифры и буквы в российских лампах используются цифры, указывающие конкретный тип лампы. Затем снова добавляется буква:

«П» для пальчиковых ламп, «С» — для ламп с октальным цоколем, «Б» — для сверхминиатюрных ламп в стеклянном корпусе, «Н» — для сверхминиатюрных ламп в металлическом корпусе.

Затем, через черточку могут добавляться буквы, указывающие на улучшенные характеристики и специальное исполнение. В советских (российских) лампах дополнительная буква «Е» обозначает повышенную надежность, долговечность, способность работать в более жестких электрических режимах, а буква «В» — повышенную механическую надежность.

В двойных триодах нити накала могут быть соединены как параллельно (например, 6Н2П, 6Н6П, 6Н23П, 6Н30П), так и последовательно (например, 6Н1П, 6Н3П). Некоторые двойные триоды имеют выводы обеих нитей накала, и потребитель может сам выбрать вариант их соединения. Например, лампа 12АХ7 и ее полные аналоги ЕСС83, Е83СС при последовательном соединении нитей накала требуют для накала напряжения 12,6 В, а при параллельном — 6,3 В.

Некоторые двойные триоды имеют одну общую нить накала на два триода (6Н8С, 6Н9С). Ток накала находится в диапазоне от 300 мА (маломощные триоды с рабочим током анода 1—10 мА) до нескольких ампер (мощные выходные триоды с рабочим током анода 100—200 мА). Маломощные триоды с рабочим током анода менее 10 мА могут обеспечивать усиление сигнала по напряжению около 100 раз, а мощные триоды с рабочим током порядка 100 мА — намного меньше, иногда всего в 2—3 раза.

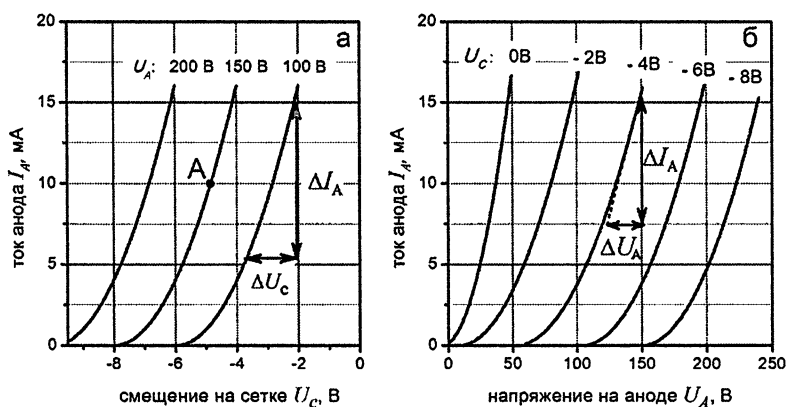


Рис. 4.2. Вольтамперные характеристики гипотетического маломощного триода:
 а — зависимости анодного тока от напряжения на сетке относительно катода;
 б — зависимости анодного тока от напряжения на аноде относительно катода

Каждый триод имеет свой набор анодно-сеточных характеристик и величин, связывающих смещение на сетке, ток анода, анодное напряжение. На рис. 4.2, а показаны зависимости тока анода от напряжения смещения для различных значений анодного напряжения. Эти зависимости близки к параболам. Это значит, что нелинейность изменения анодного тока при изменении напряжения смещения, в основном, квадратичная, т. е. в спектре нелинейных искажений будет доминировать вторая гармоника. Нелинейность уменьшается с ростом анодного тока. Это свойство стараются максимально использовать в высококачественных усилителях, несмотря на то, что рост анодного тока приводит к росту потребляемой мощности. Отношение приращения анодного тока ΔI_A к приращению сеточного напряжения ΔU_C при постоянном анодном напряжении называют *крутизной* триода:

$$\text{крутизна } S = \frac{\Delta I_A}{\Delta U_C} [\text{mA} / \text{V}]. \quad (1)$$

Крутизну обычно измеряют в мА/В. Для случая, обозначенного на рис. 4.2, крутизна равна приблизительно 5 мА/В. Очевидно, что нелинейность анодно-сеточной характеристики приводит к зависимости крутизны от анодного тока: с уменьшением анодного тока нелинейность увеличивается, а крутизна уменьшается.



Примечание.

Поэтому при разработке высококачественных усилителей стараются задавать анодный ток, близкий к максимально допустимому, несмотря на то, что такой режим может уменьшить срок службы лампы.

Крутизна показывает, на сколько миллиампер изменится анодный ток при изменении напряжения смещения на один вольт. **Обращаю внимание**, что в англоязычной литературе и в справочных данных некоторых фирм-производителей электронных ламп крутизна (по-английски *transconductance*) обозначается не буквой S , а буквой g , и измеряется не в А/В, а в *сименсах*.

Сименс — это единица электропроводности, равная 1/Ом.

Другой важной характеристикой триода является его *внутреннее сопротивление* R_i — отношение приращения анодного напряжения ΔU_A к соответствующему приращению анодного тока ΔI_A при постоянном напряжении на сетке:

$$\text{внутреннее сопротивление } R_i = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A} [\text{кОм}]. \quad (2)$$

Как видно из графиков на рис. 4.2, б внутреннее сопротивление лампы не является постоянной величиной. Оно зависит от режима ее работы, т. е. от значений анодного напряжения, напряжения на сетке, анодного тока. Внутреннее сопротивление различных ламп находится в интервале от 10—100 кОм (маломощные лампы, предназначенные для работы с малым анодным током, например, 12AX7, 6Н2П, 6Н9С) до 200—500 Ом (мощные лампы, предназначенные для работы в выходных каскадах, например, 300В, 6С33С).

Еще одним важным параметром триода является статический коэффициент усиления μ — отношение приращения напряжения на аноде ΔU_A к приращению напряжения на сетке ΔU_C , вызывающему такое же приращение анодного тока:

$$\text{коэффициент усиления } \mu = \frac{\Delta U_A}{\Delta U_C}. \quad (3)$$

Коэффициент усиления показывает, во сколько раз изменение на 1 В сеточного напряжения эффективнее для изменения анодного тока, чем изменение на 1 В анодного напряжения. Наибольший коэффициент усиления (до 100) имеют маломощные триоды с рабочим током порядка 1 мА (12AX7, 6Н2П, 6Г2), наименьший (до 3) — мощные триоды (6С19П, 6С4С, 6С41С, 6С33С, 300В) с рабочим током порядка 100 мА.

Крутизну, внутреннее сопротивление и коэффициент усиления триода можно определить графическим методом по анодно-сеточным характеристикам. Крутизна определяется непосредственно по наклону зависимости анодного тока от напряжения на сетке (рис. 4.2, а) и составляет на линейном участке примерно $S = 6 \text{ мА/В}$. Внутреннее сопротивление находится из графика «анодный ток-анодное напряжение» (рис. 4.2, б). Например, при $U_C = -4\text{В}$ приращение напряжения U_A на 25 В от 125 до 150 В приводит к изменению тока I_A на 7,5 мА: от 7,5 до 15 мА. Разделив 25 В на 7,5 мА, получаем $R_i = 3,4 \text{ кОм}$. Затем находим коэффициент усиления, пользуясь соотношением

$$\mu = SR_i, \quad (4)$$

то есть коэффициент усиления = крутизна $\left[\frac{\text{мА}}{\text{В}}\right] \times \text{внутреннее сопротивление} [\text{кОм}]$.

Связь коэффициента усиления с крутизной и внутренним сопротивлением прямо следует из определений этих понятий (1), (2), (3) и может быть легко установлена из графиков на рис. 4.2. Для рассматриваемого случая получаем $\mu = 22$. Если внутреннее сопротивление выражать в омах, крутизну надо брать в амперах на вольт.

Коэффициент усиления можно непосредственно оценить из обоих наборов характеристик на рис. 4.2, сравнивая изменение анодного напряжения с изменением сеточного. Так, например, на рис. 4.2, а изменение анодного напряжения на 50 В от 100 до 150 В примерно эквивалентно изменению сеточного напряжения на 2 В. Разделив 50 на 2, получаем $\mu \approx 25$.

В табл. 4.1 представлены основные характеристики и режимы работы триодов малой и средней мощности, которые могут быть использованы в усилителях напряжения при разработке гибридных усилителей мощности, а также при разработке усилителей-корректоров для проигрывателей виниловых дисков. Лампы объединены в группы по конструкции корпуса.

Наиболее распространенные, т. н. пальчиковые лампы с 9-штырьковым цоколем, разделены также на 2 группы по числу триодов в одном баллоне. Внутри каждой группы триоды расположены в соответствии с возрастанием анодного тока. Обратите внимание, что лампы с большим рабочим током обычно имеют меньшие значения внутреннего сопротивления и коэффициента усиления.

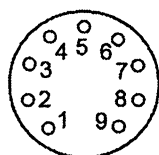
Наряду с рабочими режимами указаны предельные допустимые значения анодного тока, анодного напряжения и мощности, рассеиваемой на аноде. На рис. 4.3 показана цоколевка всех указанных ламп, за исключением сверхминиатюрных.

4.2. Схема с общим катодом

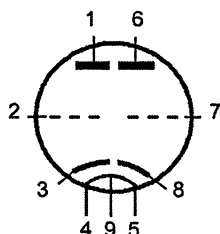
Схема с общим катодом — простейшая и в то же время основная схема построения лампового каскада, предназначенного для усиления напряжения (рис. 4.4). Между анодом и положительным выводом источника питания включается анодный резистор R_A .

Появление переменного напряжения на сетке $U_{вх}$ вызывает изменение тока между катодом и анодом, а так как напряжение источника

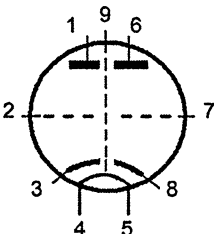
а



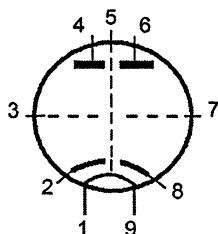
вид снизу



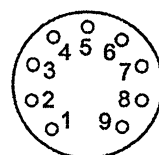
12AX7 6072
ECC83 12AY7
E83CC



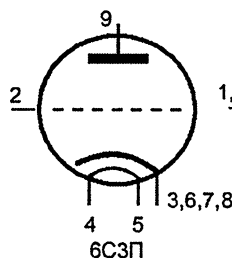
6DJ8 6H1П 6H23П
ECC88 6H2П 6H30П
E88CC 6H6П ECC85



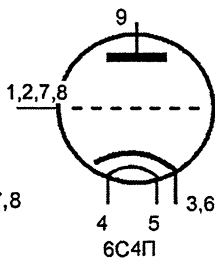
6H3П



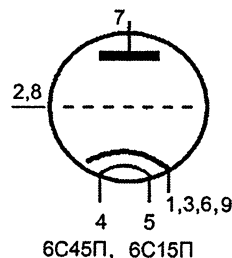
вид снизу



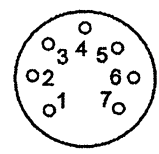
6C3П



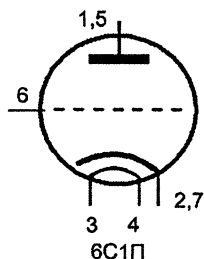
6C4П



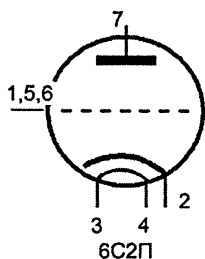
6C45П, 6C15П



вид снизу

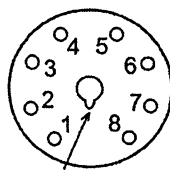


6C1П



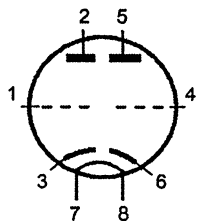
6C2П

б

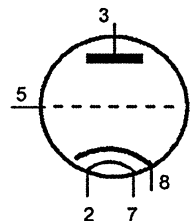


ключ

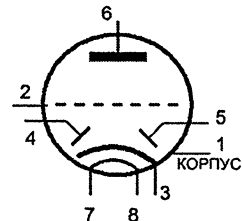
вид снизу



6H8C, 6H9C
6SL7, 6SN7



6C2C



6Г2

Рис. 4.3. Цоколевка ламп:

а — «пальчиковые» лампы; б — октальные триоды

Основные параметры некоторых триодов малой и средней мощности*

Таблица 4.1

Тип лампы	$I_A, \text{мА}$	$U_A, \text{В}$	$R_i, \text{кОм}$	$S, \text{мА/В}$	$\mu = SR_i$	Предельные значения		
						$I_A^{\text{max}}, \text{мА}$	$U_A^{\text{max}}, \text{В}$	$P_A^{\text{max}}, \text{Вт}$
Пальчиковые 9-штырьковые, двойные триоды								
12AX7, ECC83	0,5	100	80	1,25	100	8	300	1
	1,2	250	62,5	1,6	100			
6Н2П	2	250	45	2,2	100	10	300	1
6Н1П	5	125	8	4,5	36	25	300	2,2
6Н3П	8,5	150	6	5,9	36	18	300	1,8
ECC85	10	250	9,5	6	57	15	300	2,5
6Н23П (6DJ8, ECC88, E88CC)	15	100	2,9	12,5	34	20	250	1,8
6Н6П	30	120	1,8	11	20	45	300	4
6Н30П	40	80	0,85	18	15	100	250	4
Пальчиковые 9-штырьковые, одиночные триоды								
6С1П	6	250	12	2,35	28	-	275	1,8
6С2П	13,5	150	4,6	12	50	-	165	2,5
6С3П, 6С4П	16	150	2,5	19,5	50	35	150	3
6С45П, 6С15П	40	150	1,1	45	52	52	150	7,8
Лампы с октальным цоколем								
6Г2	1,1	250	91	1,1	100	-	330	1
6Н9С (6SL7)	2,5	250	44	1,6	70	-	275	1,1
6Н8С (6SN7)	10	250	7,7	2,6	20	20	330	2,75
6С2С	10	250	7,7	2,6	20	20	330	2,75
Сверхминиатюрные двойные триоды в стеклянном корпусе								
6Н17Б, 6Н21Б	3,3	200	20	3,8	75	10	250	0,9
6Н16Б, 6Н18Б	6,3	100	5	5	25	14	200	0,9
6Н28Б	7	50	3	7	22	10	150	0,9
Сверхминиатюрные одиночные триоды в стеклянном корпусе								
6С2Б	11,5	150	4,4	11,5	50	40	250	2,5
6С6Б	9	120	5	5	25	14	250	1,4
6С7Б	4,5	250	16	4	65	7	300	1,45
Сверхминиатюрные триоды в металло-керамическом корпусе (нувисторы)								
6С51Н	9,5	80	3,2	10	32	15	120	1,2
6С52Н	8	120	9	7	64	15	120	1,2
6С53Н	9	120	37	20	75	15	120	1,2

* Б. В. Кацнельсон, А. С. Ларионов. Отечественные приемно-усилительные лампы и их зарубежные аналоги (справочник). Москва, Энергоиздат, 1961.

питания U_0 фиксировано, возникает делитель напряжения R_A — сопротивление катод-анод.

Это и приводит к появлению переменного напряжения на выходе $U_{\text{вых}}$. При этом инвертируется фаза сигнала: увеличение смещения на сетке приводит к уменьшению тока в цепи анод-катод, а значит, и к уменьшению выходного напряжения.

Смещение на сетку можно подать от внешнего независимого источника. Этот режим называется *фиксированным смещением*. Однако можно поступить проще. Так как в цепи сетка-катод ток не течет, потенциал сетки не отличается от потенциала общего провода, т. е. равен нулю. Поэтому для создания на сетке отрицательного потенциала относительно катода достаточно между катодом и общим проводом включить резистор R_K , как показано на рис. 4.4. Падение напряжения на этом резисторе и будет напряжением смещения (отсчитываемым от катода к общему проводу).

На эту величину анодное напряжение (т. е. напряжение между анодом и катодом) U_A будет теперь отличаться от напряжения на аноде, т. е. от напряжения между анодом и общим проводом. Для того, чтобы на сетке не накапливался заряд, обычно включают резистор R_0 сопротивлением от нескольких десятков до нескольких сотен килоом. Он задает *входное сопротивление* каскада.

Установление смещения на сетке включением резистора в цепь катода лампы называют режимом *автоматического смещения*. Это название связано с тем, что при таком режиме возникает местная *отрицательная обратная связь по току*. Поясним смысл этого явления. Представим, что в силу какой-то причины напряжение источника питания увеличилось. Это приведет к росту анодного тока. Рост тока приведет к росту напряжения на катодном резисторе, т. е. к росту напряжения смещения. А это вызовет снижение анодного тока.

При уменьшении напряжения источника питания произойдет обратный эффект: снижение анодного тока вызовет снижение напряжения смещения и, как следствие, произойдет возрастание анодного тока. Таким образом, возникающая отрицательная обратная связь будет

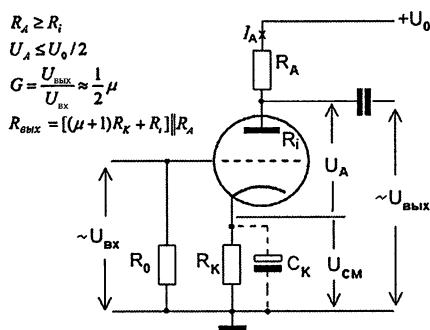


Рис. 4.4. Схема с общим катодом

стабилизировать режим работы лампы при колебаниях напряжения источника питания.

Кроме того, наличие отрицательной обратной связи снижает коэффициент гармонических искажений при одновременном снижении коэффициента усиления.

Автоматическое смещение чаще всего применяют для триодов малой и средней мощности. Коэффициент усиления таких триодов составляет от 10 до 100, поэтому напряжение смещения во много раз меньше анодного напряжения, а сопротивление катодного резистора, соответственно, много меньше сопротивления анодного резистора. В случае мощных триодов с коэффициентом усиления 2—3 и током 100 и более миллиампер, падение напряжения на катодном резисторе составляет десятки вольт, а выделяемая на нем мощность — десятков ватт. Поэтому для мощных триодов чаще применяют *фиксированное смещение*. В этом случае катод триода соединяется с общим проводом, а смещение на сетку подается от независимого источника напряжения (см., например, схему включения выходного триода 300В на рис. 2.8).

«Закон Ома» и другие важные формулы

Если взглянуть на схему каскада (рис. 4.4) с общим катодом с резистивной нагрузкой, то, на первый взгляд, может показаться, что имеется цепь, состоящая из последовательно соединенных анодного резистора сопротивлением R_A , триода с сопротивлением R_i и катодного резистора сопротивлением R_K .

На самом деле ситуация оказывается сложнее. Изменение напряжения на резисторе R_K приводит к μ -кратному изменению анодного тока, где μ — коэффициент усиления данного триода. Поэтому надо принять, что в цепь «как бы» включен еще один резистор, сопротивление которого равно μR_K .

Кроме того, надо понимать, что внутреннее сопротивление лампы нелинейно. Оно зависит от тока и напряжения на аноде относительно катода. В результате можно записать приближенное соотношение, представляющее собой своеобразный «закон Ома», связывающий анодный ток I_A с напряжением источника питания U_0 через параметры лампы μ , R_i и параметры элементов каскада:

$$I_A = \frac{U_0}{R_A + (\mu + 1)R_K + R_i}. \quad (5)$$

Сопротивление анодного резистора обычно выбирают в диапазоне $R_K = 1...3R_i$ для обеспечения максимального размаха выходного напряжения при максимально возможной линейности. Увеличение сопротивления анодной нагрузки благоприятно сказывается на линейности каскада, однако требует соответствующего увеличения напряжения источника питания, что часто не представляется целесообразным. В большинстве реальных схем часто выбирают режим, при котором напряжение на аноде равно приблизительно половине напряжения источника питания.

Выбор режимов работы триода и определение значений резисторов в схеме с общим катодом проводят следующим образом. На зависимости анодного тока от напряжения на сетке (рис. 4.2, а) выбирают линейный участок, с размахом напряжения на сетке, превышающим ожидаемую амплитуду входного сигнала, например, ± 1 В. Такой участок имеется на кривой, соответствующей анодному напряжению 150 В при среднем токе 10 мА.

Необходимо проверить, чтобы оба этих значения, а также их произведение 1,5 Вт, дающее мощность, рассеиваемую анодом, не превышали предельно допустимых значений для данного типа ламп. Напряжение на сетке составит при этом -5 В (точка А). Разделив это напряжение на значение анодного тока, сразу получаем величину катодного резистора $R_K = 500$ Ом.

Далее принимаем, что напряжение питания равно удвоенному анодному напряжению, т. е. 300 В. Падение напряжения на анодном резисторе составит $300 - 150 = 150$ В. При токе 10 мА это соответствует величине анодного резистора 15 кОм, что в несколько раз превышает внутреннее сопротивление лампы $R_i = 3,4$ кОм.

Коэффициент усиления по напряжению

Основной характеристикой каскада является *коэффициент усиления по напряжению* G . Без конденсатора C_K он определяется формулой

$$G = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \mu \frac{R_A}{R_A + (\mu + 1)R_K + R_i}. \quad (6)$$

Добавление в схему конденсатора C_K , шунтирующего катодный резистор для частот, при которых его емкостное сопротивление много меньше сопротивления R_K , т. е. $1/(2\pi f C_K) \ll R_K$, снимает отрицательную обратную связь по переменному току, сохраняя при этом обратную связь по постоянному току. Это позволяет увеличить коэффици-

ент усиления по напряжению, приблизив его к значению μ . С шунтирующим конденсатором из предыдущей формулы исключается R_K и формула для коэффициента усиления упрощается:

$$G = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \mu \frac{R_A}{R_A + R_i}. \quad (7)$$

Как видим, если сопротивление анодного резистора в несколько раз превышает внутреннее сопротивление лампы, коэффициент усиления приближается к μ . Формула (7) справедлива также для случая фиксированного смещения (катод соединен с общим проводом, а напряжение на сетке формируется внешним источником).

Приняв условно нижнюю граничную частоту за 1 Гц, получаем значение емкости шунтирующего конденсатора

$$C_K[\Phi] > \frac{1}{6,28 R_K[\text{Ом}]}. \quad (8)$$

«Закон Ома» позволяет записать выражение для коэффициента усиления каскада по напряжению через отношение падения напряжения на анодном резисторе $U_A = I_A R_A$ к напряжению внешнего источника питания. Действительно, из формулы (5) следует, что напряжение источника питания можно представить в виде

$$U_0 = I_A [R_A + (\mu + 1)R_K + R_i]. \quad (9)$$

Тогда формулу (6) для коэффициента усиления каскада можем записать в виде

$$G = \mu \frac{I_A R_A}{U_0} = \mu \frac{U_0 - U_{\text{АНОД}}}{U_0} \quad (10)$$

или в словесной формулировке: коэффициент усиления по напряжению G каскада с общим катодом во столько раз меньше коэффициента усиления триода μ , во сколько раз падение напряжения на анодном резисторе меньше напряжения внешнего источника питания.

Отметим, что эти простые формулы получены без учета сопротивления каскада, следующего за рассматриваемым. Наличие конечного входного сопротивления (которое на эквивалентной схеме оказывается по переменному току подключенным параллельно анодному резистору) несколько понижает значение G .

Как уже отмечалось, часто выбирают режим работы триода, при котором напряжение на аноде равно половине напряжения источника

питания, т. е. $U_{\text{анод}} = U_0/2$. Тогда $G = \mu/2$. Таким образом, в этом случае коэффициент усиления по напряжению для каскада с общим катодом в 2 раза меньше коэффициента усиления лампы μ .

Приводимые в справочниках характеристики ламп, используемые в формулах (6), (7), (10) и в табл. 4.1, даны для конкретных значений анодного тока и анодного напряжения. Поэтому используя эти данные, можно получить лишь приблизительное значение коэффициента усиления каскада. В табл. 4.2—4.5 в следующих разделах приведены рассчитанные режимы и параметры каскада с общим катодом для ряда триодов, учитывающие зависимость коэффициента усиления и внутреннего сопротивления триода от анодного тока и анодного напряжения.

Отметим также, что для маломощных триодов (а именно такие используются в гибридных усилителях) падение напряжения на катодном резисторе (равное по абсолютной величине необходимому напряжению смещения) всегда в 20—100 раз меньше анодного напряжения, поэтому во многих расчетах можно примерно полагать, что анодное напряжение равно напряжению на аноде, т. е. $U_{\text{анод}} \approx U_A$.

Если перед вами схема с указанными на ней значениями напряжения питания, номиналов резисторов и марки лампы, можно, используя «закон Ома» (формула (5)):

- ♦ определить анодный ток;
- ♦ рассчитать падение напряжения на анодном резисторе $U_{R_A} = I_A R_A$;
- ♦ рассчитать рассеиваемую на нем мощность $W = I_A R_A$ (мощность в ваттах получится, если ток брать в амперах, а сопротивление в омах, или ток — в миллиамперах, а сопротивление — в килоомах);
- ♦ определить напряжение смещения (равное падению напряжения на катодном резисторе, взятому с обратным знаком)

$$U_{\text{см}} = -U_{R_K} = -I_A R_K.$$

«Закон Ома» (5) позволяет определить значения резисторов, необходимых для построения каскада с общим катодом для конкретного триода с известным значением R_i и μ и желаемым значением I_A . Как уже отмечалось, R_A выбирается в 2-3 раза выше, чем R_i . Значение I_A должно выбираться в пределах 0,2—0,8 от максимально допустимого тока для данной лампы. Более точные рекомендации по выбору тока требуют либо самостоятельного анализа анодно-сеточных характеристик лампы, либо совета квалифицированного специалиста. Для получения максимального размаха выходного напряжения рекомендуется выбирать напряжение источника питания таким, чтобы выполнялось условие $U_0 = 2I_A(R_A + R_i)$. Затем выбирается R_K с помощью соотношения

$$R_K = \frac{(U_0 / I_A) - R_A - R_i}{\mu + 1}, \quad (11)$$

которое непосредственно следует из формулы (5).

Часто у радиолюбителей, желающих повторить чужую схему, нет возможности установить точно такой же резистор или воспроизвести такое же значение напряжения питания. Здесь «закон Ома» оказывается очень эффективным.

Он позволяет по известным значениям параметров лампы μ и R_i и параметров схемы R_A и R_K рассчитать анодный ток I_A . Затем рассчитывается напряжение смещения по формуле $U_C = I_A R_K$. Именно значения U_C и I_A *следует воспроизвести, прежде всего*, при повторении схемы. При этом желательно, чтобы всегда выполнялось условие $R_A > R_i$, причем чем сильнее это неравенство, тем лучше.

Выходное сопротивление

Важной характеристикой усилительного каскада являются его входное и выходное сопротивление. Как уже отмечалось, отсутствие тока в цепи сетки означает, что *входное сопротивление равно сопротивлению резистора R_0* .

Выходное сопротивление определяется из следующих соображений. Для переменного сигнала верхний вывод анодного резистора (клемма подключения положительного электрода внешнего источника питания) оказывается соединенным с общим проводом, так как внутреннее сопротивление источника питания весьма мало (это подразумевает сам термин «источник напряжения»). К тому же между «плюсом» источника питания и общим проводом всегда установлен конденсатор большой емкости, имеющий в идеале нулевое сопротивление для переменного тока. Тогда выходное сопротивление каскада можно представить как сопротивление параллельно соединенных анодного резистора R_A и «резистора» R^* , задающего напряжение на аноде

$$R^* = \frac{U_{\text{АНОД}}}{I_A} = (\mu + 1)R_K + R_i,$$

т. е. для каскада без шунтирующего конденсатора C_K можем записать

$$R_{\text{ВЫХ}} = [(\mu + 1)R_K + R_i] \parallel R_A = \frac{R_A [(\mu + 1)R_K + R_i]}{(\mu + 1)R_K + R_i + R_A}. \quad (12)$$

Используя «закон Ома», правую часть можно выразить через отношение напряжений

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_A [(\mu + 1)R_K + R_i]}{(\mu + 1)R_K + R_i + R_A} = R_A \frac{U_{\text{АНОД}}}{U_0}. \quad (13)$$

Таким образом, в схеме с общим катодом без шунтирующего конденсатора при выборе режима, *когда напряжение на аноде равно половине напряжения источника питания, выходное сопротивление будет равно половине сопротивления анодного резистора.*

При подключении шунтирующего конденсатора, когда для переменного тока катодный резистор исключается, эта формула упрощается, и выходное сопротивление каскада становится равным сопротивлению параллельно соединенных анодного резистора R_A и «резистора» R_i , т. е.:

$$R_{\text{ВЫХ}} = R_i \parallel R_A = \frac{R_A R_i}{R_A + R_i} < R_i \text{ с конденсатором } C_K. \quad (14)$$

Таким образом, с шунтирующим конденсатором выходное сопротивление каскада с общим катодом всегда меньше внутреннего сопротивления лампы. При выборе режима $R_A = R_i$ в схеме с шунтирующим конденсатором выходное сопротивление равно половине внутреннего сопротивления триода.

Режимы работы некоторых популярных триодов

В табл. 4.2—4.5 приведены режимы работы и параметры каскада с общим катодом для нескольких ламп, часто используемых в аудиоаппаратуре. Расчеты сделаны с помощью программы TubeCAD. Выбраны лампы:

- а) миниатюрные «пальчиковые» с 9-штырьковым цоколем:
 - ♦ 12AX7 (полный аналог ECC83, E83CC, приблизительный аналог 6Н2П) с малым рабочим током порядка 1 мА;
 - ♦ 6DJ8 (точные аналоги ECC88, E88CC, 6Н23П) с рабочим током порядка 10 мА;
- б) им подобные лампы с октальным цоколем:
 - ♦ 6SL7 (аналог 6Н9С, рабочий ток 2—3 мА);
 - ♦ 6SN7 (аналог 6Н8С, 6С2С, рабочий ток до 10 мА).

Таблицы дают возможность без каких-либо расчетов и без анализа анодно-сеточных характеристик:

- ♦ выбрать подходящую лампу для каскада усиления напряжения;

- ♦ подобрать элементы каскада;
- ♦ оценить коэффициент усиления по напряжению;
- ♦ оценить выходное сопротивление каскада;
- ♦ выбрать напряжение внешнего источника питания.

Однако, следует учитывать, что качество звучания может отличаться для разных режимов. Обычно больший ток дает лучшее звучание, хотя опасная в этом случае близость режимов к предельным значениям может сокращать срок службы лампы.

Таблицы позволяют оценить, как влияет изменение параметров схемы на конечный результат. Например, видно, что введение *шунтирующего конденсатора* увеличивает коэффициент усиления каскада по напряжению на 10—20 % и примерно на столько же уменьшает выходное сопротивление. Увеличение *сопротивления анодного резистора* при постоянном напряжении внешнего источника питания увеличивает коэффициент усиления каскада по напряжению. Во всех приведенных случаях для усилителя мощностью 25—50 Вт ламповые каскады усиления напряжения обеспечивают *многократный запас по перегрузочной способности*.

Режимы работы лампы 12AX7 и ее аналогов (ECC83, E83CC)
в схеме с общим катодом (рис. 4.4)

Таблица 4.2

Параметр	12AX7, ECC83, E83CC				
U_0 , В	200	250	250	300	300
R_A , кОм	100	150	100	150	200
R_K , кОм	1,9	1,7	1,15	1,15	1,37
U_A , В	140	145	156	150	140
I_A , мА	0,6	0,7	1,0	1,0	0,8
$U_c (-U_{CM})$, В	1,14	1,18	1,16	1,15	1,10
C_K , мкФ	47	63	100	100	63
G (без C_K)	37	45	40	45	48
G (с C_K)	44	49	44	50	52
$U_{вых}$, В	± 40	± 58	± 50	± 60	± 53
$R_{вых}$ (без C_K), кОм	42	33	30	33	35
$R_{вых}$ (с C_K), кОм	28	30	28	30	32

Режимы работы лампы 6Н23П и ее аналогов (6DJ8, ECC88, E88CC)
в схеме с общим катодом (рис. 4.4)

Таблица 4.3

Параметр	6Н23П, 6DJ8, ECC88, E88CC				
U_0 , В	150	150	180	200	200
R_A , кОм	6,0	9,0	5,9	7,0	10,0
R_K , кОм	0,36	0,37	0,27	0,30	0,45
U_A , В	107	95	120	129	129
I_A , мА	7	7	10	10	10

Таблица 4.3 (продолжение)

Параметр	6Н23П, 6ДJ8, ECC88, E88CC				
$U_c (-U_{cm}), В$	2,5	2,2	2,7	3,0	3,2
$C_K, мкФ$	160	160	160	160	160
G (без C_K)	15	18	15	16	19
G (с C_K)	21	24	21	23	25
$U_{вых}, В$	± 54	± 54	± 58	± 67	± 62
$R_{вых}$ (без C_K), кОм	3,0	3,7	3,0	3,3	3,9
$R_{вых}$ (с C_K), кОм	2,0	2,2	2,0	2,1	2,2

Режимы работы лампы 6Н9С (6SL7) в схеме с общим катодом (рис. 4.4)

Таблица 4.4

Параметр	6Н9С, 6SL7				
$U_0, В$	300	300	350	400	400
$R_A, кОм$	82	44	91	200	120
$R_K, кОм$	1,4	1,1	1,4	2,1	1,2
$U_A, В$	190	220	210	200	210
$I_A, мА$	1,3	1,8	1,5	1,0	1,6
$U_c (-U_{cm}), В$	1,85	2,0	2,0	2,1	1,9
$C_K, мкФ$	63	100	63	47	100
G (без C_K)	32	26	33	39	36
G (с C_K)	35	29	36	42	39
$U_{вых}, В$	± 66	± 58	± 75	± 88	± 80
$R_{вых}$ (без C_K), кОм	24	19	25	29	26
$R_{вых}$ (с C_K), кОм	22	18	22	26	24

Режимы работы лампы 6Н8С (6SN7) в схеме с общим катодом (рис. 4.4)

Таблица 4.5

Параметр	6Н8С, 6SN7				
$U_0, В$	300	300	350	350	400
$R_A, кОм$	20	20	12	20	20
$R_K, кОм$	0,60	1,4	1,1	1,4	1,3
$U_A, В$	160	200	250	230	250
$I_A, мА$	7	5	8	6	7
$U_c (-U_{cm}), В$	4,2	7,3	8,6	8,2	9,3
$C_K, мкФ$	100	63	68	63	63
G (без C_K)	12	12	10	13	13
G (с C_K)	14	14	12	14	14
$U_{вых}, В$	-60, +80	± 96	± 88	± 100	± 115
$R_{вых}$ (без C_K), кОм	7	7	5	6	6
$R_{вых}$ (с C_K), кОм	5	5	4	5	5

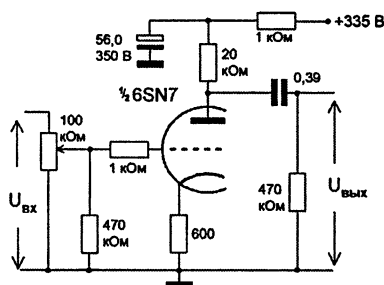


Рис. 4.5. Входной каскад усилителя «РЗ» фирмы «Audio Note»

Простые каскады с общим катодом уже встречались в конструкциях «самодельщиков» на рис. 2.9 (без шунтирующего конденсатора) и на рис. 2.10 (с шунтирующим конденсатором). Чтобы у читателя не сложилось впечатление, что такие простейшие каскады применяются только в любительских конструкциях, приведем для примера схему входного каскада весьма серьезного аппарата фирмы «Audio Note» (рис. 4.5).

«Батарейное» смещение

В высококачественной аппаратуре каждая деталь имеет в равной степени определяющее значение для достоверности звуковоспроизведения. К ним относятся не только активные элементы (лампы, транзисторы), но и пассивные. Поэтому часто отказываются от шунтирующего конденсатора (его емкость составляет порядка 100 мкФ), проигрывая в коэффициенте усиления. Можно избавиться и от катодного резистора, заменив его либо гальваническим элементом (если необходимое напряжение смещения совпадает с напряжением одного или нескольких последовательно соединенных элементов), либо полупроводниковым стабилитроном с соответствующим рабочим напряжением.

Примеры конкретных схем с использованием батарейного смещения показаны на рис. 4.6. Выбрано два предельных случая триодов, используемых в предварительных усилителях напряжения как в чисто ламповых, так и в гибридных усилителях.

Лампа 6С45П имеет очень большой рабочий ток (30 мА), а лампа 12АХ7 — очень малый (менее 1 мА). Эта разница дает отличающиеся более, чем в 10 раз выходные сопротивления: низкое, менее 1 кОм в случае 6С45П и относительно высокое, около 30 кОм в случае 12АХ7. При этом значения анодных напряжений и напряжений смещения у

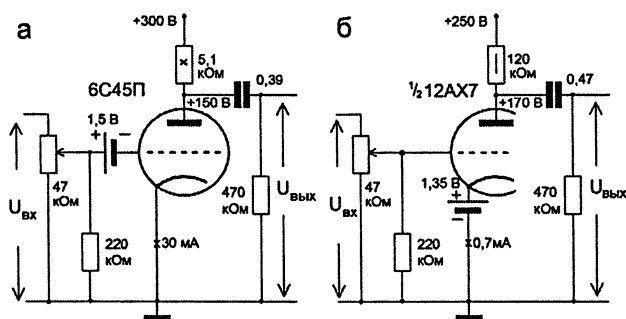


Рис. 4.6. Организация смещения в схеме с общим катодом без применения резистора:

а — гальванический элемент в цепи сетки; б — аккумулятор в цепи катода

обеих ламп оказались близки. Весьма близкий к 12AX7 аналог — лампа 6Н2П. В первом случае (рис. 4.6, а) гальванический элемент напряжением 1,5 В включен в цепь базы триода 6С45П. Так как ток в цепи базы отсутствует, срок службы гальванического элемента определяется фактически сроком его годности при хранении. Во втором случае (рис. 4.6, б) используется аккумулятор напряжением 1,35 В, включенный в цепь катода лампы 12AX7. В процессе работы ток катода подзаряжает аккумулятор, и его срок службы фактически определяется гарантийным сроком эксплуатации. Низкий ток (мене 1 мА) не приводит к отрицательным последствиям при продолжительной зарядке, если емкость аккумулятора составляет примерно 1000 мА·час.

Как видно, применение батарейного смещения не всегда возможно, так как необходимо, чтобы режим работы лампы соответствовал напряжению гальванического элемента (или нескольких последовательно соединенных). В тех случаях, когда батарейное смещение можно применить, возникают определенные неудобства в процессе эксплуатации.

**Совет.**

При установке элемента в цепь сетки нужно время от времени проверять его напряжение и при необходимости заменять новым.

**Внимание.**

При установке в цепь катода можно использовать аккумулятор, подзаряжаемый током катода, однако при токе порядка 10 мА и более избыточный заряд с течением времени может повредить аккумулятор.

Поэтому батарейное смещение используется радиолюбителями и не применяется в разработках фирм. Каскад, показанный на рис. 4.6, б, работает у автора в составе гибридного усилителя с оконечным усилителем тока класса А на истоковом повторителе около пяти лет без какого-либо обслуживания за этот период. Каскад на лампе 6С45П также прекрасно звучит, работает совместно с выходным усилителем на биполярных транзисторах, однако не столь продолжительное время.

**Внимание.**

При использовании батарейного смещения не рекомендуем использовать малогабаритные плоские батарейки, применяемые в наручных часах. Они взрываются при нагреве во время пайки! Берегите глаза!

4.3. Нагрузочная прямая

Для тех читателей, кто не ограничивается воспроизведением готовых схем и не удовлетворен приведенным в таблицах набором ламп и режимов, рекомендуем прочитать настоящий раздел, который позволит самостоятельно выбирать и рассчитывать режимы ламп, пользуясь анодно-сеточными характеристиками.

Вернемся к анодно-сеточной характеристике гипотетического триода на рис. 4.2. Мы решили выбрать точку «А» в качестве рабочей точки лампы. Параметры этой точки: анодный ток $I_A = 10$ мА, смещение на сетке $U_C = -5$ В, анодное напряжение $U_A = 150$ В. Из трех указанных параметров только любые два являются независимыми и однозначно задают величину третьего параметра. Например, каждое сочетание анодного тока и анодного напряжения может быть реализовано только при одном конкретном значении смещения на сетке. Каждое сочетание анодного напряжения и смещения на сетке однозначно указывает на конкретное значение анодного тока.

Выбранная нами точка «А» соответствует относительно линейному изменению анодного тока при изменении сеточного напряжения в пределах как минимум 5 ± 1 В. Такой размах напряжения на сетке соответствует типичному источнику сигнала, подключаемому к усилителю мощности. Максимальная мощность, рассеиваемая на аноде для нашей лампы, равна $W_{\text{макс}} = 3$ Вт. Точка «А» соответствует рассеиваемой на аноде мощности $W = I_A U_A = 1,5$ Вт, т. е. в 2 раза ниже $W_{\text{макс}}$. Этот режим соответствует отсутствию сигнала на входе. Но как узнать, что будет с ростом амплитуды входного сигнала? Не превысит ли выделяемая на аноде мощность предельное для данной лампы значение? Какой максимальный размах выходного напряжения можно получить? Для ответа на эти вопросы необходимо перейти от рис. 4.2, а, по которому мы выбирали рабочую точку, к рис. 4.2, б, где показано семейство зависимостей анодного тока от анодного напряжения. Эти зависимости построены на рис. 4.7 в большем интервале значений I_A , U_A и U_C .



Примечание.

Границы графика (анодный ток 35 мА, напряжение на аноде 320 В) выбраны в соответствии с предельно допустимыми значениями анодного тока и напряжения.

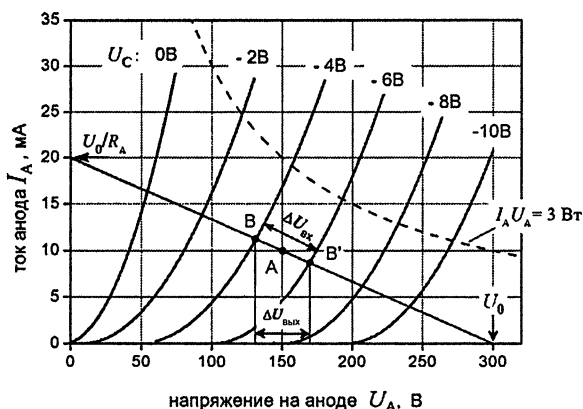


Рис. 4.7. Анодно-сеточные характеристики и нагрузочная прямая для гипотетического триода малой мощности.

Пунктирная кривая — график функции $I_A = P_{\text{макс}}/U_A$, где $P_{\text{макс}} = 3 \text{ Вт}$ — максимальная допустимая рассеиваемая на аноде мощность для данной лампы



Примечание.

Строго говоря, анодное напряжение U_A (напряжение между анодом и катодом) и напряжение на аноде $U_{\text{анод}}$ относительно общего провода для схемы с автоматическим смещением не совпадают. Однако их отличие, равное U_c , составляет всего несколько процентов, а для ламп с рабочим током порядка 1 мА — не более 1 %. Поэтому будем пренебрегать этим различием, отождествляя анодное напряжение с напряжением на аноде относительно общего провода.

Выбранная нами рабочая точка «А» нанесена на рис. 4.7. На этом рисунке нет кривой, соответствующей смещению $U_c = -5 \text{ В}$, однако ее можно мысленно представить между кривыми для $U_c = -4 \text{ В}$ и $U_c = -6 \text{ В}$. Далее необходимо нанести кривую, соответствующую максимально допустимой мощности $I_A U_A = 3 \text{ Вт}$. Это пунктирная кривая на рис. 4.7 — график функции $I_A = P_{\text{макс}}/U_A$, где $P_{\text{макс}} = 3 \text{ Вт}$, имеющий вид гиперболы ($y = 1/x$).

График, который мы будем строить, называется *динамической сеточной характеристикой*. Часто используют термин *нагрузочная прямая*. Смысл этого графика состоит в следующем. Напряжение внешнего источника U_0 делится между анодным резистором и переходом катод-анод триода (падением напряжения на катодном резисторе пренебрегаем). Мы имеем последовательную цепь с «законом Ома» $U_0 = I_A R_A + U_A$. Наша цель состоит в том, чтобы изобразить это соот-

ношение на рис. 4.7, то есть построить связь между I_A и U_A при наличии сопротивления анодной нагрузки R_A . Из только что записанной формулы следует, что эта связь имеет вид линейной функции

$$\text{нагрузочная прямая } I_A(U_A) = \frac{U_0}{R_A} - \frac{U_A}{R_A}, \quad (15)$$

т. е. функции вида $y = ax + b$, где y — это анодный ток I_A , x — напряжение на аноде U_A , $a = -1/R_A$, $b = U_0/R_A$. График такой функции имеет вид прямой линии. Построить ее очень просто. Нагрузочная прямая пересекает ось анодного напряжения в точке $U_A = U_0$. Это определяется из выражения (15) и условия $I_A = 0$. Нагрузочная прямая пересекает ось анодного тока в точке $I_A = U_0/R_A$. Это определяется из выражения (15) и условия $U_A = 0$. Затем эти две точки соединяются прямой.

Построим нагрузочную прямую для конкретного случая. Рабочая точка уже выбрана, осталось выбрать сопротивление анодной нагрузки R_A и напряжение источника питания U_0 . Воспользуемся следующей рекомендацией при выборе напряжения источника питания: при отсутствии сигнала напряжение на аноде должно быть равным $U_0/2$, т. е. $U_0 = 300$ В. Затем из формулы $U_0 = I_A R_A + U_A$ находим $R_A = U_0 / 2I_A = 15$ кОм.

Соединяем точку 300 В на оси анодного напряжения с точкой 300 В/15 кОм = 20 мА на оси анодного тока и получаем нагрузочную прямую. Она нарисована сплошной линией на рис. 4.7. Как видите, нагрузочная прямая прошла через выбранную нами рабочую точку «А».



Примечание.

При заданной рабочей точке изменение сопротивления анодного резистора будет приводить к изменению наклона нагрузочной прямой.

Нагрузочная прямая позволяет оценить условия работы триода. Появление входного переменного напряжения на сетке триода соответствует движению вверх и вниз вдоль нагрузочной прямой относительно точки «А». Например, при размахе входного сигнала $\Delta U_{вх} = \pm 1$ В движение происходит между точками «В» и «В'». Это соответствует изменению анодного напряжения от 125 до 175 В и обозначено на графике как $\Delta U_{вых}$. Линейность работы триода проявляется в том, что равным приращениям напряжения на сетке соответствуют равные приращения напряжения на аноде.

Максимальный размах входного сигнала ограничивается нулевым потенциалом на сетке и составляет для нашего случая $\Delta U_{BX}^{max} = \pm 5$ В относительно значения -5 В, т. е. смещение на сетке при наличии входного сигнала может находиться в интервале $0 \dots -10$ В, при этом размах выходного напряжения составит от $+60$ до $+235$ В, т. е. -90 В и $+85$ В относительно начального значения 150 В.

Неравенство отрицательной и положительной частей максимального выходного напряжения означает заметные искажения на краях этого диапазона. Поэтому, если требуется большой размах выходного напряжения, необходимо увеличивать напряжение анодного резистора и напряжение источника питания (до разумного предела, определяемого характеристиками лампы).



Примечание.

Важно, что нагрузочная прямая нигде не пересекается с пунктирной кривой, определяющей максимально допустимое произведение анодного тока на анодное напряжение (т. е. максимально допустимую рассеиваемую на аноде мощность). Это значит, что выбранный нами режим работы триода вполне нормальный.

На рис. 4.8 показаны примеры неудачного выбора рабочей точки и анодного сопротивления. Первый режим — точка «А» (напряжение на аноде 100 В, ток анода 4 мА) и кривая 1 (напряжение питания 130 В, сопротивление анодного резистора 7 кОм) обеспечивает малый размах выходного напряжения из-за низкого напряжения питания и характеризуется сильной нелинейностью из-за малого анодного тока.

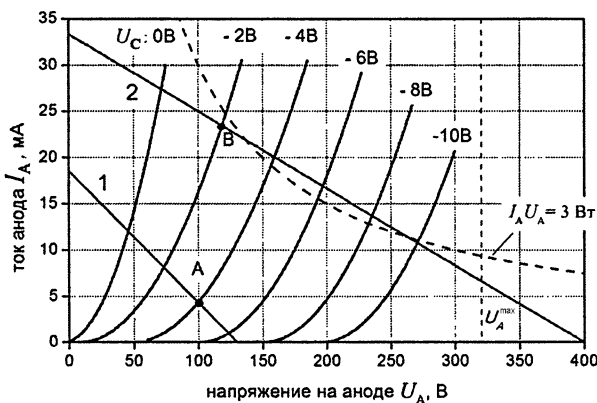


Рис. 4.8. Примеры неудачного выбора режимов триода и параметров каскада с общим катодом

Второй режим — точка «В» (напряжение на аноде 120 В, ток анода 23 мА) и кривая 2 (напряжение питания 400 В, анодный резистор 12 кОм) — имеет очень высокое напряжение питания и высокий ток анода. В результате нагрузочная прямая выходит из области допустимых значений рассеиваемой мощности, ограниченной пунктирной линией на графике.

Выбранные режимы неудачны, но не являются запрещенными к применению. Они могут быть применимы при малых амплитудах входного сигнала, например, во входном каскаде фоновкорректора. Тогда для первого случая может оказаться незаметной нелинейность, а для второго случая не произойдет перегрузки лампы. Однако согласитесь, что во втором случае получать на выходе переменное напряжение усиленного сигнала порядка 1 В при выходном сопротивлении несколько килоом при потребляемой непрерывно мощности от источника питания $400 \text{ В} \times 23 \text{ мА} = 8,6 \text{ Вт}$ выглядит действительно странно.

Представляет интерес сравнение нагрузочных прямых для разных значений сопротивления резистора анодной нагрузки. На рис. 4.9 для одной и той же рабочей точки ($U_A = 130 \text{ В}$, $I_A = 10 \text{ мА}$) построены нагрузочные прямые для трех различных сочетаний сопротивления резистора анодной нагрузки и напряжения питания (7 кОм, 200 В; 12 кОм, 250 В; 17 кОм, 300 В). Напряжение питания изменялось при каждом новом значении сопротивления нагрузки, чтобы все три нагрузочные прямые проходили через выбранную рабочую точку.

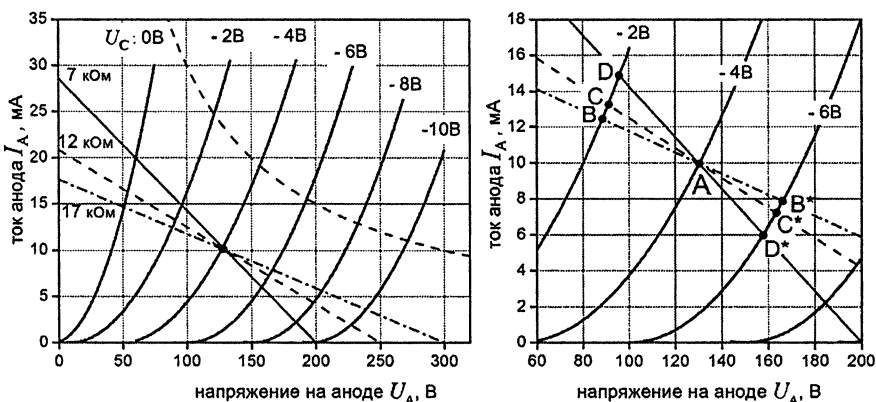


Рис. 4.9. Нагрузочные прямые для одной рабочей точки и трех различных сочетаний сопротивления резистора анодной нагрузки и напряжения питания (7 кОм, 200 В; 12 кОм, 250 В; 17 кОм, 300 В). Справа показан увеличенный фрагмент графиков

Рассмотрим для каждой нагрузочной прямой отрезки от рабочей точки «А» до точек пересечения с ближайшими ветвями анодно-сеточной характеристики. Эти ветви соответствуют значениям сеточного смещения -2 В и -6 В. Отрезки BB^* , CC^* , DD^* соответствуют изменению входного напряжения на ± 2 В.

Они имеют разную длину и, соответственно, разные проекции на ось анодных напряжений. Отсюда и различие в коэффициенте усиления: в соответствии с формулой (6) большее значение сопротивления анодного резистора дает больший коэффициент усиления по напряжению.

Но для разработчика действительно качественной аппаратуры (кроме потребляемой мощности, коэффициента усиления и запаса по амплитуде выходного напряжения) очень важным является обеспечение минимальных искажений. Для этого анализ нагрузочных прямых весьма полезен.

**Примечание.**

Для получения минимальных искажений необходимо, чтобы равным изменениям сеточного напряжения соответствовали равные приращения анодного напряжения.

Изменение анодного напряжения при изменении напряжения смещения равно проекции на ось U_A соответствующего отрезка нагрузочной прямой. Равные отрезки нагрузочной прямой всегда имеют равные проекции. Поэтому высокая линейность и низкие искажения возможны только при условии, что в правой части рис. 4.9 отрезки нагрузочной прямой, заключенные между соседними ветвями анодно-сеточных характеристик, равны. То есть, необходимо выбрать не только рабочую точку «А», но и такую комбинацию значений R_A, U_A , для которой выполняется одно из условий:

$$AB = AB^*, AC = AC^*, AD = AD^*.$$

В правой части рис. 4.9 видно, что определенные возможности для такого подбора параметров действительно имеются.

**Примечание.**

В радиолюбительской практике не всегда возможно произвольно задавать напряжение источника питания. Иногда в распоряжении радиолюбителя имеется 1 или 2 силовых трансформатора без возможности плавной вариации числа витков во вторичных

обмотках. Наиболее удобно добавлять дополнительные витки или обмотки на тороидальные трансформаторы.

Во-первых, не надо разбирать сердечник.

Во-вторых, всегда можно, не разбирая сердечник, определить нужное число витков, намотав предварительно 15—20 витков и, измерив напряжение на такой обмотке, рассчитать число витков на 1 вольт. В процессе намотки дополнительной обмотки всегда можно проверить соответствие напряжения требуемому значению. Что касается трансформаторов типа ТА, ТАН, которые имеются на многих радиорынках, то их разбирать не рекомендуется. В этом случае необходимо выбирать одновременно и рабочую точку, и сочетание значений $R_A U_A$ по указанным выше признакам минимальности искажений.

Можно измерять искажения, используя компьютер с хорошей звуковой картой и соответствующие программы. Как это делать уже неоднократно описывалось в журналах «Радио», «Радиохобби», «Радиомир», а также в сети Интернет. Можно подбирать режимы работы лампы и параметры цепи и на слух. Как видите, здесь действительно представляется настоящий простор для аудиотворчества.

4.4. Катодный повторитель

Для ламп с большим коэффициентом усиления (около 100) внутреннее сопротивление обычно велико и составляет многие десятки килоом (табл. 4.1 на стр. 104). Поэтому выходное сопротивление таких каскадов трудно сделать меньшим 20 кОм (см. табл. 4.2 и табл. 4.4 для примера). Это накладывает серьезные ограничения на работу ламповых усилителей напряжения совместно с последующими каскадами, если эти каскады построены на биполярных транзисторах. Такая же проблема возникает, если ламповый усилитель напряжения (или, например, ламповый фоновый корректор) выполняется в виде отдельного устройства и предназначен для работы с различными внешними устройствами.



Примечание.

Последующий каскад или внешнее устройство не должны нарушать нормальную работу выходного каскада предыдущего устройства.

Поэтому для нормальной работы выходное сопротивление каскада должно быть в 10 и более раз ниже входного сопротивления последующего каскада.

Обычно в звукотехнике входное сопротивление усилителя равно 47 кОм. При работе лампового усилителя напряжения в составе гибридного усилителя совместно с оконечным транзисторным усилителем тока необходимо, чтобы ламповый усилитель напряжения имел выходное сопротивление менее 1 кОм, если оконечный усилитель тока выполнен на биполярных транзисторах.

Для того, чтобы понизить выходное сопротивление лампового усилителя напряжения, необходимо использовать дополнительный ламповый каскад, получивший название «катодный повторитель». Его схема показана на рис. 4.10.

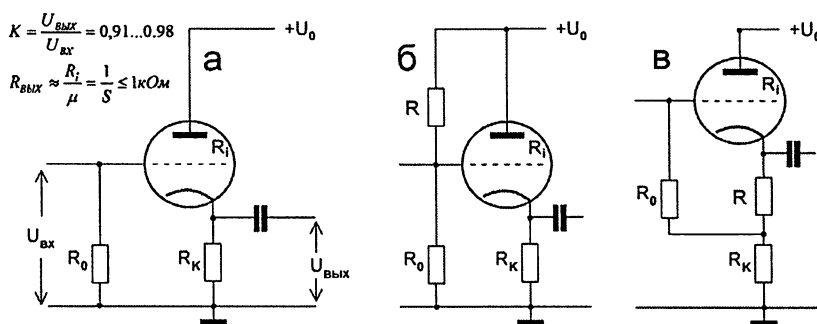


Рис. 4.10. Катодный повторитель:

а — принцип работы; б — организация сеточного смещения делителем напряжения, $R \approx R_0 > R_i$;
 в — организация сеточного смещения дополнительным резистором R в цепи катода

Этот каскад обладает высоким входным и низким выходным сопротивлением, однако *не дает усиления по напряжению*. Коэффициент передачи по напряжению (термин «коэффициент усиления по напряжению» здесь неприменим) катодного повторителя близок к 1, т. е. напряжение на катоде повторяет напряжение на сетке триода, откуда и произошло название каскада. При этом через катодный резистор возникает 100 %-ная местная отрицательная обратная связь (возникновение местной ООС обсуждалось подробно на стр. 60).

Коэффициент передачи по напряжению K катодного повторителя определяется выражением

$$K = \frac{\mu}{\mu + 1} = 0,90 \dots 0,99, \quad (16)$$

а выходное сопротивление каскада определяется формулой

$$R_{\text{вых}} = \frac{R_i}{\mu + 1} \approx \frac{R_i}{\mu} = \frac{1}{S}. \quad (17)$$

При переходе от R_i и μ к S использовано соотношение $\mu = R_i S$ (формула (4)).



Вывод.

Таким образом, можно обобщить свойства катодного повторителя: коэффициент передачи и выходное сопротивление катодного повторителя в $\mu + 1$ раз меньше, чем коэффициент усиления μ и внутреннее сопротивление R_i триода, соответственно.

Катодный повторитель сохраняет фазу входного сигнала: напряжение на катоде изменяется синфазно с изменением напряжения на сетке.

Сопротивление катодного резистора выбирают примерно равным или в 1,5—3 раза большим, чем внутреннее сопротивление лампы. Напряжение на катоде обычно равно примерно половине напряжения источника питания. Для нормальной работы лампы необходимо обеспечить смещение на сетке в соответствии с выбранной рабочей точкой. Это можно сделать несколькими способами.

Во-первых, можно применить внешнее фиксированное смещение. Однако, для маломощных ламп его обычно не используют.

Во-вторых, можно установить требуемое напряжение на сетке относительно катода с помощью делителя напряжения, установив резистор R между положительным выводом источника питания и сеткой (рис. 4.10, б).

В-третьих, можно последовательно с катодным резистором установить резистор R много меньшего сопротивления, а нижний по схеме вывод резистора R_0 соединить со средней точкой двух резисторов в цепи катода (рис. 4.10, в). Выбор сопротивления дополнительного резистора R проводят так же, как выбор катодного резистора в схеме с общим катодом, т. е. просто по закону Ома, исходя из расчетного анодного тока и требуемого напряжения смещения.



Примечание.

Особенностью катодного повторителя является большая разность потенциалов между катодом и общим проводом. Это накладывает определенные требования к организации питания накала триода.

Обычно для уменьшения фона переменного тока один из выводов нити накала заземляют. Часто заземляют среднюю точку, образованную двумя одинаковыми резисторами сопротивлением порядка 100 Ом, подключенными к концам нити накала. В обоих случаях напряжение на нити накала относительно земли не превышает напряжения накала, т. е. 6 или 12 В. Однако для катодного повторителя это не всегда допустимо.

Дело в том, что нить накала находится в непосредственной близости от катода и напряжение в сотню и более вольт между катодом и нитью накала может привести к напряженности электрического поля в несколько кВ/см. Это может сократить срок службы триода и даже нарушить его нормальную работу. Предельно допустимое напряжение катод-накал всегда указывают в паспортных характеристиках лампы.

Для уменьшения разности потенциалов между катодом и накалом к одному из выводов нити накала подают постоянное напряжение от источника питания через делитель напряжения, образованный двумя резисторами.

В табл. 4.6 приведены рассчитанные режимы и характеристики катодного повторителя на лампах 12AX7 (аналоги ECC83, E83CC, близкий аналог 6H2П), 6H23П (аналоги 6DJ8, ECC88, E88CC), 6H9C (аналог 6SL7) и 6H8C (аналог 6SN7, 6C2C). Мы не приводим здесь конкретных схем использования катодного повторителя в реальных высококачественных усилителях по следующей причине: катодный повторитель в большинстве случаев используется совместно с усилителем напряжения на каскаде с общим катодом как дополнение к этому каскаду, снижающее его выходное сопротивление

При этом не только упрощается организация сеточного смещения в катодном повторителе, но возникает возможность обойтись без разделительного конденсатора между каскадами. Этому посвящен следующий раздел.



Примечание.

Катодный повторитель имеет один принципиальный недостаток: асимметрию максимального выходного напряжения. Максимальная величина неискаженного положительного напряжения всегда меньше, чем максимальная величина неискаженного отрицательного напряжения.

Режимы и характеристики катодных повторителей.
Жирным шрифтом выделены значения величин,
определяемые свойствами лампы и не зависящие от параметров схемы

Таблица 4.6

Тип лампы	μ	R_p , кОм	U_{gr} , В	I_A , мА	$|U_c|$, В	U_k^{**} , В	$R_{k'}$, кОм	$U_{\text{макс}}$, В	K	$R_{\text{вых}}$, Ом
12AX7, ECC83E83CC, 6Н2П (близкий аналог)	100	75	200	0,6	1,3	50	100	-60 ... + 18	0,99	750
			250	1,1	1,0	120	120	-130 ... + 35		
			300	1,3	1,2	150	120	-150 ... + 40		
6Н23П, 6ДJ8ECC88, E88CC	34	2,9	150	9	1,5	75	8,2	-74 ... + 57	0,97	85
			200	10	2,1	100	10	-100 ... + 76		
			250	13	2,5	130	10	-130 ... + 99		
6Н8С, 6SN76C2C	20	7,7	200	5	2,2	100	20	-100 ... + 60	0,95	375
			250	6,4	2,8	125	20	-128 ... + 77		
			300	6	4,4	150	25	-150 ... + 85		
6Н9С, 6SL7	70	44	250	1	1,5	100	110	-110 ... + 30	0,98	630
			300	1,3	1,5	100	110	-140 ... + 40		
			350	1,4	2,1	140	110	-150 ... + 40		

* Напряжение на сетке относительно катода. Указано для сведения. Оно выставляется либо путем подключения внешнего источника, либо с помощью делителей напряжения (рис. 4.10, б, в).

** U_k — падение напряжения на катодном резисторе.

Эта разница составляет приблизительно 30 % для ламп с большим рабочим током и низким внутренним сопротивлением (например, 6Н23П), и может достигать до 3-4 раз для слаботочных ламп (например, 6Н9С). Это свойство необходимо учитывать при использовании катодных повторителей в практических схемах.

4.5. Комбинация: каскад с общим катодом + катодный повторитель

Схема, представленная на рис. 4.11, представляет собой каскад усиления напряжения на триоде V1 (классическая схема с общим катодом), к выходу которой без разделительного конденсатора подключен катодный повторитель на триоде V2. Такое включение становится возможным благодаря тому, что напряжение на аноде первого триода и напряжение на

катоде второго триода близки в половине напряжения источника питания. Подбором параметров резисторов разность этих напряжений можно сделать равной требуемому напряжению смещения для второго триода.

Наиболее просто установление требуемых режимов реализуется при использовании двух одинаковых триодов или двух половинок двойного триода. Тогда сопротивления анодного резистора R_A первого триода и катодного резистора R_{K2} второго триода просто **выбирают одинаковыми**. В этом случае второй триод приобретает смещение на сетке, совпадающее со смещением, которое создается катодным резистором R_K для первого триода. Анодное напряжение первого триода выбирается равным половине напряжения источника питания.

Тогда **усиление каскада приблизительно равно $\mu/2$, а выходное сопротивление — R_i/μ** . Таким образом, комбинация двух последовательных каскадов с непосредственной связью — каскада с общим катодом и катодного повторителя — представляет собой практический идеальный «строительный кирпичик» для разработки усилителей. Эта схема имеет минимум пассивных компонентов (в идеале всего 3 резистора, плюс разделительный конденсатор для связи с последующими каскадами), характеризуется четко определенным коэффициентом усиления по напряжению и низким выходным сопротивлением, обычно меньшим 1 кОм.

Коэффициент усиления по напряжению можно немного увеличить, включив в первом каскаде параллельно катодному резистору конденсатор C_K (см. формулы (7) и (8)).

Напомним, как выбрать сопротивления резисторов R_A и R_K . Вначале по анодно-сеточным характеристикам лампы выбираются значения анодного тока I_A и анодного напряжения U_A . Его удвоенное значение даст необходимое значение источника питания U_0 . Значение сопротивления резистора R_A выбирается в 2—4 раза больше внутреннего сопротивления триода R_i и (по возможности) с учетом рабочей точки и линейности режима лампы (раздел «Нагрузочная прямая»). Затем из «закона Ома» (формула (5)) записываем выражения, связывающие все параметры схемы:

$$\begin{aligned} \text{Если } V1 \equiv V2, \text{ то} \\ R_A = R_{K2}, U_A = U_0/2 \\ G = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \approx \mu/2 \\ R_{\text{вых}} \approx R_i/\mu \\ R_K = \frac{R_A - R_i}{\mu + 1} \end{aligned}$$

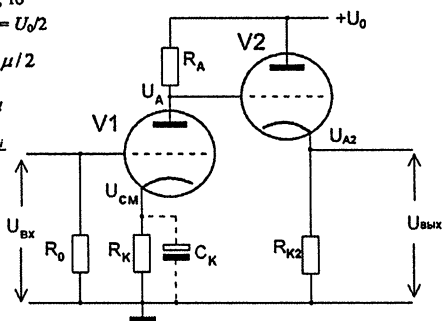


Рис. 4.11. Каскад с общим катодом, нагруженный на катодный повторитель

$$U_0 = I_A [R_A + R_i + (\mu + 1)R_K]$$

$$U_A = I_A [R_i + (\mu + 1)R_K].$$

Далее, применяя условие $2U_A = U_0$, можем записать

$$R_A + R_i + (\mu + 1)R_K = 2[R_i + (\mu + 1)R_K]$$

откуда следует

$$R_A = R_i + (\mu + 1)R_K.$$

Следовательно

$$R_K = \frac{R_A - R_i}{\mu + 1}.$$

Эта формула вынесена на рис. 4.11.



Примечание.

Особенностью комбинированного каскада «схема с общим катодом + катодный повторитель» является **постоянство тока, потребляемого от источника питания** при подаче на вход переменного напряжения источника сигнала. Постоянство тока обеспечивается вследствие того, что изменение напряжения на сетке вызывает одновременное изменение тока в цепи анода первого триода и в цепи катода второго триода, которые между собой находятся в противофазе. В результате суммарный ток, потребляемый от источника питания, сохраняется неизменным. Это — положительное свойство каскада, так как оно облегчает работу источника питания при сильных бросках входного напряжения.

По такой схеме построен, например, выходной каскад предварительного усилителя «Audio Note M7» (рис. 4.12). Этот аппарат содержит фоновкорректор с двумя каскадами с пассивными цепями коррекции, переключатель входов на пять положений, регулятор громкости и баланса (последнее не типично для Hi-End-аппаратуры). Показанный на рис. 4.12 фрагмент схемы содержит регулятор громкости и выходной двухкаскадный усилитель напряжения, построенный по принципу «каскад с общим катодом + катодный повторитель» с непосредственной связью на двойном триоде 6072 ($\mu = 44$, $R_i = 25$ кОм, $I_A = 1...2$ мА).

Поскольку лампа 6072 мало доступна на постсоветском пространстве, приведем рекомендации по построению комбинированного каскада на более доступной лампе 6SN7 (ее точный аналог 6Н8С),

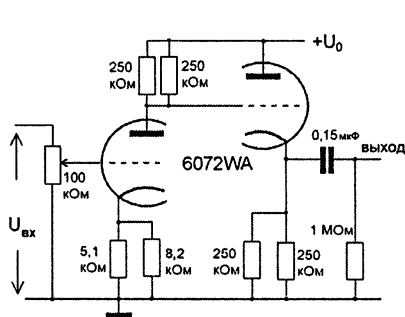


Рис. 4.12. Выходной каскад предварительного усилителя «Audio Note M7» (напряжение питания $U_0 \approx 300$ В)

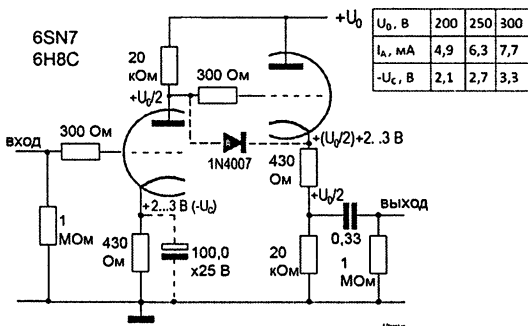


Рис. 4.13. Построение комбинированного каскада на двойном триоде 6SN7 (6H8C)

опубликованные редактором интернет-журнала «Tube CAD Journal» Джоном Броски (John Broskie)*. Схема показана на рис. 4.13. В таблице на рис. 4.13 приведены режимы работы лампы для различных напряжений питания при неизменности значений резисторов, указанных на схеме. При напряжении источника питания 300 В можно использовать вместо резисторов сопротивлением по 20 кОм резисторы сопротивлением по 30 кОм, заменив одновременно резисторы сопротивлением 430 Ом на резисторы сопротивлением по 850 Ом.

Каскад имеет при отключенном конденсаторе в цепи катода первой лампы коэффициент усиления по напряжению $G = 10$ раз, а при подключенном конденсаторе $G = 15$. Выходное сопротивление составляет 700 Ом. Его можно понизить до 300 Ом, если закоротить резистор сопротивлением 430 Ом в катодной цепи второго триода. Если требуется большее усиление по напряжению, можно применить лампы с большим значением μ , но при этом увеличится выходное сопротивление.

При использовании лампы 6SL7 (6H9C) вместо резисторов сопротивлением по 20 кОм нужно использовать резисторы сопротивлением по 75 кОм, а вместо резисторов сопротивлением по 430 Ом — резисторы сопротивлением по 845 Ом. С этой лампой коэффициент усиления без шунтирующего конденсатора составит 35, а с конденсатором увеличится до 50. Выходное сопротивление составит 2,6 кОм при наличии резистора сопротивлением 845 Ом в цепи катода выходного триода и 560 Ом, если этот резистор закоротить.

* Constant-Current-Draw Amplifier. Stereo Octal PCB. — GlassWare Audio Design, 2009 (www.glassware.com).

Напомним, что электролитический шунтирующий конденсатор должен быть максимально высокого качества, не теряя своих свойств на высоких частотах. Если есть сомнение в его качестве, необходимо параллельно ему подключить пленочный конденсатор емкостью порядка 1 мкФ.



Примечание.

Рекомендуется включить диод, как показано на схеме (рис. 4.13), для предотвращения нештатных режимов второго триода при включении питания (например, если анодное, а, значит, и сеточное напряжение сформируются раньше, чем прогреется катод).

Техника безопасности при наладке ламповых схем с непосредственной связью между каскадами



Внимание.

При наладке ламповых схем с непосредственной связью между каскадами надо соблюдать особую осторожность и аккуратность. Если используются одиночные триоды, нельзя устанавливать в схему второй триод, пока не выставлены режимы первого триода. Если используется лампа, содержащая два триода в одном баллоне, не следует подключать ко второму триоду анодное напряжение, пока не выставлено необходимое напряжение на выходе первого триода. Если эти правила не соблюдены, второй триод может оказаться включенным с недостаточным смещением на сетке, его анодный ток сильно вырастет, что может повредить или попросту сжечь катодный резистор, диоды и обмотки трансформатора в источнике питания.

Ограничения на использование слаботочных триодов в катодных повторителях

Следует отметить, что, несмотря на низкое выходное сопротивление в случае применения лампы 6Н9С, выходной каскад на такой лампе не сможет обеспечить максимальный размах выходного напряжения на нагрузке примерно в десять раз превышающей выходное сопротивление каскада. Причина состоит в малом токе (примерно 1 мА) этой лампы. Например, на нагрузке 5,6 кОм (т. е. в 10 раз выше выходного сопротивления) ток 1 мА означает напряжение всего 5,6 В.

Для усилителя мощности этого явно недостаточно. А для фонокорректора вполне допустимо. В этом случае низкое выходное сопротивление облегчает передачу сигнала без потерь по соединительному кабелю. Это же замечание относится и к другому распространенному триоду с высоким коэффициентом усиления, но малым током — 12AX7 (ECC83, E83CC, 6H2П).



Примечание.

Поэтому необходимо запомнить, что слаботочные триоды не могут раскачать усилитель мощности, построенный на биполярных транзисторах с $R_{вх} \approx 10 \text{ кОм}$, несмотря на то, что выходное сопротивление лампового каскада во много раз меньше входного сопротивления транзисторного усилителя.

Это же замечание относится к применению подобных каскадов для раскачки мощных выходных ламп чисто ламповых усилителей. Например, лампой 6H9C или 6H2П не удастся раскачать лампу 300B.

Поэтому, если требуется одновременно обеспечить большой коэффициент усиления по напряжению и низкое выходное сопротивление, необходимо устанавливать разные лампы: в первый каскад, который усиливает напряжение — лампу с максимальным значением μ , а во второй каскад — катодный повторитель — лампу с минимальным внутренним сопротивлением. При этом катодный резистор второго триода будет в несколько раз меньше анодного резистора первого триода. Такая схема — не для начинающих. Поэтому не будем приводить формул и расчетов, а ограничимся примером асимметричного каскада, использованного фирмой «Conrad Johnson» (рис. 4.14).

Лампа 12AT7 по сравнению с лампой 12AX7 имеет в несколько раз больший анодный ток (3—4 мА в сравнении с 0,5—1 мА) и в несколько раз меньшее внутреннее сопротивление (15 кОм в сравнении с 62—80 кОм). Использование нескольких параллельно соединенных резисторов в катоде второй лампы, по-видимому, связано с большой рассеиваемой мощностью.

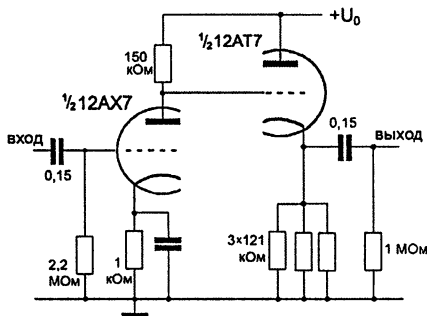


Рис. 4.14. Выходной каскад фонокорректора фирмы «Conrad Johnson»

Питание цепей накала в катодных повторителях

В разделе 4.4 при описании работы катодного повторителя уже упоминалось, что в катодном повторителе возникает большая разность потенциалов между катодом и подогревателем, так как один из выводов нити накала или среднюю точку, образованную двумя последовательно соединенными резисторами по 100—200 Ом, подключенными к выводам нити накала обычно соединяют с общим проводом (рис. 4.15, а).

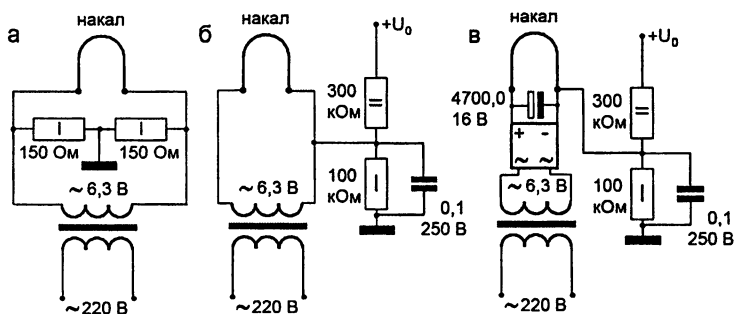


Рис. 4.15. Варианты организации питания накала ламп:

а — обычная схема, переменное напряжение питания накала; б — подача положительного потенциала $+ \frac{1}{4}U_0$, переменное напряжение питания накала; в — подача положительного потенциала $+ \frac{1}{4}U_0$, выпрямленное напряжение питания накала

В случае комбинированного каскада получается, что значения разности потенциалов между накалом и катодом сильно различаются для первого и второго триода. Это также нежелательно при использовании ламп с двумя триодам в одном баллоне. Для того, чтобы значения разности потенциалов между нитью накала и катодами обоих триодов сделать одинаковыми, на один из выводов нити накала подается напряжение, равное $+ \frac{1}{4}U_0$, от положительной клеммы источника питания через резистивный делитель напряжения (рис. 4.15, б, в). Тогда абсолютное значение разности потенциалов нити накала относительно каждого из катодов будет равно $\frac{1}{4}U_0$.



Примечание.

Последовательное включение двух каскадов без разделительного конденсатора с установлением напряжения на сетке второго триода, равного напряжению на аноде первого триода, восходит, по-видимому, к работе Э. Лофтина и С. Уайта 1930 г.,* а возможно, даже к более ранним публикациям или патентам.

* См. ссылку на стр. 58.

4.6. Улучшение схемы с общим катодом: каскад с динамической нагрузкой

Принцип работы и основные свойства

Каскад с динамической нагрузкой отличается от стандартного каскада с резистивной анодной нагрузкой, показанного на рис. 4.4, тем, что вместо резистора в цепи катода установлен еще один триод, как показано на рис. 4.16.

В этом случае нижний по схеме триод работает на динамическое сопротивление, задаваемое внутренним сопротивлением верхнего триода R_{i2} , его коэффициентом усиления μ_2 и катодным резистором R_{K2}

$$R_{\text{дин}} = R_{K2}(1 + \mu_2) + R_{i2}. \quad (18)$$

Эта формула представляет собой сумму трех сопротивлений: внутреннего сопротивления верхнего триода, сопротивления его катодного резистора, и еще одного сопротивления, равного $\mu_2 R_{K2}$, которое «как бы» включено последовательно с первыми двумя. Это слагаемое отражает тот факт, что изменение катодного резистора верхнего триода изменяет смещение на его сетке и приводит к μ_2 -кратному изменению анодного тока верхнего триода. Такие же рассуждения использовались ранее при выводе «закона Ома» для каскада с общим катодом на стр. 106.

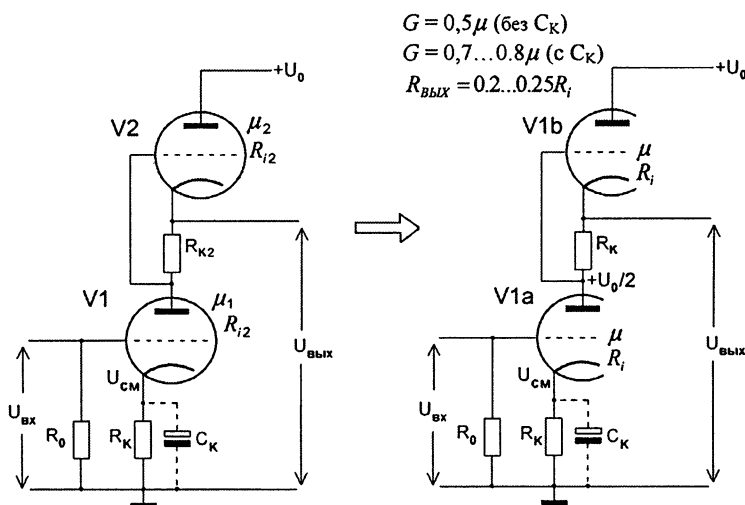


Рис. 4.16. Каскад с общим катодом с динамической нагрузкой: слева — два различных триода, справа — два одинаковых триода

Что дает такое включение? Как уже обсуждалось ранее, линейность каскада с общим катодом повышается с увеличением сопротивления анодного резистора, однако это требует соответствующего увеличения напряжения питания. Кроме того, рост анодного сопротивления увеличивает выходное сопротивление каскада с общим катодом.

В схеме с динамической нагрузкой, по сравнению со стандартной схемой с общим катодом, улучшаются сразу несколько характеристик:

- ♦ увеличивается коэффициент усиления;
- ♦ уменьшается выходное сопротивление;
- ♦ возрастает линейность каскада.



Примечание.

Линейность повышается не только потому, что нижний триод работает на высокое сопротивление, но и потому, что это сопротивление изменяется в фазе с входным сигналом. Увеличение напряжения на сетке нижнего триода увеличивает его анодный ток. Как следствие увеличивается ток, протекающий через катодный резистор верхнего триода. Это, в свою очередь, увеличивает смещение на сетке верхнего триода и приводит к его запираанию, т. е. уменьшению тока, а значит, к росту динамического сопротивления. Поэтому нижний триод в отсутствие сигнала и при его появлении работает при неизменном значении напряжения на аноде. Это свойство каскада с динамической нагрузкой и определяет его высокую линейность.

Рассмотрим свойства этого каскада более подробно. Вспомним формулу (6), приведенную на стр. 107—108 для коэффициента усиления каскада с общим катодом

$$G = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \mu \frac{R_A}{R_A + (\mu + 1)R_K + R_i} \quad (6)$$

без шунтирования катодного резистора, и формулу (7) для коэффициента усиления каскада с общим катодом с шунтирующим конденсатором

$$G = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \mu \frac{R_A}{R_A + R_i} . \quad (7)$$

Для получения коэффициента усиления каскада с динамической нагрузкой в эти формулы необходимо вместо R_A подставить сопротивление $R_{\text{дин}}$, задаваемое выражением (18). В результате получаем для каскада без шунтирующего конденсатора для нижнего триода

$$G = \mu \frac{R_{K2}(1 + \mu_2) + R_{i2}}{R_{K2}(1 + \mu_2) + R_{i2} + (\mu + 1)R_K + R_i}, \quad (19)$$

а для каскада с шунтирующим конденсатором для нижнего триода

$$G = \mu \frac{R_{K2}(1 + \mu_2) + R_{i2}}{R_{K2}(1 + \mu_2) + R_{i2} + R_i}. \quad (20)$$

Очень часто каскад с динамической нагрузкой реализуют, используя одинаковые триоды. В этом случае можно применить и одинаковые катодные резисторы (правая часть рис. 4.16). Тогда из выражения (19) получаем коэффициент усиления без шунтирующего конденсатора для нижнего триода

$$G = \mu \frac{R_K(1 + \mu) + R_i}{R_K(1 + \mu) + R_i + (\mu + 1)R_K + R_i} = \frac{\mu}{2}, \quad (21)$$

а для каскада с шунтирующим конденсатором для нижнего триода

$$G = \mu \frac{R_K(1 + \mu) + R_i}{R_K(1 + \mu) + 2R_i} > \frac{\mu}{2}. \quad (22)$$

Оценим типичные значения коэффициента усиления для каскада с динамической нагрузкой, используя режимы, приведенные для некоторых триодов в табл. 4.1—4.5. Из всех параметров нам нужны μ , R_i (табл. 4.1) и R_K (табл. 4.2—4.5). Получим значения $G = 0,7—0,8\mu$. Если использовать обычный каскад с резистивной нагрузкой R_A , то для получения усиления $G = 0,8\mu$ придется взять $R_A = 4R_i$ с соответствующим увеличением напряжения источника питания.

Итак, для каскада с динамической нагрузкой, состоящего из двух одинаковых триодов с одинаковыми значениями сопротивлений катодных резисторов каждого триода, имеем:

- ♦ коэффициент усиления = $\mu/2$ без шунтирующего конденсатора для нижнего триода;
- ♦ коэффициент усиления = $0,7...0,8\mu$ с шунтирующим конденсатором.



Примечание.

Идентичность верхнего и нижнего триодов и равенство значений катодных резисторов приводит к тому, что на аноде нижнего триода устанавливается напряжение $U_0/2$. Это значительно упрощает расчет каскада с динамической нагрузкой, сводя его просто к выбору рабочей точки нижнего триода и определению сопротивления катодного резистора.

Эта процедура была подробно описана на стр. 107—108. Повторим кратко последовательность шагов.

Шаг 1. На зависимости анодного тока от напряжения на сетке (левая часть рис. 4.2) выбирают линейный участок с размахом напряжения на сетке, превышающим ожидаемую амплитуду входного сигнала. Середина этого участка и есть рабочая точка $[U_C, I_A]$. Если анодно-сеточные характеристики неизвестны, рабочую точку выбирают по вольтамперным характеристикам (правая часть рис. 4.2, а также рис. 4.9).

Шаг 2. Сразу можем определить $R_K = U_C/I_A$.

Шаг 3. Точке $[U_C, I_A]$ соответствует одно значение U_A . Его удвоенное значение дает значение напряжения источника питания $U_0 = 2U_A$. Расчет закончен.

Важным параметром любого усилительного каскада является его *выходное сопротивление* $R_{\text{ВЫХ}}$. Для каскада с динамической нагрузкой с шунтирующим конденсатором в цепи катода нижнего триода $R_{\text{ВЫХ}}$ равно*

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_i(R_i + R_K)}{2R_i + (1 + \mu)R_K}. \quad (23)$$

С учетом того, что $R_K \ll R_i$, а $\mu \gg 1$, можно перейти к приближенному равенству

$$R_{\text{ВЫХ}} \approx \frac{R_i}{2 + \mu R_K / R_i} < R_i / 2. \quad (24)$$

Из табл. 4.1—4.5 видно, что для типичных маломощных триодов $\mu R_K / R_i \approx 2 \dots 3$. Это значит, что для рассматриваемого каскада $R_{\text{ВЫХ}} = 0,2 \dots 0,25 R_i$, что *в несколько раз меньше, чем для обычного каскада с резистивной нагрузкой*, для которого $R_{\text{ВЫХ}} = R_i \parallel R_A > R_i / 2$.

* А. П. Ложников, Е. К. Сонин. Каскодные усилители. Москва, «Энергия», 1964 г.

Без шунтирующего конденсатора выходное сопротивление несколько увеличивается (примерно в полтора-два раза, см. табл. 4.7 далее), однако все равно остается меньшим, чем для обычного каскада с резистивной нагрузкой.

Читателям, склонным к экспериментамированию, не удовлетворенным простым описанием каскада с динамической нагрузкой, рекомендуется прекрасная статья Александра Гурского*, в которой подробно и с большим количеством практических примеров разобрана работа этого каскада.

Балансный усилитель, мю-повторитель или тотемный столб?

Каскад с динамической нагрузкой получил распространение в телевизионной технике в начале 60-х годов прошлого столетия. Интересно, что, несмотря на давнюю историю, до настоящего времени используют почти десяток названий для этого каскада!

Самое первое название — «Балансный усилитель постоянного и переменного тока»**. Именно так назывался патент Мориса Артца (Maurice Artzt), выданный 9 февраля 1943 г. с приоритетом от 29 ноября 1940 г. Фрагмент описания этого патента со схемой каскада воспроизведен на рис. 4.17. По сравнению с современным вариантом, в патенте Мориса Артца для снятия выходного сигнала используется вместо общего провода средняя точка, образованная делителем напряжения на двух резисторах.

Схема каскада с динамической нагрузкой была описана подробно в американских учебниках по радиотехнике уже в середине прошлого века под названием «Totem pole amplifier» — усилитель типа «тотемный столб», очевидно, из-за вертикального расположения триодов на схеме***. Под таким названием это схема включена в современную популярную компьютерную программу «Tube CAD». Советские авторы А.П. Ложников и Е.К. Сонин рассматривали данную схему как упрощенную версию *каскадного усилителя* (эта схема рассматрива-

* А. Гурский. К 70-летию изобретения каскада SRPP. «Радиолюбби», 2010, №6, с. 2. 2010.

** M. Artzt. Balanced direct and alternating current amplifiers. USA Patent No 2, 310, 342, 1943 (приоритет 29.11.1940).

*** Тотемный столб — у индейцев Сев. Америки деревянный столб высотой до 20 м с изображениями животных — предков рода или семьи, устанавливаемый в память об умершем вожде его наследником.

Feb. 9, 1943.

M. ARTZT

2,310,342

BALANCED DIRECT AND ALTERNATING CURRENT AMPLIFIERS

Filed Nov. 29, 1940

2 Sheets-Sheet 1

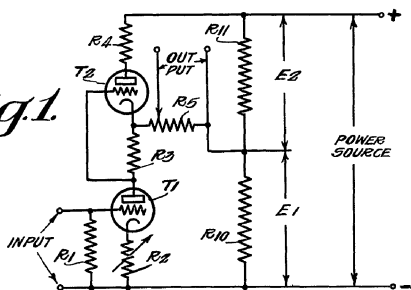
Fig. 1

Рис. 4.17. Фрагмент патента Мориса Арцта на «Балансный усилитель постоянного и переменного тока»

ется в следующем разделе) и использовали термин «каскад с динамической нагрузкой». В любительской литературе чаще всего используется термин «SRPP-каскад» без расшифровки аббревиатуры. А вариантов расшифровок как минимум три:

- Shunt Regulated Push Pull — примерный перевод «двухтактный каскад со стабилизацией путем шунтирования»;
- Series Regulated Push-Pull — примерный перевод «двухтактный каскад с последовательной стабилизацией»;
- Single Ended Reflexive Push-Pull — примерный перевод «однотактно — двухтактный рефлексивный каскад».

В 60-е годы прошлого века в радиолюбительской советской литературе такой каскад называли «двухтактно-параллельный бестрансформаторный каскад».



Примечание.

Использование термина «Push-Pull» (буквально «тяни-толкай», а на техническом языке — «двухтактный») имеет следующую причину. Если сопротивление нагрузки очень низкое (а такой случай соответствует первоначальному применению этого каскада в широкополосных телевизионных трактах), роль верхнего триода не сводится просто к созданию динамической нагрузки, а может быть интерпретирована как усилительное «плечо», работающее в противофазе с нижним триодом и отдающее ток в нагрузку. Отсюда и слова «двухтактный», «однотактно-двухтактный» в названии.

Еще одно название — «мю-повторитель» (μ -follower) указывает на возможность получения коэффициента усиления по напряжению, близкому к значению μ для нижнего триода.

Иногда этот каскад называют также «каскадный катодный повторитель» («Cascode Cathode Follower»), что, по-видимому, наименее

удачно, так как стандартный катодный повторитель в отличие от рассматриваемого каскада не дает усиления по напряжению, но зато имеет очень низкое выходное сопротивление, каковым не обладает каскад с динамической нагрузкой.

Встретив все эти названия в русско- или англоязычной профессиональной или радиолюбительской литературе, читатель должен понимать, что речь во всех случаях идет об одном и том же усилительном каскаде, содержащем в простейшем варианте два триода, два резистора, источник питания и разделительный конденсатор для связи с последующим каскадом.

Несколько практических примеров

Первый практический пример применения каскада с динамической нагрузкой в аудиоусилителях из числа отобранных для данного раздела относится к радиолюбительской конструкции 1967 г., т. е. к периоду расцвета ламповой техники — и любительской, и профессиональной. Это бестрансформаторный усилитель А. Слонима (ж-л «Радио», №9, 1967 г.). Его выходной каскад построен на двойном триоде 6Н5С без применения согласующего трансформатора (рис. 4.18, а). Схема намеренно не перерисовывалась, чтобы передать ощущение тех лет. Несмотря на отличие в расположении триодов, читатель увидит совпадение этой схемы с рис. 4.16. Каскад назван «двухтактно-параллельный бестрансформаторный каскад». Лампа 6Н5С содержит два одинаковых триода с рабочим током анода 80 мА и внутренним сопротивлением <460 Ом. Сопротивление головки громкоговорителя 4ГД5 составляет несколько сотен ом.

Второй пример применения каскада с динамической нагрузкой выбран из периода «лампового ренессанса» (рис. 4.18, б). Это входной каскад легендарного усилителя »Ongaku» фирмы «Audio Note» с серебряными проводами в трансформаторах, мощностью 25 Вт на канал и стоимостью, превышающей стоимость хорошей квартиры в городе, где живет автор этой книги. Время разработки — начало 90-х годов прошлого века.

Каскад с динамической нагрузкой уже встречался в схемах, приведенных в главе 2:

- ♦ предварительный усилитель фирмы «Audio Note» (рис. 2.6);
- ♦ входной/драйверный каскад в усилителе Евгения Комиссарова (рис. 2.7).

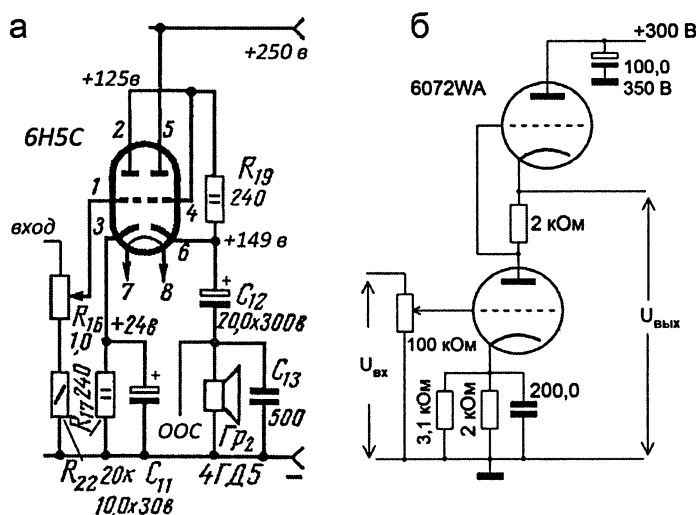


Рис. 4.18. Примеры каскада с динамической нагрузкой в реальных устройствах:

а — выходной каскад усилителя (А. Слоним, ж-л «Радио», №9, 1967 г.);

б — входной каскад усилителя «Ongaku» (Х. Кондо, «Audio Note», 1992 г.)

При расчетах каскада с динамической нагрузкой до сих пор принималось, что катодные резисторы обоих триодов имеют одинаковое сопротивление. Этот случай реализуется и в схемах, представленных ранее на рис. 2.6 и 2.7. Такое условие упрощает расчеты, однако не является необходимым или оптимальным. Многие конструкторы рекомендуют подбирать сопротивление катодного резистора верхнего триода немного отличающимся от резистора нижнего триода, оценивая качество звучания. Схема входного каскада усилителя «Ongaku» относится как раз к такому случаю.

Другими примерами каскада с динамической нагрузкой с различными значениями катодных резисторов являются схемы усилителей, показанные на рис. 4.19. В схеме на лампе 6H23П (J. Broskie, The Tube CAD Journal, 27 мая 2002 г.*) сопротивление катодного резистора верхнего по схеме триода выбрано большим, чем сопротивление резистора нижнего триода.

А. Гурский исследовал экспериментально гармонические искажения для некоторых двойных триодов, включенных по схеме с динамической нагрузкой (см. ссылку на стр. 137). Анализировалось значение

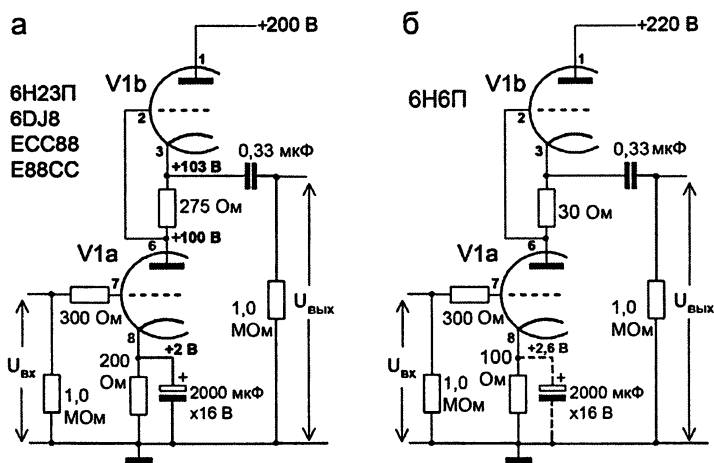


Рис. 4.19. Каскад с динамической нагрузкой на лампах 6Н23П и 6Н6П

коэффициента нелинейных искажений (КНИ) и спектр гармоник в выходном сигнале.

Для ламп 6Н6П ($\mu = 20$, $R_i = 1,8 \text{ кОм}$) при напряжении питания 220 В и токе анода 26 мА (в катодах обоих триодов установлены резисторы по 100 Ом) получены значения КНИ = 0,3 % без шунтирования катодного резистора нижнего триода конденсатором. В спектре доминирует вторая гармоника, присутствует также третья.

При шунтировании катодного резистора нижнего триода конденсатором увеличивается коэффициент усиления, но одновременно растут и искажения до уровня КНИ = 0,8 %, причем спектр гармоник расширяется: появляются 4-ая, 6-ая и более высокие гармоники.

Уменьшение сопротивления катодного резистора верхнего триода от 100 до 30 Ом при неизменном сопротивлении катодного резистора нижнего триода (100 Ом) в обоих случаях (с шунтированием нижнего резистора и без шунтирования) понижало значение КНИ: от 0,3 % до 0,2 % без шунтирования и от 0,8 % до 0,6 % — с шунтированием. Эта схема показана на рис. 4.19, б. Увеличение катодного резистора верхнего по схеме триода от 100 до 700 Ом приводило к монотонному росту КНИ в 1,5 (с конденсатором) и в 1,8 (без конденсатора) раз.

К этим интересным результатам следует добавить хорошие субъективные оценки звучания ламп 6Н6П, а также их доступность на постсоветском пространстве. Эти лампы будут рекомендованы для практического применения в гибридных усилителях, описанных далее в главе 6.

Режимы, номиналы компонентов и параметры каскада
с динамической нагрузкой для различных ламп (рис. 4.16)

Таблица 4.7

Лампа	μ	R_p , кОм	R_k , Ом	I_A , мА	U_p , В	$U_{\text{вых макс}}$, В	К-т усиления		$R_{\text{вых}}$, кОм	
							C_k нет	C_k есть	C_k нет	C_k есть
6SL7, 6H9C	70	43	1000	1,3	300	± 48	35	39	15,0	10,0
6SN7, 5692, ECC32, 6H8C, 6C2C*	20,5	10	560	3,0	150	± 21	10	13	3,6	2,3
	21	9	400	5,0	200	± 30	10	12	3,6	2,5
	21	9,2	620	5,0	250	± 40	10	13	3,6	2,2
	22	7,7	240	10,0	300	$-40 + 60$	11	12	3,6	2,8
6DJ8, ECC88, E88CC, 6H23П	30,7	2,9	120	10,0	150	± 30	15	22	1,5	0,9
	30,0	3,0	200	10,0	200	± 45	15	25	1,5	0,7
	29,6	3,1	300	10,0	250	± 60	15	25	1,5	0,6
6H30П	16	1,0	75	30,0	150	-	8	11	-	0,31
	15	1,3	220	20,0	200	-	7,5	12	-	0,29
	15	1,4	300	20,0	250	-	7,5	12	-	0,26
	15	1,7	520	18,0	300	-	7,5	14	-	0,25
6H6П	20	1,8	100	20,0	200	-	10	13,6	-	0,58
	20	1,8	150	20,0	250	-	10	14,6	-	0,49
	20	1,8	250	20,0	300	-	10	15,9	-	0,38
6H1П	40	12,2	330	3,0	200	-	20	27	-	3,95
	36	9,5	220	5,0	250	-	18	23	-	3,35
	36	9,6	620	5,0	300	-	18	28	-	2,22
12AX7, ECC83, E83CC	100	80	2000	0,5	200	± 49	50	63	18,0	9,0
	100	62,5	1100	1,0	300	± 61	50	54	18,0	12
6072	44	25	1250	2,0	300	-	22	33	-	8,1

* Лампа 6C2C отличается от остальных в этой группе тем, что имеет один, а не два триода в баллоне. Это, однако, улучшает качество звучания по сравнению с 6H8C.

В табл. 4.7 приведены режимы и номиналы компонентов каскада с динамической нагрузкой для различных ламп, рекомендуемые Дж. Броски (J. Broskie). Автором добавлены режимы для популярной, хорошо звучащей и менее дефицитной, чем 6H30П, лампы 6H6П, имеющей близкие к 6H30П параметры. Коэффициент усиления для всех ламп рассчитан по формулам (21), (22), выходное сопротивление — по формуле (24), максимальный размах выходного напряжения рассчитывался с помощью программы TubeCAD.

4.7. Каскодный усилитель

Триод — не единственный тип ламп, которые могут применяться в аудиотехнике. В главе 2 уже упоминались *тетроды*, использовавшиеся в выходных каскадах однотактных усилителей (рис. 2.9 и

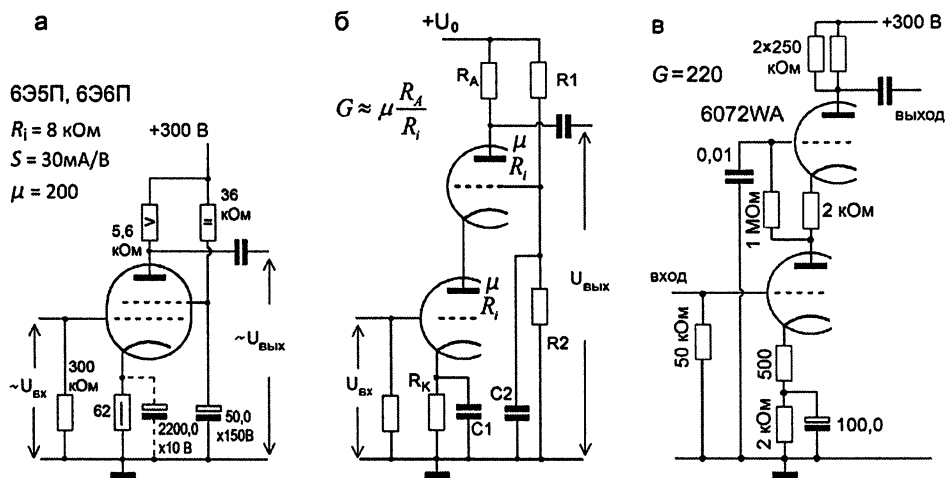


Рис. 4.20. От тетроды — к каскаду:

а — схема стандартного включения тетроды 6Э5П (6Э6П); б — схема каскадного включения двух одинаковых триодов; в — реальный каскод на входе фонокорректора фирмы «Audio Note»

рис. 2.10). Тетроды имеют дополнительную сетку, что позволяет получить больший, чем у триода, коэффициент усиления по напряжению. При этом, правда, возрастают шумы, что может быть критично для усиления слабых сигналов (например, в фонокорректорах), где большие коэффициенты усиления как раз наиболее нужны. Однако мощные тетроды 6П27С (EL34) и KT88 (6550), показанные на рис. 2.9 и рис. 2.10, включены в режиме триодов, чтобы повысить линейность оконечного каскада. Коэффициент усиления при этом уменьшается, но все равно остается большим, чем у мощных триодов (для которых он составляет всего 2—3). Представление о том, как включается тетрод в обычном, штатном режиме, дает рис. 4.20, а.

Как видно из рисунка, по сравнению с каскадом на триоде с общим катодом, каскод на тетроде имеет две дополнительные детали: резистор и конденсатор. Дополнительная (верхняя по схеме) сетка подключена через резистор (36 кОм) к положительному выводу источника питания, а через конденсатор (50 мкФ) — к общему проводу. Применение этого конденсатора соединяет дополнительную сетку с общим проводом для переменного тока. Тетрод 6Э5П (6Э6П)* имеет

* При повторении этой схемы обратите внимание, что тетроды 6Э5П и 6Э6П имеют схожие характеристики, но различную цоколевку, исключающую их взаимозаменяемость без перепайки схемы!

следующие характеристики: $R_i = 8 \text{ кОм}$; $S = 30 \text{ мА/В}$; $\mu = 200$. Триоды с подобными характеристиками отсутствуют.

Дальнейшим усовершенствованием триода является переход к **пентоду** — лампе с тремя сетками: одной основной, управляющей, и двумя дополнительными. Коэффициент усиления пентода может превышать 1000. Однако, как уже отмечалось, повышение усиления за счет введения дополнительных сеток увеличивает уровень шумов.

Для того, чтобы получить в каскаде на триоде большие коэффициенты усиления, сопоставимые с таковыми для пентодов, используют схему включения двух триодов в одном каскаде, получившую название **каскод** (по-английски «cascode»).



Примечание.

Слово «cascode» — каскод — означает каскад на триоде с параметрами пентода. Поскольку слова «каскад» и «пентод» заимствованы из английского языка, термин «каскод» одинаково интерпретируется на обоих языках.

Схема включения триодов в каскодном режиме показана на рис. 4.20, б. На первый взгляд, эта схема похожа на каскад с динамической нагрузкой, рассмотренный в предыдущем разделе. Однако она имеет принципиальное отличие. Входной сигнал подается на сетку нижнего по схеме триода, а выходной сигнал снимается с анода **верхнего** триода.

При этом в схему добавляется полноценный анодный резистор R_A , являющийся нагрузкой верхнего триода. На сетку верхнего триода подается постоянное напряжение через делитель $R1, R2$, но по переменному току сетка соединена с общим проводом за счет использования конденсатора $C2$. Роль резистора R_K и подключенного к нему конденсатора $C1$ такая же, как и в стандартном каскаде на триоде с общим катодом.



Примечание.

Поскольку сетка верхнего по схеме триода заземлена по переменному току, верхний триод оказывается включенным **по схеме с общей сеткой**. При таком включении входной сигнал подается на катод, а выходной сигнал снимается с анода. Такая схема включения триода до сих пор в этой книге не рассматривалась, так как такое включение при построении гибридных усилителей использовать не будет.

При каскодном включении триодов коэффициент усиления каскада в несколько раз увеличивается по сравнению с каскадом с общим катодом:

$$G = \frac{\mu^2 R_A}{R_A + \mu R_i} \approx \mu \frac{R_A}{R_i}. \quad (25)$$

Сопротивление анодного резистора R_A выбирается в несколько раз больше внутреннего сопротивления триодов R_i . Переход в формуле (25) от точного равенства к приближенному сделан в предположении, что отношение сопротивления анодного резистора к внутреннему сопротивлению лампы все-таки всегда остается много меньше μ .

Увеличение коэффициента усиления достигается не просто за счет включения в схему второго триода (как это было в случае каскада с динамической нагрузкой), а с одновременным повышением напряжения питания вследствие значительного падения напряжения на анодном резисторе верхнего триода.



Примечание.

Каскодная схема включения триодов известна более полувека. Она широко применялась в радиотелевизионной технике в 60-х годах прошлого века. Именно тогда была издана уже упоминавшаяся книга А. П. Ложникова и Е. К. Сониной «Каскодные усилители» (Москва, «Энергия», 1964 г.). О масштабе применения ламп в целом и каскодных схем в частности в тот период свидетельствует невероятно огромный по современным стандартам тираж этой книжки — 50 тыс. экз., причем в серии «Массовая радиобиблиотека» (выпуск 561!). Сравните с 1-2 тыс. экземпляров для современной радиолобительской русскоязычной литературы. Правда, малые тиражи книг сегодня частично компенсируются распространением информации по схемотехнике через интернет, к сожалению, очень часто искаженной и неточной.

В период лампового ренессанса каскодное включение триодов нашло применение в фонокорректорах. По каскодной схеме на лампе 6072 построен входной каскад нескольких фонокорректоров фирмы «Audio Note» (рис. 4.20, в). Параметры этой лампы $\mu = 44$, $R_i = 25$ кОм были приведены в табл. 4.7. Используя эти значения, можно определить, что коэффициент усиления каскада равен 220. Полные схемы таких фонокорректоров будут рассматриваться в главе 7.

4.8. Улучшение катодного повторителя

Применение источника тока вместо катодного резистора

Простейшее улучшение обычного катодного повторителя состоит в том, чтобы заменить катодный резистор источником постоянного тока, т. е. таким компонентом или набором компонентов, которые поддерживают неизменным ток в цепи катод-анод независимо от изменения в определенных пределах уровня сигнала и напряжения источника питания. Это позволяет значительно повысить линейность каскада. Из формулы (16) на стр. 123 ясно, что коэффициент передачи катодного повторителя определяется значением коэффициента усиления триода μ . Для многих триодов значение μ определяется анодным током и при его постоянном значении почти не зависит от напряжения анод-катод. Поэтому динамическое сопротивление в цепи катода, поддерживающее постоянным анодный ток, повысит линейность каскада.

Простейшим источником тока может служить дроссель, который может рассматриваться как источник постоянного тока по отношению к переменному току.



Примечание.

Это странно звучащее утверждение надо понимать так: амплитуда переменного тока будет поддерживаться постоянной при изменении напряжения источника питания.

Другая возможность состоит в замене катодного резистора на электрическую цепь, построенную на каком-либо нелинейном элементе, например вакуумном триоде,

пентоде, биполярном или полевом транзисторе, а также на специальных интегральных схемах.

На рис. 4.21 показан пример использования источника тока на биполярном транзисторе в составе усилителя напряжения по схеме с общим катодом, непосредственно работающего на катодный повторитель.

Источник тока образован транзистором, двумя резисторами и светодиодом. Резистор сопротивлением

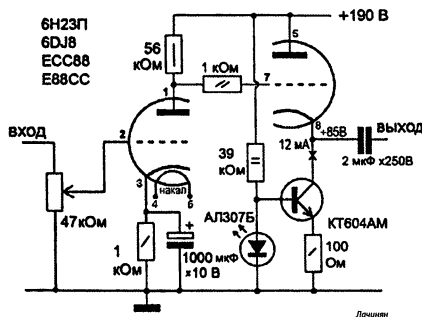


Рис. 4.21. Предварительный усилитель, предложенный С. Лачиняном («Радио», №4, 2001 г., с.13). При воспроизведении схемы устранены ошибки в цоколевке лампы

39 кОм задает ток через светодиод. Падение напряжения на светодиоде изменяется меньше, чем вызвавшее его изменение напряжения источника питания. Это обеспечивает поддержание постоянного напряжения на базе транзистора. А это, в свою очередь, обеспечивает постоянное значение тока 12 мА, протекающего в цепи эмиттер-коллектор транзистора.

**Примечание.**

Схема приводится для иллюстрации применения транзисторов в катодных повторителях. В этой, в целом интересной схеме, спорным является выбор режима работы входного триода лампы 6Н23П: довольно низкое значение анодного тока около 2 мА вместо типично используемого значения силы тока для этой лампы 7—10 мА для выбранного анодного напряжения около 80 В (см. для сравнения режимы, предлагаемые в табл. 4.3 на стр. 112).

Возможно, автор схемы стремился повысить линейность режима работы триода, создавая очень большое сопротивление нагрузки. Возможно, цель состояла в том, чтобы получить большой коэффициент усиления первого каскада по напряжению, который приближается к значению коэффициента усиления лампы μ , если сопротивление анодного резистора выбирается во много раз выше внутреннего сопротивления лампы R_i (формула (7) на стр. 108). Во всяком случае, представляется странным использование в одной схеме двух триодов одного типа с токовым режимом, различающимся в 6 раз.

**Примечание.**

Отметим, что применение источника тока вместо катодного резистора не изменяет ни коэффициент передачи, ни выходное сопротивление катодного повторителя.

Соответствующие формулы приведены ранее на стр. 123 и на рис. 4.10.

Катодный повторитель Эрика Уайта

Эрик Уайт (E. L. C. White) в 1940 г. предложил улучшение стандартного катодного повторителя с помощью добавления второго триода. Полученный им патент назывался «Улучшения в схеме усилителя на

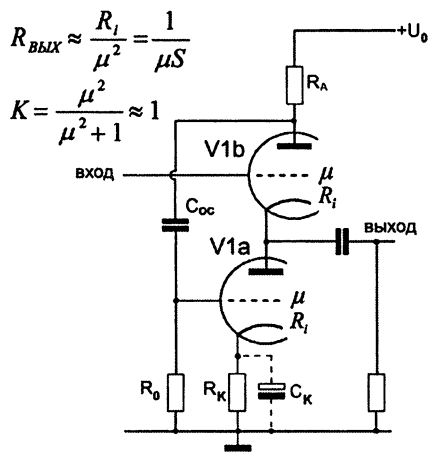


Рис. 4.22. Катодный повторитель каскодного типа (повторитель Уайта)

Особенность состоит в наличии у верхнего триода анодного резистора R_A , на котором изменение напряжения происходит в противофазе с изменением напряжения на его катоде. Это переменное напряжение через конденсатор $C_{ос}$ подается на сетку нижнего триода и управляет величиной его анодного тока. Его изменение, в свою очередь, влияет на величину напряжения на анодном резисторе верхнего триода.

Возникает положительная обратная связь. На устойчивость каскада это не влияет, так как усиления нет: коэффициент передачи меньше 1. Влияние обратной связи проявляется в уменьшении выходного сопротивления. Оно уменьшается в μ раз по сравнению с обычным катодным повторителем. При этом коэффициент передачи становится ближе к единице, чем у обычного катодного повторителя. Сравним параметры для обычного повторителя и повторителя Уайта**:

	Обычный катодный повторитель	Катодный повторитель каскодного типа (повторитель Уайта)
Коэффициент передачи	$K = \frac{\mu}{\mu + 1} = 0,90...0,99$	$K = \frac{\mu^2}{\mu^2 + 1} \approx 0,98...0,999$
Выходное сопротивление	$R_{вых} = \frac{R_i}{\mu + 1} \approx \frac{R_i}{\mu} = \frac{1}{S}$	$R_{вых} \approx \frac{R_i}{\mu^2 + \mu + 1} \approx \frac{R_i}{\mu^2} = \frac{1}{\mu S}$

термоионном вентиле или относящиеся к ней».* Базовая схема катодного повторителя Уайта показана на рис. 4.22. Его часто называют **катодным повторителем каскодного типа**.

Повторитель Уайта работает следующим образом. Верхний по схеме триод работает в режиме обычного катодного повторителя. Входной сигнал подается на его сетку, а выходной снимается с его катода. Нижний по схеме триод выполняет функцию катодного резистора для верхнего триода.

* Е. Л. С. White. Improvements in or relating to Thermoionic Valve Amplifier Circuit. British patent GB564,250, опубл. 20 сент. 1944 г., приоритет от 7 сент. 1940 г.

** А. П. Ложников, Е. К. Сонин. Каскодные усилители. Москва, «Энергия», 1964 г.

Выходное сопротивление повторителя Уайта достигает очень малых значений. Их можно легко определить, если известны внутреннее сопротивление и коэффициент усиления лампы (см. табл. 4.1 или табл. 4.7). Например, для лампы 6Н6П получаем 6 Ом, для 6Н23П — 3,3 Ом, для 6Н8С — 23 Ом.



Примечание.

При применении такой схемы надо учитывать ограничения по выходному току. Выходное сопротивление 3,3 Ом вовсе не означает возможности работать на 8-омную динамическую головку громкоговорителя. Это значение гарантирует, что катодный повторитель не потеряет работоспособности и сохранит номинальный уровень искажений при подключении нагрузки сопротивлением порядка 10 Ом, но мощность будет ограничена допустимым током через лампу. Возможно, этого будет достаточно для работы низкоомных головных телефонов.

Катодный повторитель Джона Броски

Казалось бы, все варианты построения элементарных ламповых каскадов уже давно придуманы, а ламповый ренессанс не принес подлинно новых схемных решений. По-видимому, одним из исключений из набора старых, возрожденных ламповых каскадов является схема катодного повторителя, предложенная в 2010 г. Джоном Броски — редактором интернет-журнала «Tube CAD Journal»*.

Схема показана на рис. 4.23. В схеме используются два одинаковых триода. Верхний по схеме триод работает в режиме катодного повторителя. Вместо катодного резистора включен нижний триод, формирующий высокое динамическое сопротивление. Отличительной особенностью каскада является способ подавления пульсаций питающего напряжения. Для этого переменная составляющая питающего напряжения (т. е. пульсации) через конденсатор $C^* = 1$ мкФ и делитель напряжения, образованный резисторами R^* и R_{g2} , подается на сетку нижнего триода. Пульсации на сетке приводят к пульсациям анодного тока нижнего триода, которые смешиваются в противофазе с пульсациями тока верхнего триода, вызванными пульсациями питающего напряжения.

* J. Broskie. Aikido Cathode Follower. Glass Ware Audio Design, 2010 (www.glass-ware.com).

Выбор соотношений резисторов

$$R_{g2} = \frac{R^*}{\mu - 1}$$

обусловлен тем, что изменение напряжения на сетке вызывает изменение анодного тока в μ раз большее, чем такое же изменение анодного напряжения. Значение резистора R^* выбирается таким, чтобы обеспечить равенство складывающихся в противофазе токов пульсаций для их полного подавления. Значение резистора $R^* = 100$ кОм выбрано для удобства расчетов и может быть заменено любым резистором сопротивлением примерно 50—200 кОм при условии установки резистора R_{g2} в соответствии с приведенной выше формулой.

Величина емкости конденсатора C^* выбирается из условия $C^*R_{g2} > 0,1$ с (секунда). Его рабочее напряжение должно быть не меньше напряжения источника питания U_0 . Резистор в цепи сетки верхнего триода — любой из диапазона 300—1000 Ом.

Делитель напряжения, образованный двумя резисторами по 1 МОм, задает на сетке верхнего триода напряжение, равное половине напряжения источника питания. Для ламп с анодным током порядка 1 мА (12AX7, 6Н2П, 6Н9С) их значение можно **одновременно для обоих резисторов** увеличить до 2—5 МОм, а для ламп с анодным током порядка 10 мА (6Н23П, 6Н6П, 6Н30) — **одновременно для обоих резисторов** уменьшить до 500 кОм.

Сопротивления катодных резисторов выбираются по многократно описанной схеме: выбирается рабочая точка триода (анодное напряжение и анодный ток), затем определяется необходимое смещение на сетке и его значение делится на анодный ток. Результат деления и равен сопротивлению резисторов $R_{K1} = R_{K2}$.

Емкость шунтирующего конденсатора выбирается из условия $C_{K2}R_{K2} > 0,1$ с, а лучше — $C_{K2}R_{K2} > 1$ с.

Емкость C разделительного конденсатора на выходе зависит от значения входного сопротивления следующего каскада R_{BX} и определяется из условия $CR_{BX} > 0,1—1$ с.

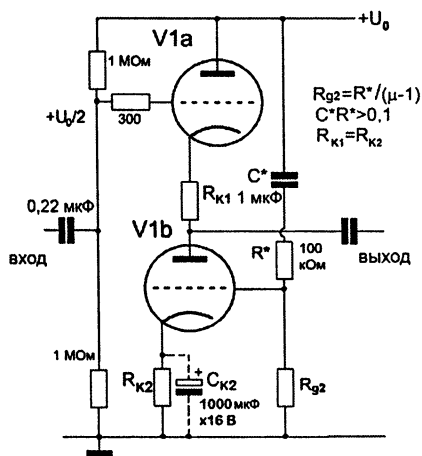


Рис. 4.23. Катодный повторитель Джона Броски

В табл. 4.8 приведены режимы и параметры каскада для различных ламп, предложенные Дж. Броски.

Параметры катодного повторителя Дж.
Броски для различных ламп. $R^* = 100\text{ кОм}$

Таблица 4.8

Лампа	μ	$R_p, \text{кОм}$	$R_{K1}, R_{K2}, \text{Ом}$	$I, \text{мА}$	$U_0, \text{В}$	$R_{g2}, \text{кОм}$	$R_{\text{вых}}, \text{Ом}$ $C_{K2} \text{ нет}$	$R_{\text{вых}}, \text{Ом}$ $C_{K2} \text{ есть}$ $R_{K1} = 0$
6DJ8 6Н23П ЕСС88 Е88СС	30	2,9	120	10	150	3,37	208	88
	30	3,0	200	10	200	3,45	291	92
	30	3,0	300	10	250	3,50	378	97
	29	4,0	680	5,0	250	3,62	780	130
	29	3,4	480	8,0	300	3,58	575	110
6Н30П	15	1,1	70	20	100	6,94	131	66
	16	1,0	75	30	150	6,71	128	58
	15	1,3	220	20	200	6,94	284	75
	15	1,4	290	20	250	6,94	356	79
	15	1,7	530	15	300	7,14	597	98
6Н1П	40	12,2	330	3,0	200	2,58	612	292
	36	9,5	220	5,0	250	2,86	464	250
	35	9,6	640	5,0	300	2,94	650	260
12АХ7 ЕСС83 Е83СС 6Н2П*	100	80	2000	0,5	200	1,0	2757	780
	100	62	1100	1,0	300	1,0	1699	610
6072	44	25	1250	2,0	300	2,33	1763	540
6Н8С 65N7 6Н8С	21	9,0	400	5,0	200	4,7	660	<500
	21	9,2	620	5,0	250	4,7	820	<500
	22	7,5	240	10,0	300	4,5	490	<400
	21	8,4	470	7,2	300	4,7	680	<500

* близкий аналог

4.9. Двухкаскадная схема «Айкидо»

Мы рассмотрели элементарные «строительные блоки» для построения ламповых усилителей напряжения. Они делятся условно на две группы: каскады, усиливающие напряжение (усилительные каскады), и каскады, усиливающие только ток (буферные каскады). К первым относится каскад с общим катодом и его модификации: каскад с динамической нагрузкой и каскодный усилитель. Ко вторым относятся катодный повторитель и его модификации: катодный повторитель Уайта и катодный повторитель Броски.

Каскады двух типов часто объединяют в единую схему, чтобы иметь одновременно усиление по напряжению и низкое выходное сопротивление

ление. Последнее необходимо при работе на нагрузку порядка 10 кОм и менее, а также при передаче сигнала по кабелю, чтобы его паразитная емкость совместно с высоким выходным сопротивлением усилителя не ослабляли передачу высоких частот.

В разделе 4.5 мы видели, как простой каскад с общим катодом объединяется с простым катодным повторителем без применения разделительного конденсатора. Все усложненные варианты каскадов с общим катодом также могут быть непосредственно, без разделительного конденсатора, подключены к катодному повторителю, причем не обязательно к самому простейшему. Такая возможность, в принципе, существует всегда, потому что в каскаде усиления напряжения работает нижний триод (верхний формирует нагрузку), а в катодном повторителе работает верхний триод (нижний триод или транзистор в катодной цепи «верхнего» триода, образует нагрузку).

Таким образом, постоянное напряжение на выходе первого, усилительного каскада, можно, в принципе, сделать равным напряжению на входе второго, буферного, каскада. Наиболее просто это получается, если в качестве расчетного напряжения на выходе первого и входе второго каскадов брать напряжение, равное половине напряжения источника питания. Такой режим оказывается вполне подходящим и для усилительного, и для буферного каскада.

Дж. Броски (J. Broskie)* предложил элегантную схему двухкаскадного усилителя, которую он назвал «Айкидо» (рис. 4.24). Это непосредственное (без разделительного конденсатора) соединение усилитель-

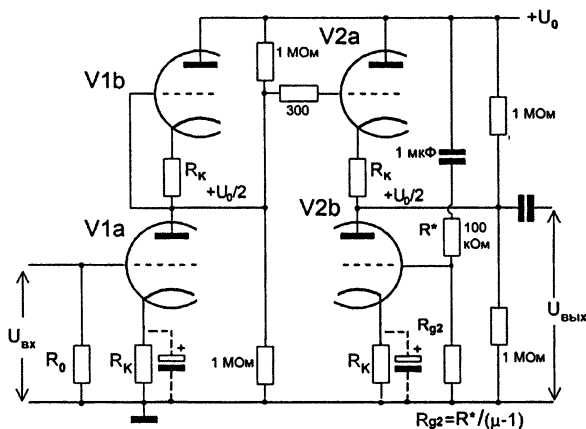


Рис. 4.24. Схема каскада типа «Айкидо»

* Aikido all in one. GlassWare Audio Design 2009 (www.glass-ware.com).

тельного каскада с генератором тока в качестве анодной нагрузки и выходного буферного каскада по схеме катодного повторителя Броски. Происхождение названия понятно из структуры схемы*. Эта комбинация каскада, усиливающего напряжение, и каскада, усиливающего ток — естественное продолжение «акробатики» ламповых схем, рассмотренных ранее.



Примечание.

Первый каскад на лампе V1, на первый взгляд, является каскадом с динамической нагрузкой. Однако, это не так. В каскаде с динамической нагрузкой выходной сигнал снимался с катода верхнего триода (рис. 4.16—4.19), а в данном случае — с анода нижнего триода. Верхний триод с резистором R_k образуют генератор стабильного тока. Нижний триод «видит» в качестве анодной нагрузки сопротивление, во много раз превышающее его внутреннее сопротивление. Это обеспечивает высокую линейность работы нижнего триода.

Каскад с динамической нагрузкой имеет дополнительное преимущество за счет «динамичности» нагрузки, поддерживающей постоянное напряжение на аноде нижнего триода. При равных резисторах в катодах верхнего и нижнего триода в схеме с генератором тока $G = \mu/2$, как и в схеме с динамической нагрузкой.

Выходное сопротивление этого каскада немного выше, чем каскада с динамической нагрузкой, и равно $R_{\text{вых}} = (R_i + (\mu + 1)R_k)/2$, т. е. $> R_i/2$. Но рост выходного сопротивления не важен, так как за этим каскадом стоит катодный повторитель, на который возлагается задача обеспечения низкого выходного сопротивления. Шунтирование нижнего катодного резистора немного повышает усиление по напряжению и уменьшает выходное сопротивление до величины $R_i/2$. При этом отключается местная отрицательная обратная связь по переменному току, что может привести к некоторому росту искажений. Искажения вносятся и самим конденсатором, если он электролитический не слишком высокого качества.

Второй каскад построен по схеме катодного повторителя Броски, рассмотренного в предыдущем разделе. Такой катодный повторитель имеет повышенную линейность и подавление пульсаций питающего напряжения. С помощью делителей напряжения (по два последовательно вклю-

* Айкидо — один из видов восточных единоборств.

ченных резистора сопротивлением 1 МОм в каждом каскаде) поддерживается половина напряжения питания на выходе первого каскада и на выходе второго каскада. О выборе компонентов для катодного повторителя Броски подробно написано в предыдущем разделе.

В каждом каскаде «верхние» и «нижние» триоды должны совпадать. Могут совпадать также и триоды в первом и втором каскадах. Тогда все четыре катодных резистора будут иметь одно и то же сопротивление. О выборе катодных резисторов в различных каскадах уже писалось в предыдущих разделах. Там же можно найти и таблицы с рассчитанными параметрами. Это табл. 4.7 для каскада с динамической нагрузкой и табл. 4.8 для катодного повторителя Броски. Лампы можно выбирать как *одинаковые* для обоих каскадов, так и *разные*.



Внимание.

При использовании режимов из табл. 4.7 и 4.8 при построении каскада «Айкидо» выбирайте параметры, соответствующие одному и тому же напряжению источника питания для ламп первого и второго каскадов!

Во многих случаях от двухкаскадной схемы, подобной «Айкидо», кроме высокой линейности ожидают как можно большего коэффициента усиления по напряжению и как можно меньшего выходного сопротивления. Поэтому наиболее естественным выглядит применение в первом каскаде лампы с малым рабочим анодным током, но с высоким значением коэффициента усиления (напр., 12AX7, 6Н9С), а в выходном каскаде — лампы с большим анодным током и низким внутренним сопротивлением (6Н6П, 6Н30).

Промежуточный вариант представляют лампы 6Н23П, 6Н8С. Они могут использоваться и одновременно в обоих каскадах, и только во втором или только в первом в комбинации с уже упомянутыми лампами с относительно низким и относительно высоким рабочим током анода.



Примечание.

Рекомендуем учесть особенности питания накала с целью уменьшения разности потенциалов между нитью накала и катодом (рис. 4.15).

МОЩНЫЕ ТРАНЗИСТОРНЫЕ УСИЛИТЕЛИ ТОКА

Глава содержит минимальные сведения о полупроводниках, р-п-переходах, биполярных и полевых транзисторах, необходимые для понимания принципа работы оконечного каскада лампово-транзисторного усилителя. Этот каскад является мощным транзисторным усилителем тока.

5.1. Чем отличается полупроводник от металла и диэлектрика

В отличие от ламп, где есть металлические электроды, электроны и вакуум, в котором они движутся, в полупроводниковых приборах (диодах и транзисторах) электрический ток происходит путем переноса заряда в веществе — полупроводниковом кристалле. Кристаллы характеризуются регулярным, периодическим расположением атомов в пространстве. Типичные значения периода кристаллической решетки — 0,5...0,6 нм.

Обозначение «нм» означает нанометр, т. е. одна миллиардная часть метра, или одна тысячная часть микрона. В одном кубическом сантиметре кристаллического вещества содержится примерно 10^{22} атомов. Такое число очень трудно представить нормальному человеку. Укажем для сравнения, что если бы период кристаллической решетки равнялся одному сантиметру, то куб из 10^{22} плотно упакованных ячеек имел бы размер более 100 км.

Кристаллы делятся на *металлы, полупроводники и диэлектрики*.

Как проводят ток металлы?

В металлах имеется много свободных электронов — примерно по одному свободному электрону на каждый атом. Эти электроны могут ускоряться под действием внешнего электрического поля и таким

образом могут образовывать электрический ток. Однако, электроны сталкиваются с другими электронами, изменяют свою скорость и направление движения. На движение электронов оказывают также влияние чужеродные атомы, которые всегда присутствуют в реальных кристаллах.



Примечание.

Обычные металлические проводники являются поликристаллами, т. е. состоят из множества кристаллических зерен. Например, весьма чистая алюминиевая фольга с чистотой 0,9999 (т. е. примесей меньше, чем 0,01 %) состоит из зерен размером около 1 микрона. При пересечении границ зерен скорость электронов также изменяется.

Атомы в узлах кристаллической решетки непрерывно колеблются. Амплитуда и число колебаний растут с возрастанием температуры. Когда амплитуда колебаний достигает величины, равной периоду кристаллической решетки, кристалл превращается в жидкость, т. е. плавится.

Таким образом, электрон, ускоряясь в электрическом поле, встречает на своем пути не только другие электроны, но и колеблющиеся атомы кристаллической решетки, чужеродные атомы и границы зерен в поликристаллическом материале. Как долго может двигаться электрон без столкновений и на какое расстояние он за это время может переместиться? Это расстояние называют **средней длиной свободного пробега**.

В очень чистых металлах, имеющих строение в виде **монокристалла**, т. е. имеющих единую кристаллическую решетку, при очень низких температурах длина свободного пробега может достигать величин порядка 1 см! В этой фразе слова «очень чистый» означают число примесных атомов примерно 1 примесный атом на миллиард «родных» атомов, а низкие температуры означают примерно -250°C .

В обычных металлах при комнатной температуре длина свободного пробега составляет 20—50 нм. Т. е. в реальных электрических устройствах, включая даже современные сверхбольшие интегральные схемы с технологическими нормами порядка 0,1 мкм, электрон, двигаясь от одного края проводника к другому, много раз изменяет направление и скорость своего движения. **Это и приводит к появлению электрического сопротивления, величина которого растет пропорционально длине проводника.**

С повышением чистоты металла и с понижением температуры сопротивление уменьшается. И наоборот, повышение содержания примесей и увеличение температуры приводят к возрастанию сопротивления.



Примечание.

Голубая мечта ученых, создающих сегодня основы наноэлектроники — перейти к электронным компонентам, размер которых меньше длины свободного пробега электрона, т. е. составляет примерно 10 нм. В таких устройствах многократное рассеяние электронов исчезнет, их движение будет похоже на распространение звука в воздухе или света в прозрачной среде. Звук и свет, как и электроны, имеют волновые свойства и поэтому выбраны в качестве наглядной аналогии. Проводимость резко возрастет, а сопротивление перестанет зависеть от длины проводника.

Этот экскурс в основы электронной теории твердых тел помогает понять принципиальные отличия *твердотельной*, т. е. транзисторно-диодной электроники от *вакуумной*, т. е. ламповой электроники.

Почему диэлектрики не проводят ток?

Диэлектрики отличаются от металлов тем, что при объединении атомов в кристалл не появляются свободные электроны. Все электроны находятся внутри атомов. Они не могут ускоряться под действием внешнего электрического поля. Поэтому проводимость у диэлектриков появляется лишь в двух случаях.

Первый случай — очень высокая температура. В этом случае очень небольшая часть электронов покидают атомы и могут двигаться по кристаллу, участвуя в электропроводности. Высокая температура — это многие сотни или даже тысяча градусов по Цельсию. Эти процессы обратимые: при охлаждении «свободные» электроны занимают свои места в атомах, а проводимость диэлектрика, точнее, отсутствие проводимости, восстанавливается.

Второй случай проводимости диэлектриков реализуется в сильных электрических полях. При крайне сильных электрических полях, напряженностью более 10 киловольт на сантиметр, может произойти электрический пробой диэлектрика. Имеющиеся немногочисленные свободные электроны, разогнавшись в поле до гигантских скоростей,

могут разрушить кристаллическую решетку. В кристалле навсегда остается механическое повреждение, видимое невооруженным глазом в виде трека, похожего на молнию. А молния, напомним, возникает в результате электрического пробоя атмосферы.

Металлы имеют характерный блеск, часто называемый *металлическим блеском*. Его причиной являются как раз свободные электроны: свет не может войти в среду, где есть много свободных зарядов, и поэтому отражается от нее, что и вызывает блеск. *Диэлектрики*, наоборот, *всегда прозрачны*. Свет прекрасно распространяется в диэлектриках, не встречая никаких препятствий для распространения. Прозрачны именно кристаллы диэлектриков, например, кристалл поваренной соли или алмаза. Прозрачны и однородные стеклообразные диэлектрики. Реальные диэлектрические вещества имеют поликристаллическую структуру либо вообще вид спеченных порошков (например, керамика). Имеется также многочисленные неоднородности и на поверхности. Все неоднородности рассеивают свет, поэтому такие диэлектрики имеют матовый вид.

Как проводят ток полупроводники?

Полупроводники занимают промежуточное место между металлами и диэлектриками. При температуре абсолютно нуля все электроны находятся в атомах. Проводимость отсутствует, и полупроводники неотличимы по электрическим характеристикам от диэлектриков. Но уже при нагреве до комнатной температуры в полупроводниках появляются свободные носители заряда: *электроны и дырки*.

Свободные электроны возникают при выходе электронов за пределы «родных» атомов при получении определенной порции энергии. Эту порцию энергии обычно измеряют в электрон-вольтах, сокращенно «эВ».

Один электрон-вольт — это кинетическая энергия, приобретаемая зарядом, равным заряду электрона, при разгоне между двумя точками пространства с разностью потенциалов в 1 вольт. Она равна произведению заряда электрона на разность потенциалов. Напомним, что энергия, которую получает заряд в 1 кулон (Кл) в тех же условиях равна 1 джоулю (Дж): $1 \text{ Кл} \times 1 \text{ В} = 1 \text{ Дж}$. Заряд электрона равен примерно $1,6 \times 10^{-19}$ Кл, поэтому 1 электрон-вольт — тоже весьма малая величина.

Из кристаллов кремния изготовлено примерно 90 % всех существующих в мире полупроводниковых диодов, транзисторов и микро-

схем. Для того, чтобы электрон внутри этого кристалла стал свободным, необходима энергия примерно 1 эВ. Для кристалла германия, из которого также изготавливают диоды и транзисторы (автору неизвестно, изготавливают ли из германия микросхемы), эта энергия немного меньше и составляет примерно 0,7 эВ.

Что такое «дырка»?

Появление свободного электрона приводит к возникновению «пустого места» там, где он до этого находился. Отсутствие некоторого количества зарядов в системе, содержащей неимоверно большое число отрицательных зарядов (электронов), внешне может восприниматься как появление положительных зарядов в системе нейтральных частиц. Эти пустые места, интерпретируемые как положительные заряды, и называют «дырками». Чтобы понять суть термина «дырка», представьте себе воду, в которой есть камешки и пузырьки воздуха.

Камешки под действием силы тяжести опускаются вниз. Пузырьки в этих же условиях поднимаются вверх. Можно забыть о том, что есть вода и говорить: пузырек отличается от камешка тем, что имеет отрицательную массу, потому что все тела с положительной массой падают вниз, а пузырьки поднимаются вверх. Надеюсь, читатели поняли, что камешки — это электроны, а пузырьки — это дырки.

Полупроводники n- и p-типа

Таким образом, в полупроводниках имеются положительно заряженные и отрицательно заряженные носители заряда. В чистом полупроводнике, не содержащем примесей, их числа равны: кусок полупроводника в целом нейтрален. Но его свойства можно изменить, вводя примеси. Валентность кремния и германия равна четырем. Это значит, что атом германия и кремния имеет 4 валентных электрона на внешней оболочке, которые участвуют в образовании химических связей.

Если часть «родных» атомов заменить атомами элементов с иной валентностью, ситуация сильно изменится. Введение в кристаллическую решетку вместо атома кремния иного атома с большей, чем у кремния валентностью (например, 5-валентного фосфора), приведет к появлению одного «лишнего», 5-го электрона при формировании связей между атомами. Возникнет большая, по сравнению с исходной, электронная проводимость.

Такой легированный кристалл называют *полупроводником n-типа* (от слова negative — отрицательный). Если заменить часть «родных» атомов на атомы меньшей валентности (например, трехвалентным бором), появятся пустые, незаполненные места в электронной системе кристалла, т. е. положительные дырки. Проводимость тоже возрастет, но будет не электронной, а дырочной. Такой легированный кристалл называют *полупроводником p-типа* (от слова positive — положительный).



Примечание.

Слово «часть» в данном случае означает «1 атом примеси примерно на 10 тыс. собственных атомов», т. е. даже специально легированный полупроводник часто оказывается более чистым, чем специально нелегированный металл, используемый в электронике. Обычные и даже высококачественные медные провода содержат намного больше примесей.

Если взять кусочек кремния и одну его часть легировать фосфором, а другую — бором, получим *p-n-переход*. Если к его краям приделать электрические проводники, получим полупроводниковый *диод*, который проводит ток только в одном направлении.

Вольтамперная характеристика — зависимость тока I от напряжения U — полупроводникового диода показана на рис. 5.1. Она имеет вид экспоненциальной функции

$$I = I_s(e^{qU/kT} - 1), \quad (26)$$

где $q = 1,6 \times 10^{-19}$ Кл — заряд электрона, $k = 1,38 \times 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана (К — кельвин), T — температура (в градусах Кельвина), а I_s — ток насыщения. Произведение qU — это кинетическая энергия, приобретаемая электроном (или дыркой) при движении в электрическом поле между двумя точками с разностью потенциалов U . Произведение kT определяет среднюю кинетическую энергию электрона при температуре T . Ее называют средней тепловой энергией электрона.

На рис. 5.1, а построена вольтамперная характеристика в относительных, безразмерных единицах. Напряжение выражено в qU/kT , а ток в I/I_s . При прямом смещении ($U > 0$), т. е. когда к p-области подключен плюс, а к n-области — минус от внешнего источника напряжения, ток в прямом направлении ($I > 0$) неограниченно возрастает

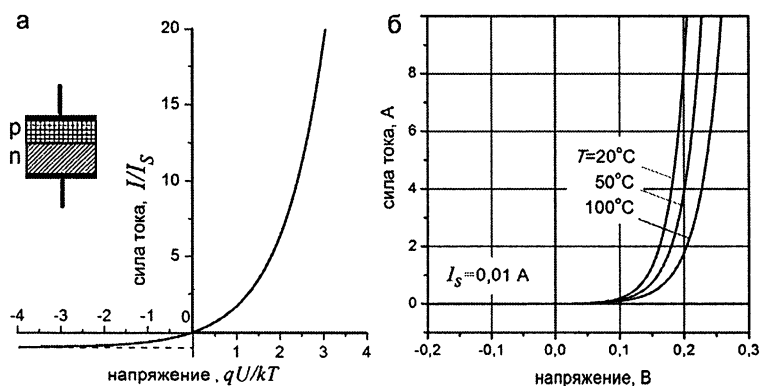


Рис. 5.1. Вольтамперные характеристики идеального полупроводникового диода: а — в относительных единицах; б — в абсолютных единицах для трех значений температуры

по экспоненциальному закону. При нулевом напряжении ток отсутствует, $I = 0$.

При обратном смещении появляется ток в обратном направлении. Экспоненциальный множитель с ростом отрицательного напряжения быстро устремляется к нулю, а сила тока стремится к постоянному значению, равному по абсолютной величине силе тока насыщения I_s .

Существование тока в обратном направлении связано с присутствием в области n-типа дырок, а в области p-типа — электронов. Дырки в области n-типа, специально легированной, чтобы создать большое количество электронов, возникают всегда при температуре выше абсолютного нуля из-за того, что незначительная часть электронов может получить от колеблющихся атомов энергию, достаточную для того, чтобы они стали свободными.

Переход каждого электрона из связанного в свободное состояние порождает одну дырку. По этой же причине в полупроводнике p-типа всегда присутствует незначительное количество электронов. Движение в электрическом поле этих, *неосновных*, носителей заряда и порождает ток в обратном направлении.

Если посчитать среднюю тепловую энергию для комнатной температуры $T = 20^\circ\text{C}$ и выразить ее в электрон-вольтах, получим величину приблизительно 27 мэВ (миллиэлектрон-вольт). Для этого необходимо перевести температуру в градусах Цельсия в градусы Кельвина по формуле $T(\text{кельвин}) = 273 + T(^{\circ}\text{C})$, затем умножить на постоянную Больцмана. Получим энергию в джоулях: $kT(293\text{K}) = 4,0 \times 10^{-21} \text{ Дж}$. Если теперь разделить это значение на заряд электрона, получим энер-

гию в электрон-вольтах. В таких единицах намного удобнее строить вольтамперные характеристики. Они представлены на рис. 5.1, б для трех значений температуры: 20 °C ($kT = 26$ мэВ), 50 °C ($kT = 30$ мэВ) и 100 °C ($kT = 34$ мэВ). Сила тока насыщения выбрана равной 10 мА.

5.2. Как работает биполярный транзистор

«Транзистор, полупроводниковый триод» — так называлась статья Джона Бардина и Уолтера Браттейна, опубликованная в 1948 г.* Предложенное ими устройство получило название от двух слов «transfer resistor», которые можно перевести как «преобразующий резистор». В 1956 году они совместно с Уильямом Шокли (W. Shokley) получили за создание транзистора Нобелевскую премию.

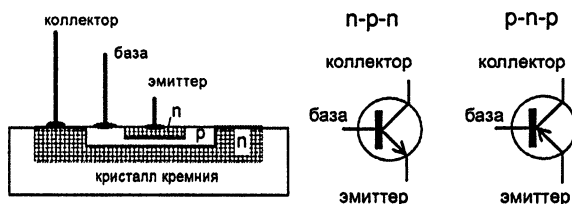


Рис. 5.2. Устройство биполярного транзистора: слева — конструкция, справа — обозначения на схемах

Чтобы получить транзистор, необходимо сделать структуру типа *p-n-p* или *n-p-n* (рис. 5.2). Такой транзистор называют **биполярным**, так как в нем работают носители заряда двух знаков: электроны и дырки. У транзистора имеется три электрода. Они называются **эмиттер**, **база**, **коллектор**.

При работе транзистора к переходу эмиттер-база прикладывают разность потенциалов, создающую прямое смещение, а к переходу база-коллектор прикладывают разность потенциалов, создающую обратное смещение. Разность потенциалов между базой и эмиттером примерно равна разности потенциалов, которая нужна, чтобы сделать

* J. Bardeen, W. Brattain, The Transistor, A Semiconductor Triode. Physical Review, 1948, v. 47, p. 230.

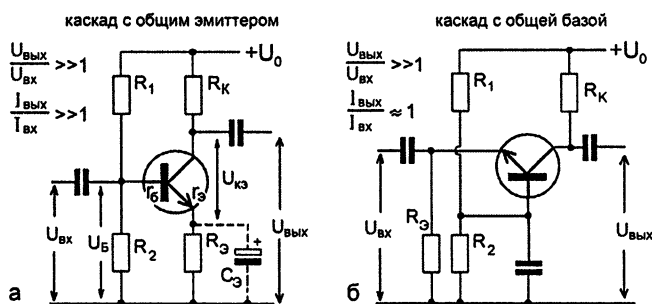


Рис. 5.3. Усилители напряжения на биполярном транзисторе:
а — схема с общим эмиттером; б — схема с общей базой

электрон в полупроводнике свободным, т. е. около 1 В для кремния и около 0,7 В для германия.

Разность потенциалов обратного смещенного перехода база-коллектор в несколько раз выше и может достигать до десятков вольт. В этом случае небольшое изменение тока через базу приведет к сильному изменению тока в цепи коллектора. То есть, полупроводниковый **биполярный транзистор усиливает малые изменения тока**. Этим он принципиально отличается от вакуумного триода, который усиливает малые изменения разности потенциалов на сетке относительно катода.

Для того, чтобы сделать усилитель напряжения на транзисторе, его включают по схеме с общим эмиттером (рис. 5.3, а), иногда по схеме с общей базой (рис. 5.4, б).

Схема с общим эмиттером

Схема с общим эмиттером похожа на схему с общим катодом в ламповой схемотехнике. Эта схема наиболее часто применяется в транзисторных конструкциях. Основной характеристикой биполярного транзистора является **статический коэффициент передачи тока в схеме с общим эмиттером $h_{21Э}$** . Буква «Э» подчеркивает, что речь идет о схеме с общим эмиттером. Цифры «1» и «2» относятся к элементам матрицы, описывающей передаточную характеристику четырехполюсника — базовой модели для расчета элементарных каскадов.

Статический коэффициент передачи тока определяется как отношение постоянного тока коллектора к постоянному току базы при заданных постоянном обратном напряжении коллектор-эмиттер и токе эмиттера I_3 задает общий ток в схеме. Он распадается

ется на ток базы I_B и ток коллектора I_K , который в $h_{21Э}$ раз больше тока базы, т. е. можно записать соотношение

$$I_Э = I_B + I_K = I_B + h_{21Э} I_B = (1 + h_{21Э}) I_B.$$

Статический коэффициент передачи тока составляет от нескольких десятков до нескольких сотен. Большие значения реализуются у мало-мощных транзисторов.



Примечание.

Часто в англоязычной технической литературе (включая справочные данные производителей транзисторов) для обозначения статического коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером вместо обозначения $h_{21Э}$ используют обозначение h_{FE} (от слов *Forward current gain in common Emitter configuration* — усиление прямого тока в схеме с общим эмиттером). В радиолюбительской литературе часто используют обозначение β .

Делитель напряжения, образованный резисторами R_1 и R_2 , задает необходимое начальное смещение на базе транзистора

$$U_B = U_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Значения этих резисторов выбирают так, чтобы протекающий через них ток был значительно (примерно в 10 раз) выше тока I_B .

Каскад с общим эмиттером является инвертирующим усилителем напряжения и тока. Коэффициент усиления по напряжению дается приближительным соотношением

$$G_{\text{НАПРЯЖ}} = -\frac{R_K}{r_Э + R_Э},$$

а коэффициент усиления по току

$$G_{\text{ТОК}} = -h_{21Э} \frac{R_K}{R_K + R_{\text{НАГРУЗКИ}}},$$

где сопротивление нагрузки ($R_{\text{НАГРУЗКИ}}$) — это входное сопротивление следующего каскада, а $r_Э$ — внутреннее дифференциальное сопротивление транзистора.

Знак минус в обоих выражениях означает изменение (инвертирование) фазы переменного тока и напряжения. Коэффициенты усиления по напряжению и по току по абсолютному значению больше 1. Для маломощных транзисторов коэффициент усиления по напряжению может составлять более 100. Произведение этих коэффициентов дает

коэффициент усиления по мощности. Подытоживая, можно сказать, что каскад с общим эмиттером обеспечивает:

- ♦ усиление по напряжению;
- ♦ усиление по току;
- ♦ усиление по мощности.

Входное сопротивление каскада R_{BX} (дифференциальное сопротивление по отношению к переменному току) не зависит от значений используемых в схеме резисторов, а определяется только собственными параметрами транзистора — коэффициентом $h_{21э}$ и внутренними дифференциальными сопротивлениями транзистора r_b и $r_э$:

$$R_{BX} = r_b + (1 + h_{21э})r_э.$$

Выходное сопротивление (дифференциальное сопротивление по отношению к переменному току) просто равно сопротивлению резистора в цепи коллектора, т. е.

$$R_{ВЫХ} = R_K.$$



Примечание.

Элементарный усилитель напряжения на одном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером, дает настолько много искажений, что усилители на одном транзисторе, как правило, никогда не используют. Этим транзисторы принципиально отличаются от ламп. На одной лампе (именно лампе, а не баллоне с двумя триодами или триодом и пентодом внутри) можно не только построить прилично звучащий усилитель напряжения в составе усилителя мощности, но даже усилитель мощности, непосредственно работающий от проигрывателя виниловых дисков с фонокорректором, от магнитофона или CD-проигрывателя на громкоговоритель мощностью около 1 Вт. Такой усилитель можно сделать на одном триоде 6С45П, на тетродах 6Э5П, 6Э6П или на пентоде 6П9.

Большие искажения элементарной схемы усилителя на одном транзисторе обусловлены нелинейностью его вольтамперных характеристик, их зависимостью от температуры транзистора и от силы протекающего сквозь него тока (рис. 5.4).

Характеристики на рис. 5.4 по своему содержанию аналогичны характеристикам гипотетического триода, показанным на рис. 4.2. Зависимость тока коллектора (рис. 5.4, левая часть) эквивалентна зави-

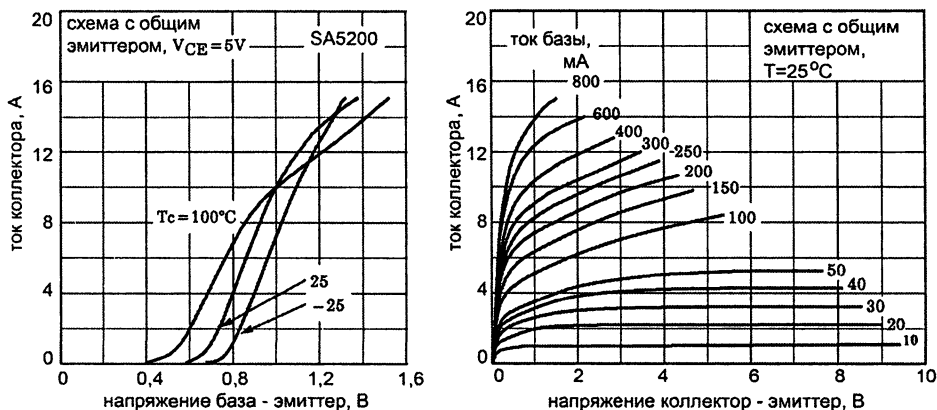


Рис. 5.4. Вольтамперные характеристики транзистора 2SC5200 («Toshiba» 1997)

симости тока анода от напряжения смещения на сетке (рис. 4.2, б). На рис. 5.4 (левая часть) четко видно, что ток коллектора начинает возрастать при приближении напряжения на базе к 1 В.

Причем, чем выше температура, тем при меньших значениях напряжения на базе начинается рост коллекторного тока. Отчетливо видно, как увеличивается нелинейность вольтамперной характеристики с ростом температуры. А теперь представьте, что транзистор нагревается в процессе работы, например, от $25^\circ C$ до $60^\circ C$. И без того нелинейный отклик дополнительно ухудшится тепловыми процессами. О том, почему электропроводность твердых тел изменяется с температурой, говорилось в предыдущем разделе: это, во-первых, возрастающее рассеяние носителей заряда на колеблющихся атомах кристаллической решетки, во-вторых, появление с ростом температуры дополнительных носителей заряда, до этого не участвовавших в процессе электропроводности.

Пара транзисторов: n-p-n-транзистор 2SC5200 японской фирмы «Toshiba» и комплементарный ему p-n-p-транзистор 2SA1943 — одни из лучших современных мощных транзисторов, которые будут использоваться нами в следующей главе для построения практических гибридных усилителей.



Примечание.

Комплементарными называют два транзистора с близкими характеристиками, но разными типами проводимости. Такие пары транзисторов специально разрабатывают для использования в

двухтактных выходных каскадах. В ламповых конструкциях компонентарность невозможна, так как не существует ламп р-типа.

Транзисторы SA5200 и SC1943 лишены одного из недостатков, присущих большому числу транзисторов, особенно тем, которые разработаны в 70—80-х годах прошлого века. *Этот недостаток — зависимость статического коэффициента передачи тока транзистора от протекающего через него тока.*

Статический коэффициент передачи тока $h_{21э}$ можно оценить по вольтамперным характеристикам, приведенным в правой части рис. 5.4. Например, видно, что при изменении тока базы от 40 до 50 мА ток коллектора изменяется примерно от 4 до 5 А. Это значит, изменение тока коллектора примерно в 100 раз больше, чем изменение тока базы, т. е. $h_{21э} = 100$.

На рис. 5.5 показана зависимость этого параметра от тока коллектора для различных температур. Действительно, при температуре 25 °С имеем $h_{21э} = 100$ при токе коллектора 0,4—4 А. Видно, что $h_{21э}$ изменяется с ростом тока, но не очень сильно, причем с ростом температуры зависимость $h_{21э}$ от тока коллектора ослабляется.

Это один из лучших показателей для транзисторов большой мощности. Но... значение $h_{21э}$ существенно возрастает с ростом температуры: примерно на 80 % при изменении температуры от 25 до 100 °С. Таким образом, опять сталкиваемся с проблемой тепловых искажений...

Сделанный нами простой анализ свойств биполярных транзисторов позволяет сформулировать следующие рекомендации по их применению в одноконтных усилителях. Во-первых, желательно, чтобы температура транзистора не изменялась сильно в процессе работы. Во-вторых, желательно, чтобы не сильно изменялся ток коллектора в процессе работы. В-третьих, температура транзистора должна быть достаточно высокой.

Все эти условия можно выполнить одновременно, если использовать работу транзистора в классе А. Ток коллектора будет большим

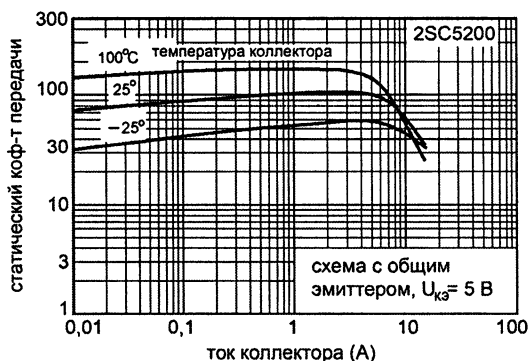


Рис. 5.5. Зависимость статического коэффициента усиления по току транзистора 2SC5200 («Toshiba», 1997 г.)

и постоянным. Температура будет высокой, а постоянство тока коллектора предотвратит разогрев транзистора в процессе работы после выхода на стационарный режим в результате прогрева.

Но режим А многократно увеличивает массу усилителя и его энергопотребление. Хорошо звучащий транзисторный усилитель массой 15—20 кг при мощности 10 Вт на канал и температуре вынесенных наружу радиаторов около 60 °С, увы, не имеет сегодня коммерческой перспективы.

Поэтому в транзисторной схемотехнике применяют обычно несколько каскадов усиления, охваченных общей отрицательной обратной связью с целью максимального уменьшения всех видов искажений. Однако, как мы видели в предыдущих разделах, подавление одних искажений с помощью ООС сопровождается появлением других искажений.

Схема с общей базой

Усилитель напряжения на одном транзисторе можно построить, включив его по схеме с общей базой (рис. 5.3, б). Такая схема имеет меньшие искажения, чем схема с общим эмиттером, однако такой усилитель имеет очень низкое входное сопротивление и поэтому нуждается в дополнительном согласующем каскаде на входе.

Схема с общей базой отдельно тоже, как правило, не используется. Однако в высококачественных многокаскадных усилителях мощности по схеме с общей базой строят каскад усиления напряжения. Так, например, построен усилитель высокой верности Николая Сухова,* его зарубежные прототипы, а также его модификация с использованием современной элементной базы Леонида Ридико.**

Мы ранее условились, что в усилителе для звуковоспроизведения, не содержащем общей отрицательной обратной связи, усилитель напряжения лучше делать на лампах, а не на транзисторах. Поэтому, не концентрируясь на транзисторных усилителях напряжения, перейдем к обсуждению усилителя тока на биполярном транзисторе. По аналогии с катодным повторителем его называют *эмиттерный повторитель*.

* Н. Е. Сухов. УМЗЧ высокой верности. «Радио», 1989, №6, с. 55—57.

** Л. Ридико. УМЗЧ ВВ на современной элементной базе с микроконтроллерной системой управления. «Радиолюбби», 2001, №5, с. 52—57.

5.3. Эмиттерный повторитель

В эмиттерном повторителе (рис. 5.6) резистор в цепи коллектора отсутствует, входной сигнал подается на базу транзистора, а выходной сигнал снимается с эмиттера. Если рассматривать эквивалентную схему каскада по отношению к переменному току, то коллектор транзистора оказывается соединенным с общим проводом, так как внутреннее сопротивление идеального источника питания можно положить равным нулю.

Поэтому, представляя, что коллектор соединен с общим проводом, эмиттерный повторитель можно назвать «каскад с общим коллектором», продолжая классификацию, введенную в предыдущем разделе (рис. 5.3), где рассматривались каскады с общим эмиттером и общей базой.

Напряжение на эмиттере выбирают приблизительно равным половине напряжения источника питания. Изменение напряжения на базе сопровождается таким же изменением напряжения на эмиттере, отсюда и название каскада «эмиттерный повторитель». Этот каскад не усиливает напряжения. Основное свойство эмиттерного повторителя состоит в том, что он усиливает ток. Это становится возможным потому, что ток эмиттера в $(1 + h_{21Э})$ раз выше тока базы.

Эмиттерный повторитель является буферным (согласующим) каскадом. Он имеет высокое входное сопротивление $R_{ВХ}$ и низкое выходное сопротивление $R_{ВЫХ}$. Значение входного сопротивления

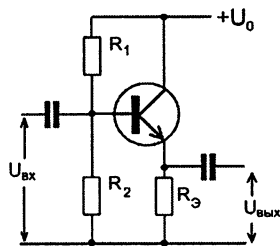


Рис. 5.6. Эмиттерный повторитель

$$R_{ВХ} = (1 + h_{21Э})(R_3 || R_{НАГРУЗКИ}) = \\ = (1 + h_{21Э}) \frac{R_3 R_{НАГРУЗКИ}}{R_3 + R_{НАГРУЗКИ}} \approx (1 + h_{21Э}) R_3$$

определяется тем, что ток базы в $(1 + h_{21Э})$ раз меньше тока эмиттера. Переменная составляющая эмиттерного тока частично ответвляется в нагрузку, подключенную через выходной конденсатор параллельно эмиттерному резистору, поэтому входное сопротивление в $(1 + h_{21Э})$ раз выше сопротивления параллельно соединенных R_3 и $R_{НАГРУЗКИ}$. Переход к приближенному равенству в этом выражении сделан в предположении, что сопротивление нагрузки, равное входному сопротивлению следующего каскада, значительно больше сопротивления R_3 .

Значение выходного сопротивления определяется как сопротивление параллельно соединенных резистора R_3 и внутреннего сопротивления транзисторных р-п-переходов. Поэтому всегда выполняется соотношение

$$R_{\text{ВЫХ}} < R_3.$$

5.4. Параллельный усилитель тока

Параллельный усилитель тока известен как минимум несколько десятилетий. В простейшей версии он состоит из четырех транзисторов и четырех резисторов (рис. 5.7). Это симметричный двухтактный каскад, содержащий две пары эмиттерных повторителей. В такой схеме существенно подавляются тепловые искажения, возникающие при резком увеличении тока через выходные транзисторы.

Фирма «National Semiconductors» в 70-х годах прошлого столетия выпускала несколько интегральных широкополосных усилителей тока малой мощности для использования в качестве буферных каскадов. Схема одного из них представлена на рис. 5.7, б. Это параллельный усилитель с возможностью раздельного питания входного и выходного каскадов. Примерно в это же время автор этой книги собирал

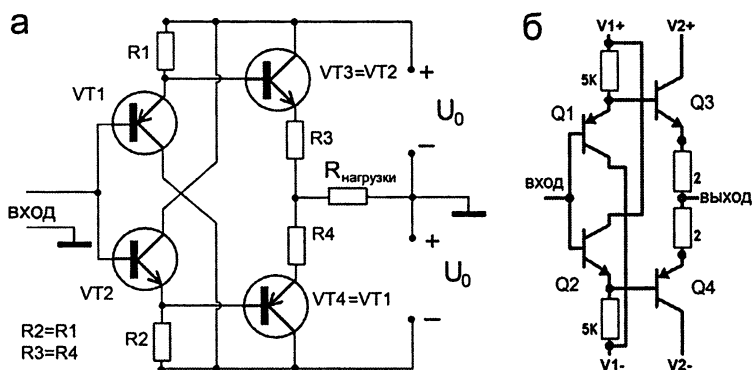


Рис. 5.7. Параллельный усилитель тока:

а — общая схема; б — схема интегрального буфера LH0002 («National Semiconductors», 1979 г.)

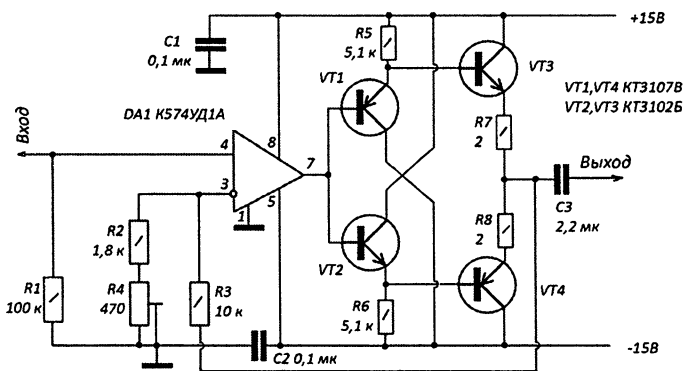


Рис. 5.8. Линейный усилитель (1984 г.)

для своего 5-канального трифонического транзисторного усилителя предварительный каскад по схеме, показанной на рис. 5.8*.

Как видно из этого рисунка, в этой схеме, предложенной Ю. Солнцевым, к выходу широкополосного интегрального операционного усилителя (ОУ) подключен параллельный усилитель тока на маломощных транзисторах с целью повышения тока, отдаваемого в нагрузку, и облегчения работы выходных каскадов ОУ. Весь усилитель в целом охвачен общей отрицательной обратной связью через резисторы R3 и R2 + R4. Сегодня более правильным представляется организация в подобной схеме ООС не с выхода параллельного усилителя, а с выхода операционного усилителя. Так построен усилитель мощности, показанный ранее на рис. 3.5.

Другими примерами использования параллельного усилителя в качестве выходного каскада маломощных усилителей могут служить схема предварительного усилителя без ООС Павла Мацуры (рис. 3.6) и схема выходного каскада одного из лучших из когда-либо выпускавшихся интегральных ОУ малой мощности — микросхемы AD797 фирмы «Analog Device» (рис. 5.9). В обоих случаях предоконечные транзисторы снабжены генераторами тока (Q4, Q7 в усилителе П. Мацуры, I5, I6 в AD797).

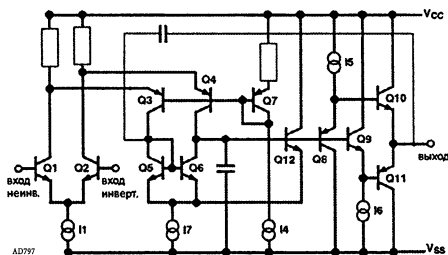


Рис. 5.9. Упрощенная схема операционного усилителя AD797 (Analog Device)

* Ю. Солнцев. Высококачественный усилитель мощности. — Радио, 1984, № 5, с. 29—34.

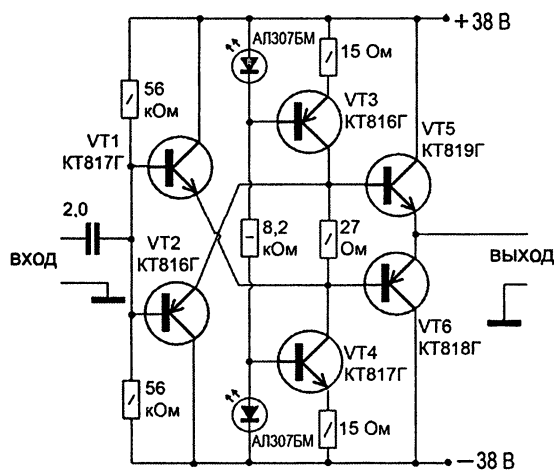


Рис. 5.10. Параллельный усилитель тока
С. Лачиняна («Радио» 2001, №4, с. 13)

из таких схем предложена С. Лачиняном (рис. 5.10). Она опубликована в 2001 г. в журнале «Радио» совместно с ламповым усилителем напряжения, который был представлен ранее (рис. 4.21). Входные транзисторы VT1, VT2 включены по симметрично компенсаторной схеме с раскачкой базовых токов оконечных транзисторов от мощных источников стабильного тока на транзисторах VT3, VT4. Усилитель имеет настолько высокие характеристики по линейности, что совместно с ламповым усилителем напряжения обеспечивает высокое качество воспроизведения без применения общей отрицательной обратной связи. Автор этой схемы приводит положительные отзывы о качестве звучания такого усилителя.

Еще один вариант мощного параллельного усилителя предложен итальянским радиоконструктором-любителем Андреа Чуффоли* (A. Ciuffoli, рис. 5.11). Этот усилитель разрабатывался в расчете на получение выходной мощности 50 Вт на нагрузке 8 Ом и 100 Вт на нагрузке 4 Ом. В отличие от схемы С. Лачиняна, здесь нет каскадов, представляющих собой источники тока, на входе установлены транзисторы высокой мощности, а выходной каскад содержит по 3 параллельно включенных комплементарных пары мощных транзисторов.

Параллельное включение выходных транзисторов привело к необходимости установки в эмиттерные цепи каждого из них резисторов сопротивлением 0,18 Ом, что следует отнести к недостаткам этой

Различными авторами предложено несколько вариантов параллельных усилителей тока, способных работать в качестве оконечного усилителя тока в высококачественных усилителях мощности без использования общей отрицательной обратной связи с выхода усилителя тока на вход предварительного усилителя напряжения. Эти схемы представляют наибольший интерес для темы настоящей книги. Одна

* <http://www.geocities.com/ResearchTriangle/8231/>

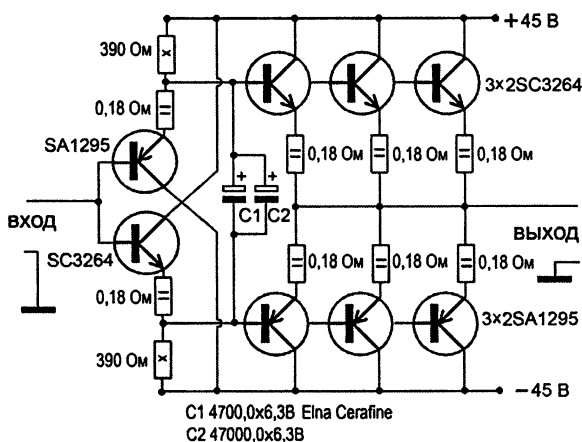


Рис. 5.11. Параллельный усилитель тока Андреа Чуффоли (1999 г.)

конструкции. Автор этой разработки, отмечая ее оригинальность, не сообщает, однако, о качестве звучания.

Задолго до схем С. Лачиняна и А. Чуффоли, в 1982—1985 гг. А. Агеев предложил усилитель мощности с выходным каскадом в виде параллельного усилителя*. Хотя усилитель мощности был охвачен общей отрицательной обратной связью, доработка параллельного усилителя в выходном каскаде заслуживает внимания (рис. 5.12). В этой схеме содержится меньше нелинейных элементов (транзисторов, а также и диодов), чем в схеме С. Лачиняна.

Роль генераторов тока для базовых цепей выходных транзисторов выполняют конденсаторы совместно с резистивными делителями. Такое включение называют «вольтодобавкой». Напряжения на конденсаторах практически не зависят от уровня сигнала и равны примерно

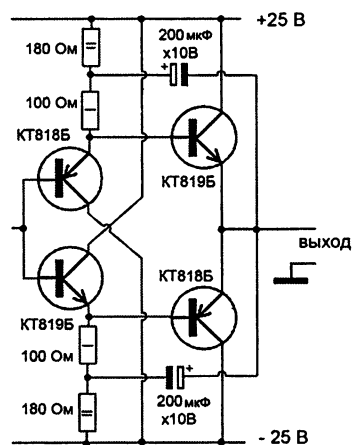


Рис. 5.12. Выходной каскад усилителя А. Агеева, выполненный в виде параллельного усилителя («Радио», 1985 г., №8). При воспроизведении схемы устранена опечатка, имевшаяся в оригинале

* А. Агеев. Усилительный блок любительского радиокомплекса. — «Радио», 1982, №8, с. 31—35; Параллельный усилитель в УМЗЧ. — «Радио», 1985 г., №8, с. 35—37.

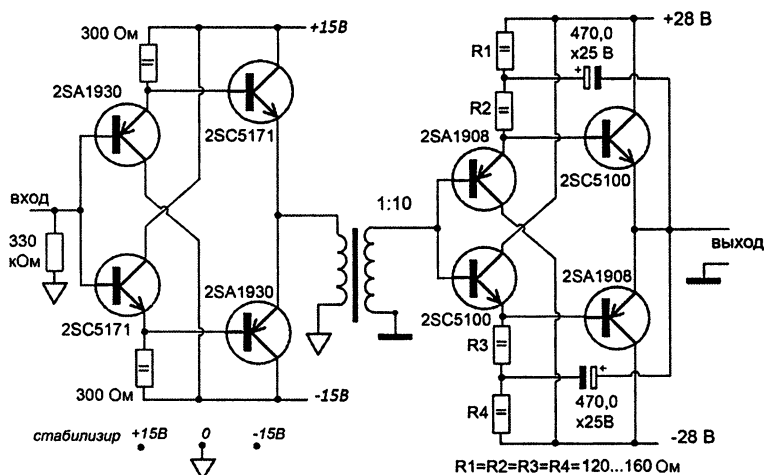


Рис. 5.13. Усилитель В. Ульянова на основе двух параллельных усилителей тока, между которыми установлен повышающий трансформатор

1/3 от 25 В. Максимальный размах выходного сигнала приближается к напряжению источника питания.

При отсутствии конденсаторов максимальный размах выходного напряжения уменьшается в два раза с ± 24 до ± 12 В, а коэффициент гармонических искажений многократно возрастает.

Такой выходной каскад позволяет получить на выходе мощность не менее 50 Вт на нагрузке 4 Ом при указанном на схеме напряжении источника питания. Номинальная мощность на нагрузке 8 Ом составляет 25 Вт при коэффициенте гармонических искажений 0,22 % и входном сопротивлении 4 кОм. Особенностью схемы, по сравнению со схемой С. Лачиняна, является применение транзисторов одинаково высокой мощности в первом и в выходном каскаде. Забегая вперед, укажем, что на основе этой схемы в следующей главе будет предложено изготовить высококачественный гибридный усилитель.

На основе четырехтранзисторного параллельного усилителя Агеева с вольтодобавкой Владимир Ульянов* предложил весьма интересный полностью твердотельный усилитель, в котором два параллельных усилителя тока связаны через повышающий трансформатор (рис. 5.13). «Изюминка» усилителя заключается в том, что усиление напряжения осуществляется пассивным компонентом — трансформатором, а не транзисторами и не лампами.

* <http://cxem.net/sound/amps/amp50.php>

Применение трансформатора позволило также отказаться от разделительного конденсатора между каскадами, а также развязать гальванически «силовую землю», к которой подключена акустическая система, и «сигнальную землю», к которой подключается источник сигнала.

Первый усилитель тока собран на транзисторах средней мощности по стандартной схеме. Он питается от стабилизированного источника напряжением ± 15 В. Второй усилитель тока собран на транзисторах высокой мощности по схеме с вольтодобавкой. Особенностью усилителя является повышающий трансформатор. Автор этой книги изготовил такой усилитель с применением рекомендованного В. Ульяновым трансформатора LL7905 шведской фирмы «Lundahl» (<http://www.lundahl.se>).

Могу подтвердить очень чистое, открытое, свободное и напористое звучание. В одном из тестов усилитель легко «переиграл» знаменитый ламповый двухтактник «QUAD» стоимостью более 2 тыс. долл. Усилители тестировались с использованием винилового проигрывателя, лампового предусилителя-корректора, входящего в комплект «QUAD», и акустических систем «Martin Logan» (электростатический СЧ-ВЧ излучатель и динамическая НЧ-головка). Транзисторный усилитель оказался явно лучше в области низких частот, по-видимому, благодаря более низкому выходному сопротивлению и 300-ваттному силовому трансформатору.

Но есть и проблемы в повторении этой конструкции.

Во-первых, рекомендованный автором трансформатор стоит почти 80 Евро, не считая стоимости пересылки и таможенной пошлины. Такая стоимость уводит эту конструкцию в ценовой диапазон, сравнимый с ламповыми одноктактниками на мощных триодах или тетроддах с заказными трансформаторами на выходе (например, от фирмы «Аудиоинструмент»).

Во-вторых, при незначительном «уходе» нулевого напряжения на выходе первого каскада трансформатор LL7905 в металлическом экране размером с коробку спичек входит в режим насыщения, что воспринимается как очень раннее ограничение сигнала при прослушивании.

Некоторые самоделщики изготавливали для этого усилителя самостоятельно повышающий трансформатор весьма значительных размеров, возможно именно из-за указанной причины. Конечно, можно установить в первом каскаде схему поддержания нуля с помощью операционного усилителя и интегратора, но преимущества от простоты и

отсутствия обратной связи в этом случае исчезают. Варианты гибридного усилителя на основе усилителя Агеева с ламповым усилителем напряжения на входе, описанные в следующей главе, вполне «конкурентноспособны» по качеству звучания с усилителем В. Ульянова, но оказываются проще и дешевле при изготовлении.

5.5. Как работает полевой транзистор

Идея создания полевого транзистора возникла в двадцатые годы прошлого века, однако реальные полевые транзисторы были изготовлены только в 60-х годах, т. е. после создания биполярных транзисторов. В полевом транзисторе нет p - n -переходов в том смысле, в котором они используются в биполярном транзисторе. В полевом транзисторе имеется *канал* — полупроводник n - или p -типа, проводимость которого изменяется при приложении напряжения к *затвору* — симметрично расположенным и электрически соединенным областям противоположного типа проводимости (рис. 5.14, левая часть).

Если канал изготовлен из материала n -типа, на исток подают «минус», а на сток «плюс» источника питания. К затвору прикладывают отрицательное напряжение относительно истока. В цепи затвор-исток ток не протекает, в отличие от биполярного транзистора, где должен обязательно течь ток на участке база-эмиттер. Разность потенциалов между затвором и истоком приводит к возникновению области объемного заряда (показана пунктиром в левой части рис. 5.14).

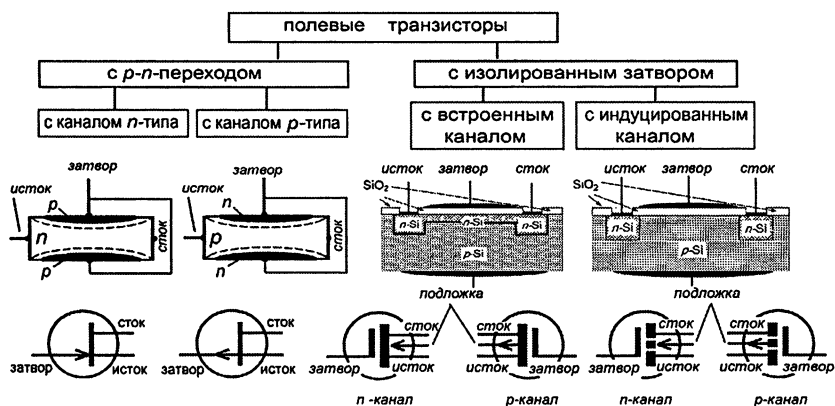


Рис. 5.14. Классификация, устройство и обозначения полевых транзисторов

Это приводит к сужению канала и уменьшению тока через него. Чем больше разность потенциалов «затвор-исток» $U_{зи}$, тем уже канал и меньше ток. При некотором значении разности потенциалов ток пропадает: сила тока обращается в ноль. Такое значение $U_{зи}$ называют *напряжением отсечки*. По-английски полевые транзисторы называют FET-transistors (сокращение от Field Effect Transistors, т. е. транзисторы на полевом эффекте).

Существуют полевые транзисторы со структурой полупроводник-диэлектрик-металл. По-русски они обозначаются как «МДП-транзисторы» (от Металл, Диэлектрик, Полупроводник), а по-английски — «MOSFET-транзисторы» от слов Metal, Oxide, Semiconductor, так как в них в качестве диэлектрика используется оксид кремния. Устройство таких транзисторов показано в правой части рис. 5.14.

Такие транзисторы называют «**полевые транзисторы с изолированным затвором**». Затвор изолирован от канала слоем оксида кремния. Канал (с типом проводимости, противоположным типу проводимости подложки) может быть как встроенным, так и индуцированным. В таком транзисторе, как видно из рис. 5.4, не три, а четыре электрода: сток, исток, затвор и подложка. На практике часто исток соединяют электрически с подложкой. Тогда остаются, как и в предыдущем случае, три электрода: исток, сток, затвор.

На рис. 5.15 показаны вольтамперные характеристики гипотетического мощного полевого транзистора с каналом p -типа. Для каждого значения напряжения затвор-исток ток стока с ростом абсолютного значения напряжения сток-исток сначала растет, а затем стремится к

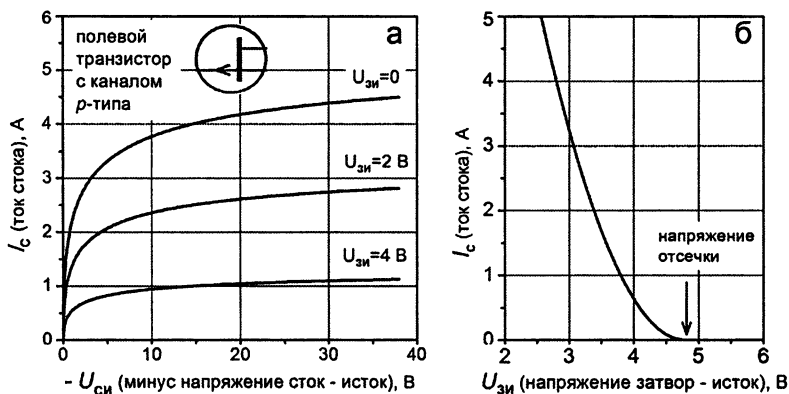


Рис. 5.15. Вольтамперные характеристики мощного полевого транзистора с каналом p -типа

постоянному значению — току насыщения. Изменение напряжения на затворе приводит к изменению тока стока.

Например, на рис. 5.15, а видно, что изменение напряжения ± 2 В на затворе относительно значения $U_{зи} = 2$ В приводит к изменению тока стока примерно от 1,1 до 4,4 А. Если в цепь стока включена нагрузка сопротивлением 8 Ом (например, головка громкоговорителя), такое изменение тока стока приведет к изменению напряжения на нагрузке от 8,8 до 35,2 В. Таким образом, полевой транзистор может использоваться для усиления напряжения. Для этого его включают *по схеме с заземленным истоком*. Такое включение аналогично схеме с общим катодом, которая рассматривалась для вакуумных триодов в главе 4 (рис. 4.4). Причем, как и в случае вакуумного триода, управление выходным сигналом осуществляется напряжением на входе каскада, а не током, как это имело место для биполярных транзисторов.

Однако сходство полевого транзистора с вакуумным триодом этим не исчерпывается. Зависимость тока стока от напряжения на затворе для полевого транзистора имеет вид *не экспоненты*, как в биполярном транзисторе, а *параболы* — как вакуумном триоде. Эта зависимость представлена на рис. 5.15, б. Она описывается формулой

$$I_{\text{СТОКА}} = I_{\text{СТОКА}}^{\text{МАКС}} \left(1 - \frac{U_{\text{ЗАТВОР-ИСТОК}}}{U_{\text{ОТСЕЧКИ}}} \right)^2.$$

Для случая, показанного на рис. 5.15, б, максимальное значение тока стока составляет $I_{\text{СТОКА}}^{\text{МАКС}} = 10$ А, поэтому насыщение тока стока с уменьшением напряжения на затворе не проявляется.

По аналогии с вакуумным триодом, полевой транзистор характеризуется *крутизной* вольтамперной характеристики S :

$$\text{крутизна} = \frac{\text{изменение тока стока}}{\text{изменение напряжения на затворе}},$$

$$S = \frac{\Delta I_{\text{СТОКА}}}{\Delta U_{\text{ЗАТВОР-ИСТОК}}}.$$

Например, для характеристики, показанной в правой части рис. 5.15, при напряжении на затворе 3 В крутизна равна приблизительно 4 А/В.

Для построения усилителя напряжения на полевом транзисторе используют схему с общим истоком (рис. 5.16, а). Она полностью аналогична схеме с общим катодом для вакуумного триода. Для усиления сходства выбран транзистор с каналом *n*-типа, для которого поляр-

ность подключения источника питания соответствует полярности для вакуумного триода.

Резистор в цепи истока необходим для создания на затворе смещения, противоположного по знаку смещению на стоке относительно истока: в точности так же, как в ламповой схеме с общим катодом. Конденсатор, подключенный параллельно этому резистору, снимает местную отрицательную обратную связь (ООС) по переменному току. Возникновение местной ООС аналогично ранее рассмотренному случаю для схемы с общим катодом (см. раздел 4.2). Нетрудно догадаться на основании приведенных выше рассуждений о связи изменения тока стока от напряжения на затворе, *что*

коэффициент усиления по напряжению в схеме с общим истоком равен произведению крутизны на сопротивление резистора в цепи стока

$$G = SR_C.$$

Показанный на рис. 5.16, б истоковый повторитель является однотактным усилителем тока на полевом транзисторе. Это аналог катодного повторителя на вакуумном триоде и эмиттерного повторителя на биполярном транзисторе, рассматривавшихся ранее в главе 4 (рис. 4.10) и в главе 5 (рис. 5.6). Выходное сопротивление истокового повторителя приблизительно равно $1/S$, а коэффициент передачи по напряжению — около 1 (истоковый повторитель):

$$R_{\text{ВЫХ}} \approx \frac{1}{S}, \quad K = \frac{SR_{\text{НАГРУЗКИ}}}{1 + SR_{\text{НАГРУЗКИ}}} \approx 0,9...0,99,$$

где *сопротивление нагрузки* — это входное сопротивление следующего за истоковым повторителем каскада. Обратите внимание, что выражение для выходного сопротивления совпадает с таковым для катодного повторителя (рис. 4.10 и формула (17) в главе 4).

Входное сопротивление каскада с большой точностью равно сопротивлению резистора, включенного между затвором и общим проводом, так как ток в цепи затвор-исток практически равен нулю. При использовании делителя из двух резисторов, включенных между положительным полюсом источника питания и общим проводом для задания смещения на затворе, входное сопротивление равно их общему сопротивлению при параллельном соединении, так как по переменному току эти резисторы будут соединены параллельно.

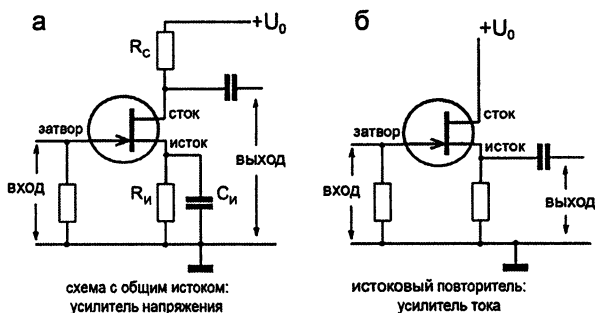


Рис. 5.16. Основные схемы включения полевого транзистора для усиления напряжения: а — усилитель напряжения; б — усилитель тока

Это связано с тем, что для переменного тока положительный полюс источника питания оказывается соединенным с общим проводом вследствие ничтожно малого сопротивления источника напряжения по переменному току.



Примечание.

Обращаю внимание, что в англоязычной литературе и в справочных данных зарубежных фирм-производителей полевых транзисторов (например, «ST Microelectronics», «International Rectifier») крутизна (по-английски *transconductance*) обозначается как g_f и измеряется не в А/В, а в сименсах. Сименс — единица электропроводности, равная 1/Ом.

В следующем разделе будут представлены практические схемы истоковых повторителей с использованием мощных полевых МДП-транзисторов. Поэтому целесообразно сначала кратко рассмотреть особенности их вольтамперных характеристик.

Рассмотрим в качестве примера транзистор с изолированным каналом на подложке *p*-типа (правая часть рис. 5.14). При отсутствии напряжения на затворе при любой полярности напряжения сток-исток тока не будет, так как в любом случае один из *p-n*-переходов будет смещен в обратном направлении. При подаче на затвор положительного напряжения относительно подложки за счет отталкивания дырок и притяжения электронов вблизи затвора возникнет проводящая область, обогащенная электронами — индуцированный канал *n*-типа.

На рис. 5.17 показаны вольтамперные характеристики такого транзистора. Зависимости тока стока от напряжения сток-исток представ-

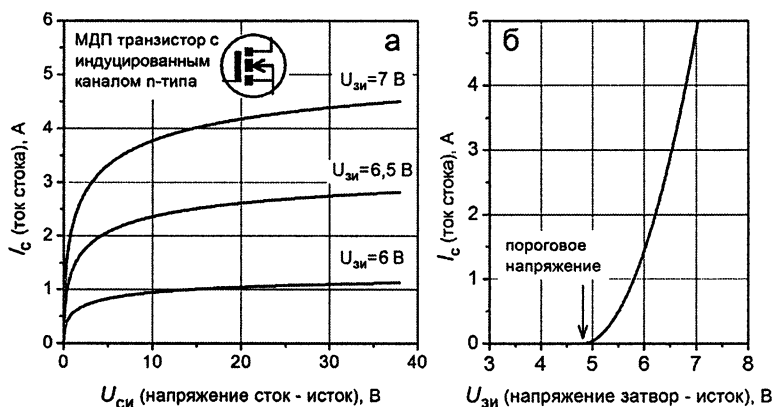


Рис. 5.17. Вольтамперные характеристики МДП-транзистора (MOSFET) с индуцированным каналом *n*-типа:

а — зависимость тока стока от напряжения сток-исток;
 б — зависимость тока стока от напряжения затвор-исток

лены на рис. 5.17, а. Эти кривые очень похожи на выходные характеристики полевого транзистора с *p-n*-переходом, но только здесь знак тока стока и напряжения на стоке совпадают. Видно, что в этом случае все потенциалы положительны. Зависимость тока стока $I_{\text{СТОКА}}$ от напряжения сток-исток $U_{си}$ представляет собой часть параболы (рис. 5.17, б)

$$I_{\text{СТОКА}} = k[(U_{зи} - U_{\text{ПОР}})U_{си} - \frac{1}{2}U_{си}^2],$$

где $U_{зи}$ — напряжение «затвор-исток», $U_{си}$ — напряжение «сток-исток», $U_{\text{ПОР}}$ — пороговое напряжение «затвор-исток», а коэффициент k , имеющий размерность A/B^2 , зависит от конструкции транзистора. Он определяет крутизну транзистора S через соотношение $S = k(U_{зи} - U_{\text{ПОР}})$, т. е. чем больше напряжение на затворе, тем выше крутизна.

Это утверждение означает, что связь между током стока и напряжением на затворе всегда *нелинейна*, так как при линейной связи крутизна кривой $I_{\text{СТОКА}}(U_{зи})$ была бы постоянна. Однако неограниченно увеличивать напряжение на затворе нельзя, так как наступит пробой оксидного промежутка (его толщина меньше 1 мкм, и разность потенциалов в 10 В при такой толщине соответствует напряженности электрического поля более 100 кВ/см). Читатели, интересующиеся более подробно применением полевых транзисторов в электронике, могут обратиться к специальной литературе, например, к книге

В. М. Немчинова и др. «Усилители с полевыми транзисторами» (М., «Советское радио», 1980).

5.6. Мощные истоковые повторители с источниками тока

В этом разделе представлено несколько практических решений по построению выходного каскада высококачественного усилителя на мощном полевом транзисторе (рис. 5.18 и рис. 5.19). Все схемы являются усилителями тока, выполненными в виде истокового повторителя на МДП-транзисторе (MOSFET) с индуцированным каналом. Все схемы относятся к классу А, т. е. характеризуются большим непрерывно потребляемым током и большой потребляемой мощностью как при наличии сигнала на входе, так и при его отсутствии, т. е. в режиме «молчания».

В отличие от простейшей схемы истокового повторителя, показанной на рис. 5.16, б, все схемы, представленные в этом разделе вместо резистора в цепи истока полевого транзистора содержат генератор стабильного тока. Генератор тока необходим для обеспечения максимальной линейности каскада.

Для всех истоковых повторителей потребляемая непрерывно мощность W_0 приблизительно равна произведению напряжения источника питания U_0 на силу тока I_0 , задаваемую генератором тока, т. е. $W_0 = U_0 I_0$. Вспомогательные цепи потребляют мощность, во много раз

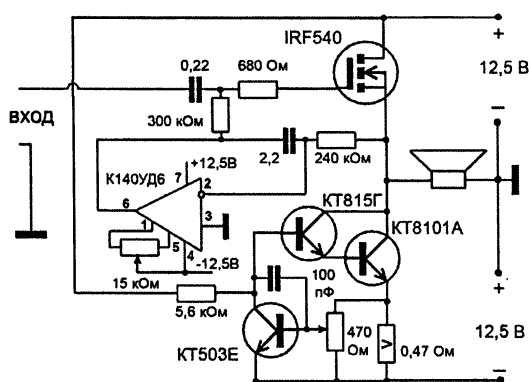


Рис. 5.18. Истоковый повторитель с генератором тока и интегратором для поддержания нулевого постоянного напряжения на выходе

меньшую мощность, потребляемой основным полевым транзистором и генератором тока. Нагрузка подключается к истоку полевого транзистора и общему проводу. Напряжение на истоке полевого транзистора $U_{\text{и}}$ относительно общего провода равно приблизительно половине напряжения источника питания, $U_{\text{и}} \approx U_0 / 2$.

Первая схема (рис. 5.18, автор И. Бондаренко*) имеет двупольарный источник питания, нагрузка подключается к его средней точке и истоку полевого транзистора. Генератор тока выполнен на составном транзисторе, образованном транзисторами КТ815Г и КТ8101А. Сила тока, протекающего в цепи исток-сток полевого транзистора, устанавливается потенциометром (470 Ом), задающим уровень напряжения на резисторе 0,47 Ом, при котором происходит открывание транзистора КТ503Е (0,7 В).

В верхнем по схеме положении движка потенциометра ток покоя равен приблизительно $0,7 \text{ В} / 0,47 \text{ Ом} = 1,5 \text{ А}$. Рекомендованное автором значение — 2,5 А. Для поддержания нулевого постоянного напряжения организована следящая обратная связь с помощью интегратора на микросхеме К140УД6. Постоянная времени интегратора задается произведением резистора сопротивлением 240 кОм на емкость конденсатора 2,2 мкФ и составляет примерно 0,5 с. Максимальная выходная мощность составляет 12 Вт на нагрузке 4 Ом.

Необходимость введения интегратора обусловлена отсутствием разделительного конденсатора между истоком транзистора и головкой громкоговорителя. Такое включение потребовало и применения двупольарного источника питания.



Примечание.

Многие уверены, что отсутствие разделительного конденсатора благотворно сказывается на звучании усилителя. Это не совсем верно. Дело в том, что в рассматриваемом случае роль разделительных конденсаторов начинают играть конденсаторы фильтра блока питания. К ним поэтому предъявляются те же требования по качеству, что и к разделительному конденсатору на выходе, если бы таковой в схеме присутствовал. Использование двупольарного источника питания оправдано в двухтактных симметричных каскадах с высоким напряжением питания. В этом случае использование двупольарного источника позволяет в два раза уменьшить рабочее напряжение конденсаторов большой емкости, имеющих весьма высокую стоимость.

* И. Бондаренко. Лампо-поле-биполярно-микросхемный безтрансформаторный УМЗЧ без ООС. «Радиолюбби», 2000, №5, с. 66.

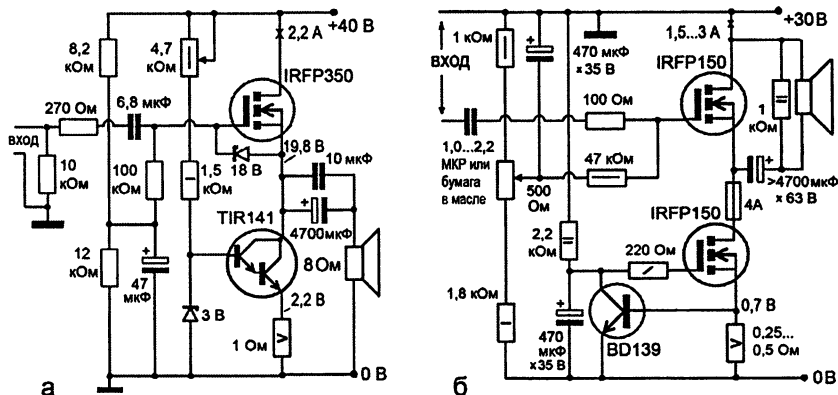


Рис. 5.19. Схемы истоковых повторителей с однополярным источником питания. Авторы: а — П. Мацура; б — А. Чифоли

На рис. 5.19 представлены два варианта мощного истокового повторителя с однополярным источником питания и разделительным конденсатором на выходе.

В схеме Павла Мацуры (Чехия) генератор тока выполнен на мощном составном транзисторе TIR141, в цепь базы которого включен стабилитрон*. Выбранный рабочий ток составляет 2,2 А. Максимальная мощность ограничивается напряжением питания, а не током. При напряжении питания 40 В максимально возможный размах выходного сигнала на нагрузке не может быть более ± 18 В, что соответствует среднеквадратичному значению переменного напряжения $18/\sqrt{2} = 12,7$ В.

Для получения максимальной выходной мощности необходимо это значение возвести в квадрат и разделить на сопротивление нагрузки. Получим 20 Вт. П. Мацура приводит близкую к этому значению реальную мощность — 17 Вт. Выходное сопротивление усилителя равно 0,16 Ом, время нарастания — 1,5 мкс. Непрерывно потребляемая мощность от источника питания $W = 40 \text{ В} \times 2,2 \text{ А} = 88 \text{ Вт}$. Эта мощность рассеивается на двух мощных транзисторах поровну.



Примечание.

Не совсем удачным следует признать использование стабилитрона в цепях, задающих значение силы тока генератора тока. Значение силы тока генератора тока определяется как напряжение стабилизации стабилитрона (3 В) минус падение напряжения

* Сайт www.pha.inetnet.cz/macura/audiopage.html (P. Macura).

на составном транзисторе (около 1 В), деленное на сопротивление резистора 1 Ом. При этом важно поддерживать правильный рабочий ток стабилитрона, следует использовать стабилитрон мощностью 0,5 Вт. В противном случае напряжение на стабилитроне может отличаться от его номинального значения.

П. Мацура приводит данные о коэффициенте нелинейных искажений (КНИ) своего истокового повторителя. При токе покоя 2 А он составляет менее 0,07 % при мощности до 6 Вт и менее 0,05 % при мощности 1 Вт. С уменьшением тока покоя до 1,4 А искажения заметно возрастают: КНИ = 0,08% при мощности 1 Вт и монотонно увеличивается до 0,5% при мощности 6 Вт. В спектре гармоник доминирует вторая гармоника.

Интересную схему мощного истокового повторителя предложил итальянский радиолюбитель-конструктор Андреа Чиффоли (А. Ciuffoli)*. Схема показана на рис. 5.19, б. Генератор тока выполнен на мощном полевом транзисторе, идентичном основному транзистору. Значение силы тока задается падением напряжения на резисторе 0,22—0,47 Ом в цепи истока нижнего по схеме транзистора. Это падение напряжения определяется напряжением открывания кремниевого биполярного транзистора BD139 и составляет 0,7 В.

Поэтому сила тока равна просто 0,7 В / (0,25—0,5 Ом) и составляет от 1,4 до 2,8 А в зависимости от значения сопротивления. В отличие от традиционного построения мощных истоковых повторителей общим проводом в схеме является не отрицательный вывод источника питания, к которому подключен исток транзистора — генератора тока, а положительный вывод, к которому подключен сток основного (верхнего по схеме) МДП-транзистора. Что это дает?

Во-первых, происходит развязка сигнальной цепи от источника питания. Сигнальная цепь при подключении сигнальной «земли» и одного из выводов громкоговорителя к положительному выводу источника питания оказывается отделенной от источника питания источником тока, имеющим в идеале бесконечно большое сопротивление.

Во-вторых, при таком включении ток, потребляемый от источника питания в режиме «молчания» и при пиковых значениях входного

* Первичная публикация в журнале «Electronics World», май 2000 г., с. 382, перепечатка в журнале «Радиолюбби» №4, 2000 г., с. 16.

сигнала, сохраняется неизменным. Это облегчает работу источника питания. С появлением входного сигнала ток через нижний по схеме транзистор, являющийся генератором тока, сохраняется неизменным (в этом и состоит его функция), а ток через верхний по схеме полевой транзистор уменьшается. И часть тока, формируемого генератором тока, ответвляется в катушку громкоговорителя.

Чем больше уровень сигнала, тем меньший ток протекает через верхний по схеме транзистор. Таким образом, усилитель будет выделять максимальное количество тепла в состоянии покоя и минимальное — при максимальной громкости звука на выходе. А.Чиффолли рекомендует использовать резисторы Caddock в сигнальном тракте (100 Ом и 47 кОм, последний резистор задает входное сопротивление) и электролитические конденсаторы ELNA Cerafine.

Максимальная мощность усилителя определяется напряжением источника питания и силой тока генератора тока. При напряжении питания 30 В она составляет 12 Вт на нагрузке 8 Ом при токе 1,6 А и 20 Вт на нагрузке 4 Ом при токе 3 А. Потребляемая мощность в 4—5 раз выше. Выходное сопротивление составляет 0,2—0,4 Ом (чем больше рабочий ток, тем ниже выходное сопротивление).

Эта схема будет предложена для повторения и описана более подробно в следующей главе. Для тех читателей, кто решит воспроизвести другие схемы истоковых повторителей настоящего раздела, напомним несколько важных советов.

Во-первых, напряжение источника питания указано под нагрузкой. Напряжение без нагрузки должно быть на 15—20 % выше.

Во-вторых, потребляемая мощность 50—90 Вт потребляется *непрерывно*, в отличие от традиционных транзисторных схем класса В или АВ, в которых мощность в режиме покоя весьма мала, а мощность при подаче звукового сигнала потребляется только во время сигнала (для музыкального сигнала средняя мощность примерно в 10 раз меньше «мгновенной» мощности). Поэтому требуется серьезный силовой трансформатор номинальной мощностью в 2—3 раза выше потребляемой мощности. Очень серьезные требования предъявляются и к радиаторам мощных транзисторов. Их площадь должна составлять приблизительно 1000 см² на один транзистор. Лучше сначала собрать макет усилителя, отрегулировать электрические и тепловые режимы, оценить качество звучания и только после этого делать окончательную сборку и изготавливать корпус.

5.7. Лирическое отступление: классическая физика в сравнении с квантовой или почему транзисторы никогда не будут звучать так, как звучат лампы

В электронной лампе между катодом и анодом находится вакуум. Электрон получает ускорение от внешнего электрического поля и движется от катода к аноду, время от времени сталкиваясь с другими электронами и вновь ускоряясь вдоль направления внешнего поля после каждого столкновения. В кристалле электрон «пробирается» сквозь невероятное количество колеблющихся «родных» и примесных ионов в кристаллической решетке. Чем выше температура, тем больше амплитуда этих колебаний. Кроме того, плотность тока в транзисторах намного выше, чем в лампах. Это значит, что электрон гораздо чаще сталкивается с другими электронами.

Если сделать температуру очень низкой, а площадь p-n-перехода — очень большой, то проблема рассеяния электронов на колебаниях решетки и ее изменения с ростом температуры и силы тока частично ослабнет. Возможно, если отказаться от кремния и перейти к другим полупроводниковым кристаллам, а также к другим легирующим примесям, можно будет дополнительно уменьшить нежелательные процессы рассеяния носителей заряда. Иными словами, для полноценной конкуренции транзисторов с лампами, по-видимому, надо ставить задачу *создания специальных транзисторов для звуковых применений*. Эта задача, однако, скорее всего, экономически невыгодна. Инвестирование в разработку новых полупроводниковых приборов и организацию их производства, по-видимому, никогда не окупится.

Однако даже если будет предпринята попытка создания нового поколения транзисторов для звуковых применений, возникнет еще одна проблема, до сих пор не обсуждавшаяся. Дело в том, что электрон в кристалле отличается от электрона в вакууме. У него уменьшается масса. Масса электрона m в соответствии со вторым законом Ньютона определяет его ускорение a под действием внешней силы F , а именно $F = ma$. Такой силой является сила $F = -eE$, действующая на заряд $-e$ в электрическом поле напряженностью E (E измеряется в единицах В/м — вольт на метр).

У электрона в кристалле масса не просто уменьшается, она перестает быть постоянной величиной и начинает зависеть от скорости. Кроме того, она может зависеть и от направления. Поэтому propor-

циональность между напряженностью поля и ускорением нарушается. Иными словами, связь между изменением скорости электрона в кристалле и внешним электрическим полем оказывается достаточно сложной. Это связано с тем, что влияние внешнего поля осуществляется на фоне уже присутствующих в кристалле полей, порождаемых ионами в узлах кристаллической решетки. Это явление не зависит от того, колеблются ионы или нет, и поэтому не зависит от температуры.

Чтобы этого избежать, необходимо снижать действующие внутри транзистора значения напряженности поля, работать при небольших значениях разности потенциалов, не выходя за пределы линейной связи между напряженностью поля и ускорением электрона. Но тогда для создания нужного ускорения катушки громкоговорителя придется применять повышающий трансформатор. Либо разрабатывать специальные низкоомные громкоговорители.

Таким образом, по-видимому, в ближайшие десятилетия во «взаимоотношениях» транзисторных и ламповых компонентов аудиотехники не следует ожидать ничего принципиально нового. С этим пессимистическим заявлением мы переходим к обсуждению практических конструкций хорошо звучащих гибридных усилителей мощности.

ПРАКТИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ ГИБРИДНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Эта глава — основная в книге. Опытные радиолюбители могут сразу начинать с нее. Здесь содержатся пошаговые рекомендации по компоновке усилителя, выбору компонентов, «секретам» монтажа и сборки, схемотехнике и практической реализации хорошо звучащих лампово-транзисторных усилителей мощностью от 10 до 100 Вт.

6.1. Две серии усилителей

Для построения высококачественных гибридных усилителей и исследования звучания различных схем и различных ламп предлагаются две серии усилителей. Они принципиально различаются типом оконечного транзисторного усилителя мощности.

Первая серия основана на четырехтранзисторном двухтактном параллельном усилителе тока, выходные транзисторы которого работают в режиме АВ. Такой усилитель может обеспечить мощность более 100 Вт на канал при соответствующих параметрах источника питания и площади радиаторов. Если в этом нет необходимости, можно ограничиться мощностью до 25 Вт на канал.

Масса такого аппарата в стереоварианте для верхнего предела мощности составляет примерно 20 кг, на нижнем пределе — до 10 кг. Этот усилитель требует особого внимания к построению входного лампового усилителя напряжения, так как параллельный усилитель тока имеет относительно небольшое входное сопротивление. Для работы совместно с этим усилителем будут предложены несколько типов ламповых усилителей, начиная от минималистских, однотриодных, и заканчивая более сложным, четырехтриодным «Айкидо».

Вторая серия выглядит значительно скромнее по своим возможностям. Это бескомпромиссный однотактный усилитель класса А на полевых транзисторах. С ним совместно может работать каждый из ламповых усилителей из предыдущей серии, а также целая серия однотриодных схем и двухтриодных схем с динамической нагрузкой. В минималистском исполнении с усилителем напряжения на одном триоде число элементов от источника сигнала до катушки громкоговорителя равно всего пяти! Этот подход наиболее близок к ламповым однотактникам. Но вариативности здесь гораздо меньше. Стереоусилитель массой более 10 кг развивает мощность около 10 Вт на канал. Повышение мощности возможно только за счет пропорционального увеличения энергопотребления, тепловыделения, площади радиаторов и массы аппарата.

6.2. Техника безопасности превыше всего

При самостоятельном изготовлении усилителей, описанных в этой главе, и винил-корректоров, описанных в следующей главе, необходимо не просто соблюдать аккуратность, а строго выполнять правила техники безопасности. Опасным для жизни является напряжение выше 36 В.

Обращаю внимание, что в транзисторной части гибридного усилителя максимальное напряжение между шинами питания составляет 50—90 В, а в ламповой — намного выше: до 350 В относительно общего провода на выходе выпрямителя до подключения нагрузки и вдвое выше между выводами вторичной обмотки трансформатора при использовании схемы выпрямителя на кенотронах.



Внимание.

Будьте внимательны при монтаже и осторожны при первом включении и наладке блоков питания!

Если вы недостаточно уверены в правильности монтажа, попросите более опытного товарища проверить или даже запустить в первый раз собранный вами усилитель. Производственные правила техники безопасности запрещают наладку и ремонт высоковольтных устройств в одиночку. Это правило следует соблюдать и в домашних условиях.

**Внимание.**

Будьте особенно внимательны с электролитическими конденсаторами большой емкости.

Они запасают большую энергию, и если в транзисторных устройствах после выключения питания конденсатор разряжается на нагрузку, образованную полупроводниковым материалом транзистора, то в ламповых конструкциях вакуумные промежутки между катодом и анодом такой возможности не обеспечивают. В результате заряд на электролитических конденсаторах в ламповых конструкциях может сохраняться в течение нескольких часов после отключения прибора от сети.

Такая же ситуация возникнет и в блоке питания транзисторного усилителя, если испытывать блок питания без нагрузки. Поэтому настоятельно рекомендуем: до окончания всех монтажных или наладочных работ шунтируйте конденсаторы блока питания транзисторной части усилителя резисторами сопротивлением примерно 20 кОм, а конденсаторы блока питания ламповой части — резисторами сопротивлением примерно 200 кОм.

**Внимание.**

Не прикасайтесь к электродам высоковольтных конденсаторов и оголенным проводам в блоке питания, не измерив предварительно напряжение на них!

Будьте осторожны при пользовании пинцетами: изолируйте полимерной трубкой (удобно пользоваться термоусадочной трубкой) или изолентой те части пинцетов, которые вы держите в руках. Будьте осторожны с длинными отвертками, с металлическими часовыми отвертками, круглогубцами «утиный нос» и другими металлическими инструментами! Изолируйте их таким же способом.

6.3. Активные и пассивные компоненты: в большом деле не бывает мелочей

Ложка дегтя портит бочку меду.

Русская пословица

В высококачественных усилителях все компоненты в равной степени важны. Надо понимать, что никакие схемотехнические трюки не скроют плохого качества компонентов. Как в пище: никакое мастерство повара и аромат соуса не скроют плохого качества и несвежести исходных продуктов. Иногда утверждают, что глубокая общая отрицательная обратная связь (ОООС) может убрать искажения, вносимые некачественными компонентами.

В уже упоминавшейся книге Д. Селфа много страниц посвящено тому, как выбор точки на схеме для снятия сигнала обратной связи, подаваемого на инвертирующий вход транзисторного усилителя, влияет на общий коэффициент гармоник. Есть в соответствии с этими рассуждениями и рекомендации брать сигнал ОООС с клеммы громкоговорителя. Однако, в отличие от Д. Селфа и других сторонников усилителей мощности с глубокой ОООС, автор этой книги убежден, что и в усилителях с ОООС не удастся скрыть полностью недостатков отдельных компонентов. Просто в усилителях с ОООС нельзя четко идентифицировать, с каким конкретно компонентом усилителя связаны недостатки звуковоспроизведения.

Силовой трансформатор

Без хорошего источника питания хорошего звучания вы не получите. Недостаточная мощность трансформатора никогда не позволит получить полноценного воспроизведения низкочастотных звуков (в них содержится основная часть мощности звукового сигнала) и ударов (для них важна передача коротких импульсов тока большой амплитуды на комплексную нагрузку).

Целесообразно максимально диверсифицировать (т. е. разделять) источники питания: транзисторной части — от ламповой, внутри транзисторной части разделять по каналам, внутри ламповой — применять отдельные трансформаторы для анодного напряжения и накальных цепей ламп. В усилителях класса А желательно обеспечивать двухкрат-

ный запас номинальной мощности силового трансформатора по сравнению с непрерывно потребляемой мощностью. В усилителях класса В (или АВ) необходимо применять силовой трансформатор мощностью в 2 раза выше, чем максимальная мощность музыкального сигнала, который вы хотели бы воспроизвести. Если есть возможность, лучше применять силовые трансформаторы с тороидальным сердечником: они создают меньше электромагнитных помех.

Выпрямитель: диоды, кенотроны

Следует тщательно отбирать диоды для источника питания транзисторной части усилителя. Рекомендуются использовать диоды Шоттки с выпрямляющим переходом металл-полупроводник либо высокочастотные диоды с выпрямляющим р-п-переходом с малым временем восстановления — т. н. «фасты» (от слова *fast* — быстрый).

Ламповые конструкции лучше питать от источника, содержащего кенотронный выпрямитель. Лишь, в крайнем случае, если нет подходящего трансформатора, или в силу жестких ограничений по массогабаритным параметрам можно применять полупроводниковые диоды, причем только высокочастотные.

Подробные рекомендации по выбору диодов содержатся далее в разделе «Чего никогда не следует делать». Рекомендации по выбору вакуумных кенотронов содержатся при описании конкретных конструкций.

Конденсаторы блока питания

Задача конденсаторов блока питания — не только подавлять пульсации, но и служить кратковременным источником энергии при воспроизведении импульсных сигналов большой амплитуды. В оконечной части аппарата — в транзисторном усилителе тока — минимальная емкость конденсаторов должна составлять 20000 мкФ на канал и может быть увеличена до 60000 мкФ и более на канал.

Необходимо выбирать электролитические конденсаторы максимально высокого качества. Это значит — без потери свойств электролита, а значит, и емкости на высоких частотах, с низким последовательным сопротивлением и малой индуктивностью. Целесообразно шунтировать электролитические конденсаторы пленочными, емкость которых составляет от 0,001 до 0,01 емкости электролитического конденсатора.

К сожалению, отечественные электролитические конденсаторы не обладают качеством, требуемым для построения высококачественных усилителей. Высококачественные электролитические конденсаторы имеют обозначения ELNA, RUBYCON, NICHICON, EPCOS, HITACHI, SANYO, RIFA, PANASONIC. Внутри этих «брендов» аудиофилами ценятся ELNA Cerafine, ELNA Silmic, RUBYCON Black Gate, RIFA PHE, PANASONIC FA, FC, HFQ.

Эти конденсаторы рекомендуются как для блоков питания транзисторной части, так и для блока питания ламповой части гибридного усилителя. Кроме того, для применения в ламповых блоках питания высокую репутацию имеют высоковольтные электролитические конденсаторы MUNDORF.



Примечание.

К сожалению, высококачественные электролитические конденсаторы очень дороги. Если ориентироваться на самое высокое качество, стоимость полного комплекта электролитических конденсаторов для усилителя может составить 100 долл. и даже более.

В качестве «бюджетного» решения можно рекомендовать конденсаторы «TEAPO» с расширением low-ESR (т. е. низкое эквивалентное последовательное сопротивление). Самый бюджетный вариант для электролитических конденсаторов:

- ♦ 80—90 % емкости формируется доступными дешевыми конденсаторами;
- ♦ 10—20 % емкости формируется дорогими качественными;
- ♦ 0,1—1 % емкости формируется пленочными (или слюдяными) максимального доступного качества.

В блоке питания ламповых усилителей напряжения перед дросселем можно применять «компьютерные» электролитические конденсаторы без шунтирования более качественными.

Разделительные конденсаторы

В качестве разделительных конденсаторов между ламповым усилителем напряжения и транзисторным усилителем тока следует использовать пленочные, слюдяные либо бумаго-масляные конденсаторы. Последние получили высокую оценку аудиофилов-ламповиков. Более всего ценятся специально производимые для Hi-End аудиоаппаратуры бумаго-масляные конденсаторы марок SOLEN и JENSEN, однако

в полном смысле слова «заоблачные» цены на них (100 долларов за 1 шт. — не предел!) вынуждают автора воздержаться от рекомендаций по их использованию в радиолюбительских конструкциях.

Более доступными по ценам являются разработанные для аудиотехники пленочные конденсаторы MultiCap, SuperCap, AuriCap, Mylar. Можно использовать и пленочные конденсаторы общего применения. Они различаются материалом диэлектрика, тип которого можно определить по маркировке:

- ♦ лавсан: FKS, PEI, MKT, MKS, ММК, MET, MEF;
- ♦ поликарбонат: FKC, MKC, KC;
- ♦ полипропилен: MKP, FKP, KP, MPR.

Наиболее высокую оценку по качеству звучания имеют полипропиленовые конденсаторы. Хорошие отзывы также получили отечественные пленочные фторопластовые конденсаторы серии ФТ, а также слюдяные серии ССГ. В этой серии существуют номиналы 0,1 мкФ и 0,2 мкФ, достаточные для работы в качестве разделительных совместно с усилителем тока на полевых транзисторах.

Наиболее доступны и дешевы отечественные пленочные конденсаторы серий К78, К73, также пригодные для работы в качестве разделительных в гибридном усилителе. И, наконец, есть многочисленные сообщения о хорошем звучании конденсаторов МБГО, МБГЧ, К40У-9, которое улучшается, если извлечь их из корпусов, поместить в пластиковые коробочки и залить герметиком.



Внимание.

Экспериментируя с подбором типа разделительного конденсатора в гибридном усилителе, помните, что на выводе конденсатора со стороны ламповой части имеется напряжение, равное половине напряжения источника питания (т. е. до 150 В!), которое может возрасти до полного напряжения источника питания (т. е. до 200—300 В!) в первые секунды после включения и отключения усилителя от сети. Дождитесь разряда конденсаторов блока питания перед заменой разделительного конденсатора!

Если транзисторная часть усилителя имеет однополярное питание, на выходе усилителя необходимо установить разделительный конденсатор емкостью примерно 5000—10000 мкФ. Его рекомендуется составить из 2—4 параллельно соединенных электролитических и пленочных конденсаторов высокого качества.

Лампы

Рекомендуется применять старые (но не бывшие в употреблении) советские или новые российские лампы тех марок, которые указаны на схемах. Их параметры подробно приводятся в приложении. Старые советские лампы имеют высокую репутацию не только у радиолюбителей-аудиофилов на постсоветском пространстве, но и за рубежом — в Европе и США.



Примечание.

Есть мнение, что ламповый ренессанс в аудиотехнике во многом стал возможен благодаря тому, что на российских предприятиях сохранилось производство ламп. Сегодня российские предприятия выпускают по заказам из-за рубежа целый ряд известных звуковых ламп, которые затем реализуются под брэндами «Electroharmonics», «Sovtek», «Tungsol» и др.

Далеко не все лампы годятся для высококачественного звуково-спроизведения. Например, не пригодны популярные в прошлом триоды 6Н1П, 6Н2П. По мнению автора, не пригоден и двойной триод 6Н23П, несмотря на его популярность.

Транзисторы

Рекомендации по транзисторам приведены при описании схем. Можно применять как зарубежные, так и отечественные (советские, российские, белорусские) биполярные и полевые транзисторы. Зарубежные производители проводят активную рекламу своей продукции и делают доступными подробные технические данные, чего, к сожалению, не скажешь про отечественных производителей.

Резисторы

Из отечественных резисторов рекомендуются резисторы МТ, ВС, С2-10, С2-29, можно применить и С2-23, и даже МЛТ, но с несколько худшим результатом. Из зарубежных — Caddock, Richen Ohm, Dale, Vishay. Не рекомендуются проволочные ПЭВ, компьютерные китайские резисторы, а также имеющиеся на наших радиорынках белые керамические резисторы неизвестного производителя мощностью от 2 до 10 Вт.

Провода

Следует избегать применения многожильных проводов за исключением тех марок, в которых каждая жила имеет собственную лаковую изоляцию. Сечение проводов должно быть больше, чем интуитивно кажется достаточным на первый взгляд. Монтаж и компоновка элементов должны быть сделаны так, чтобы проводов было как можно меньше. Подробные рекомендации по выбору проводов содержатся далее в разделе «Чего никогда не следует делать».



Примечание.

Не увлекайтесь золотыми или серебряными проводами, лучше вложите сэкономленные деньги в лампы, конденсаторы и резисторы!

Припой

Рекомендуется использовать оловянно-серебряный припой или, в крайнем случае, паять чистым оловом. Рекомендации по припою приводятся далее в разделе «Чего никогда не следует делать».

Где купить хорошие радиокомпоненты

Кроме радиорынков крупных городов, предлагающих новые, старые и бывшие в употреблении радиокомпоненты, их можно приобрести через различные сайты в сети интернет, например:

- ♦ радиокомпоненты общего назначения — <http://ru.farnell.com/>, <http://www.chipdip.ru>, <http://www.platan.ru>;
- ♦ новые и старые радиолампы — <http://www.audioinstrument.narod.ru/>, <http://istok2.com/>;
- ♦ элитные аудиокомпоненты зарубежных производителей — <http://samodelka.ru/>, <http://audiomania.ru/>.



Примечание.

Читателей с ограниченным доступом к элитным комплектующим (и по «географическим», и по финансовым причинам) хочу успокоить: при грамотном изготовлении даже повсеместное использование пленочных конденсаторов К73, К78 в качестве разделительных, а также для шунтирования доступных электролитических конденсаторов (до 1 % от емкости шунтируемого конденсатора)

и резисторов МЛТ при условии применения силового трансформатора достаточной мощности, а также ламп и транзисторов, рекомендуемых далее в этой главе, позволит вам создать аппарат, звучащий гораздо лучше 500-долларовых усилителей известных «брендов». При более тщательном подборе компонентов Вы получите звучание, не уступающее элитным аппаратам стоимостью несколько тысяч долларов США.

6.4. Особенности компоновки усилителя и монтажа

При компоновке и монтаже усилителя следует придерживаться определенных, достаточно простых и понятных правил, иначе заложенные в его концепции и схеме возможности не реализуются.



Внимание.

В без-ОООС-ных усилителях нет цепей, не влияющих на звук!

Таковыми могли бы быть вспомогательные цепи, например, переключатель входов, блок защиты от перегрева или перегрузки, блок задержки подключения нагрузки, задержки включения анодного напряжения, плавной зарядки конденсаторов источника питания, блоки индикации, дистанционного управления, но они, скорее всего, будут влиять отрицательно. Одни — за счет дополнительных контактов в звуковом тракте, другие — за счет дополнительных помех, третьи — просто за счет того, что отвлекут ваше время, силы, внимание и сбережения от создания действительно звучащего аппарата и получения удовольствия от прослушивания с его помощью любимой музыки.

Во-первых, следует максимально развести в пространстве цепи питания, сильноточные и слаботочные сигнальные цепи. Т. е. сетевой разъем, силовые трансформаторы, выходные разъемы и подходящие к ним провода, провода от конденсаторов блока питания транзисторного усилителя, анодный трансформатор, дроссель должны находиться как можно дальше от входных цепей лампового усилителя, регулятора громкости, входных разъемов и проводов, соединяющих выходные гнезда с входными цепями.

Все провода с переменным напряжением сетевой частоты должны быть свиты с периодом примерно 1 см.

Во-вторых, необходимо минимизировать длину всех проводов за счет оптимального расположения модулей и блоков. *Самыми короткими должны стать провода, идущие от регулятора громкости к сеткам ламп.* По этим проводам проходит самый слабый в усилителе сигнал. Минимально короткими и при этом с максимальным сечением (1,5—2,5 мм² для усилителя мощностью 25—100 Вт на канал) должны быть провода от электролитических конденсаторов блока питания к выходным транзисторам и от них — к выходным клеммам.

В-третьих, необходимо уделить самое пристальное внимание разводке «земли». Рекомендуются разделить слаботочную (сигнальную) и силовую «земли». Для этого в ламповом усилителе напряжения максимально компактно выполните все присоединения к общему проводу, используя в качестве земляной шины медную пластину с отводами для облегчения пайки (лучше — от какого-нибудь старого прибора), либо медный провод диаметром более 1 мм. В транзисторном усилителе тока следует применять либо медные шины, либо медный провод диаметром 1,5—1,8 мм, придерживаясь принципа «звезды» при разводке.

Центральная точка «звезды» выбирается между электролитическими конденсаторами. От нее идут два провода к выходным клеммам усилителя и один провод — к земляной шине лампового усилителя. Соединение «земли» с корпусом усилителя осуществляется только в одной точке в непосредственной близости от регулятора громкости и сеток ламп.



Внимание.

Никаких других соединений «земляных» и «общих» проводов с корпусом быть не должно! Не забывайте тщательно изолировать от корпуса «общие» контакты входных и выходных клемм!

В-четвертых, следует максимально диверсифицировать трансформаторы: в транзисторной части по каналам, в ламповой — разделять анодный и накальный трансформаторы. При этом не забудьте предусмотреть приличный запас по мощности для всех трансформаторов. Лучше — примерно в 2 раза.

В-пятых, при разводке цепей питания нельзя применять «последовательные» соединения. Например, напряжение от источника пита-

ния к транзисторам или к лампам правого и левого канала следует подавать по двум разным поводам. В крайнем случае, можно сформировать шины питания, подобно земляной шине, используя медные пластины или медный провод большого диаметра.

На рис. 6.1 и рис. 6.2 показаны примеры компоновки гибридного усилителя с использованием указанных подходов. В обоих случаях показаны отдельные по каналам тороидальные трансформаторы как наилучший вариант для блока питания транзисторной части усилителя. На рис. 6.1 представлен асимметричный вариант: все трансформаторы находятся слева, а входные цепи, регулятор громкости и входной ламповый блок — справа.



Примечание.

Обращаю внимание на экранирование входных проводов: экранирующая оплетка содержит внутри оба сигнальных провода (и «фазу», и «землю»), соединяется с сигнальной землей только с одной стороны — со стороны ламп.

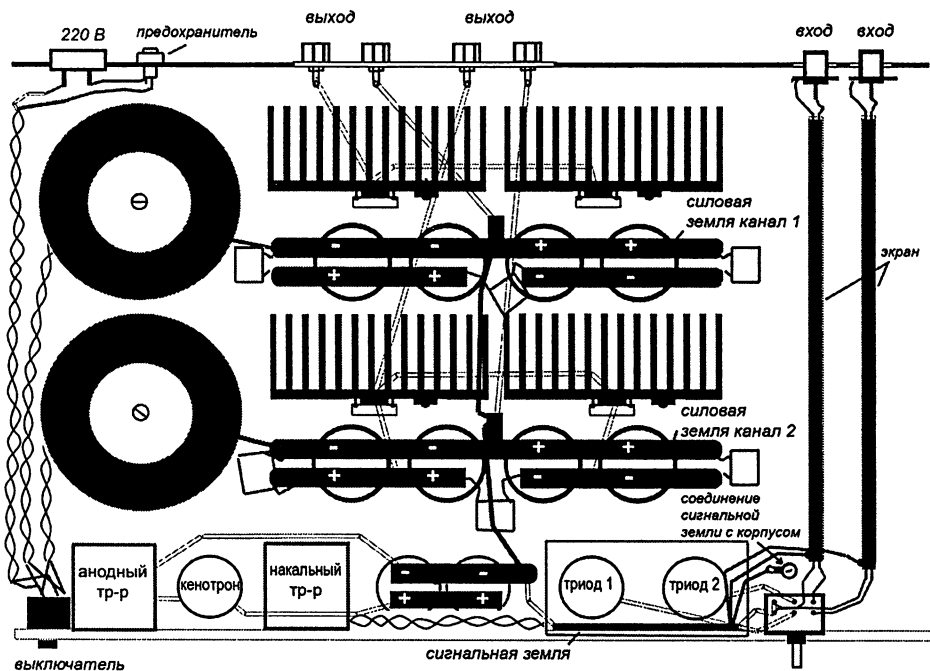


Рис. 6.1. Расположение основных модулей и элементов гибридного усилителя с асимметричной компоновкой

На рис. 6.2 показан симметричный вариант расположения компонентов.

Такой вариант приветствуется многими фирмами и радиолюбителями. В таком варианте, однако, возникает проблема разведения на достаточное расстояние сигнальных и силовых цепей. Для этого на рис. 6.2 входной ламповый усилитель и регулятор громкости приближены к входным разъемам, а ось регулятора громкости выведена за счет «удлинителя» на переднюю панель. Выходные силовоточные цепи максимально вынесены к краям усилителя. На краю находятся и подводящие сетевые провода, а силовые трансформаторы максимально приближены к передней панели усилителя.

Выбор окончательной компоновки — за вами. Отметим, что симметричный вариант исключает провода от входных гнезд к лампам, хотя, в принципе, и в асимметричном варианте можно приблизить входные триоды вместе с регулятором громкости к входным гнездам, снабдив ось регулятора громкости удлинителем. Помните, что провода, идущие от движка потенциометра, регулирующего громкость, к сеткам

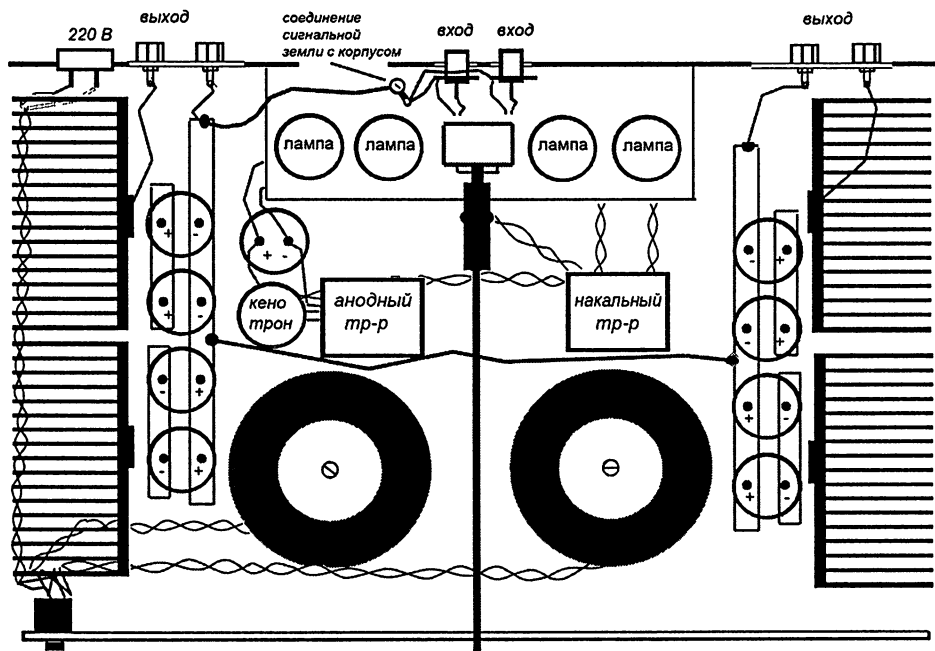


Рис. 6.2. Расположение основных модулей и элементов гибридного усилителя с симметричной компоновкой

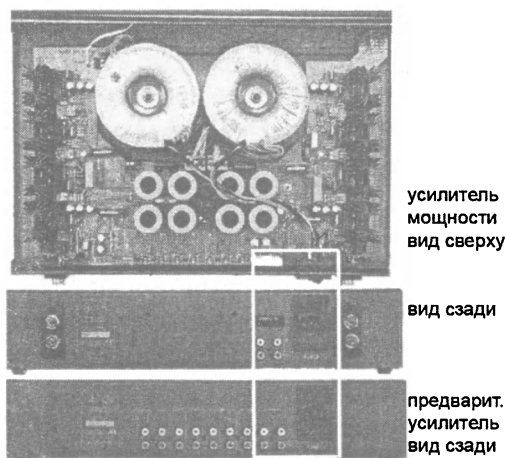


Рис. 6.3. Пример неудачной компоновки усилителя: сигнальные слаботочные цепи расположены вплотную к силовым цепям

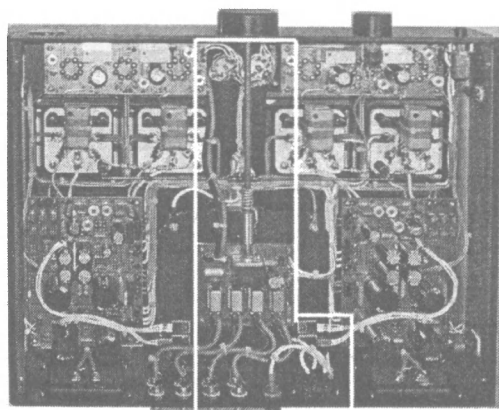


Рис. 6.4. Пример неудачной компоновки усилителя: сигнальные слаботочные цепи расположены вплотную к силовым цепям, регулятор громкости приближен к входным разъемам, но сильно удален от входного каскада

ламп должны быть самыми короткими: по этим проводам проходит самый слабый в усилителе сигнал.

На рис. 6.3 и рис. 6.4 показаны случаи отступления от приведенных очевидных и понятных правил, допущенные профессиональными разработчиками весьма недешевых транзисторных (рис. 6.3) и лампового (рис. 6.4) аппаратов.

Ошибка на рис. 6.3 — приближение входных гнезд к сетевому разъему, сетевому выключателю и предохранителю. Причем эта ошибка усугубляется тем, что предварительный и оконечный усилитель выполнены в отдельных корпусах, регулятор громкости вынесен в предварительный усилитель. В непосредственной близости от сетевых цепей питания усилителя мощности оказались провода и гнезда, передающие сигнал, ослабленный регулятором громкости!

Эта ошибка допущена как в оконечном усилителе мощности, так и в предварительном усилителе. При том, что места

внутри в обоих блоках предостаточно. Стоимость комплекта, включающего предварительный (без фоновкорректора!) и оконечный усилители, составляет 3 тыс. долл.

Ошибка разработчика усилителя, показанного на рис. 6.4, состоит в том, что регулятор громкости (японский «ALPS» стоимостью более 20 евро) максимально приближен к входным гнездам и снабжен удлини-

телем, но входные каскады усиления удалены от регулятора громкости и установлены в непосредственной близости от передней панели.

В результате проводники между движками регулятора громкости и сетками входных ламп, несущие самый слабый сигнал, оказались длинными. Следовало установить регулятор громкости на переднюю панель.

При этом отпала бы необходимость в удлинении его оси, а провод, несущий самый слабый сигнал, оказался бы по длине равным всего 2—4 см. Допущена и еще одна ошибка: входные гнезда находятся предельно близко к сетевому разъему, а некоторые из входных проводов буквально пересекаются с проводами силового питания.

6.5. Чего никогда не следует делать



Правило 1.

Нельзя использовать какие-либо детали металлического корпуса, шасси, радиаторов транзисторов в качестве токоведущих или токопроводящих элементов.

Если такая «возможность» возникает непреднамеренно, необходимо принять все меры, чтобы эту возможность исключить. Например,

- ♦ нельзя допустить соединение выходной клеммы усилителя с корпусом, даже если эта клемма соединена с общим проводом и корпус тоже соединен с общим проводом;
- ♦ нельзя допустить непреднамеренного соединения с корпусом экранирующих оплеток сигнальных проводов, а также «нулевых» («земляных») контактов входных гнезд усилителя с металлическим шасси (корпусом);
- ♦ нельзя размещать выходные «земляные» клеммы двух каналов усилителя на общей металлической панели, даже если эта панель изолирована от корпуса и шасси;
- ♦ нельзя размещать транзисторы выходных каскадов разных каналов на общих радиаторах, даже если оба канала имеют единый источник питания и коллекторы (т. е. корпуса) транзисторов подключаются к одному полюсу источника питания.

Все электрические соединения должны быть выполнены осознанно, качественно, с минимальным количеством паяк и минимальной длиной проводников.

**Правило 2.**

Нельзя использовать экранирующие оплетки в качестве токоведущих элементов.

Оплетка должна быть соединена с «общим» проводом только один раз, у входа каскада, к которому подводится сигнал с помощью экранированного провода. Это правило иллюстрируется на рис. 6.1, где в правой части усилителя показаны входные цепи от входного разъема до сетки входной лампы.

При прокладке сигнальных проводников необходимо самое серьезное **внимание уделить тем участкам, где уровень сигнала минимален**. В усилителе мощности — это участок между «движком» регулятора громкости и входом усилителя напряжения. В гибридном усилителе входом является сетка первой лампы или противоположный от сетки вывод резистора, подключенного к сетке первой лампы. Этот участок должен быть минимальной длины (2—5 см), при этом экранирование не обязательно. Идеальный вариант — распаять резистор прямо между движком потенциометра и сеткой лампы, не используя никаких проводников, кроме выводов резистора.

**Правило 3.**

Нельзя использовать «случайные», а также многожильные провода в качестве сигнальных, земляных, токоведущих в цепях питания постоянного тока.

Популярные и наиболее распространенные многожильные провода можно использовать только для питания цепей накала ламп, для питания вспомогательных и управляющих элементов, например, реле, если таковые присутствуют в цепях защиты, индикации и т. п. Их можно также использовать для подвода сетевого напряжения к первичной обмотке силового трансформатора.

Какие же провода нужно использовать?

Одножильные, медные, диаметром не менее 0,5 мм в сигнальных цепях и 1—1,8 мм в силовых цепях от вторичной обмотки трансформатора к диодам и конденсаторам фильтра питания, от них к выходным транзисторам, а от транзисторов к выходным клеммам.

Если есть возможность — применяйте провода, предназначенные для высококачественного звуковоспроизведения. Такие провода обычно изготавливают из особо чистой («бескислородной») меди.



Примечание.

Медь при соединении с кислородом образует оксид, который является плохим проводником, а точнее — хорошим полупроводником. Поэтому бескислородная медь рассматривается как более качественный проводник по сравнению с обычной медью, в которой присутствует неконтролируемое количество примеси кислорода.

Но не тратьте более 10 долл. США за 1 м одножильного провода! Скорее всего, такие вложения не оправдаются. Лучше использовать эти средства на приобретение высококачественных ламп, конденсаторов и резисторов.

Можно использовать одножильные провода телефонных кабелей, провода «витой пары», предназначенной для прокладки компьютерных сетей связи, центральные жилы высокочастотных технических кабелей, включая 75-омный телевизионный кабель.



Примечание.

При использовании центральной жилы телевизионных кабелей убедитесь в том, что она полностью медная. Существуют как индивидуальные (толщина жилы примерно 0,6 мм), так и коллективные (толщина жилы более 1,2 мм) телевизионные кабели, где жила сделана из омедненной стали! Это удешевляет кабель и, по-видимому, приемлемо для телевизионного сигнала в связи с выраженным скин-эффектом для дециметрового диапазона радиоволн. Скин-эффект (от английского «skin» — кожа) состоит в том, что с ростом частоты переменного электрического тока он распределяется все ближе и ближе к поверхности. Однако для аудиотехники стальные провода, покрытые медью, категорически запрещены! При частоте 20 кГц глубина скин-слоя равна примерно 0,5 мм, т. е. скин-эффектом в аудиотехнике можно пренебречь. Это значит, что в стальном омедненном проводе в аудиотракте носителем сигнала будет не медь, а сталь!

Можно использовать медный обмоточный провод старых звуковых и высокочастотных трансформаторов соответствующего диаметра.

тра. Желательно, чтобы все проводники имели избыточное сечение. Даже сигнальные проводники на входе не должны иметь диаметр менее 0,5 мм.

В радиолюбительской литературе приводятся рекомендации по применению в высококачественной аудиотехнике в сигнальных цепях проводов из чистого серебра или даже золота. Автор этой книги воздерживается от подобных рекомендаций ввиду значительной стоимости таких компонентов. Если есть возможность использовать серебряный провод от высокочастотных контуров радиоаппаратуры, то этим можно воспользоваться.

Однако концентрироваться на этом не следует. Личный опыт автора по применению серебряного провода для разводки «земли» и проводки сигнальных цепей показал, что смена схемотехнической парадигмы влияет на качество звучания намного сильнее, чем переход от медных к серебряным проводам.

Стоит упомянуть высказанное многими аудиофилами негативное мнение о «звучании» посеребрянного провода. Такой провод широко распространен в радиоэлектронике. В высокочастотной технике вследствие скин-эффекта он имеет преимущество по сравнению с обычным медным проводом. Однако в аудиотехнике, по-видимому, следует воздерживаться от его использования.

Хотя стандартный многожильный провод использовать не рекомендуется, следует упомянуть положительные отзывы о применении литцента — многожильного медного провода с изолированными жилами. Особенностью такого провода является многократное увеличение удельной поверхности (отношение поверхности к объему или к массе провода).

Поскольку скин-эффект в звуковом диапазоне не выражен, можно предположить, что слышимая разница в звучании обычного провода и литцента связана с тем, что качество меди в проводе вблизи поверхности и в глубине различаются.

Автор этой книги не уверен, что следует выбирать «на слух» провода. Дело в том, что очень легко услышать разницу между «плохим» и «хорошим» усилителем. «Плохой» — это усилитель с ООС, переигрывающий не самые дешевые коммерческие аппараты престижных «брендов» аудиотехники.

«Хороший» — это минималистский без-ООС-ный ламповый, гибридный или транзисторный усилитель, сделанный по описанной в этой книге правилам. Гораздо труднее охарактеризовать различия в звучании двух действительно хороших аппаратов. Каждый из них

звучит по-своему, но по-своему хорошо. Легко поставить эксперимент по «отслушиванию» плохих ламп, плохих резисторов, плохих конденсаторов в «хорошем» усилителе.

Достаточно в усилителе без ООС поочередно переставлять две лампы или два различных резистора в цепи анодной нагрузки, или два различных конденсатора в качестве разделительного (или выходного) конденсатора. Разница сразу слышна. А вот экспериментов с полной заменой проводов или полной заменой припоя в усилителях с хорошо отобранными иными компонентами, автор этой книги не проводил.

Такие эксперименты слишком «дороги». И по времени (надо сделать два одинаковых усилителя, отличающихся только проводами или только припоем) и по стоимости компонентов. Лучше сразу использовать максимально хорошие провода и максимально хороший припой, а средства на второй комплект компонентов использовать для создания подлинно новой конструкции.

Тем более, что припой и провода — отнюдь не самые дорогие компоненты в усилителе. Самыми дорогими компонентами в рамках «гибридной» парадигмы звукоусиления в звуковом тракте становятся электролитические и пленочные конденсаторы (если не считать стоимость головок громкоговорителей). Поэтому приведенные выше рекомендации по проводам и приведенные ниже рекомендации по припою, основаны не на личном опыте автора, а на советах, изложенных в разнообразных источниках другими «собратьями» по аудиофилии.



Правило 4.

Нежелательно использовать обычный оловянно-свинцовый припой. Желательно использовать припой, состоящий из олова и серебра.

Такой припой можно изготовить самостоятельно. Методика описана, например, в ж-ле «Радиолюбитель» (№4, с. 54, 1999 г.). Можно использовать в качестве источника серебра и упоминавшиеся провода высокочастотных контуров радиоприборов, и старинные монеты, имеющиеся в антикварных магазинах.

А вот ювелирное серебро применять не рекомендуется. Можно припаять припой фирмы «Waco», продающийся в некоторых аудиосалонах Москвы и Санкт-Петербурга. Автор в течение многих лет успешно применяет оловянно-серебряный припой «Konrad Electronics» (95 % олова + 5 % серебра или 95,5 % олова + 3,8 % серебра + 0,7 % меди), продающийся в европейской сети магазинов этой фирмы.

**Правило 5.**

Нельзя паять перегретым паяльником или паяльником недостаточной мощности. В обоих случаях качество паяного соединения будет неудовлетворительным.

Необходимо иметь хотя бы простейший регулятор напряжения, например, делая отводы от вторичной обмотки питающего трансформатора, либо используя регулятор мощности от бытовой, например, осветительной электроаппаратуры. Лучше всего приобрести паяльную станцию с поддержанием постоянной температуры жала паяльника.

Если в одной точке соединяются несколько проводников, необходимо паять все соединения одновременно. Если вы забыли об этом и подплавляете, скажем, пятый провод к контактному лепестку, где уже «сидят» четыре проводника, следите, чтобы припой полностью расплавился для всех соединений, а затем одновременно для всех соединений затвердел.

Лучше всего — заранее соединить все (предварительно облуженные) проводники методом «скрутки», а затем пропаять.

**Правило 6.**

Нельзя использовать разъемы. За исключением ламповых панелек, без которых невозможно обойтись.

Исключение может составить сетевой разъем для подключения к усилителю переменного напряжения 220 В. Однако можно и от него отказаться, закрепив перманентно входной сетевой кабель винтами и монтажными лепестками. Нельзя использовать пластмассовые панельки под лампы и контактные колодки или стойки с пластмассовым основанием. Панельки — только керамические, а стойки — керамические или гетинаксовые, текстолитовые.

**Правило 7.**

Никаких печатных плат! Электрическая логистика важнее ложной «красивости» печатного монтажа.

Как бы ни выглядели красиво параллельно расположенные на печатной плате резисторы с расстоянием, достаточным, чтобы написать между ними на плате их номера и номиналы, достаточно образования на уровне начальной школы, чтобы посчитать число избыточных соединений, каждое из которых потенциально вносит искажения в сигнал.

И не поможет ни высокая репутация фирмы Audio Note, использующей печатные платы в своих ламповых конструкциях, ни авторитет Джона Броски, продающего от имени журнала «Tube CAD Journal» печатные платы для своих ламповых конструкций.

Вы слышали когда-нибудь о логистике? Это наука о том, как оптимально транспортировать компоненты производственного процесса к месту производства (от электроэнергии и сырья до комплектующих деталей и работников, производящих эту продукцию), а результаты производства — к потребителю.

Представьте, что вам на велосипеде надо объехать N населенных пунктов, посетив каждый один раз. Станете ли вы накручивать красивые параллельные полосы, изящно смотрящиеся из окна иллюминатора пролетающего сверху вертолета? Если вы собрались за покупками в магазины, станете ли вы с сумками дефилировать по изящным траекториям, вместо того, чтобы использовать, пусть не параллельно идущие, но зато *кратчайшие* пути.

Так почему нам подсовывают программные продукты, изящно располагающие радиодетали параллельными рядами, а затем соединяющие их избыточными проводниками, да еще со щедрым использованием дополнительных проводов поверх печатных проводников?! Удивительно, почему такими программами пользуются профессиональные инженеры! И возникают тогда «объективистские» аргументы, что интегральный усилитель (т. е. усилитель на мощных интегральных схемах), содержащий около сотни компонентов, звучит лучше, потому что компоненты расположены компактно, а паяных соединений нет. Только стоит такой усилитель должен, как и подобает «солидному продукту» — не менее 100 долларов за ватт. На что следует такой же ответ.

Во-первых, компактно внутри диэлектрика — это значит, что возникнут приличные паразитные емкости. Смотрите формулу для расчета емкости плоского конденсатора в конце этой книги (емкость обратно пропорциональна расстоянию между двумя параллельными проводниками). И не забудьте, что диэлектрическая проницаемость ϵ изоляторов в микросхемах в несколько раз выше таковой для воздуха (для воздуха $\epsilon = 1$): емкость, как видно из той же формулы, прямо пропорциональна величине ϵ .

Во-вторых, компактно в пределах возможностей планарной технологии и ограниченного набора материалов — это значит с приличной избыточностью активных и пассивных компонентов сверх минимально необходимого их числа, из-за необходимости удовлетворения

всем ограничениям технологических процессов литографирования, легирования, травления, пассивации, металлизации поверхности кремниевого кристалла.

Для изготовления предлагаемых в этой книге аппаратов не просто нет необходимости в печатных платах, но, наоборот, есть необходимость от них отказаться ради соблюдения «электрической логики», которая заключается в минимизации числа паяных соединений и геометрической длины всех проводников.



Правило 8.

Нельзя использовать электролитические конденсаторы в сигнальном тракте. Нельзя использовать керамические конденсаторы нигде.

В сигнальном тракте, а также в блоке питания необходимо использовать пленочные (полипропиленовые или фторопластовые), слюдяные, бумаго-масляные конденсаторы. Такими конденсаторами необходимо шунтировать электролитические конденсаторы в блоках питания.

Крайне нежелательно использовать в блоке питания электролитические конденсаторы т. н. «компьютерного» качества (т. е. те, которые продаются по доступным ценам на радиорынках и у многочисленных дилеров, работающих «по звонку»). Их можно использовать только в фильтрах цепей накала, если накал питается постоянным напряжением.



Примечание.

Это правило нуждается в пояснении. Дело в том, что в аудиоусилителях практически нет «незвуковых» или «несигнальных» цепей. К таким, кроме упоминавшихся цепей накала, можно отнести только сетевой провод и первичную обмотку трансформатора. Мы не обсуждаем здесь вспомогательные блоки защиты, задержки подключения нагрузки, задержки включения анодного напряжения, плавной зарядки конденсаторов источника питания, блоки индикации, дистанционного управления и т. п., которые в этой книге не рассматриваются.*

* Существуют мощные выходные триоды прямого накала (300В, 2А3, 6С4С). Для них цепи накала являются сигнальными. Эти лампы признаны как наиболее «звучащие» и используются в качестве выходных в аппаратах «высшей наценочной категории».

**Внимание.**

Сигнальная цепь начинается от конденсаторов фильтра питания. Во-первых, в усилителях класса В или АВ задача этих конденсаторов не только устранять осцилляции сетевого напряжения частотой 100 Гц, но и обеспечивать импульсы тока питания при резких всплесках музыкального сигнала.

Во-вторых, в усилителях с двухполярным питанием и подключением нагрузки без разделительного конденсатора, разделительными становятся как раз конденсаторы блока питания.

Ослабленные требования можно применить к качеству электролитического конденсатора между кенотроном (или диодами) выпрямителя и дросселем при наличии такового в блоке питания лампового усилителя напряжения.

**Правило 9.**

Нельзя экономить на силовом трансформаторе.

Для транзисторного усилителя класса АВ мощность силового трансформатора должна более чем в 2 раза превышать максимальную полезную мощность усилителя. Лучше, если это соотношение будет равно 3—4. Для транзисторного усилителя класса А и для всех описанных в этой книге ламповых усилителей напряжения и винил-корректоров (все они работают в классе А) мощность силового трансформатора должна не менее чем в 2 раза превышать непрерывно потребляемую мощность, т. е. в 10—20 раз превышать полезную мощность усилителя.

**Совет.**

Запас в 1,5—2 раза рекомендуется иметь и по мощности трансформаторов, используемых для питания накальных цепей.

Важно диверсифицировать трансформаторы источников питания, максимально разделяя питание различных цепей. Минимальное условие: отдельный трансформатор для питания транзисторного усилителя тока, отдельный трансформатор для источника анодного питания с RC-цепями развязки для правого и левого канала, отдельный трансформатор для накала ламп.

При построении блока питания транзисторного «оконечника» можно сэкономить на емкости конденсаторов, увеличив мощность

силового трансформатора. Например, фирма «Sakura Systems» (Япония) предлагает усилитель на мощной интегральной микросхеме с силовым трансформатором 150 Вт на канал при мощности усилителя класса АВ 25 Вт на канал и емкости конденсаторов блока питания 2×1000 мкФ на канал. Стоимость такого усилителя — более 2 тыс. долл.

Рекомендация автора — сразу устанавливать для окончного транзисторного усилителя силовой трансформатор мощностью 150—300 Вт или два по 100—150 Вт, а емкость конденсаторов можно увеличивать впоследствии при эксплуатации аппарата по мере появления доступа к высококачественным конденсаторам.



Правило 10.

Нельзя использовать стандартные выпрямительные диодные мосты нигде, кроме источника питания накала ламп.

Дело в том, что диоды в этих мостиках создают высокочастотные помехи при изменении полярности приложенного к ним напряжения. В крайнем случае, использование таких мостиков возможно, если параллельно каждому диоду подключить высококачественный пленочный конденсатор емкостью 1—10 нФ.

Однако лучше всего в высоковольтном источнике анодного питания ламповых усилителей напряжения использовать кенотроны, содержащие два вакуумных диода с общим катодом, а в выпрямителе блока питания транзисторного окончного усилителя тока применить диоды Шоттки, в которых используется переход металл-полупроводник. Подходят зарубежные диоды серии QT или MBR и отечественные КД270Г, КД271Г. Можно применить т. н. «быстрые» диоды серии FR или отечественные КД213. При этом надо использовать диоды с большим запасом по допустимому току.

Рекомендуемые марки диодов и их параметры приведены в табл. 6.1 и табл. 6.2, а внешний вид показан на рис. 6.5.



Примечание.

Обращаю внимание на особенности диодов серии FR. В обозначении этих диодов первая цифра от 1 до 6 после букв указывает силу тока в амперах (от 1 до 6 А). Для питания мощного транзисторного усилителя тока рекомендуется использовать диоды с максимальным значением тока. Вторая и третья цифры (01—07) определяют максимальное напряжение: от 80 (01) до 1000 В (07).

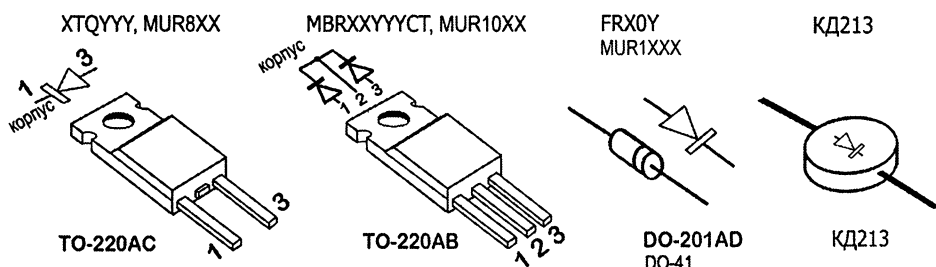


Рис. 6.5. Внешний вид рекомендуемых диодов

**Совет.**

Рекомендуется использовать диоды с максимальным напряжением более 100 В. Надо учитывать, что быстродействие диодов серии FR понижается с повышением значения максимального обратного напряжения. Диоды серий FRX01—FRX04 имеют время восстановления 150 нс (наносекунд), диоды серии FRX05 — 250 нс, а диоды серий FRX06, FRX07 — 500 нс. Таким образом, если выбраны диоды FR, следует признать оптимальным применение марок FR602, FR603, FR604 или FR502, FR503, FR504.

Для анодного питания (напряжение 200—300 В, потребляемый ток до 50 мА) целесообразно использовать вакуумные выпрямительные диоды — кенотроны, например, 6Ц5С. При их отсутствии можно использовать высоковольтные быстрые диоды серии FR или MUR (табл. 6.2). Для диодов FR первая цифра (сила тока в амперах) может быть любой от 1 до 7, а последняя цифра должна быть 6 или 7, что соответствует напряжению 800 и 1000 В. Такие диоды могут работать вместо кенотрона в двухполупериодных схемах выпрямления со средней точкой. В этой схеме максимальное обратное напряжение на диоде в $2\sqrt{2} = 2,828...$ раз превышает напряжение на каждой из двух половинок вторичной обмотки трансформатора. В случае применения мостовой схемы выпрямления могут быть использованы также диоды FR105 и FR205, а также MUR160 с максимальным обратным напряжением 600 В.

Обратите внимание, что диоды Шоттки для источников анодного напряжения непригодны из-за низкого максимального напряжения, не превышающего 100 В.

*Типы и параметры диодов для применения
в источнике питания транзисторной части гибридного усилителя*

Таблица 6.1

Марка диода	Максимальный прямой ток, А	Максимальное обратное напряжение, В	Тип корпуса
Диоды Шоттки			
8TQ80	8	80	ТО-220АС
8TQ100	8	100	ТО-220АС
КД270Г	7,5	100	ТО-220АС
МВР10100	10	100	ТО-220АС
КД271Г	10	100	ТО-220АС
МВР2080СТ*	20	80	ТО-220АВ
МВР2090СТ*	20	90	ТО-220АВ
МВР20100СТ*	20	100	ТО-220АВ
Быстрые диоды			
FR602 (FR502)	6 (5)	100	DO-201AD
FR603 (FR503)	6 (5)	200	DO-201AD
FR604 (FR504)	6 (5)	400	DO-201AD
FR605 (FR505)	6 (5)	600	DO-201AD
FR606 (FR506)	6 (5)	800	DO-201AD
FR607 (FR507)	6 (5)	1000	DO-201AD
MUR820	8	200	ТО-220АС
MUR840	8	400	ТО-220АС
MUR1010*	10	100	ТО-220АВ
MUR1020*	10	200	ТО-220АВ
КД213А	10	200	Рис. 6.5
КД213Б	10	200	Рис. 6.5
КД213В	10	200	Рис. 6.5
КД213Г	10	100	Рис. 6.5

* Только для двухполупериодных выпрямителей

*Диоды, рекомендуемые для использования
в источнике питания ламповых усилителей напряжения*

Таблица 6.2

Марка диода	Максимальный прямой ток, А	Максимальное обратное напряжение, В	Тип корпуса
FR105 (FR205)*	1 (2)	600	DO-201AD
FR106 (FR206)*	1 (2)	800	DO-201AD
FR107 (FR207)	1 (2)	1000	DO-201AD
MUR160*	1	600	DO-41
MUR180*	1	800	DO-41
MUR1100	1	1000	DO-41

*Только для мостовых выпрямителей

**Правило 11.**

«Служенье муз не терпит суеты!»

Эта цитата из стихотворения А. С. Пушкина означает следующее: **нельзя торопиться при создании высококачественной аудиотехники, нельзя ничего делать в состоянии усталости, волнения, беспокойства.** Надо все делать не спеша, аккуратно, надежно, солидно и только в состоянии творческого подъема, общего положительного тонуса. Это единственный «эзотерический» принцип, которому следует автор этой книги. Однако и он имеет в глубине своей вполне понятную техническую основу.

6.6. Начнем с конца!

Выбор оконечного усилителя тока

Создание усилителя мощности необходимо начинать с конца, т. е. с выбора схемы оконечного транзисторного усилителя тока. Затем необходимо сформулировать техническое задание (т. е. набор требований) к ламповому усилителю напряжения. При этом необходимо параллельно проводить функционально-стоимостный анализ (что реально, а что нереально в рамках семейного бюджета). К полученному результату следует применить принцип **операционального мышления**: поставленная цель должна подразумевать ее достижимость в обозримый период и доступными средствами в условиях домашней мастерской.

**Примечание.**

В этой главе предлагаются два ряда конструкций гибридных усилителей, отличающихся оконечными усилителями тока и выходной мощностью.

Первый ряд основан на мощном двухтактном параллельном усилителе тока на четырех биполярных транзисторах, образующих двухтактный усилитель мощностью от 15 до 70 Вт в зависимости от напряжения питания и сопротивления нагрузки с возможностью увеличения до 100 Вт и более при мостовом включении (при этом число компонентов удваивается).

Выходной каскад этого усилителя работает в режиме АВ с током покоя выходных транзисторов примерно 100 мА. Для совместной работы с этим выходным каскадом предлагается серия ламповых усилителей напряжения: от минималистского на одном триоде до более сложного на четырех триодах. Почти все они могут быть испытаны и отлажены с помощью одного макетного модуля.

Вторая серия усилителей основана на применении оконечного транзисторного одноктактного усилителя тока на полевом транзисторе, работающего в режиме класса А. Этот усилитель идеологически наиболее близок к эксклюзивным ламповым одноктактникам, но в несколько раз дешевле по стоимости комплектующих. Усилитель непрерывно потребляет мощность в несколько раз выше максимальной полезной мощности и примерно в 20 раз выше средней мощности звуковоспроизведения при прослушивании музыки. Выходная максимальная мощность базового варианта, как и ламповых одноктактников, составляет около 10 Вт. Ее увеличение до 20 Вт возможно при пропорциональном возрастании потребляемой мощности. Для работы совместно с этим усилителем, в дополнение ко всем ламповым усилителям первой серии, предлагается ряд упрощенных ламповых решений с учетом невысокой выходной мощности «оконечника».

6.7. Усилитель с выходным каскадом класса АВ по схеме Агеева

Описание схемы

Оконечный транзисторный усилитель тока, предложенный А. Агеевым, и ранее обсуждавшийся в главе 5 (рис. 5.12) представляет собой версию параллельного усилителя тока — одной из редких транзисторных схем, удовлетворительно работающей без применения ООС. Схема, рекомендуемая для изготовления высококачественного гибридного усилителя, показана на рис. 6.6.

Оконечный усилитель содержит четыре транзистора, шесть резисторов и два конденсатора, не считая разделительного конденсатора на входе (он входит в состав лампового усилителя напряжения), и конденсаторов блока питания.

В усилителе три канала протекания тока в режиме покоя:

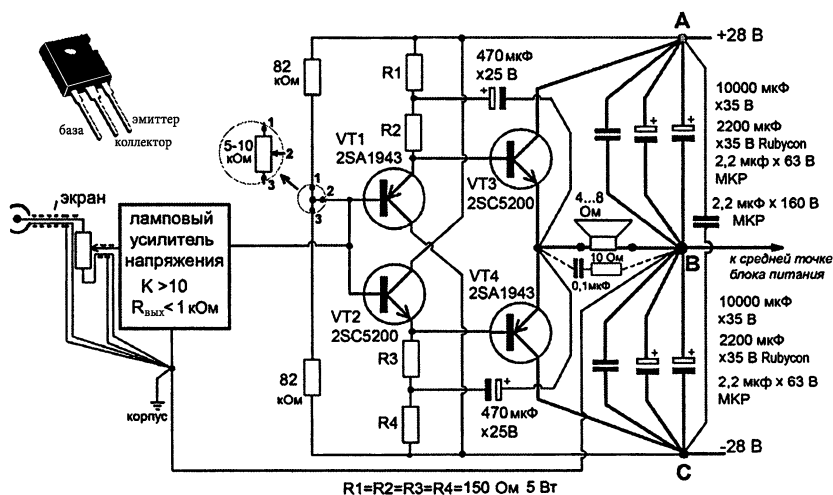
- ♦ положительный вывод источника питания, резисторы R1, R2, эмиттер-коллектор транзистора VT1, отрицательный вывод источника питания;
- ♦ отрицательный вывод источника питания, резисторы R3, R4, эмиттер-коллектор транзистора VT2, положительный вывод источника питания;
- ♦ положительный вывод источника питания, коллектор-эмиттер транзистора VT3, эмиттер-коллектор транзистора VT4, отрицательный вывод источника питания.

Ток в каждой ветви один и тот же, сила тока покоя определяется резисторами $R1 + R2 = R3 + R4$ и равна:

$$\text{Ток покоя} = \frac{U_0 - 0,7B}{R1 + R2}.$$

Здесь U_0 — половина полного напряжения питания (28 В на рис. 6.6), 0,7 В — падение напряжения на переходе база-эмиттер выходного транзистора. Условие $R1 = R2$ и $R2 = R4$ выполнять не обязательно. Просто часто бывает удобнее использовать все резисторы одного номинала и одной мощности. Можно выбирать $R1 = R4$ больше, чем $R3 = R2$, как в схеме на рис. 5.12.

Схема характеризуется относительно высоким потреблением электроэнергии и, соответственно, высоким тепловыделением в режиме покоя. Это связано с тем, что в режиме покоя потребляемая усилите-



лем мощность в 3 раза больше, чем мощность, потребляемая транзисторами выходного каскада.

Этим данная схема существенно отличается от стандартных двухтактных транзисторных усилителей класса АВ, у которых ток покоя всего усилителя (порядка 50—100 мА) практически равен току покоя выходного каскада.

При токе покоя выходного каскада 100 мА ток покоя всего усилителя составляет 300 мА, для двух каналов 600 мА, т. е. при напряжении питания ± 28 В потребляемая мощность составит примерно 33 Вт. Это надо учитывать при выборе радиаторов для транзисторов. Рекомендуемая общая площадь радиаторов составляет около 2000 см² для каждого канала.

Максимальный ток, который может протекать через выходные транзисторы, равен произведению тока покоя на коэффициент усиления транзисторов первого каскада. При токе покоя 100 мА и коэффициенте усиления транзисторов около 80 (типичное для указанных на схеме) максимальный ток составит 8 А, т. е. примерно половину от максимально допустимого значения для данных транзисторов. Это значит, что усилитель выдержит короткое замыкание в нагрузке. Поэтому *никаких цепей защиты от перегрузки не предусмотрено*. Достаточно установить предохранитель на 3—5 А на входе первичной обмотки трансформатора.

Максимальное переменное напряжение на выходе до ограничения составляет около 24 В. Это соответствует среднеквадратичному значению $24/1,414 = 17$ В, мощности около 70 Вт на нагрузке 4 Ом и около 35 Вт на нагрузке 8 Ом. Максимальная сила тока, требуемая для обеспечения такой мощности, составляет 4,25 А для 4 Ом и 2,12 А для 8 Ом, т. е. заметно меньше максимального значения тока 8 А, ограниченного коэффициентом усиления транзисторов и током входного каскада. Номинальная мощность усилителя — около 50 Вт для 4 Ом и около 25 Вт для 8 Ом.



Примечание.

Важным положительным свойством усилителя является отсутствие каких-либо переходных процессов при включении и выключении. Это свойство обусловлено исключительно отсутствием общей отрицательной обратной связи (ОООС). Все усилители с ОООС имеют запас по усилению в сотни или даже тысячи раз, поэтому в момент включения отсутствие ОООС при очень большом усилении может привести к таким переходным процессам, которые вредны не только для наших ушей, но и для акустических систем.



Внимание.
Так как в данном усилителе такие неприятные процессы отсутствуют, никаких схем задержки подключения акустических систем после включения питания не требуется.

В усилителе можно использовать транзисторы, указанные в табл. 6.3. При отборе транзисторов важно обеспечить одинаковый коэффициент усиления по току. Если важно получение предельной мощности, то выбирать надо максимальное значение коэффициента усиления по току. Для получения высокого качества звучания важно, чтобы коэффициент усиления по току имел минимальную зависимость от тока коллектор-эмиттер.

Хороший вариант — транзисторы, указанные на схеме на рис. 6.6. Характеристики этих транзисторов (одного из двух комплементарных) были представлены на рис. 5.4, рис. 5.5. К сожалению, автору не удалось отыскать подобных графиков для комплементарных пар транзисторов KT818—KT819 и KT8101—KT8102.

Сопротивление резисторов можно варьировать с целью изменения тока покоя выходного каскада. От тока покоя выходного каскада может зависеть качество звуковоспроизведения. В целом увеличение тока покоя благоприятно скажется на качестве звука, так как с ростом тока покоя увеличится диапазон мощности, в котором усилитель работает в классе А.



Примечание.
В принципе, можно подбирать номиналы (и типы) резисторов даже на слух после сборки!

Важно соблюдать симметрию их значений. Для большей мощности нужен больший ток, т. е. резисторы с более низким сопротивлением. Достижение максимальной мощности обсуждается в следующем разделе.

Комплементарные пары мощных кремниевых транзисторов, рекомендуемые для применения в параллельном усилителе тока при напряжении питания более ±25 В

Таблица 6.3

p-n-p VT1, VT4	n-p-n VT2, VT3	U _{кэ} макс	I _к макс	P _к макс
2SA1943	2SC5200	230 В	15 А	150 Вт
2SA1302	2SC3281	200 В	16 А	150 Вт
KT8102A	KT8101A	200 В	18 А	150 Вт
KT8102Б	KT8101Б	160 В	18 А	150 Вт
KT818ГМ	KT819ГМ	100 В	15А	100 Вт

Блок питания

Варианты блока питания показаны на рис. 6.7. В транзисторных усилителях мощности класса АВ стабилизированное питание не применяется. Установлено, что питание мощного выходного каскада от нестабилизированного источника обеспечивает лучшую динамику и естественность звучания.



Совет.

Рекомендуется использовать трансформаторы с большим запасом по мощности и конденсаторы фильтра максимального качества, а также диоды из числа указанных в табл. 6.1.

Простейший вариант источника питания — **мостовой выпрямитель на четырех диодах** и трансформатор с отводом от средней точки во вторичной обмотке (рис. 6.7, а). Лучше, если есть возможность использовать трансформатор с двумя вторичными обмотками и применить два мостовых выпрямителя (рис. 6.7, б). В обоих случаях после подключения фильтрующего конденсатора постоянное напряжение на выходе U_0 определяется по формуле:

$$U_0 = \sqrt{2}U_{\approx} - 2U_{\text{диод}} \approx 1,4U_{\approx} - 2 \times 0,7B,$$

где U_{\approx} — переменное напряжение на входе мостового выпрямителя; $U_{\text{диод}}$ — падение напряжения на диоде, равное приблизительно 0,7 В для кремниевого диода с р-п-переходом и несколько меньше — для диода Шоттки.

В последние годы многие радиолюбители-аудиофилы отдают предпочтение **двухполупериодным выпрямителям** (рис. 6.7, в). В таком выпрямителе используются только два диода, однако даже для однополярного источника напряжения требуется вторичная обмотка с отводом от средней точки. Для двухполярного источника напряжения, как показано на рис. 6.7, в, необходимо иметь две вторичные обмотки с отводом от средней точки (или 4 независимые обмотки, попарно соединенные последовательно). Напряжение на выходе двухполупериодного выпрямителя определяется формулой

$$U_0 = \frac{\sqrt{2}}{2}U_{\approx} - U_{\text{диод}} \approx 0,7U_{\approx} - 0,7B,$$

где U_{\approx} — суммарное переменное напряжение на вторичной обмотке ($2 \times 22 = 44$ В на рис. 6.7, в). При использовании этой схемы необхо-

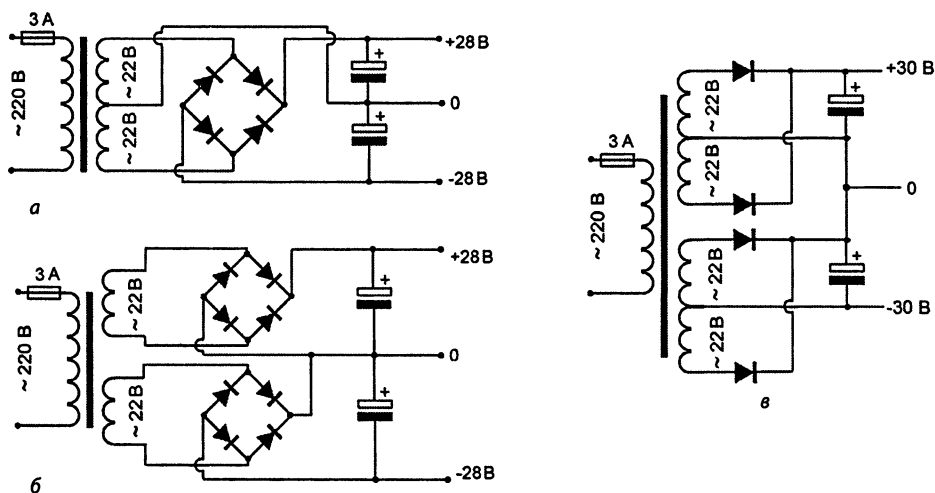


Рис. 6.7. Варианты двухполярного блока питания:

а — с одним мостовым выпрямителем; б — с двумя мостовыми выпрямителями;
в — с двумя двухполупериодными выпрямителями

димо иметь в виду, что максимальное напряжение на диодах в $\sqrt{2} = 1,41$ раза превышает напряжение U_{Σ} , что необходимо учитывать при выборе диодов. Эта особенность учтена при отборе номиналов диодов в табл. 6.1. Кроме того, в двухполупериодной схеме с отводом от средней точки накладываются повышенные требования к мощности трансформатора вследствие того, что половины вторичных обмоток отдают ток в нагрузку поочередно.



Примечание.

Двухполупериодные выпрямители широко используются в ламповых блоках питания с кенотронным выпрямителем. Для формирования анодного напряжения требуется один двойной кенотрон. Мостовые выпрямители на кенотронах используются только для формирования очень высоких напряжений (от 500 до 1000 В), для которых двухполупериодная схема со средней точкой требует нереальных допустимых напряжений катод-анод для кенотронов. Мостовая схема на кенотронах неудобна еще и тем, что в случае прямонакальных кенотронов достаточно сложно обеспечить электрическую развязку накальных и анодных цепей: необходимо иметь несколько электрически несвязанных источников накального напряжения. Мостовой кенотронный выпрямитель используется в

легендарном усилителе «Ongaku» фирмы «Audio Note» для получения анодного напряжения около 1000 В.

Небольшая историческая справка. Двухполупериодная схема выпрямителя на двух диодах со средней точкой была предложена нашим соотечественником В. Ф. Миткевичем и получила широкое распространение в отличие от позднее предложенной Лео Гретцом мостовой схемы с четырьмя диодами. До появления дешевых полупроводниковых диодов мостовая схема не пользовалась популярностью, так как дополнительные лампы в выпрямителе оказывались дороже дополнительных обмоток трансформатора.

При использовании в мостовой схеме прямонакальных кенотронов очень сложной оказывалась задача организации цепей накала. В схеме Миткевича такой проблемы нет. Мостовой выпрямитель очень часто называют в литературе схемой Гретца, а вот имя Миткевича по отношению к выпрямителю на двух диодах упомянуть забывают. Это историческое отступление сделано для того, чтобы напомнить об этом.

Автору не удалось найти в литературе обоснования преимуществ выпрямителя Миткевича по сравнению с выпрямителем Гретца, за исключением того, что противофазное включение вторичных обмоток в схеме Миткевича подавляет синфазные сетевые помехи. Можно предположить, что рекомендации по его использованию в высококачественной аппаратуре связаны просто с заимствованием в современной транзисторной аудиотехнике схемотехнических решений из ламповых конструкций прошлых лет. Поэтому радиолюбителям предлагается самим выбрать вариант выпрямителя с учетом имеющихся силовых трансформаторов, доступных диодов и изложенных выше соображений.

Самый лучший вариант для силового трансформатора — трансформатор с тороидальным сердечником. Он создает минимум электромагнитных помех, легко наматывается с помощью самодельного челнока без сборки-разборки сердечника, не создает акустических шумов и достаточно компактен. С применением тороидального трансформатора усилитель может иметь меньшую высоту, что часто приветствуется аудиофилами.

Очень удобно использовать имеющиеся на строительных рынках тороидальные трансформаторы, предназначенные для 12-вольтовых галогеновых ламп. Такие трансформаторы имеют мощность от 20 до 600 Вт. Трансформаторы мощностью 20—100 Вт имеют одну обмотку на 12 В, мощностью 150 и 200 Вт — обмотку, намотанную в два про-

вода, т. е. две обмотки по 12 В, а мощностью 300 Вт — три обмотки по 12 В. Для использования в усилителях необходимо домотать нужное количество витков, при необходимости можно вначале уменьшить число витков уже имеющихся обмоток. Примерное число витков на вольт составляет 7-8 при мощности 100 Вт, 6-7 при мощности 150—200 Вт и 5-6 при мощности 300 Вт.

Для определения точного числа витков нужно намотать примерно 10 витков и максимально точно измерить напряжение, затем сделать соответствующие расчеты. С учетом периметра одного витка и его увеличения по мере намотки рассчитайте длину провода и намотайте (с запасом) это количество провода на челнок. Можно применить провод несколько меньшего сечения, чем тот, что намотан на трансформаторе. После завершения намотки не обрезайте оставшийся провод, не измерив предварительно напряжение. Затем отмотайте или домотайте витки при необходимости.

Если нет возможности изготовить или приобрести тороидальный трансформатор, можно использовать без перемотки трансформаторы серий ТН и ТПП, указанные в главе 8. Они имеют высокую надежность и определенный запас по перегрузке. Особенно рекомендуются трансформаторы, залитые компаундом и покрашенные в зеленый цвет. Ромбики с номером в центре в дополнение к штампам «ОТК» означают военную приемку. И конечно же, опытные радиолюбители вправе рассчитать и намотать трансформатор самостоятельно.

Вариант собранного оконечного усилителя показан на рис. 6.8. В каждом канале использованы два радиатора площадью около 1000 см².



Примечание.

Необходимо выбирать радиаторы, предназначенные для естественного теплообмена с окружающей средой без применения принудительной вентиляции. Они имеют ребра или «иглы» с расстоянием примерно 1 см. Имеющиеся на радиорынках компьютерные радиаторы с расстоянием между пластинами примерно 2—3 мм при естественной конвекции не эффективны. Их использовать можно, но с поправкой на пониженную эффективность.

На каждом радиаторе, примерно в центре, установлен без применения каких-либо изоляционных прокладок один из транзисторов оконечного каскада — VT3 или VT4. Рядом с ним на этой же стороне или напротив него с противоположной стороны (можно с помощью

одного винта, сжимающего оба транзистора) *через изоляционную прокладку* устанавливается раскачивающий его транзистор первого каскада: VT1 совместно с VT3, VT2 совместно с VT4.



Внимание.

Все четыре радиатора должны быть электрически изолированы друг от друга и от корпуса.

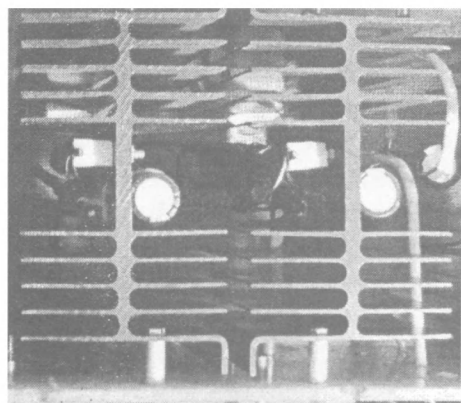
Это достигается применением в качестве несущего основания диэлектрической пластины из стеклотекстолита толщиной около 4 мм. Кроме двух транзисторов на каждом радиаторе с помощью монтажных стоек или винтов с лепестками крепятся два резистора и один конденсатор вольтодобавки (470—1000 мкФ × 25—35 В). Используйте резисторы и конденсаторы максимально высокого качества.

Таким образом, оконечный усилитель не требует никаких других монтажных элементов или плат кроме радиаторов. В непосредственной близости от радиаторов располагаются электролитические конденсаторы блока питания. Бюджетный вариант указан на рис. 6.6: конденсатор 20000—30000 мкФ «компьютерного» качества шунтируется конденсатором 1000—3000 мкФ хорошего качества и пленочным 1—4 мкФ, желательно полипропиленовым (серия МКР) или фторопластовым (серия ФТ). Конденсаторы, показанные на рис. 6.7, не требуются.

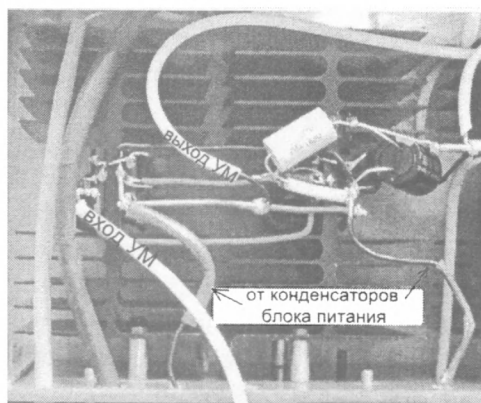
Очень важно сделать аккуратно соединения, показанные как точки А, В, С на рис. 6.6. Реально это могут быть медные шины (см. рис. 6.1, рис. 6.2) или, в крайнем случае, медный провод диаметром 1,5 мм. Затем очень важно минимизировать длину и количество проводников между транзисторами, а также между транзисторами и конденсаторами. Используйте одножильный провод диаметром около 1 мм.

Сборка и настройка

На рис. 6.8 показан один канал параллельного усилителя тока в сборе без блока питания. В блоке питания применен готовый трансформатор ТПП305. В связи с тем, что его мощность (130 Вт) не обеспечивает достаточно большого запаса, было принято решение изготовить общий блок питания на оба канала и использовать два электролитических конденсатора емкостью по 40000 мкФ. Эти конденсаторы дополнительно зашунтированы конденсаторами «Panasonic» и «Rubycon» емкостью по 2200 мкФ × 35 В. Дополнительные конденсаторы распаяны в непосред-



вид сверху



вид снизу

Рис. 6.8. Фотография одного канала выходного усилителя тока в сборе

ственной близости от транзисторов под радиаторами. Там же установлены и дополнительные пленочные конденсаторы.

Кроме того, пленочный конденсатор ($1 \text{ мкФ} \times 160 \text{ В}$) серии МКР распаян между положительной и отрицательной шинами источника питания. Четыре обмотки трансформатора по 20 В (без нагрузки — по 24 В) использованы для получения двуполярного выпрямленного напряжения $\pm 29 \text{ В}$ (без нагрузки около $\pm 33 \text{ В}$) по двухполупериодной схеме выпрямления с использованием в каждом плече двух диодов Шоттки в одном корпусе MBR2010. Забегая вперед, укажем, что полный усилитель со всеми элементами, включая и ламповую часть, показан далее на рис. 6.21.

На входе первичной обмотки желательно применить простейший LC фильтр высокочастотных помех: пропустить каждый из двух сетевых проводов через ферритовое кольцо, сделав 1-2 витка, а параллельно первичной обмотке трансформатора подключить конденсатор 1—3 нФ (пленочный) на напряжение 1000 В. В крайнем случае можно ограничиться только конденсатором.

Усилитель практически не требует настройки. До первого включения напряжения питания необходимо лишь убедиться в правильности монтажа. Заранее надо проверить правильность напряжений на выходе источника питания. Затем, подключив напряжение питания, без подключения нагрузки к выходу усилителя необходимо убедиться в отсутствии постоянного напряжения на выходе. Оно не должно быть более 30 мВ.

Далее подключают громкоговоритель и повторяют измерение напряжения на выходе. Если напряжение на выходе заметно превы-

шает 30 мВ (это бывает при разбросе коэффициентов усиления транзисторов и сопротивлений резисторов) можно, хотя и нежелательно, воспользоваться потенциометром 4,7—10 кОм для регулировки нулевого потенциала на выходе, включив его на входе усилителя, как показано на рис. 6.6. После установки нулевого напряжения на выходе и проверки его стабильности после прогрева транзисторов (5—10 мин.) желательно вместо потенциометра и постоянных резисторов (82 кОм) впаять два резистора нужного номинала. Работоспособность усилителя можно проверить, подключив на вход усилителя сигнал от CD-проигрывателя. Лучше сразу на два канала.

Вы услышите не очень громкий, но очень нейтральный и чистый звук. После этого, вспоминая заповедь Гиппократы («Не навреди!»), можете приступить к построению лампового усилителя напряжения. Усилитель напряжения одновременно с нужным уровнем мощности добавит в звучание усилителя жизненности, напора, динамики.



Внимание.

При испытании собранного усилителя тока не забудьте, что напряжение от источника музыкального сигнала нужно подавать через разделительный пленочный конденсатор емкостью примерно 4 мкФ, рассчитанный на напряжение до 63 В. В окончательном варианте единственный в схеме полного гибридного усилителя разделительный конденсатор устанавливается в непосредственной близости к лампе в усилителе напряжения.

Этот конденсатор показан далее на всех вариантах схем ламповых усилителей напряжения. Он должен быть рассчитан на напряжение не ниже напряжения источника питания лампового каскада, т. е. до 300 В. Установка конденсатора вблизи лампы, а не вблизи транзисторов, обусловлена стремлением минимизировать длину проводников, несущих высокое напряжение.

Изменение максимальной выходной мощности

Предлагаемое значение напряжения питания ± 28 В обеспечивает «комфортную» мощность при стандартных габаритах усилителя (43 см × 30 см × 12 см) и работе на нагрузку 4—8 Ом в помещении площадью до 50 м² при чувствительности акустических систем примерно 88—92 дБ/Вт/м. При этом полноценно используются возможности выбранных пар транзисторов 2SA5200 + 2SC1943.

Параллельный усилитель отлично работает в широком диапазоне напряжений источника питания. С указанными на схеме транзисторами (максимальное напряжение эмиттер-коллектор составляет 230 В) оно может в принципе быть увеличено до ± 45 В. Минимальное рекомендуемое напряжение составляет ± 18 В. При таком напряжении максимальная выходная мощность составит примерно 20 Вт на нагрузке 4 Ом и вдвое меньше на нагрузке 8 Ом. Конечно можно, но вряд ли целесообразно, строить гибридный усилитель меньшей мощности.



Примечание.

При изменении напряжения питания должно сохраниться значение тока покоя выходных транзисторов в пределах 100—120 мА. Для этого при изменении напряжения питания надо изменить сопротивления резисторов $R1$ — $R4$ просто в соответствии с законом Ома. Ток покоя, как уже обсуждалось в начале этого раздела, определяется по формуле $I = (U_0 - 0,7B)/(R1 + R2)$, где U_0 — половина полного напряжения питания (28 В на рис. 6.6), 0,7 В — падение напряжения на переходе база-эмиттер транзистора. Должно также выполняться условие $R1 + R2 = R3 + R4$ и $R2 = R3$, $R1 = R4$, т. е. схема должна быть симметричной. Условие $R1 = R2$ и $R3 = R4$ выполнять не обязательно. Просто часто бывает удобнее использовать все резисторы одного номинала и одной мощности.

Поясним сказанное *на примере*. При напряжении питания ± 20 В для тока 100 мА получаем $R1 + R2 = R3 + R4 = 190$ Ом. Можно брать $R1 = R2 = R3 = R4 = 100$ Ом (ближайший номинал из стандартного ряда), а можно взять $R2 = R3 = 91$ Ом, $R1 = R4 = 100$ Ом или $R2 = R3 = 75$ Ом, $R1 = R4 = 120$ Ом. Сопротивление резисторов $R2 = R3$ можно делать до 2 раз меньше сопротивлений $R1 = R4$. А вот делать $R2 = R3$ заметно большими, чем $R1 = R4$, не следует.

Номинальная мощность резисторов должна как минимум в 2 раза превышать непрерывно рассеиваемую мощность. Для $R1 = R2 = R3 = R4 = 100$ Ом и силе тока $I = 0,1$ А рассеиваемая мощность на каждом резисторе составит $W = I^2 R = 1$ Вт. По-видимому, в этом случае можно использовать стандартные 2-ваттные резисторы, хотя лучше, если мощность резисторов будет повыше.

При напряжении питания менее ± 25 В, вместо указанных в табл. 6.3, можно применить транзисторы с меньшим максимальным током. Соответствующие комплементарные пары приведены в табл. 6.4.

Комплементарные пары мощных кремниевых транзисторов, рекомендуемые для применения в параллельном усилителе тока при напряжении питания менее ± 25 В

Таблица 6.4

p-n-p VT1, VT4	n-p-n VT2, VT3	$U_{\text{колл-эмит макс}}$	$I_{\text{колл макс}}$	$P_{\text{колл макс}}$
2SA1942	2SC5199	160 В	12 А	120 Вт
2SA1908	2SC5100	120 В	8 А	75 Вт
MJE15033	MJE15032	250 В	8 А	50 Вт
KT818Г	KT819Г	90 В	10 А	60 Вт

С повышением напряжения максимальная выходная мощность будет увеличиваться. Чем ограничивается ее значение? Так как в предлагаемой схеме отсутствует какая-либо система защиты от перегрузок или короткого замыкания, а также от перегрева транзисторов, рекомендуется исключить возможность возникновения импульсов выходного тока, превышающего максимально допустимое значение для выходных транзисторов.

Для указанных на схеме (рис. 6.6) и в табл. 6.3 транзисторов максимально допустимый постоянный ток равен 15—18 А. Для параллельного усилителя с одинаковыми входными и выходными транзисторами максимальный ток, который может протекать через выходные транзисторы, равен произведению тока покоя на коэффициент усиления транзисторов первого каскада.

При токе покоя 100 мА и коэффициенте усиления транзисторов около 100 максимальный ток не превысит 10 А. Для максимального сигнала на выходе среднеквадратичное значение составит примерно 7 А. Такой ток соответствует мощности 200 Вт на нагрузке 4 Ом и 100 Вт на нагрузке 8 Ом. И при этом усилитель выдержит короткое замыкание на выходе!

Какое напряжение питания требуется для получения таких высоких мощностей? Амплитудное значение выходного напряжения должно быть равно 40 В. Такое максимальное амплитудное значение выходного напряжения реализуется при напряжении питания примерно ± 45 В. Это значение можно рассматривать как максимальное разумное ограничение на величину напряжения питания.



Внимание.

Необходимо тщательно отбирать диоды для таких значений напряжения питания и тока с соответствующим запасом по допустимым значениям этих величин. Указанные в табл. 6.1 диоды Шоттки в этом случае непригодны из-за низкого допустимого напряжения (100 В).

Рекомендуется делать отдельные выпрямители для каждого канала, даже если используется общий силовой трансформатор на два канала. Можно использовать диоды КД213, MUR1020 (параллельно соединив два диода в общем корпусе).

Можно ли дальше повышать выходную мощность? Надо повышать либо выходной ток, либо выходное напряжение. Некоторые авторы (Д. Селф, С. Лачинян, А. Чиффолли) рекомендуют параллельное соединение транзисторов в выходном каскаде. При этом в эмиттерные цепи выходных транзисторов включаются резисторы сопротивлением примерно 0,2 Ом (см. рис. 5.11). Следуя замечанию А. Агеева, мы не рекомендуем такой вариант уomoщения.

Другим (и более правильным) вариантом повышения мощности является *мостовое включение двух идентичных параллельных усилителей*. Он позволяет при заданном напряжении питания получить до 4 раз более высокую мощность при неизменном сопротивлении нагрузки (реально — удвоенную мощность на удвоенном сопротивлении нагрузки). Этот вариант подробно рассматривается далее в этой главе.

6.8. Ламповые усилители напряжения

Меры безопасности

В этом разделе описано несколько практических схем лампового усилителя напряжения для работы в составе гибридного усилителя совместно с транзисторным выходным усилителем тока по схеме, описанной в предыдущем разделе.

В зависимости от выбранной мощности гибридного усилителя, ламповый усилитель напряжения должен обеспечивать усиление по напряжению от 10 до 30 раз, а его выходное сопротивление должно составлять менее 1 кОм. Это накладывает определенные требования к компонентам (лампам) и схемотехническим решениям. Прежде, чем перейти к построению ламповых усилителей напряжения, рекомендуем прочитать советы по технике безопасности.



Внимание.

Все указанные на схемах напряжения измерены под нагрузкой. Все ламповые каскады, описанные в этой книге, в режиме покоя потре-

бляют максимальный ток. В зависимости от мощности примененных трансформаторов значения напряжения на выходе источника питания без нагрузки и в контрольных точках без установленных ламп могут оказаться на 15—30 % выше номинальных. Это надо обязательно иметь в виду при сборке усилителя.

Например, если вы включите источник питания, не подключив к нему нагрузку, напряжение на выходе может оказаться выше 300 В при расчетном номинальном напряжении 250 В. Если вы подключите к источнику питания усилительные каскады и при этом забудете вставить лампу (лампы) в панельку, напряжения на конденсаторах тоже окажутся более высокими.

Поэтому необходимо обеспечить соответствующий запас по допустимому напряжению для всех конденсаторов в вашем аппарате. Если этого не сделать, конденсатор может взорваться и травмировать вас. При первом включении собранного устройства старайтесь находиться подальше от высоковольтных конденсаторов.

Если вы не уверены в себе, попросите более опытного товарища проверить собранную вами конструкцию. При настройках и регулировках обязательно используйте резистор сопротивлением порядка 200 кОм, подключенный параллельно выходным клеммам источника анодного напряжения. Этот резистор обеспечит ток около 1 мА после выключения устройства и приведет к разряду высоковольтных конденсаторов в течение 20—30 с после отключения напряжения сети.

При отсутствии такого резистора на высоковольтных конденсаторах может сохраняться опасное для вашей жизни напряжение в течение многих часов. Будьте предельно внимательны и аккуратны!

Бескомпромиссный одноламповый вариант

Схема №1. Усилитель напряжения на одном триоде. По-видимому, существует всего один тип триода, способного обеспечить коэффициент усиления до 25—30 раз при выходном сопротивлении менее 1 кОм в простейшем варианте элементарного усилительного каскада с общим катодом. Такой триод должен иметь внутреннее сопротивление порядка 1 кОм и коэффициент усиления по напряжению — не менее 50.

Таким триодом является достаточно распространенная отечественная лампа 6С45П и ее менее распространенный аналог 6С15П. Зарубежным аналогом является американская лампа WE417 с близкими

параметрами, но с иной цоколевкой. Внутреннее сопротивление лампы 1,1 кОм при коэффициенте усиления 50, а максимальная мощность, рассеиваемая анодом, — почти 8 Вт. Ток накала — 440 мА. Лампа 6С45П рекомендована для «аудиофилов» Михаилом Торопкиным*. Автор этой книги подтверждает ее прекрасное звучание.

Схема усилителя напряжения представлена на рис. 6.9. Она не требует комментариев. Принцип работы простейшего каскада с общим катодом был подробно описан в главе 4. При указанных на схеме номиналах коэффициент усиления по напряжению составляет с подключенными конденсаторами С2, С3 — 40 раз (формула 7 в главе 4), а без этих конденсаторов — 30 (формула 6 в главе 4). При переходе от 6С45П к 6С15П можно отключить электрод номер 1, он в этой лампе не используется. Дополнительный индекс «Е» означает повышенный срок службы. Лампа 6С45П-Е может работать не менее 3000 часов.

Схема блока питания показана на рис. 6.10. Использованы стандартные готовые трансформаторы: анодный ТА5 (мощность 15 Вт) и накальный ТН30 (мощность 13 Вт). Для получения переменного напряжения 2×250 В использовано последовательное соединение двух групп обмоток $2 \times (125 + 112 + 14)$ В. Вместо указанного ТА5 можно (и даже с лучшим результатом) применить анодный трансформатор с таким же набором вторичных обмоток, но большей мощности: ТА19, ТА40, ТА68.

Применение кенотрона не только обеспечивает «чистоту» выпрямленного напряжения, но и создает необходимую задержку включения анодного питания: высокое напряжение появляется после прогрева кенотрона.



Примечание.

Раннее, до подогрева катода подключение анодного напряжения к лампам сокращает их срок службы.

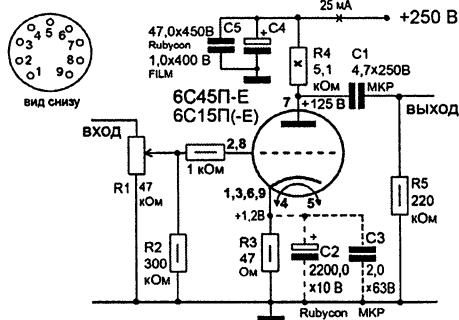


Рис. 6.9. Схема «минималистского» усилителя напряжения на одном триоде

* М. В. Торопкин. Аудиосистема класса Hi-Fi своими руками. С-Петербург, «Наука и Техника», 2006.

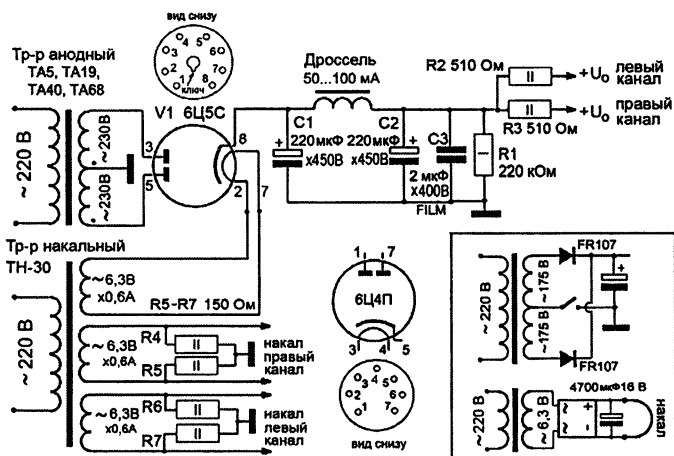


Рис. 6.10. Схема блока питания с двухполупериодным выпрямителем на кенотроне. На вставке варианты блока питания с использованием диодов и с применением стабилизированного напряжения для питания накала

Выпрямленное напряжение на катode кенотрона 6Ц5С зависит от напряжения на каждой из двух половин вторичной обмотки трансформатора и от силы тока в нагрузке. Связь тока и напряжения для кенотрона приведена в главе 8 (рис. 8.20). Вместо кенотрона 6Ц5С с октальным цоколем можно использовать его пальчиковый 7-штырьковый аналог 6Ц4П.

В крайнем случае, можно вместо кенотрона использовать диоды FR107, FR106 (1 А, 800 и 1000 В), или FR207, FR206 (2А, 800 и 1000 В), MUR180 (1 А, 800 В), MUR1100 (1 А, 1000 В). Но в этом случае желательно сделать отдельный выключатель для анодного питания или реле времени с задержкой порядка 10 с.



Внимание.

Напряжение на каждой из двух половин вторичной обмотки под нагрузкой должно составлять в случае двухполупериодного выпрямителя на полупроводниковых диодах не 250 В, а 175 В.

Вариант замены кенотрона диодами показан на вставке на рис. 6.10. При использовании диодов можно сделать два отдельных для каждого канала блока питания с мостовыми выпрямителями (потребуется 8 диодов). Для получения выходного выпрямленного напряжения

250 В переменное напряжение на вторичной обмотке (под нагрузкой) должно быть равно

$$250 \text{ В} / 1,414 - 2 \text{ В} = 175 \text{ В}.$$

Для накала лучше применить трансформаторы ТН-32, ТН-33 мощностью 20 Вт. Можно использовать выпрямленное напряжение (вставка справа внизу на рис. 6.10).

В схеме очень мало компонентов, однако их качество очень важно. Только конденсатор С1 в блоке питания может быть обычного, «компьютерного» качества. Резисторы R1—R7 в блоке питания — МЛТ, С2-23.

Резисторы в усилителе напряжения — ВС, УЛИ, С2-29 или зарубежные Riken Ohm, Dale, Vishay. В крайнем случае — МЛТ, С2-23. Резистор R4 в усилителе напряжения мощностью 10 Вт можно составить из нескольких параллельно соединенных резисторов меньшей мощности.



Совет.

Последовательное соединение резисторов в данном случае не рекомендуется.

В авторском варианте используются 7-8 параллельно соединенных двухваттных резисторов С2-23. Их температура во время работы составляет примерно 60 °С. Применение в качестве резистора R4 отечественного ПЭВ, а также зарубежного белого керамического резистора неизвестного производителя привело к заметному ухудшению звучания: появились «вялость» и «рыхлость» вместо «четкости» и «быстроты». Анодный резистор в ламповом каскаде очень хорошо «прослушивается»!

Хорошо слышен и разделительный выходной конденсатор. Можно параллельно соединять конденсаторы различных типов и различных производителей. Во всех случаях емкость должна быть не менее 4 мкФ, а максимальное рабочее напряжение — не ниже напряжения источника питания.

Макет усилителя напряжения показан на рис. 6.11, а соединение основных деталей показано на рис. 6.12. Первоначально блок питания изготавливался без дросселя с выпрямителем на двух диодах серии FR. Затем вместо диодов на кронштейне был установлен кенотрон. Дроссель в макетном исполнении отсутствует. Он впоследствии был установлен при окончательном монтаже всего усилителя в корпусе.

Как видно на рис. 6.11 и рис. 6.12, входные RCA разъемы (их иногда называют «тюльпан») и потенциометр — регулятор громкости рас-

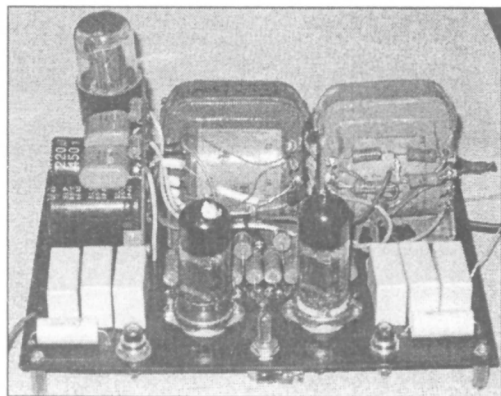


Рис. 6.11. Макет минималистского усилителя напряжения

Шунтирующие конденсаторы C_2 , C_3 в усилителе напряжения, вообще говоря, не обязательны. И если в вашем распоряжении нет качественных экземпляров, можно в базовом варианте обойтись вообще без них. Конденсаторы C_1 , C_2 , C_3 (2 по 1 мкФ на 400 В) и резистор R_1 блока питания расположены на небольшой вертикально установленной печатной плате, а резисторы R_4 — R_7 распаяны на выводах накаливающего трансформатора.

Особенности монтажа и настройки. Очень важно аккуратно и компактно смонтировать все элементы. Усилитель собран на плате из текстолита толщиной 2 мм. Все детали, установленные сверху, видны на рис. 6.11.

Рис. 6.12 дает представление о расположении деталей снизу. В качестве земляной шины использована медная шина от старого прибора в виде полосы шириной 8 мм и толщиной 0,3 мм. Эта пластина согнута в виде перевернутой буквы «п» и укреплена снизу платы тремя винтами с использованием небольших уголков (два по краям и один в центре). Кроме этой шины монтажными контактами являются только лепестки ламповых панелек. Те детали, которые не припаиваются к общей шине и к лепесткам ламповых панелек, распаяны и закреплены с помощью собственных выводов.



Примечание.

При распайке выводов деталей проводов на лепестках ламповой панельки в ней должна находиться лампа (любая), чтобы после пайки деталей жестко зафиксированные лепестки не препятствовали установке лампы в панельку.

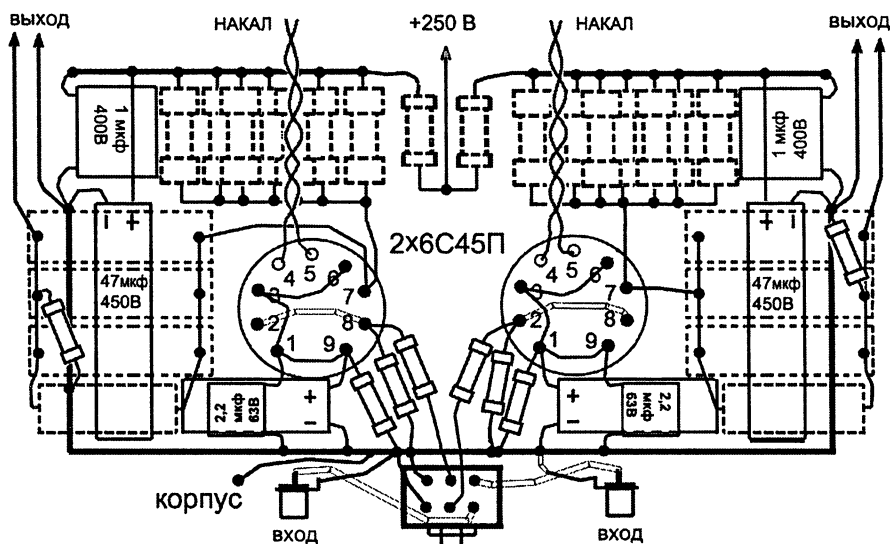


Рис. 6.12. Монтажная схема (вид снизу) стереофонического усилителя напряжения на триодах 6С45П (без блока питания). Резистор R4 образован несколькими параллельно соединенными резисторами. Конденсатор C1 образован 4 параллельно соединенными конденсаторами емкостью 1 мкФ

Если есть сомнения в надежности монтажа крупных конденсаторов (C1 и C4 в усилителе напряжения), их можно закрепить с помощью мягкого медного провода диаметром 1 мм в полихлорвиниловой изоляции. Провод в виде петли охватывает сверху конденсатор, его концы пропускаются сквозь два специально сделанных отверстия в плате, а затем с обратной стороны плотно скручиваются плоскогубцами. Такой незатейливый прием используют даже инженеры фирмы «Audio Note».

Схема №2. Усилитель на одном тетроде. Минималистский одноламповый усилитель напряжения можно построить на одном тетроде, включенном в триодном режиме. Такой вариант показан на рис. 6.13. Широкополосные тетроды 6Э5П, 6Э6П с малым внутренним сопротивлением были «открыты» для аудио-применения А. И. Манаковым. Лампа 6Э5П имеет зарубежный аналог — EL183. Параметры лампы в триодном включении ($R_i = 1,2$ кОм; $S = 30$ мА/В; $\mu = 30—35$) близки к параметрам ламп 6С45П, 6С15П.

Поэтому эти лампы устанавливаются с минимальной доработкой на место 6С45П. Используется полностью показанный на рис. 6.11 макетный модуль: входные разъемы, регулятор громкости, ламповые панельки, анодные резисторы и разделительные конденсаторы, блок

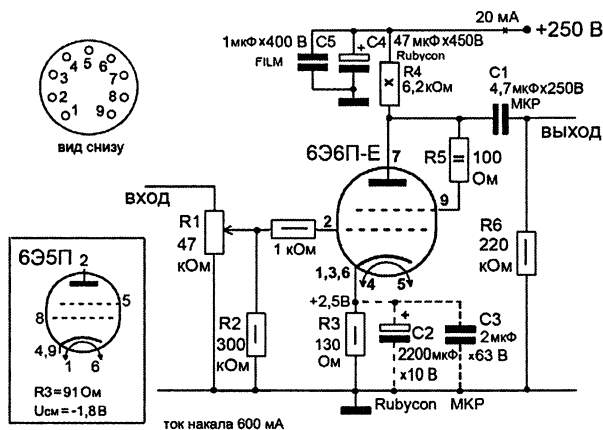


Рис. 6.13. «Минималистский» усилитель напряжения на тетроде в триодном включении

питания. Изменения сводятся к замене резистора R3 (он задает смещение на сетке лампы) и добавлению резистора R5 между управляющей сеткой и анодом тетрода.

Тетроды 6Э5П и 6Э6П-Е звучат отлично! Если кратко охарактеризовать — «напористо», «сочно», «рельефно». Тетрод 6Э6П-Е использовать предпочтительнее, так как он имеет срок службы более 10 000 часов.

Коэффициент усиления в случае применения тетродов составит около 20 без шунтирующих конденсаторов C2, C3 и около 25 — с конденсаторами C2, C3. По сравнению с лампой 6С45П тетроды 6Э5П и 6Э6П имеют больший ток накала — 600 мА. Максимальная рассеиваемая на аноде мощность составляет более 8 Вт, а максимальный ток анода — более 40 мА.



Примечание.

Лампы 6Э5П и 6Э6П имеют различную цоколевку! Цоколевка лампы 6Э6П совпадает с цоколевкой 6С45П, если в лампе 6Э6П не использовать при монтаже вывод 8, а в лампе 6С45П не использовать вывод 9. Это облегчает выбор лучше звучащих ламп без большой переделки устройства. При переходе от 6Э6П к 6С45П и обратно не забудьте изменить сопротивление катодного резистора.

Изменение напряжения источника питания. Если нет возможности воспроизвести указанное на схеме напряжение источника пита-

ния (250 В), можно использовать, в принципе, любое напряжение в диапазоне 200—300 В с учетом следующих рекомендаций.

Лампы 6С45П, 6С15П.

Если используется источник питания с напряжением + 300 В, то сопротивление катодного резистора целесообразно увеличить до $R_3 = 51 \text{ Ом}$. Ток через лампу составит 30 мА, напряжение на аноде составит + 150 В. Качество звучания, по-видимому, улучшится, особенно при высоких уровнях выходного сигнала. Потребляемая мощность от анодного источника питания составит 9 Вт на канал.

Понижение напряжения питания до 200 В потребует более серьезных изменений. В этом случае для поддержания режима $U_A = 125 \text{ В}$, $I_A = 25 \text{ мА}$ необходимо уменьшить сопротивление резистора анодной нагрузки до $R_4 = 3 \text{ кОм}$, сохранив неизменным значение катодного резистора $R_3 = 47 \text{ Ом}$.

Лампы 6Э5П, 6Э6П.

При напряжении источника питания + 300 В рекомендуется рабочая точка $U_A = 150\text{—}160 \text{ В}$, $I_A = 20\text{—}25 \text{ мА}$. Для этого надо установить анодный резистор номиналом 5,6 кОм (10 Вт), катодный резистор — 75—82 Ом. Падение напряжения на катодном резисторе составит около 2 В.

При понижении напряжения источника питания до + 200 В, необходимо уменьшить сопротивление резистора анодной нагрузки до $R_4 = 3,6\text{—}3,9 \text{ кОм}$.

Применение гальванических элементов вместо катодных резисторов. При использовании ламп 6С45П или 6С15П можно применить гальванические элементы вместо резистора R_3 для создания смещения на сетке. Такой способ организации смещения обсуждался в главе 4 (рис. 4.6, а). Из-за значительного анодного тока не рекомендуется устанавливать гальванические элементы в цепь катода. Их надо устанавливать в цепь сетки, как показано на рис. 4.6, а, а катод соединять с общим проводом.

Приведем рекомендации по корректировке режимов. Если использовать аккумуляторы напряжением 1,35 В, предлагается рабочая точка: $U_A = + 135 \text{ В}$, $I_A = 25 \text{ мА}$. При напряжении питания 250 В сопротивление резистора R_4 должно быть равно

$$(250 \text{ В} - 135 \text{ В})/25 \text{ мА} = 4,6 \text{ кОм}.$$

При напряжении 300 В надо взять $R_4 = 6,6$ кОм. Для других напряжений читателям предлагается определить номинал резистора R_4 самостоятельно.

Если использовать гальванический элемент напряжением 1,5 В, предлагается рабочая точка: $U_A = +150$ В, $I_A = 30$ мА. При напряжении питания 250 В сопротивление резистора R_4 должно быть равно $(250 \text{ В} - 150 \text{ В})/30 \text{ мА} = 3,3$ кОм. При напряжении питания 300 В (предпочтительнее для этого режима) $R_4 = 5$ кОм. Именно такой вариант и показан на рис. 4.6, а.

Понятно, что гальванические элементы можно применить и для ламп 6Э6П, 6Э5П. Выбранное на рис. 6.13 напряжение смещения немного отличается от напряжения двух последовательно соединенных аккумуляторных элементов ($2 \times 1,35 \text{ В} = 2,7 \text{ В} > 2,5 \text{ В}$). По-видимому, в этом варианте схема будет неплохо работать. Но, вообще говоря, для корректировки режимов требуется знание вольтамперных характеристик тетрода в триодном включении.

Для тетрода 6Э5П такие характеристики приведены в конце книги в главе 8. Из них видно, что напряжение смещения 1,35 В вполне подходит для анодного напряжения 125—140 В и может быть применено с источником питания напряжением 200—300 В. Приведем конкретные рекомендации.

Рекомендация 1. Напряжение источника питания 200 В. Напряжение гальванического элемента (включается в цепь сетки, как на рис. 4.6, а) 1,35 В. Ток анода 20 мА. Напряжение на аноде 110 В. Падение напряжения на анодном резисторе $(200 - 110) = 90$ В, его сопротивление $90/20 = 4,5$ кОм.

Рекомендация 2. Напряжение источника питания 250 В. Напряжение гальванического элемента (включается в цепь сетки, как на рис. 4.6, а) 1,35 В. Ток анода 30 мА. Напряжение на аноде 120 В. Падение напряжения на анодном резисторе $(250 - 120) = 130$ В, его сопротивление $130/30 = 4,33$ кОм.

Рекомендация 3. Напряжение источника питания 300 В. Напряжение гальванического элемента (включается в цепь сетки, как на рис. 4.6, а) 1,35 В. Ток анода 30 мА. Напряжение на аноде 120 В. Падение напряжения на анодном резисторе $(300 - 120) = 180$ В, его сопротивление $180/30 = 6$ кОм.

Питание накала ламп выпрямленным напряжением. В качестве путей улучшения звучания можно порекомендовать использовать выпрямленное или даже стабилизированное питание накала ламп.

Можно использовать стандартные выпрямительные мосты, простые электролитические конденсаторы емкостью порядка 10000 мкФ.



Совет.

При этом можно использовать стандартные накальные трансформаторы с переменным напряжением под нагрузкой 6,3 В.

После выпрямления напряжение увеличивается в 1,414 раз. При использовании мостового выпрямителя падение напряжения на двух диодах составит около 2 В, т. е. выпрямленное напряжение будет равно примерно 7 В. Это значение находится в пределах допустимого 10 %-ного отклонения от номинального напряжения 6,3 В. В качестве стабилизатора можно использовать микросхемы LM7806 (рис. 6.14: выходное напряжение 6 В, входное 8—21 В, ток до 1 А), установленные на небольшой радиатор. Необходимо использовать по одному отдельному стабилизатору для каждой лампы.



Примечание.

При использовании стабилизатора стандартного напряжения накального трансформатора 6,3 В уже будет недостаточно! Рекомендуем использовать для стабилизатора входное переменное напряжение 9—10 В. Большее значение приведет к повышенному выделению тепла, а меньшее — к ненадежной работе при колебаниях напряжении сети. Для получения такого напряжения при использовании мостового выпрямителя вторичная обмотка трансформатора (под нагрузкой) должна обеспечивать переменное напряжение примерно 8 В. Эти примитивные расчеты приведены так подробно в связи с тем, что радиолюбители часто забывают о том, что в низковольтных выпрямителях падение напряжения на диодах заметно уменьшает выходное напряжение.

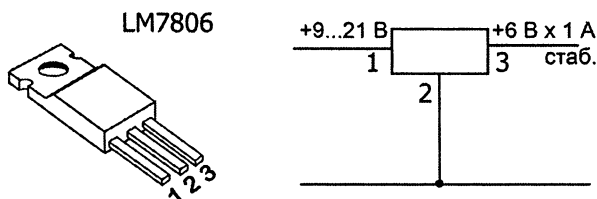


Рис. 6.14. Интегральный стабилизатор LM7806 для питания накала ламп

В качестве серьезного улучшения конструкции без изменения схемы сигнального тракта можно рекомендовать применить источник стабилизированного анодного напряжения. Однако конструкция такого стабилизатора с выходным напряжением 250 В и током более 50 мА содержит 3-4 лампы, более десятка пассивных компонентов и потребляет мощность более 20 Вт. Схему такого стабилизатора можно найти в специальной литературе по ламповой технике, например, в книге М. В. Торопкина*. Построение такого стабилизатора может быть рекомендовано только достаточно опытным радиолюбителям. Использование стабилизатора примерно в 2 раза увеличит габариты усилителя напряжения.

«Суперминималистский» вариант: один триод — пол-баллона. Если создается усилитель не очень высокой мощности, можно воспользоваться прекрасно звучащим двойным пальчиковым 9-штырьковым триодом 6НЗ0П и сделать стереофонический усилитель напряжения всего на одном баллоне! Этот триод имеет внутреннее сопротивление 0,85 кОм, коэффициент усиления 15. Его зарубежные аналоги отсутствуют. Этот триод пользуется большой популярностью не только на постсоветском пространстве, но и среди аудиофилов Западной Европы и США. Возможно, это привело к дефицитности и высокой стоимости этих ламп.

Схема усилителя на половине баллона лампы 6НЗ0П показана на рис. 6.15 для нескольких значений напряжения питания. Выходное сопротивление такого каскада составляет около 700 Ом, а коэффициент усиления — от 7 (без шунтирующих конденсаторов С3, С4) до 12 (с конденсаторами С3, С4).



Примечание.

Вследствие невысокого коэффициента усиления по напряжению этот усилительный каскад можно рекомендовать для работы в составе гибридного усилителя относительно невысокой мощности — не более 10 Вт на нагрузку 8 Ом или до 20 Вт на нагрузку 4 Ом при чувствительности 1 В.

Учитывая различный уровень фонограмм и необходимость запаса по динамике, мощности при работе на нагрузку 8 Ом может оказаться

* М. В. Торопкин. Ламповый Hi-Fi усилитель своими руками. — СПб.: Наука и Техника, 2006 г.

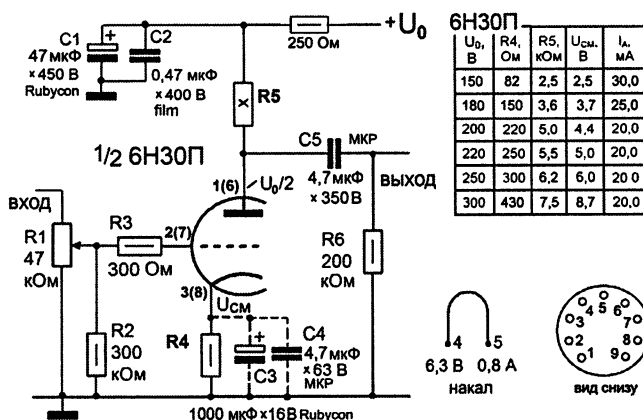


Рис. 6.15. Схема усилителя напряжения на одной половине лампы 6Н30П

недостаточно для комфортного прослушивания сложных записей в помещении площадью более 20 м². Этот вариант усилителя напряжения также может быть собран с использованием макетного модуля, показанного на рис. 6.11.

Один баллон — два триода: резистивный усилитель на двух триодах 6Н6П

Еще один вариант простого усилителя напряжения с относительно невысоким коэффициентом усиления — усилитель на двойном триоде 6Н6П с параллельным соединением двух триодов в баллоне (рис. 6.16). В этом случае внутреннее сопротивление уменьшается в два раза и становится равным 0,9 КОм, т. е. близкое к сопротивлению триода 6Н30П.

Усилитель «вписывается» в монтажный модуль, показанный на рис. 6.11. Коэффициент усиления выше, чем в варианте с 6Н30П, однако все же небольшой:

- 10—11 без шунтирования катодного резистора R_4 конденсаторами;
- 12—15 — с шунтированием.

Поэтому можно понизить напряжение питания до 200 В. Это обеспечит достаточный запас по динамическому диапазону при одновременном снижении потребляемой мощности. Последнее весьма важно для данной схемы. Она потребляет 40 мА на канал: значительно больше, чем схемы, представленные на рис. 6.9, 6.13, 6.15 (20—25 мА).

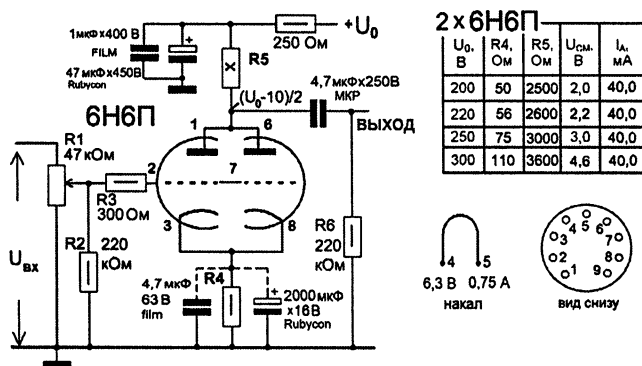


Рис. 6.16. Усилитель напряжения на двойном триоде 6N6П с параллельным соединением двух триодов

Одновременно удваивается и ток накала: 0,75 А на канал. Необходимо, соответственно, увеличить мощности анодного и накального трансформаторов в блоке питания. Подойдут анодный ТА73 (две обмотки 160 В + 20 В с кенотронным выпрямителем, две обмотки по 160 В с диодным двухполупериодным выпрямителем) и накальный ТН14, ТН15, ТН16. Выходное сопротивление каскада равно приблизительно 700 Ом.

Один баллон — два триода: каскад с динамической нагрузкой

После элементарного каскада с общим катодом следующим по уровню сложности является каскад с динамической нагрузкой. Если задаться целью минимизировать количество компонентов, то разумно изучить возможность построения такого каскада на двойных триодах. К сожалению, очень ценимые аудиофилами лампы с октальным цоколем (6Н8С, 6Н9С) не позволяют получить нужного низкого выходного сопротивления и не могут обеспечить необходимого тока для раскачки мощного усилителя тока.

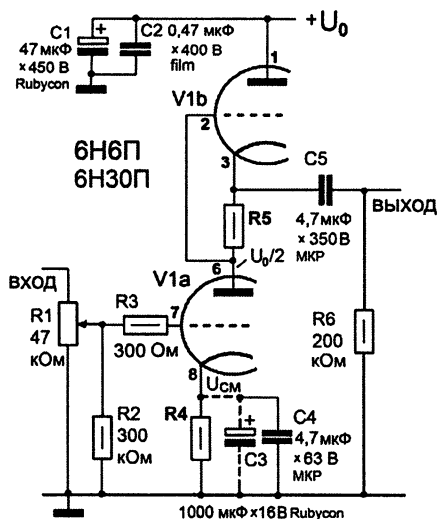
Такие лампы существуют среди 9-штырьковых двойных триодов «пальчикового» типа. Это лампы 6Н6П (внутреннее сопротивление 1,8 кОм, коэффициент усиления 20) и 6Н30П (внутреннее сопротивление 0,85 кОм, коэффициент усиления 15). Они имеют одинаковую цоколевку и конструктивно (количество баллонов и тип цокря), а также по напряжению питания и потребляемому току совместимы с описанной в предыдущем разделе одно-триодной версией усили-

Схема каскада с динамической нагрузкой, номиналы резисторов, режимы ламп и параметры каскада для двух ламп и различных напряжений показаны на рис. 6.17. По сравнению с простым резистивным каскадом каскад с динамической нагрузкой, как уже подробно обсуждалось в главе 4, характеризуется более низкими искажениями и меньшим выходным сопротивлением.



Обратите внимание, что в соответствии с рекомендациями А. Л. Гурского (см. рис. 4.19, б и комментарий к нему) сопротивление резистора R_5 выбрано меньшим, чем сопротивление катодного резистора R_4 .

При использовании лампы 6Н6П выходное сопротивление каскада составит 400—600 Ом. Так как коэффициент усиления по напряжению относительно невелик (10—15 раз), мощность усилителя при чувствительности 1 В составит 20—40 Вт на нагрузке 4 Ом и 10—20 Вт на нагрузке 8 Ом.



U ₀ , В	R ₄ , Ом	R ₅ , Ом	U _{см} , В	I _A , мА	К-т усиления		R _{вых} , кОм	
					С3 НЧТ	С3 ВСТ	С3 НЧТ	С3 ВСТ
200	100	30	2,0	20,0	10	13,6	<1	0,58
220	100	30	2,5	25,0	10	13,6	<1	0,58
250	150	51	3,0	20,0	10	14,6	<1	0,49
300	250	100	5,0	20,0	10	15,9	<1	0,38

U ₀ , В		R ₄ , Ом	R ₅ , Ом	U _{сэл} , В	I _а , мА	К-т усиления		R _{вых} , кОм	
						С3 НВТ	С3 ВСТЬ	С3 НВТ	С3 ВСТЬ
200	220	150	4,4	20,0	7,5	12	<1	0,29	
220	250	150	5,0	20,0	7,5	12	<1	0,28	
250	300	200	6,0	20,0	7,5	12	<1	0,26	
300	430	300	8,7	20,0	7,5	14	<1	0,25	

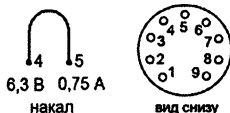


Рис. 6.17. Каскад с динамической нагрузкой на двойных пальчиковых триодах с низким внутренним сопротивлением

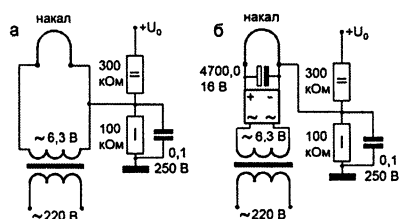


Рис. 6.18. Схема питания накала ламп в каскаде с динамической нагрузкой

Лампа 6Н30П обеспечит выходное сопротивление менее 300 Ом. Но коэффициент усиления будет меньшим: 7,5 без шунтирования конденсатором катодного резистора и 12 — с шунтированием. Поэтому при чувствительности 1 В будем иметь на выходе 7,5—12 В, что на нагрузке 4 Ом даст 14—35 Вт мощности, а на нагрузке 8 Ом — только 7—17 Вт.

Эту мощность надо рассматривать как максимальную. Мощности 7 Вт может оказаться недостаточно для комфортного прослушивания оркестровой музыки или рок-музыки с некоторыми типами акустических систем в помещении площадью более 15 м².



Примечание.

Надо учитывать, что присутствие шунтирующего конденсатора, увеличивающего коэффициент усиления, одновременно увеличивает и искажения. Кроме того, надо иметь в виду, что лампы могут иметь разброс по коэффициенту усиления. Надо также учитывать, что записи разных лет и жанров, даже оцифрованные, имеют разный средний уровень. Поэтому целесообразно иметь определенный запас усиления по напряжению даже без применения шунтирующего конденсатора.

Таким образом, усилитель напряжения по схеме, показанной на рис. 6.17, с лампой 6Н6П реально может надежно работать в составе усилителя мощностью примерно 15 Вт на нагрузке 4 Ом и 8 Вт на нагрузке 8 Ом. Это вполне приличная альтернатива ламповым одноконтурным на триодах 300В или тетродах КТ88 (6550)!

При этом в оконечном транзисторном параллельном усилителе можно понизить напряжение питания до ± 20 В, что позволит снизить стоимость компонентов за счет применения в блоке питания конден-

Для того, чтобы значения разности потенциалов между нитью накала и катодами обоих триодов сделать одинаковыми, на один из выводов нити накала от положительной клеммы источника питания через резистивный делитель напряжения подают напряжение, равное $+ \frac{1}{4} U_0$ (рис. 6.18). Тогда абсолютное значение разности потенциалов нити накала относительно каждого из катодов будет равно $\frac{1}{4} U_0$.

саторов с рабочим напряжением 25 В, а в цепи вольтодобавки — конденсаторов с рабочим напряжением 16 В, а также более дешевых транзисторов (табл. 6.4).

Один баллон — два триода: каскад с общим катодом + катодный повторитель

Комбинация «каскад с общим катодом + катодный повторитель» позволяет легко сформировать нужный коэффициент усиления и низкое выходное сопротивление. Многие поклонники ламповой аудиотехники избегают применения катодных повторителей, отмечая пониженную естественность звучания этих каскадов.

Здесь нет однозначного мнения. Укажем противоположный пример: фирма «Audio Note» не считает катодный повторитель «плохим» каскадом и широко его применяет, причем на всех «этапах» звукового тракта: в фоновых корректорах (см. далее в главе 7), в предварительных усилителях (рис. 4.12) и в оконечных усилителях (легендарный «Ongaku»).

В этом разделе предлагаются две простые «компромиссные» конструкции для тех читателей, которые хотят составить свое мнение по этому вопросу. «Компромиссность» означает несложные решения на одном двойном триоде на канал с несколько ограниченными возможностями.

Первая схема использует очень популярный двойной триод 6Н23П или его зарубежные аналоги. Эта лампа — безусловно стала «рабочей лошадкой» для радиолюбителей-«ламповиков». Этому способствует ее доступность, низкая стоимость и, самое главное, сочетание параметров: коэффициент усиления 34 при внутреннем сопротивлении около 3 кОм, два триода в одном баллоне.

На рис. 6.19 показана схема, легко вписывающаяся в макетный модуль (рис. 6.11) с блоком питания, показанным на рис. 6.10. Усилитель потребляет ток 20 мА и работает при напряжении питания 200 В. Для лампы выбрана рабочая точка 100 В, 10 мА. Необходимое для этого смещение на сетке составляет 2 В.



Примечание.

Многие радиолюбители-конструкторы любят использовать лампы 6Н23П с пониженным напряжением питания: от 40 до 60 В. По мнению автора, это допустимо только в фоновых корректорах, где выходное напряжение не превышает 1—2 В. В усилителях мощ-

ности, где требуется напряжение сигнала на выходе примерно 15 В, такой режим приведет к сильным искажениям.

Автор не является поклонником этого триода. В личных конструкциях автора этот триод, к сожалению, оказался «неконкурентоспособен» ни во входных каскадах полностью ламповых усилителей, ни в составе гибридного усилителя. В распоряжении автора имелось достаточно большое количество экземпляров ламп 6Н23П (в том числе с индексами «ЕВ») разных лет производства Ульяновского завода и аналогичные им лампы Е88СС фирмы «Тесла». Возможно, лампы других производителей в вашем усилителе будут звучать лучше.

Коэффициент усиления без шунтирования катодного резистора — 15...17, с шунтированием увеличивается до 20. Выходное сопротивление усилителя составляет 85 Ом. Его можно использовать совместно с оконечным усилителем, показанным на рис. 6.19 при напряжении питания до ± 28 В.

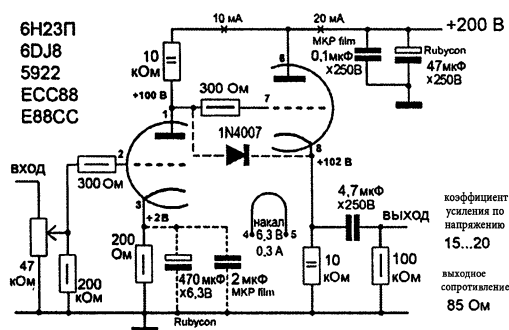


Рис. 6.19. Комбинированный каскад на двойном триоде 6Н23П

Диод 1N4007 рекомендуется для подавления возможных нежелательных переходных процессов при включении питания.

Для того чтобы значения разности потенциалов между нитью накала и катодами обоих триодов сделать одинаковыми, на один из выводов нити накала подается напряжение, равное $\frac{1}{4}U_0$, от положительной клеммы источника питания через резистивный делитель напряжения (рис. 6.18). Тогда абсолютное значение разности потенциалов нити накала относительно каждого из катодов будет равно $\frac{1}{4}U_0$.



Внимание.

Для не очень опытных радиолюбителей при сборке усилителя рекомендуется не присоединять анод второго триода (вывод б) к анодному напряжению при первом подключении питания. Рекомендуется сначала установить лампу, подключить анодное и накальное питание, затем убедиться в том, что напряжение на аноде первого триода (вывод 1) составляет 100 В или половину анодного напряжения, если использу-

Возможно, читатели уже обратили внимание, что в настоящей главе до сих пор рассматривались исключительно «пальчиковые» лампы с 9-штырьковым цоколем. В то же время при построении полностью ламповых схем многие отдают предпочтение лампам с октальным цоколем. Среди триодов с октальным цоколем наиболее популярны 6Н9С (6SL7) и 6Н8С (6SN7). Первая из них имеет большой коэффициент усиления (70) и очень высокое внутреннее сопротивление (44 кОм). Она пригодна для слаботочных каскадов типа входных каскадов фоновкорректоров. Вторая лампа имеет меньшие значения обоих параметров: 20 и 7,7 кОм, соответственно. Такое сочетание позволяет получить коэффициент усиления 10—12 при выходном сопротивлении около 400 Ом в комбинированной схеме «каскад с общим катодом + катодный повторитель».

Эта мощность достаточна и даже немного велика для помещений до 20 м². Однако, она, по-видимому, недостижима при работе на транзисторный усилитель тока с входным сопротивлением менее 10 кОм. Проблема заключается в том, что лампа 6Н8С может не обеспечить нужный выходной ток. Поэтому реальная мощность будет ниже. Рекомендуется использовать этот вариант только в случае выбора пониженного напряжения

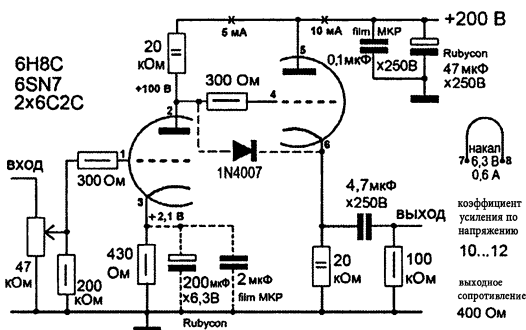


Рис. 6.20. Усилитель напряжения на триоде с октальным цоколем

питания оконечного усилителя (± 20 В). Это уменьшит и габариты, и потребляемую мощность всего устройства в целом.

Усилители, собранные по схемам, показанным на рис. 6.19, 6.20 могут работать совместно с блоком питания, показанным на рис. 6.10. Можно использовать монтажный модуль, показанный на рис. 6.11 при условии установки ламповых панелек для октальных ламп. По сравнению со всеми обсуждавшимися в этом разделе ламповыми схемами, усилитель на лампе 6Н8С потребляет примерно вдвое меньшую мощность, что позволяет использовать анодный трансформатор меньших габаритов.



Внимание.

При наладке усилителя на лампах с непосредственной связью между каскадами надо соблюдать особую осторожность и аккуратность. Не подавайте анодное напряжение на триод второго каскада, пока не выставлены режимы триода первого каскада. Если это правило не выполнять, второй триод может оказаться включенным с недостаточным смещением на сетке, его анодный ток сильно вырастет. Это может повредить или попросту сжечь катодные резисторы, диоды и обмотки трансформатора в источнике питания.

Для того чтобы значения разности потенциалов между нитью накала и катодами обоих триодов сделать одинаковыми, на один из выводов нити накала подается напряжение, равное $+ \frac{1}{4}U_0$, от положительной клеммы источника питания через резистивный делитель напряжения (см. рис. 6.18). Тогда абсолютное значение разности потенциалов нити накала относительно каждого из катодов будет равно $\frac{1}{4}U_0$.

6.9. Усилитель в сборе. Оценка качества звучания

Усилитель собран в корпусе, основу которого образуют две боковые рамки из алюминиевого сплава. К ним крепятся передняя панель, задняя панель, транзисторный модуль, ламповый модуль. Для крепления каждого из указанных элементов использованы дюралевого уголки и по 2 винта М4 с каждой стороны.

Никаких иных несущих элементов нет. В таком варианте усилитель легко монтируется, налаживается, и если надо — модернизи-

руется. После сборки и наладки передняя панель и боковые рамки закрываются фальш-панелями из дюралюминия или оргстекла. Расположение основных компонентов и вид усилителя после распайки и разводки всех соединений показаны на рис. 6.21.

В блоке питания ламповой части усилителя использован анодно-накальный трансформатор ТАН37 (мощность 60 Вт), обеспечивающий для анодного питания более чем двукратный запас по мощности. Используются кенотрон 6Ц5С, дроссель, 3 конденсатора емкостью 150 мкФ «компьютерного качества», зашунтированные пленочным конденсатором емкостью 1 мкФ. Дополнительно, под основными лампами установлены конденсаторы «Rubicon» емкостью 47 мкФ — по одному на каждый канал. Допустимое напряжение всех конденсаторов — 450 В.

В усилителе напряжения использованы лампы 6Э6П-Е с отличным звучанием и сроком службы 10 тыс. часов. Разделительный конденсатор С1 имеет емкость около 6 мкФ и образован четырьмя параллельно соединенными пленочными конденсаторами разных производителей (K73, SX-MKP, WIMA-MKS, SX-MET, Mylar). Эти конденсаторы видны на фотографии. С нижней стороны платы распаяны катодные резисторы, резисторы, соединяющие сетки ламп с общим проводом, и резисторы между движком потенциометра и сетками ламп. Резисторы между катодом каждого тетрода и второй сеткой так же, как и анодные резисторы, вынесены на верхнюю сторону платы для лучшего охлаждения.

Параметры ламповой части следующие:

- ♦ переменное напряжение на каждой из двух половин вторичной обмотки анодного трансформатора: без нагрузки + 300 В, под нагрузкой + 285 В;

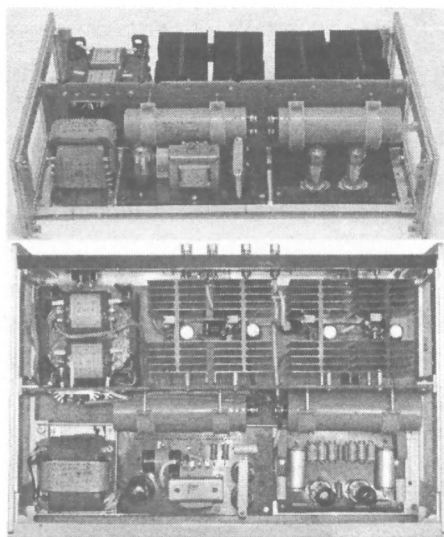


Рис. 6.21. Вверху: расположение основных элементов внутри усилителя до разводки проводов, установки транзисторов, резисторов и малогабаритных конденсаторов. Передняя и задние панели отсутствуют. Внизу: вид сверху полностью собранного и отлаженного усилителя со снятой верхней крышкой

- ♦ постоянное напряжение на выходе анодного блока питания без нагрузки + 330 В, под нагрузкой + 300 В;
- ♦ анодный ток каждой лампы 6Э6П-Е — 25 мА;
- ♦ сопротивление анодного резистора — 5,5 кОм (10 Вт);
- ♦ сопротивление катодного резистора — 82 Ом;
- ♦ напряжение смещения (равное по абсолютной величине напряжению на катоде относительно общего провода) — минус 1,8 В;
- ♦ напряжение на аноде +160 В.

Трансформатор ТАН37 имеет две накальные обмотки с переменным напряжением по 6,3 В, рассчитанные на ток по 1,6 А каждая с отводами по 5 В. Переменное напряжение одной из двух обмоток выпрямляется диодным мостом (8 А на 1000 В), фильтруется электролитическим конденсатором емкостью 4700 мкФ на напряжение 16 В и используется для питания накала обеих ламп 6Э6П-Е. Постоянное напряжение на накалах ламп составляет 6,7 В, что вполне допустимо.

Вторая накальная обмотка использована для питания накала кенотрона. Так как цепь накала потребляет ток 0,6 А, т. е. значительно ниже расчетного для 6,3-вольтовой обмотки трансформатора, использована обмотка, рассчитанная на 5 В. При этом напряжение под нагрузкой составило 5,9 В, что также вполне допустимо.

Монтаж цепей питания транзисторного усилителя от трансформатора до электролитических конденсаторов большой емкости выполнен медным проводом диаметром 1,2—1,5 мм. Монтаж от этих конденсаторов до выходов на акустические системы выполнен одножильным проводом диаметром 1,5 мм, относительно слаботочные участки — проводом диаметром 0,7 мм от кабеля индивидуальной телеантенны.

Монтаж цепей питания ламповой части усилителя выполнен одножильным медным проводом диаметром 1 мм. В звуковом тракте использован провод центральной жилы индивидуального телевизионного кабеля.

Применена «земляная» шина из полоски меди шириной 1 см и толщиной 0,3 мм. Шина расположена под лампами усилителя напряжения. Она соединяется со средней точкой источника питания транзисторной части и с общим проводом («минус» питания) отрезками центральной жилы телевизионного кабеля длиной 3—4 см. Проводка от входных гнезд к регулятору громкости выполнена медным проводом от витой пары 5 категории польского производства: расплетенная витая пара помещена в экран, соединенный с общим проводом усилителя около ламп 6Э6П-Е.

На задней стенке установлены сетевой разъем, патрон с предохранителем, выходные клеммы для подключения громкоговорителей и входные разъемы «RCA» (часто именуемые «тюльпаны»). На передней стенке установлен выключатель сетевого напряжения и регулятор громкости. В качестве регулятора применен относительно недорогой потенциометр «Vishay», доступный через торговую сеть «Фарнелл». Общая стоимость всех компонентов составляет от 100 до 150 долл. США в зависимости от типа используемых компонентов и цен продавцов-поставщиков в вашем регионе. Общая трудоемкость составляет от 50 до 100 часов в зависимости от ваших слесарных и монтажных навыков, а также имеющихся в вашем распоряжении конструкционных материалов и элементов.

Усилитель отличается ровным и динамичным звучанием с хорошей пространственной сценой и четким, «увлекательным» воспроизведением басовых звуков и барабанов. Хорошо звучит симфоническая, камерная и хоровая музыка, а также джаз и рок. При воспроизведении оркестровой музыки высокой громкости возникает устойчивое ощущение, что имеющиеся искажения на высоких уровнях возникают не в усилителе, а присутствуют в записи. В принципе, это, по-видимому, соответствует действительности, так как известно, что оркестровые записи подвергают компрессии из-за того, что динамический диапазон оркестра (см. главу 1) значительно шире достижимого диапазона в жилом помещении. Лампы 6С45П-Е, которые устанавливались вместо 6Э6П-Е, тоже звучат отлично.

Усилитель вполне конкурентноспособен по звучанию как по отношению к полностью твердотельному усилителю, построенному по схеме В. Ульянова (рис. 5.13) с трансформаторами от фирмы «Lundahl», так и к полностью ламповому усилителю, схема которого показана на рис. 2.10, с трансформаторами от фирмы «Аудиоинструмент». По сравнению с чисто транзисторным усилителем есть едва заметная окраска, придающая дополнительный динамизм и «драйв» при прослушивании. Это связано с присутствием в тракте лампового усилителя напряжения.

По сравнению с полностью ламповым усилителем в звучании более четко обозначена низкочастотная часть, более «выпукло» и «рельефно» передаются звуки бас-гитары, контрабаса и барабанов. Это обеспечивается транзисторным выходным каскадом с низким выходным сопротивлением без общей отрицательной обратной связи. В то же время данный гибридный усилитель в 2,5—3 раза ниже по стоимости

компонентов по сравнению с упомянутыми усилителями, так как не содержит дорогих звуковых трансформаторов.

Усилитель «переигрывает» по воспроизведению низких частот и общей динамике ламповый двухтактный «QUAD 405» стоимостью более 2 тыс. долл. США при сопоставимой достоверности передачи средне- и высокочастотного диапазонов. При сопоставлении использовался проигрыватель виниловых дисков с ламповым фонокорректором «QUAD» и акустические системы «Martin Logan» с электростатическими излучателями для средне- и высокочастотного диапазонов. Прослушивание происходило в акустически подготовленном помещении площадью более 30 м², пол, стены и потолок в котором были оклеены специальным звукопоглощающим материалом, а углы сглажены.

6.10. Двухкаскадный усилитель типа «Айкидо»

Для создания гибридного усилителя повышенной мощности при использовании в транзисторной части напряжения питания $\pm 40... \pm 45$ В от лампового усилителя напряжения требуется большой коэффициент усиления по напряжению G (примерно $G = 50$ или даже выше) и одновременно низкое выходное сопротивление. Ни одна из схем ламповых усилителей напряжения, ранее описанных в настоящей главе, такой коэффициент усиления по напряжению обеспечить не может.

Максимальным коэффициентом усиления обладает схема на лампе 6С45П (рис. 6.9), для которой при использовании шунтирующего конденсатора в цепи катода лампы можно получить усиление $G = 30$. Более высокие значения усиления по напряжению требуют применения слаботочных ламп с коэффициентом усиления около 100, при этом неизбежно возникает необходимость введения второго каскада на лампе с большим рабочим током анода для обеспечения низкого выходного сопротивления.

Описанная в главе 4 схема комбинированного каскада на 4-х триодах («Айкидо»), предложенная Дж. Броски (рис. 4.24), отлично подходит для этих целей. Пример реализации такой схемы показан на рис. 6.22. Первый каскад собран на двойном триоде 12AX7 по схеме с общим катодом (нижний по схеме триод) с генератором тока на верхнем по схеме триоде в качестве анодной нагрузки.

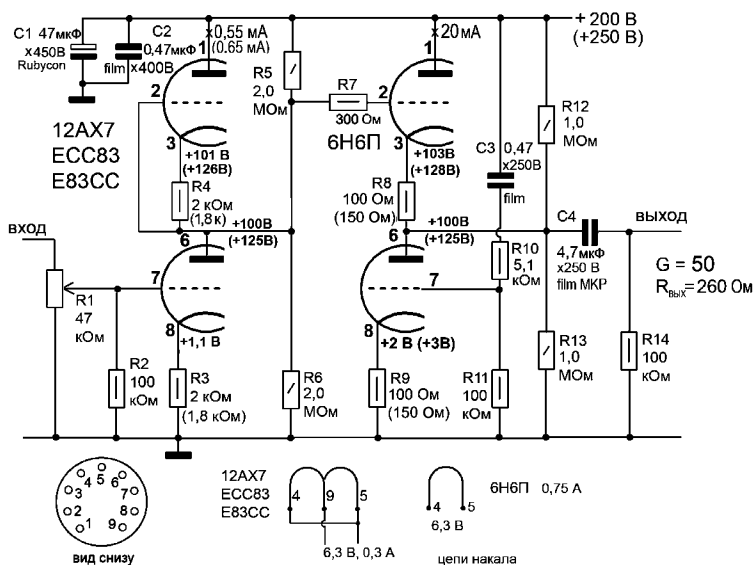


Рис. 6.22. Схема двухкаскадного лампового усилителя напряжения «Айкидо». В скобках указаны номиналы резисторов R3, R4, R8, R9, значения напряжений и токов для напряжения источника питания 250 В

Ток каскада составляет менее 1 мА. Генератор тока создает виртуальную очень высокоомную нагрузку и повышает таким образом линейность каскада по сравнению со случаем резистивной анодной нагрузки.

Коэффициент усиления каскада по напряжению равен 50. Он может быть повышен на 10—20 %, если шунтировать резистор R3 высококачественным конденсатором емкостью более 50—100 мкФ на напряжение 6,3—10 В.

Второй каскад собран на двойном триоде 6Н6П по схеме катодного повторителя Броски (см. подробнее рис. 4.23 и комментариев к нему). Ток каскада равен 20 мА. Он обеспечивает коэффициент передачи по напряжению около 1 и имеет выходное сопротивление менее 300 Ом. Если R9 шунтировать электролитическим конденсатором (см. рис. 4.23 и комментарий к нему) емкостью 1000—2000 мкФ (на напряжение 6,3—10 В), а резистор R8 закоротить ($R8 = 0$), выходное сопротивление уменьшится в несколько раз (см. табл. 4.8).

В свою очередь, электролитический конденсатор надо шунтировать пленочным емкостью 1—10 мкФ за исключением случаев, когда электролитический конденсатор имеет очень высокое качество (Rubycon Black Gate, Elna Silmic, Elna Cerafine).

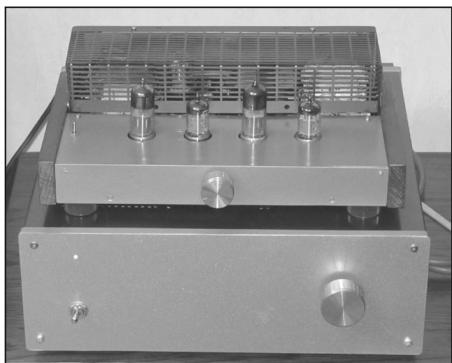


Рис. 6.23. Предварительный стереофонический усилитель «Айкидо» в сборе (лампы 12AX7, 6Н6П). Блок питания, включая анодный и накальный трансформаторы, кенотрон 6Ц5С, конденсаторы и дроссель, находятся под декоративной решеткой. Усилитель показан совместно с изготовленным в виде отдельного блока транзисторным усилителем тока

Для того, чтобы значения разности потенциалов между нитью накала и катодами обоих триодов сделать одинаковыми, на один из выводов нити накала каждой лампы подается напряжение, равное $+ \frac{1}{4}U_0$, от положительной клеммы источника питания через резистивный делитель напряжения (см. рис. 6.18). Тогда абсолютное значение разности потенциалов нити накала относительно каждого из катодов будет равно $\frac{1}{4}U_0$.

Во втором каскаде можно использовать лампу 6Н30П, установив $R_{10} = 6,8 \text{ кОм}$. Режимы ламп и номиналы элементов в этом случае (анодный ток 20 мА):

- ♦ при напряжении источника питания 200 В – $U_A = 100 \text{ В}$, $U_C = -5,5 \text{ В}$, $R_8 = R_9 = 270 \text{ Ом}$;
- ♦ при напряжении источника питания 250 В – $U_A = 125 \text{ В}$, $U_C = -7 \text{ В}$, $R_8 = R_9 = 350 \text{ Ом}$.

Двухкаскадный ламповый усилитель напряжения «Айкидо» уверенно раскачивает мощные усилители тока, способные отдавать до 200 Вт на нагрузке 4 Ом и 100 Вт на нагрузке 8 Ом. По этой причине было принято решение изготовить стереовариант «Айкидо» в виде отдельного устройства. Его внешний вид показан на рис. 6.23 совместно с изготовленным в виде отдельного блока двухканальным транзисторным усилителем тока.

Можно использовать блок питания, схема которого показана на рис. 6.10. Выходное напряжение + 200 В при использовании кенотрона требует применения анодного трансформатора с двумя вторичными обмотками около 200 В (под нагрузкой) каждая. При применении вместо кенотрона двух диодов напряжение каждой из двух вторичных обмоток должно составлять 140 В для получения напряжения на выходе блока питания 200 В и 176 В для получения на выходе напряжения 250 В. В конце книги в главе 8 указаны возможные серийные трансформаторы типа ТА.

В транзисторном усилителе для поддержания его работоспособности без лампового блока имеется встроенный «дежурный» усилитель напряжения на ОУ ОРА551 с напряжением питания ± 30 В и регулятор громкости, которые отключаются при работе совместно с ламповым предусилителем «Айкидо».

6.11. Повышение мощности: мостовая схема

Если мощности до 50 Вт недостаточно, можно использовать мостовое включение двух одинаковых усилителей, включив на входе «фазорасщепитель» — каскад на одном триоде, формирующий на выходе две одинаковых по амплитуде, но противофазных «копии» входного сигнала. Противофазные сигналы затем усиливаются каждым из двух усилителей.

Нагрузка подключается между выходными клеммами усилителей, не соединенными с общим проводом. В нагрузке складываются выходные сигналы. В результате выходное напряжение оказывается в два раза, а мощность — в четыре раза выше, чем у каждого из двух усилителей по отдельности.



Примечание.

В мостовом усилителе двухполярный источник питания оконечного транзисторного усилителя тока можно заменить однополярным, так как «силовая» земля оказывается не востребуемой. Вместо двухполярного источника питания можно применить однополярный с искусственной средней точкой, образованной делителем из двух идентичных резисторов. Эта средняя точка используется в качестве общего сигнального провода при подключении выхода лампового усилителя напряжения ко входу оконечного усилителя.

Обращаю внимание, что каждое плечо мостового усилителя «видит» только половину сопротивления нагрузки. Это значит, что соединяемые «мостом» усилители должны быть рассчитаны на работу с половинным сопротивлением используемой нагрузки. Это не всегда возможно. Поэтому в большинстве реальных случаев при мостовом соединении усилителей сопротивление нагрузки удваивают. Тогда при

неизменном напряжении питания выходная мощность увеличится не в четыре, а только в два раза.

Мостовые усилители хорошо звучат. **Во-первых**, при мостовом включении подавляются четные гармоники. **Во-вторых**, благоприятно сказывается на звучании отсутствие силовой земли, так как в этом случае исключается нежелательное влияние токов, возникающих в силовом общем проводе, на входные цепи. Упрощается также конструкция источника питания и количество электролитических конденсаторов большой емкости: мостовой усилитель (в данном случае оконечный транзисторный усилитель тока) питается от однополярного источника.

Вариант мостового усилителя показан на **рис. 6.24**. На входе включен каскад с разделенной нагрузкой на лампе 6Н6П, затем два усилителя напряжения на 6С45П, затем два параллельных усилителя тока. Вариант, представленный на **рис. 6.24**, имеет следующие параметры:

- ♦ коэффициент усиления по напряжению — 50;
- ♦ чувствительность — 0,7 В;
- ♦ выходная мощность на нагрузке 8 Ом — 100 Вт;
- ♦ на нагрузке 6 Ом — 150 Вт.

Схема приводится в качестве примера. Автор испытал один канал мостового усилителя, сделанный из стереофонического усилителя. Читателям, решившим изготовить мостовой усилитель, предлагается самим выбрать вариант усилителя напряжения из числа описанных в предыдущих разделах, а также определить напряжение питания и резисторы во входных цепях параллельного усилителя в соответствии с ранее описанными рекомендациями.

Напряжение питания можно увеличивать до 75 В с одновременным увеличением сопротивления резисторов до 220—300 Ом, при этом целесообразно зашунтировать конденсаторами емкостью порядка 1000 мкФ катодные резисторы сопротивлением 47 Ом ламп 6С45П, чтобы увеличить коэффициент усиления по напряжению. Не забудьте, что рабочее напряжение конденсаторов вольтодобавки также должно быть пропорционально увеличено до 35 В.

На входе мостового усилителя включен каскад на триоде с разделенной нагрузкой. Такой каскад не рассматривался в **главе 4**, так как он весьма редко используется в гибридных усилителях. Этот каскад обычно применяют в двухтактных ламповых усилителях для получения двух одинаковых по амплитуде, но противоположных по фазе, копий входного сигнала без изменения его амплитуды, т. е. без усиления по напряжению.

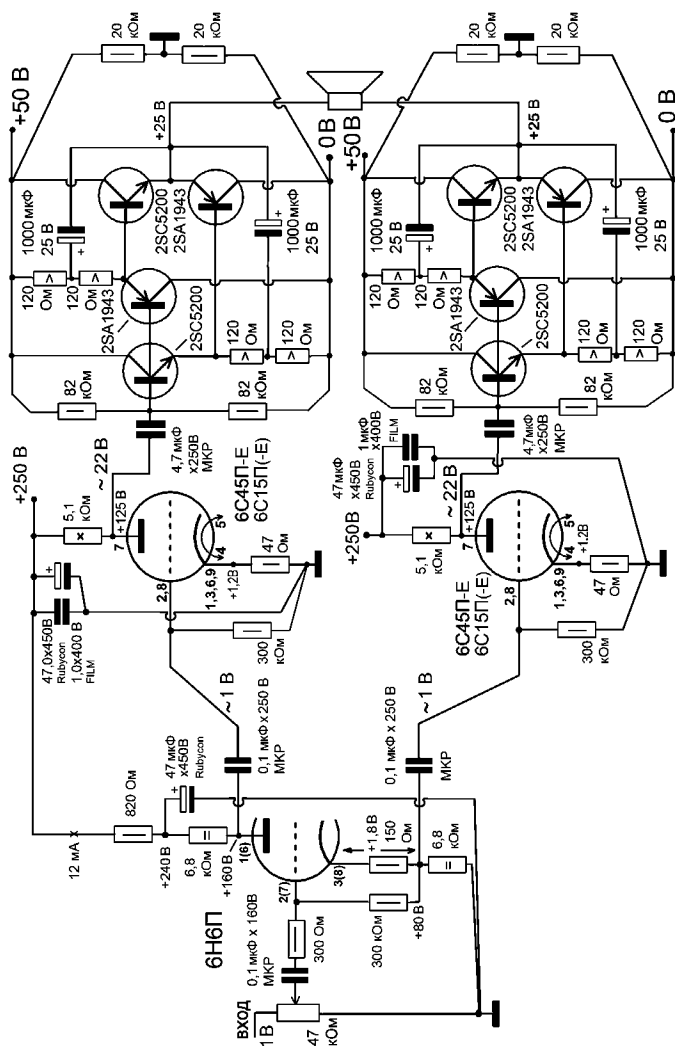


Рис. 6.24. Схема мостового гибридного усилителя

По этой причине такой каскад называют фазоинверсным. Напряжение источника питания делится на три равные части между анод-катодным промежутком лампы и двумя одинаковыми резисторами в цепи катода и анода (в данном случае их сопротивление равно 6,8 кОм).

Для создания смещения на сетке установлен резистор сопротивлением 150 Ом. Если не рассматривать присутствие анодного резистора, имеем катодный повторитель. С анодным резистором возникает возможность получения синфазного с напряжением на сетке выходного сигнала. Присутствие высокого сопротивления в цепи катода, однако, не позволяет получить усиление по напряжению, так как катодный резистор создает сильную местную отрицательную обратную связь.

Как уже отмечалось в первой главе, изменение напряжения на аноде происходит в противофазе, а изменение напряжения на катоде — в фазе с изменением напряжения на сетке. Таким образом, и реализуется фазоинверсная функция каскада с разделенной нагрузкой.

**Совет.**

Для читателей, уже собравших стереоусилитель, можно порекомендовать «экспресс-тест» оценки мостовой схемы.

Для этого с движка потенциометра-регулятора громкости на одну из двух ламп 6С45П сигнал подается непосредственно на сетку, а на другую лампу — через каскад на операционном усилителе по схеме инвертирующего повторителя с резистором 10—20 кОм во входной цепи (он определяет входное сопротивление) и разделительными конденсаторами (1—2 мкФ на входе и 0,1—0,5 мкФ на выходе).

**Совет.**

Рекомендуется использовать следующие микросхемы: AD825, AD797, ОРА627, AD744 и в самом крайнем случае — NE5334, NE5332, ОРА134, ОРА3134, ОРА604.

Выбор лампы (6Н6П) для каскада с разделенной нагрузкой фактически определился имеющимся источником питания для ламп 6С45П, 6Э5(6)П с напряжением 250 В. Это значит, что напряжение между анодом и катодами лампы во входном каскаде должно составить примерно 80 В.

В таком режиме неплохо работают лампы 6Н6П, 6Н23П, а также сверхминиатюрные лампы 6Н16Б, 6Н18Б и 6Н28Б. Предпочтение

было отдано первой по причине хорошего звучания и определенным «эстетическим» критериям: странно выглядит сверхминиатюрная лампа на входе усилителя мощностью более 100 Вт на канал. Выбрано значение анодного тока 12 мА.

Для лампы 6Н23П при напряжении анод-катод 80 В целесообразно выбрать ток анода 8 мА. Тогда номиналы резисторов изменятся следующим образом: вместо двух резисторов по 6,8 кОм надо установить резисторы по 10 кОм, а вместо резистора 150 Ом — резистор 220 Ом. Номинал резистора величиной 820 Ом в цепи развязки по питанию не изменяется. Входная лампа работает в облегченном режиме в том смысле, что размах выходного напряжения не превышает размаха входного, т. е. ± 1 —2 В.



Примечание.

Напомню, что на сетке входной лампы имеется высокое постоянное напряжение (80 В), поэтому разделительный конденсатор на входе — обязателен!

В этом каскаде могут работать и другие лампы, например, 12АХ7, 6Н8С, 6Н9С, однако для них потребуются увеличить напряжение источника питания до 300—400 В и изменить номиналы всех резисторов.

Как уже упоминалось, при мостовом включении транзисторного оконечного усилителя можно использовать однополярный источник питания. Однако настраивать и проверять работоспособность оконечного усилителя тока (каждого «плеча» по отдельности) лучше с использованием вспомогательного двухполярного источника. Он может быть маломощным, порядка 10 Вт, но напряжение каждой из двух его половинок должно равняться половине напряжения питания, выбранного для мостового усилителя. С таким источником питания необходимо выставить нулевой потенциал на выходе в режиме покоя и убедиться в работоспособности каскада с помощью источника музыкального сигнала.

Если такого вспомогательного источника питания нет, необходимо выставить половину напряжения источника питания на выходе каждого из двух включаемых мостом выходных транзисторных усилителя, убедиться, что половина напряжения питания имеется в центре делителей напряжения, образованных резисторами по 20 кОм (эти точки соединяются затем с общим проводом лампового входного каскада).

Затем можно подключать ламповый усилитель напряжения, предварительно проверив соответствие режимов указанным на схеме, и по возможности, проверив работоспособность с помощью любого оконечного усилителя или какой-либо измерительной аппаратуры, имеющейся в вашем распоряжении.

Рекомендуем вначале собрать усилитель по стандартной схеме, прослушать его в стереоварианте, убедиться в высоком качестве звучания и только затем переходить к изготовлению фазоинверсного входного каскада и к мостовому соединению выходных усилителей тока. При этом двухполярный источник питания без какой-либо переделки может использоваться и в мостовом варианте.



Примечание.

Мостовое включение с превращением стереофонического усилителя в монофонический повышенной мощности предусмотрено в некоторых фирменных усилителях с помощью переключателей, устанавливаемых на задней панели аппарата. При этом в спецификациях отмечают не только возрастающую мощность, но и снижающиеся искажения.

Опытным радиолюбителям можно рекомендовать сделать мостовой усилитель с использованием лампового усилителя напряжения и согласующего трансформатора с одной первичной и двумя вторичными обмотками для получения двух одинаковых по амплитуде, но противоположных по фазе напряжений для раскачки мостового оконечного усилителя тока (**рис. 6.25**).

Все три обмотки трансформатора должны иметь одинаковое количество витков для обеспечения коэффициента передачи по напряжению $1:(1 + 1)$. Допустимо уменьшение числа витков на вторичных обмотках до 0,7 + 0,7 с учетом большого коэффициента усиления по напряжению лампы 6С45П. Первичная обмотка должна создавать нагрузку, эквивалентную 4—5 кОм, быть рассчитана на постоянный ток не менее 40 мА и рассеиваемую мощность примерно 20 Вт. Вторичные обмотки должны быть рассчитаны на нагрузку примерно по 5—10 кОм каждая.



Примечание.

*Сравнивая схемы, показанные на **рис. 6.24** и **6.25**, можно видеть, что такой трансформатор заменяет два триода и 5(!) разделительных конденсаторов.*

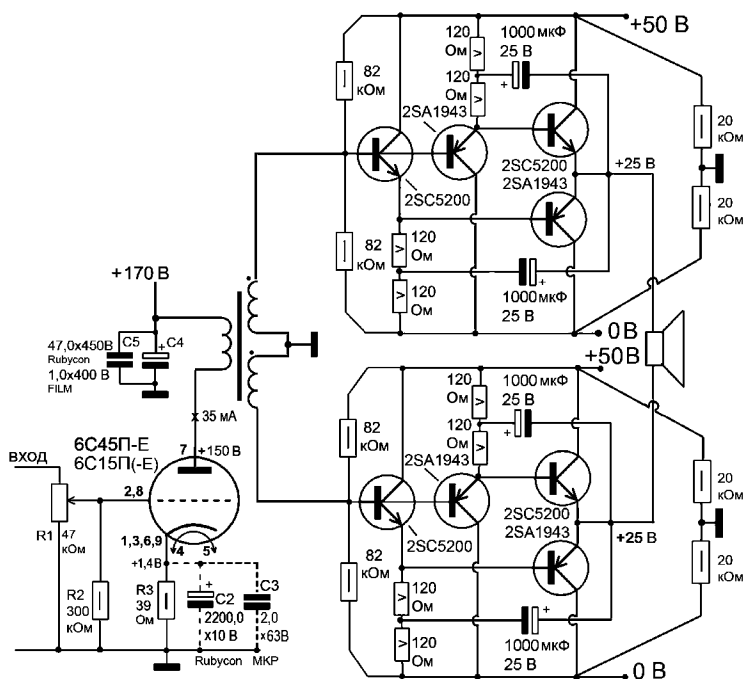


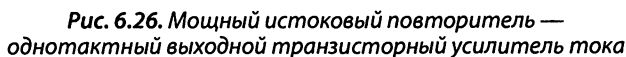
Рис. 6.25. Мостовой усилитель с согласующим трансформатором вместо фазоинвертирующего каскада

6.12. Усилитель с выходным каскадом класса А по схеме Чиффолли

Схема и конструкция

В этом разделе описана серия гибридных усилителей, в основе которых лежит однотактный выходной каскад на полевом транзисторе, работающем в классе А. Концептуально такой каскад является максимально возможным твердотельным аналогом ламповых «однотактников». Используется вариант истокового повторителя, предложенный итальянским радиолюбителем Андреа Чиффолли. Схема показана на рис. 6.26.

Входной сигнал подается через конденсатор C1 и резистор R6 на затвор нижнего по схеме полевого транзистора. В цепи истока этого транзистора установлен генератор тока на таком же полевом транзисторе и биполярном транзисторе BD139. Значение тока задается общим сопротивлением R^* параллельно соединенных резисторов R8,



Особенности и преимущества схемы обсуждались в главе 5 (см. раздел 5.6, рис. 5.19, б). Сигнал подается на затвор относительно стока полевого транзистора, а не относительно истока, как это делается в типовых схемах мощных истоковых повторителей.

Такое включение, кроме преимуществ, обсуждавшихся в главе 5, по-видимому, уменьшает входную емкость каскада. Это снижает требования к параметрам предварительного лампового усилителя напряжения: он не должен иметь низкое выходное сопротивление. Вполне достаточно, чтобы выходное сопротивление составляло несколько килоом.

При указанном на схеме напряжении питания рекомендуемое значение тока покоя выходного транзистора составляет 1,5 А для нагрузки сопротивлением 8 Ом и 2—2,2 А для нагрузки сопротивлением 4 Ом.

Непрерывно потребляемая мощность от источника питания равна произведению напряжения питания на ток покоя выходного транзистора. При подаче на вход сигнала сопротивление канала нижнего по схеме полевого транзистора изменяется при неизменности силы тока, задаваемой генератором тока, и часть тока ответвляется в нагрузку.

Максимальная полезная мощность усилителя при напряжении питания 26 В ограничивается максимальным значением амплитуды выходного сигнала, равным 12 В, и для нагрузки $R_{\text{нагр}} = 8 \text{ Ом}$ составляет $W = 0,5 \times 12^2/8 \approx 9 \text{ Вт}$. Ток покоя должен составлять не менее 1,5 А.

При таком же напряжении питания для нагрузки $R_{\text{нагр}} = 4 \text{ Ом}$ максимальная мощность может достигать значения $W = 0,5 \times 12^2/8 \approx 18 \text{ Вт}$, однако ток покоя должен быть при этом не менее 3 А. Непрерывно потребляемая мощность стереоварианта такого усилителя составит более 130 Вт!

При стандартных габаритах усилителя $43 \times 30 \times 10 \text{ см}^3$ необходимо будет принять весьма серьезные меры по охлаждению такого аппарата. Возможно, потребуется увеличить габариты усилителя или применить принудительное охлаждение. Последнее решение, однако, автор считает неприемлемым для аппаратуры, предназначенной для домашнего применения.

Во-первых, из-за возможного акустического шума, **во-вторых**, из-за необходимости периодического обслуживания вентиляторов, **в-третьих**, просто из-за соображений технической эстетики. Поэтому рекомендация автора заключается в использовании тока покоя 2—2,2 А для нагрузки 4 Ом, что обеспечит выходную мощность 12—14 Вт.

Усилитель класса А требует повышенного внимания к мощности источника питания и радиаторам мощных транзисторов. Вариант, собранный автором, показан на рис. 6.27. Несущей основой усилителя являются 4 одинаковых радиатора, имеющие ребра с одной стороны и гладкую поверхность с другой стороны. Ребра радиаторов обращены вверх, а гладкая поверхность — вниз. Радиаторы скреплены снизу металлическими пластинами шириной 3—4 см и толщиной 3—5 мм. Было принято решение сделать усилитель плоским, высотой примерно 8 см.

В усилителе применены отдельные для каждого канала блоки питания мощных источников повторителей. Полная схема

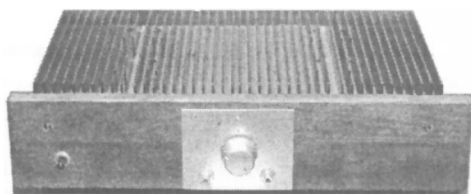


Рис. 6.27. Усилитель в сборе

источника питания показана на рис. 6.28. Использовано 2 тороидальных трансформатора мощностью по 150 Вт, приобретенных на строительном рынке и предназначенных для питания осветительных галогеновых ламп накаливания.

Каждый трансформатор содержит две обмотки, обеспечивающие переменное напряжение по 12 В каждая. Число витков уменьшено, а обмотки соединены последовательно для получения переменного напряжения 20 В (под нагрузкой). В каждом канале использована мостовая схема выпрямления на четырех диодах 8TQ100 с конденсатором 10000 мкФ + 3300 мкФ + 2 мкФ для каждого канала.

Конденсатор емкостью 3300 мкФ — высококачественный (Rubycon, Elna). Конденсатор емкостью 2 мкФ — пленочный, желательно серии МКР (полипропиленовый), ФТ (фторопластовый) или, в крайнем случае, — К78, К73, МКТ, МКС. В мостовом выпрямителе можно также применить диоды КД213(А-Г), MBR10100, FR602—FR607. Параметры и цоколевка диодов приводились ранее (рис. 6.5, табл. 6.1).

Схема каждого канала усилителя, за исключением выходных разделительных конденсаторов и блока питания, собрана на плате размером 65×110 мм без применения печатного монтажа. Мощные полевые транзисторы установлены на плате металлической поверхностью вниз

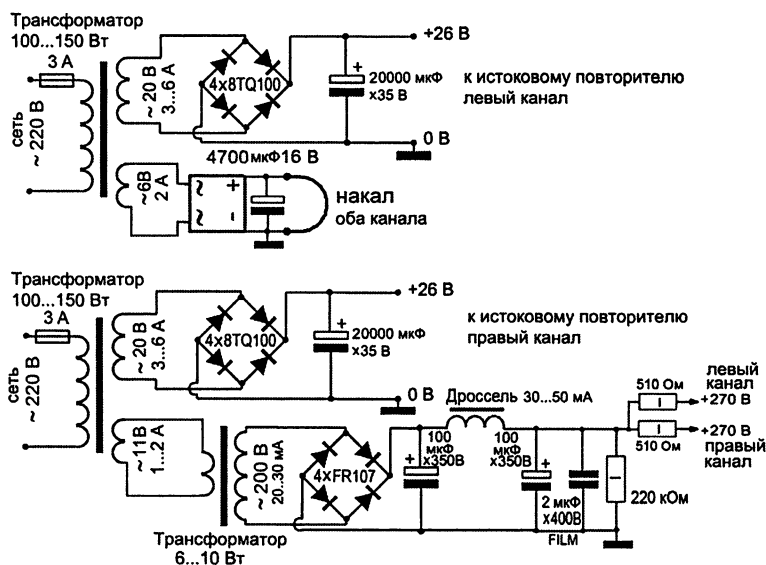


Рис. 6.28. Схема источника питания гибридного усилителя с транзисторным однотактным усилителем класса А на полевых транзисторах

таким образом, чтобы расстояние между ними было равно ширине каждого из 4 радиаторов.

Каждый из четырех мощных полевых транзисторов привинчен через изолирующую прокладку к одному из радиаторов. В отличие от большинства фирменных и самодельных усилителей, в этой конструкции входные гнезда вынесены на переднюю панель для минимизации звукового тракта и исключения наводок со стороны блока питания и силовых цепей. Лампы расположены в непосредственной близости от входных разъемов и регулятора громкости.



Примечание.

Недостатком конструкции можно, по-видимому, считать горизонтальное расположение ламп(ы), обусловленное малой высотой корпуса.

Вместо указанных на схеме транзисторов IRF250 можно применить транзисторы IRFP150, IRFP250 (200 В, 33 А, цоколевка совпадает), IRF240, IRFP240.

Питание обоих каналов лампового усилителя напряжения осуществляется от одного источника высокого напряжения 100—300 В (в зависимости от выбранной схемы лампового каскада) и источника напряжения накала 6 В. В связи с тем, что данный усилитель не требует предварительного усилителя напряжения с низким выходным сопротивлением, мощность, потребляемая ламповым усилителем, составляет не более 10 Вт в сумме на оба канала.

Поэтому вместо сетевого повышающего трансформатора для формирования анодного напряжения было использовано «обратное» включение понижающего 10-ваттного тороидального 12-вольтowego трансформатора, приобретенного на строительном рынке. Этот трансформатор использован как повышающий с коэффициентом $220/12 = 18,3$. На один из силовых трансформаторов мощностью 150 Вт наматывается дополнительная обмотка, обеспечивающая переменное напряжение около 11 В (примерно 6 витков на вольт) проводом диаметром 0,7—0,8 мм.

Можно делать отводы с шагом около 1 В, если необходимо точно подобрать выходное напряжение. К этой обмотке подключается низковольтная обмотка малогабаритного повышающего трансформатора. Изменяя напряжение на дополнительной обмотке, можно в широких пределах изменять анодное напряжения питания ламп с учетом 1,4-кратного повышения напряжения после выпрямителя и фильтра.

Таким образом, можно при желании опробовать различные схемы усилителей напряжения на лампах из числа предлагаемых в следующем разделе с напряжением питания от 100 В до 300 В.

В блоке питания ламповой части усилителя использована мостовая схема выпрямления на диодах FR107, дроссель и конденсаторы емкостью по 47—100 мкФ перед дросселем и после него. Уменьшение емкости конденсаторов по сравнению со схемой на рис. 6.10 связано с уменьшением потребляемого тока ламповым усилителем, работающим на высокоомный вход истокового повторителя. Дроссель можно использовать от старой ламповой аппаратуры на ток до 50 мА. Если не удалось найти подходящий дроссель, его можно исключить при условии, что емкость конденсаторов составляет не менее 100 мкФ.

Применение диодного выпрямителя вместо кенотронного обусловлено только ограничениями по габаритам в рамках выбранной конструкции усилителя. Питание накала ламп осуществляется выпрямленным напряжением от дополнительно намотанной вторичной обмотки на втором из основных трансформаторов. В качестве выпрямителя использован стандартный диодный мостик на ток 2 А и напряжение 1000 В.

При отсутствии ошибок в монтаже усилитель готов к использованию сразу после сборки. Необходимо только выставить подстроечным резистором половину напряжения питания на отрицательном выводе выходного разделительного конденсатора. Рекомендуется прослушать усилитель, подав на его вход сигнал с выхода CD-проигрывателя. При напряжении сигнала 1 В и нагрузке 4 Ом выходная мощность составит 0,25 Вт на канал. Это позволит убедиться в работоспособности, оценить нейтральность и чистоту звучания.

Ламповые усилители напряжения для истокового повторителя

Если вы уже собрали один из ламповых усилителей напряжения, описанных в разделе 6.7 для работы совместно с двухтактным параллельным усилителем тока на биполярных транзисторах, вы можете испытать с любым из них мощный истоковый повторитель. Любой из ранее описанных ламповых усилителей пригоден для раскачки истокового повторителя.



Примечание.

Требования к усилителю напряжения, предназначенному для работы совместно с истоковым повторителем по коэффициенту

усиления, по амплитуде выходного напряжения, по отдаваемому в нагрузку току (по выходному сопротивлению) значительно «мягче». Ведь истоковый повторитель по сравнению с параллельным усилителем тока на биполярных транзисторах обладает более низкой выходной мощностью и более высоким входным сопротивлением.

Требования к ламповому каскаду таковы: при чувствительности 1 В коэффициент усиления по напряжению должен быть равен 8—12 для нагрузки сопротивлением 4—8 Ом, а выходное сопротивление — 5—10 кОм. Более высокое выходное сопротивление может привести к тому, что входная емкость полевого транзистора начнет шунтировать выход усилителя напряжения в высокочастотной области звукового диапазона. Это приведет к снижению коэффициента передачи на высоких частотах.

Исходя из этих требований и руководствуясь принципом краткости сигнального тракта, а также минимальной потребляемой мощностью и стоимостью компонентов, можем просто методом исключения выбрать подходящие схемы из ранее описанных. Во-первых, исключаются все двухкаскадные схемы с катодным повторителем (рис. 6.19, 6.20, 6.22) как необоснованно сложные. Далее исключаем схему, содержащую два параллельно соединенных триода 6Н6П (рис. 6.16) вследствие большого потребляемого тока. Остаются 4 схемы:

- ♦ каскад на триоде 6С45П (рис. 6.9);
- ♦ каскад на тетроде 6Э6П в триодном включении (рис. 6.13);
- ♦ каскад на половинке лампы 6Н30П (рис. 6.15);
- ♦ каскад с динамической нагрузкой на 6Н6П, 6Н30П (рис. 6.17).

Последний каскад наиболее предпочтителен, так как каскад с динамической нагрузкой обладает большей линейностью. Учитывая, что ток, потребляемый каждым каналом, составляет более 20 мА, необходимо либо использовать блок питания, описанный ранее на рис. 6.10, либо предусмотреть увеличение до 15—20 Вт мощности повышающего трансформатора в схеме на рис. 6.27.

Применение указанных схем обеспечит отличное звучание, но **приведет к неоправданному увеличению габаритов и потребляемой мощности.** Поэтому, с учетом ослабленных требований по обеспечению низкого выходного сопротивления, для раскачки истокового повторителя можно предложить серию усилителей на хорошо зарекомендовавших себя двойных и одиночных триодах с внутренним сопротивлением 3—7 кОм и анодным током 6—10 мА. Эти триоды

позволяют получить требуемые коэффициенты усиления и выходное сопротивление не выше 5 кОм.

Подходят следующие лампы:

- ♦ двойные триоды 6Н8С с октальным цоколем;
- ♦ «пальчиковые» двойные триоды 6Н6П, 6Н30П, 6Н23П, 6Н3П с 9-штырьковым цоколем;
- ♦ одиночные «пальчиковые» триоды 6С3П, 6С4П с 9-штырьковым цоколем;
- ♦ сверхминиатюрные двойные триоды 6Н16Б, 6Н18Б, 6Н28Б;
- ♦ сверхминиатюрные одиночные триоды 6С6Б, 6С7Б, 6С51Н.

Предлагаемые схемы включения — стандартный каскад с общим катодом (один триод) и каскад с динамической нагрузкой (два триода).

Рассмотрим подробнее реализацию этих схем для данного ряда ламп.



Совет.

*Напомню, что при сборке лампового усилителя необходимо руководствоваться рекомендациями, приведенными в **разделах 6.1—6.4**, а также практическими примерами, показанными на **рис. 6.11, 6.12, 6.21**.*



Внимание.

Во многих схемах этого раздела можно и рекомендуется применять гальванические элементы вместо катодного резистора. Ни в коем случае не используйте батарейки для часов. При пайке они взрываются! Применяйте «пальчиковые» элементы формата AAA.

Двойной триод с октальным цоколем 6Н8С (зарубежный аналог/прототип 6SN7). Эта лампа получила высокую оценку аудиофилов во всем мире, она используется, например, во входном каскаде усилителя «РЗ» фирмы «Audio Note» (рис. 4.5). По-видимому, единственным ее недостатком по сравнению с другими вышеупомянутыми лампами является относительно высокое напряжение питания — 250—350 В и более. На одном баллоне можно построить стереоусилитель напряжения по простейшей схеме с общим катодом и резистивной нагрузкой (рис. 4.4, 4.5). Рекомендуемое сопротивление анодного резистора 10—20 кОм.



Совет.

*Рекомендую воспользоваться таблицей параметров схемы и режимов, которая приведена в **главе 4** для данного триода (**табл. 4.5**).*

По сравнению с базовой схемой, показанной на рис. 4.4, необходимо добавить электролитический конденсатор высокого качества емкостью 20—30 мкФ между клеммой подключения источника высокого напряжения и общим проводом. Этот конденсатор целесообразно зашунтировать пленочным емкостью 1—2 мкФ. Рабочее напряжение конденсаторов 350—450 В. После сборки и проверки работоспособности разделительный конденсатор в ламповом каскаде удаляется, а вывод анода лампы подключается непосредственно к левому по схеме выводу конденсатора С1 истокового повторителя (рис. 6.26).

Каскад с динамической нагрузкой на лампе 6Н8С показан на рис. 6.29. Он не имеет особенностей. Параметры более подробно указаны в табл. 4.7 в главе 4. Вместо 6Н8С (с лучшим результатом) можно использовать зарубежные лампы 6SN7, 5692, ECC32, а также одиночные триоды 6С2С, удвоив в последнем случае число баллонов в усилителе. После сборки и проверки работоспособности конденсатор С5 и резистор R6 в ламповом каскаде удаляются, а вывод катода верхнего триода подключается непосредственно к левому по схеме выводу конденсатора С1 истокового повторителя (рис. 6.26).

Двойной триод 6Н6П. С использованием этой лампы можно сделать простой резистивный каскад по схеме с общим катодом и каскад с динамической нагрузкой.

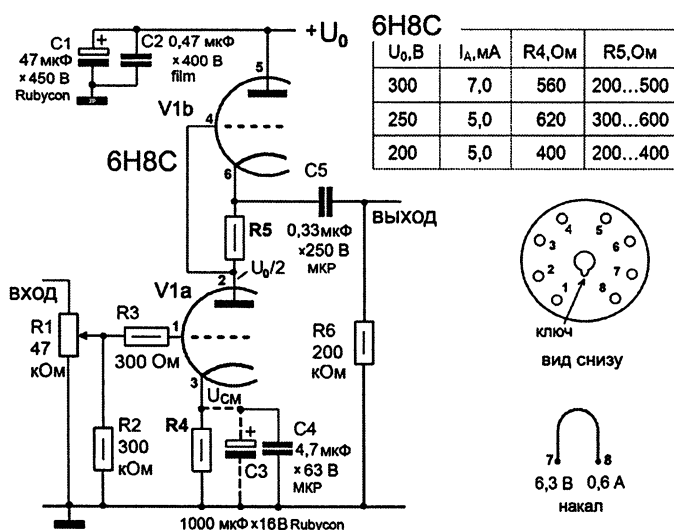


Рис. 6.29. Каскад с динамической нагрузкой на двойном триоде 6Н8С

Схема простого резистивного каскада показана на рис. 6.30 с номиналами элементов для трех различных значений напряжения питания. При напряжении источника питания 160 В рабочая точка триода 80 В 12,5 мА требует смещения на сетке $-1,5$ В. Это позволяет использовать гальванический элемент вместо резистора. Учитывая относительно большой ток в цепи катода (12,5 мА), целесообразно установить гальванический элемент («пальчиковая» батарейка формата ААА) в цепь базы. Катод лампы в этом случае просто соединяется с общим проводом. Из схемы исключается не только катодный резистор, но и шунтирующий его электролитический конденсатор. Такая схема приводилась ранее для лампы 6С45П на рис. 4.6, а.

После сборки и проверки работоспособности каскада конденсатор С5 и резистор R6 в ламповом каскаде удаляются, а вывод анода лампы подключается непосредственно к левому по схеме выводу конденсатора С1 истокового повторителя (рис. 6.26).

Можно порекомендовать использовать каскад с динамической нагрузкой на лампе 6Н6П. Его схема уже приводилась на рис. 6.17. Учитывая невысокую мощность оконечного усилителя в рассматриваемом случае можно понизить напряжение питания каскада до 160 В с одновременным изменением номинала резистора R4: вместо указанного на рис. 6.17 номинала надо взять $R4 = 120$ Ом. Сопротивление резистора R5 (схема на рис. 6.17) может находиться в диапазоне 40—120 Ом.

Как и в предыдущих случаях, после сборки и проверки работоспособности усилителя напряжения конденсатор С5 и резистор R6 удаля-

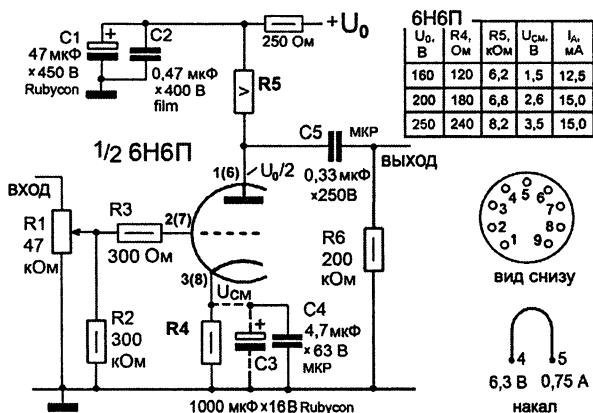


Рис. 6.30. Усилитель напряжения на лампе 6Н6П по схеме с общим катодом. Номера выводов лампы в скобках соответствуют второму триоду

ются, а вывод катода верхнего триода подключается непосредственно к левому по схеме выводу конденсатора С1 истокового повторителя (рис. 6.26).

Триод 6С3П (6С4П). Эти лампы имеют хорошую репутацию среди аудиофилов. Каждый баллон содержит один триод. Рабочий ток этих триодов составляет 10—15 мА.



Примечание.

Лампы 6С3П и 6С4П имеют близкие параметры (см. табл. 4.1), но разную цоколевку! Можно обеспечить их совместимость по цоколевке для отбора наиболее «звучащих» экземпляров среди ламп обоих типов, если использовать при монтаже на ламповых панелях только выводы 2—5, 9, а выводы 1, 6—8 оставить свободными.

На рис. 6.31 показан резистивный каскад, а на рис. 6.32 — каскад с динамической нагрузкой. Использование напряжения смещения величиной 1,5 В позволяет применить гальванический элемент (см. рекомендации, изложенные при обсуждении рис. 6.30). Гальванический элемент можно применить и в каскаде с динамической нагрузкой.

После сборки и проверки работоспособности конденсатор С5 и резистор R6 в ламповом каскаде удаляются, а вывод анода лампы (рис. 6.31) и вывод катода верхнего триода (рис. 6.32) подключаются непосредственно к левому по схеме выводу конденсатора С1 истокового повторителя (рис. 6.26).

Двойной триод 6Н23П. Эта лампа весьма популярна среди отечественных и зарубежных аудиофилов. Она выпускается в настоя-

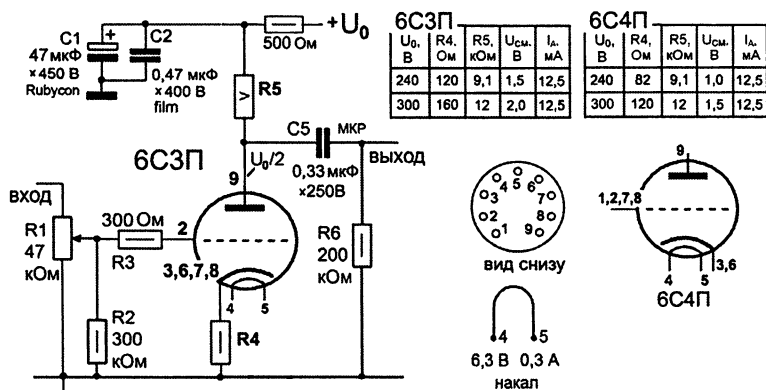


Рис. 6.31. Усилитель на триоде 6С3П по схеме с общим катодом

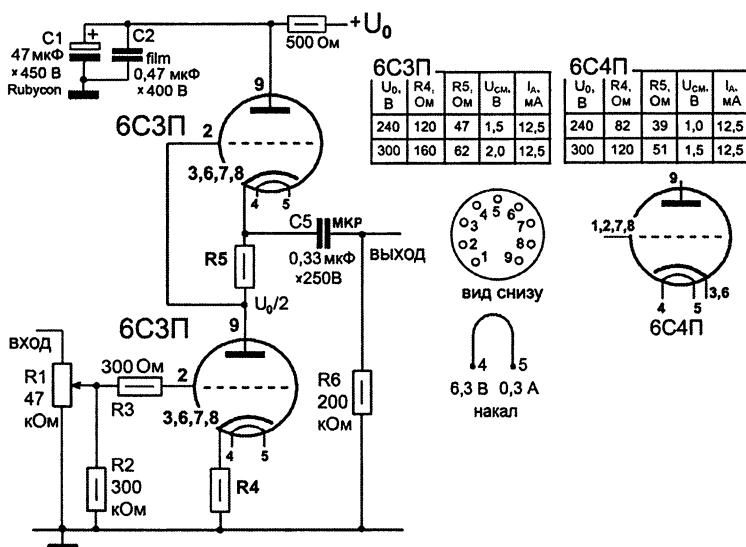


Рис. 6.32. Каскад с динамической нагрузкой на двух триодах 6C3П (6C4П)

щее время российскими предприятиями и поставляется на экспорт. Зарубежными аналогами являются лампы 6DJ8, E88CC, EC88.

К сожалению, звучание ламп 6Н23П и E88CC произвело неудовлетворительное впечатление на автора этих строк. Субъективная оценка соответствует объективным параметрам: приведенные в главе 8 вольтамперные характеристики имеют заметную даже «невооруженным» глазом нелинейность.

Только учитывая доступность этой лампы, возможно, в качестве первого шага «к ламповому звуку» можно предложить резистивный каскад и каскад с динамической нагрузкой. Параметры этих каскадов приведены ранее в главе 4: рис. 4.4 и табл. 4.3 — резистивный каскад, рис. 4.16, 4.19 и табл. 4.7 — каскад с динамической нагрузкой. Цоколевка лампы показана на рис. 4.2.

Двойной триод 6Н3П. Эта лампа еще не встречалась при обсуждении усилителей напряжения. На рис. 6.33 показан вариант резистивного каскада, на рис. 6.34 — каскада с динамической нагрузкой. Лампа имеет коэффициент усиления 36 и внутреннее сопротивление 6,5 кОм. Коэффициент усиления каскада составляет примерно 15, выходное сопротивление около 5 кОм. Каскад с динамической нагрузкой имеет меньшие искажения и более низкое выходное сопротивление.

При напряжении источника питания 250 В смещение на сетке составляет –1,35 или –1,5 В. Это позволяет использовать гальваниче-

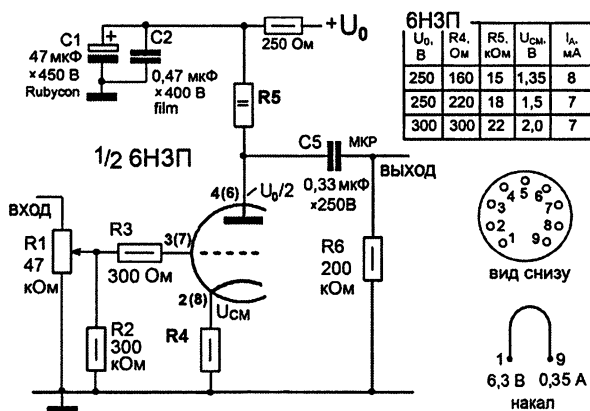


Рис. 6.33. Резистивный каскад на лампе 6НЗП

ский элемент или аккумулятор вместо резистора. Учитывая относительно большой ток в цепи катода (7—8 мА), гальванический элемент («пальчиковая» батарейка или аккумулятор формата ААА) целесообразно устанавливать в цепь базы. Катод лампы в этом случае просто соединяется с общим проводом. Такая схема приводилась ранее для лампы 6С45П на рис. 4.6, а.

Сверхминиатюрные лампы. Совместно с истоковым повторителем могут работать усилители напряжения на сверхминиатюрных лампах в стеклянном (двойные триоды 6Н16Б, 6Н18Б, 6Н28Б) или металлическом (одиночные триоды 6С51Н) корпусе. Последние получили название *нувисторы*. Каскады на сверхминиатюрных лампах можно

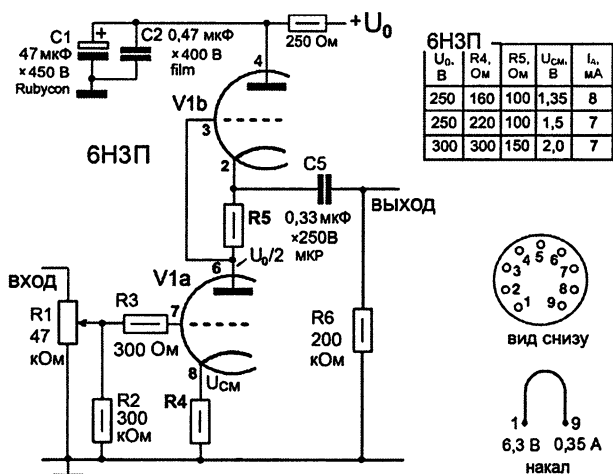


Рис. 6.34. Каскад с динамической нагрузкой на лампе 6НЗП

монтировать на макетных печатных платах, используя отверстия и площадки на плате для крепления деталей и одножильный медный провод диаметром примерно 0,5—0,6 мм для их соединения между собой. Нувисторы обладают заметным микрофонным эффектом, поэтому при монтаже необходимо принять меры для их механической развязки от шасси и корпуса.

Схемы и режимы для сверхминиатюрных двойных триодов 6Н16Б, 6Н18Б показаны на рис. 6.35 и рис. 6.36.



Примечание.

Сверхминиатюрные лампы потребляют отнюдь не сверхмалую, а вполне приличную мощность! Например, двойные триоды 6Н16Б, 6Н18Б потребляют по накалу более 2,5 Вт, а от источника анодного питания — более 2 Вт.

Срок службы 6Н16Б — всего 750 час., 6Н16Б-ВР — более 2000 час., а 6Н18Б — более 1500 час.

При напряжении источника питания 160 (180) В рабочая точка триода 80 В 5,5 мА (90 В 6 мА) требует смещения на сетке $-1,35$ ($-1,5$) В. Это позволяет использовать аккумулятор (1,35 В) или гальванический элемент (1,5 В) вместо катодного резистора R4.



Совет.

Учитывая относительно большой ток в цепи катода, целесообразно установить аккумулятор или гальванический элемент («пальчиковая» батарейка или аккумулятор формата AAA) в цепь сетки.

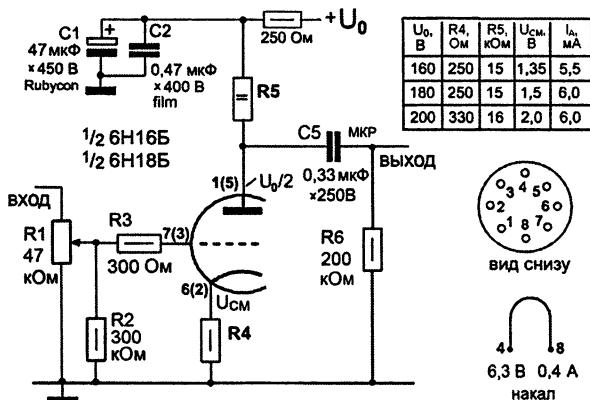


Рис. 6.35. Резистивный каскод на двойном сверхминиатюрном триоде 6Н16Б



На рис. 6.37 и рис. 6.38 приведены варианты усилителя напряжения на лампе 6Н28Б. Этот сверхминиатюрный двойной триод с рабочим током 6—8 мА, коэффициентом усиления 22, внутренним сопротивлением 3 кОм и анодным напряжением 40—90 В, по мнению автора, необоснованно обойден вниманием аудиофилов-радиолюбителей. А между тем, имея коэффициент усиления, анодный ток, внутреннее сопротивление, весьма близкие к очень популярной лампе 6Н23П, лампа 6Н28Б обладает *более линейными вольтамперными характеристиками* (см. главу 8)! Кроме того, на нижнем пределе анодного напряжения лампа работоспособна при напряжении питания, начиная от 70—80 В.

Обращаю внимание, что в схемах на рис. 6.37 и 6.38 при напряжении питания 90 и 100 В рабочая точка соответствует смещению на сетке $-1,35$ В, которое может быть сформировано аккумулятором формата «ААА». См. подробнее рекомендации, изложенные при обсуждении рис. 6.35 и рис. 6.36. Кроме того, понижение напряжения питания до 70—100 В позволяет использовать конденсаторы С1, С2, С5 на напряжение 100—160 В.

На рис. 6.39 показаны варианты усилителя напряжения на сверхминиатюрных триодах 6С6Б. Регулятор громкости на входе не показан. В схеме с резистивной нагрузкой (рис. 6.39, слева) напряжение на аноде выбрано равным + 100 В для всех значений напряжения источника

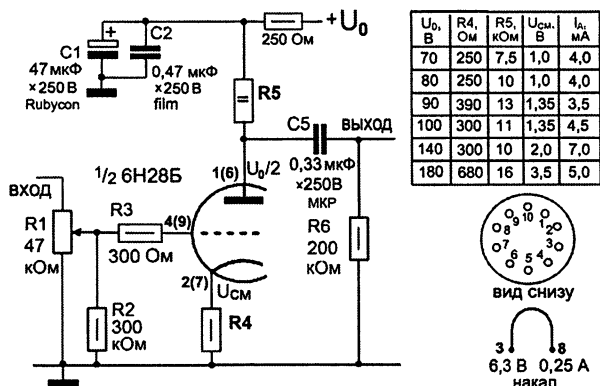


Рис. 6.37. Резистивный каскад на двойном триоде 6H28B

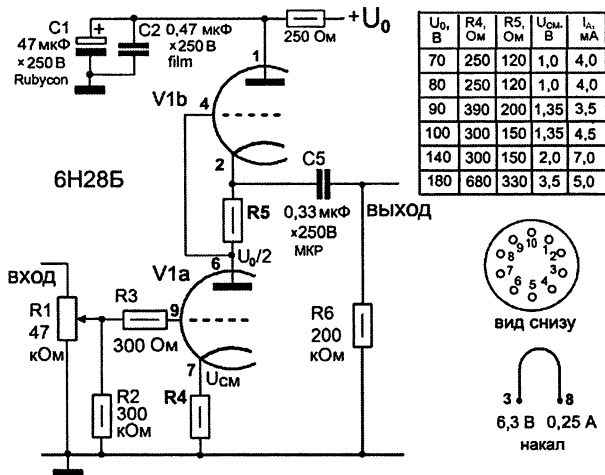


Рис. 6.38. Каскад с динамической нагрузкой на двойном триоде 6H28B

питания (от 180 до 240 В). При этом напряжение смещения (равное по абсолютному значению падению напряжения на катодном резисторе номиналом 180 Ом) составляет $-1,3...-1,5$ В и может быть сформировано с помощью гальванического элемента.

С учетом значительного тока анода его лучше включить в цепь сетки, как было показано ранее на рис. 4.6, а. В этом случае катод лампы соединяется с общим проводом, а резистор номиналом 180 Ом и шунтирующий его конденсатор исключаются из схемы. В схеме с динамической нагрузкой катодный резистор сопротивлением 180 Ом может быть заменен гальваническим элементом в цепи сетки при напряжении источника питания 190—210 В.

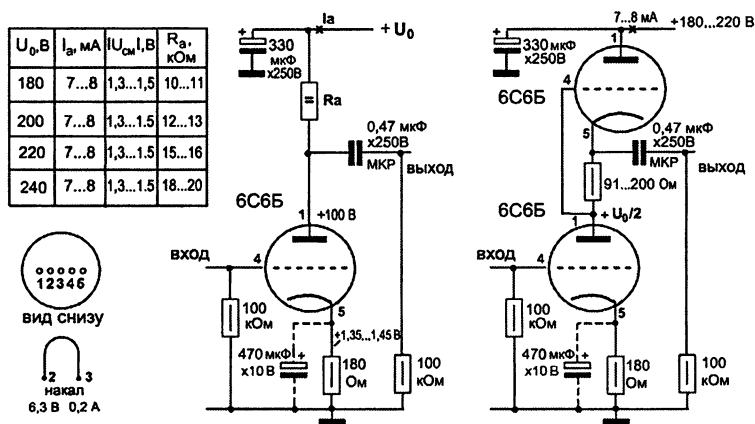


Рис. 6.39. Два варианта усилителя напряжения на сверхминиатюрных триодах 6С6Б

Сверхминиатюрные триоды, получившие название «*нувисторы*», имеют металло-керамический корпус и характеризуются высокой долговечностью — продолжительность работы составляет 5 тыс. часов! Нувисторам требуется относительно небольшой ток для питания накала (130 мА), что, по-видимому, стало возможным благодаря их компактной конструкции.

Для усилителя напряжения мощностью примерно 10—12 Вт не требуется большой коэффициент усиления, поэтому можно использовать нувисторы 6С51Н. Они имеют параметры, близкие к популярному двойному триоду 6Н23П, а также двойному миниатюрному триоду 6Н28Б: коэффициент усиления равен 30—40 при внутреннем сопротивлении 3—4 кОм.



Примечание.

Следует отметить, что на характеристиках нувистора 6С51Н есть два линейных участка. Первый соответствует рабочей точке 50—70 В 9—15 мА и может быть рекомендован только для применения в малосигнальных цепях, где амплитуда входного сигнала заведомо меньше 0,5 В. Коэффициент усиления по напряжению для этого участка составляет 40.

Этот режим будет рекомендован в главе 7 для построения винил-корректоров. Второй участок соответствует рабочей точке примерно 100—120 В 5—10 мА. Коэффициент усиления по напряжению для этого участка составляет примерно 30. Последний диапазон

пригоден для раскачки усилителей мощности, так как напряжение смещения (2,5—3В) превышает максимальную амплитуду входного сигнала.

Варианты построения усилителя напряжения на нувисторах показаны на рис. 6.40, а режимы и номиналы резисторов для напряжения питания 180—240 В указаны в табл. 6.5. Регулятор громкости на схеме не показан.



Внимание.

Двенадцать проволочных выводов в нувисторе расположены по три на четырех concentрических окружностях, часть из них обрезаны (см. подробнее в главе 8). Выводы нормальной длины показаны черными, а обрезанные — светлыми кружками. Обрезанные выводы имеют электрический контакт с необрезанными, расположенными на одной окружности, что связано с особенностями конструкции нувистора. Будьте внимательны и учитывайте это при монтаже и пайке!

Параметры и номиналы элементов усилителя напряжения на нувисторах 6С51Н Таблица 6.5

U_0 , В	R_a , кОм	R_k , Ом	I_a , мА	$|U_{см}|$, В
180	24	680	3,8	2,6
200	18	470	5,6	2,6
220	15	390	7,0	2,7
240	13	300	9,0	2,7

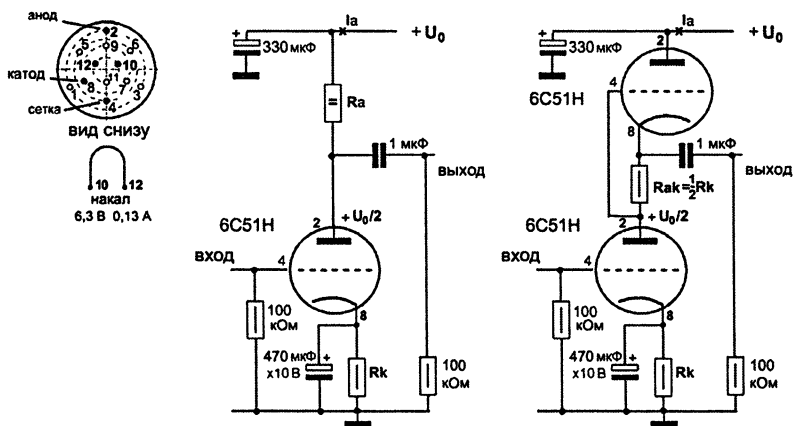


Рис. 6.40. Два варианта усилителя напряжения на нувисторах

Режимы выбраны таким образом, чтобы независимо от схемы (резистивный каскад или каскад с динамической нагрузкой) напряжение на аноде усиливающего триода было равно половине напряжения питания. **Обращаю внимание**, что в резистивном каскаде сопротивление анодного резистора (13—20 кОм) в несколько раз выше внутреннего сопротивления триода (3—4 кОм).

Это должно благоприятно сказаться на линейности каскада за счет приближения его работы к случаю применения в качестве анодной нагрузки генератора тока. Последнее, однако, потребовало бы применения вместо анодного резистора еще одного триода. Каскад с общим катодом с генератором тока вместо анодного резистора можно реализовать вместо схемы каскада с динамической нагрузкой (правая часть рис. 6.40), если выходной сигнал снимать не с верхнего, а с нижнего по схеме вывода резистора $R_{ак}$. Читатели, склонные к экспериментированию, могут попробовать различные схемы включения.

Блок питания. Вместо упрощенного варианта мостового выпрямителя на полупроводниковых диодах (рис. 6.28) для питания лампового усилителя можно применить отдельный силовой трансформатор с двумя симметричными вторичными обмотками и сделать кенотронный выпрямитель. Общие рекомендации по построению блока питания лампового усилителя напряжения, изложенные ранее (рис. 6.10 и комментарий к нему), остаются в силе и для блока питания усилителей напряжения, представленных на рис. 6.29—6.40. Небольшой ток, потребляемый этими схемами, дает возможность уменьшить мощность силового трансформатора до 10 Вт.

Кроме того, для всех схем, за исключением тех, что потребляют ток более 7—8 мА на канал (рис. 6.30—6.32: схемы с использованием ламп 6Н6П и 6СЗП, 6С4П), можно использовать миниатюрный двойной диод 6Х2П в двухполупериодном выпрямителе с отводом от средней точки вторичной обмотки трансформатора. Схема показана на рис. 6.41, а связь между напряжением на вторичных обмотках силового трансформатора и выходным напряжением показана в главе 8 (рис. 8.22).

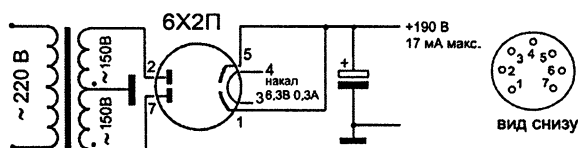


Рис. 6.41. Использование двойного миниатюрного диода 6Х2П в источнике анодного напряжения

ВИНИЛ-КОРРЕКТОРЫ

Эта глава — своеобразное приложение для читателей, имеющих усилитель мощности (не обязательно из тех, что описаны в главе 6), и любящих «старый, добрый винил». Рассматриваются принципы схемотехники старых и современных профессиональных корректоров и предлагаются несколько несложных конструкций корректоров на доступных лампах.

7.1. Вчера и сегодня

Новое — не всегда хорошо забытое старое, даже если речь идет о ламповом и виниловом ренессансе. В «старые добрые времена» расцвета ламповой электроники предусилители-корректоры строили на 2-3 лампах с большим коэффициентом усиления с использованием общей отрицательной обратной связи для частотной коррекции и, как правило, с дополнительным линейным усиливающим каскадом на выходе или с катодным повторителем для снижения выходного сопротивления.

Например, усилители-корректоры типа «Audio Research» и «Marantz» 70-х годов прошлого века были построены на 3 триодах 12AX7 (ЕСС83), имеющих коэффициент усиления по напряжению 100, внутреннее сопротивление 60—80 кОм и рабочий ток около 1 мА. В связи с высоким внутренним сопротивлением этого триода для обеспечения выходного сопротивления порядка 1 кОм, необходимого для работы с межблочным кабелем и усилителем мощности, последний каскад выполнялся по схеме катодного повторителя. С выхода усилителя на катод первого триода подавалась частотно-зависимая обратная связь в соответствии со стандартом RIAA для воспроизведения грамзаписей. Некоторые фирмы в первых каскадах использовали пентоды, обеспечивающие большие коэффициенты усиления.

В наше время, в период «лампового ренессанса», когда прослушивание виниловых дисков стало привилегией узкого круга «аудиогур-

манов», а комплект хорошей ламповой аппаратуры по стоимости стал приближаться к недорогому автомобилю, подходы к построению предусилителей-корректоров изменились:

- ♦ число каскадов минимизируется;
- ♦ общая обратная связь не используется;
- ♦ используют пассивные цепи коррекции;
- ♦ пентоды практически не применяются.

Первый каскад стараются сконструировать с максимальным усилением, затем устанавливают пассивные цепи коррекции, а за ними последующие каскады. Причем последний каскад должен иметь выходное сопротивление порядка 1 кОм, чтобы не было потерь на высоких частотах из-за паразитной емкости соединительного кабеля. Если число каскадов более двух, применяют распределенные цепи коррекции, чтобы уменьшить заметность шумов второго каскада.

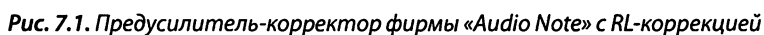
7.2. Подход профессионалов

На рис. 7.1 показан пример бескомпромиссного решения разработчиков фирмы «Audio Note». Предусилитель построен на двойных триодах 6072. Этот двойной триод имеет следующие параметры: коэффициент усиления по напряжению — 44, внутреннее сопротивление 25 кОм, рабочий ток — 2 мА. Эти параметры не являются выдающимися, однако лампа 6072 применяется этой фирмой во многих разработках, очевидно, из-за высокого качества звучания.

Первый каскад должен иметь минимальный уровень и максимальное усиление по напряжению, так как его шумы и искажения будут усилены последующими каскадами. За первым каскадом следуют пассивные цепи коррекции, понижающие коэффициент передачи с ростом частоты в соответствии со стандартом RIAA (постоянные времени корректирующих цепей составляют 75, 318 и 3180 мкс).

В схеме на рис. 7.1 первый каскад выполнен по каскадной схеме с использованием двух триодов. Это обеспечивает коэффициент усиления по напряжению более 100. Отличительной особенностью конструкции является применение не RC-, а RL-коррекции.

Использование катушек индуктивности вместо конденсаторов позволяет исключить искажения, обусловленные материалом конденсатора: медный провод катушек индуктивности искажает



Для согласования цепей коррекции с выходом первого каскада пришлось установить катодный повторитель на двух параллельно соединенных триодах лампы 6072. Параллельное соединение триодов уменьшает в 2 раза внутреннее сопротивление лампы, а, значит, и выходное сопротивление каскада. На выходе включен каскад с динамической нагрузкой, имеющий по сравнению с резистивным каскадом повышенный коэффициент усиления, пониженное выходное сопротивление и меньшие искажения. Выходное сопротивление этого каскада равно примерно 10 кОм, что явно много для работы на нагрузку 47 кОм (стандартное значение входного сопротивления усилителей мощности) и недопустимо много для уверенной передачи высокочастотных сигналов по кабелю с учетом его возможной паразитной емкости.

Предусилитель-корректор питается от нестабилизированных источников анодного и накального напряжения. В высоковольтной части используется кенотрон, дроссель и несколько электролитических конденсаторов общей емкостью 500 мкФ. В накальной части используются полупроводниковые диоды, конденсаторы общей емкостью более 10 тыс. мкФ, а также дополнительный фильтр для подавления пульсаций напряжения, представляющий собой транзистор, включенный по схеме с общей базой с включением между базой и общим проводом электролитического конденсатора.

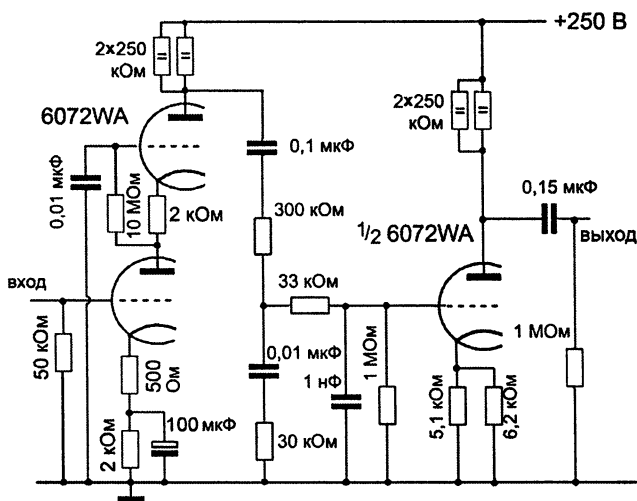


Рис. 7.2. Предусилитель-корректор фирмы «Audio Note» с RC-коррекцией

Вариант предусилителя фирмы «Audio Note» с RC-коррекцией показан на рис. 7.2. Используются те же лампы 6072. В первом каскаде — каскодное включение двух триодов. Далее — корректирующие RC-цепочки. Для них, в отличие от LC-коррекции, согласующий буфер на катодном повторителе не требуется. Затем — стандартный резистивный каскод с коэффициентом усиления около 20 и выходным сопротивлением порядка 20 кОм. Комплект деталей для построения такого корректора Audio Note Kit L3 Phono Stage сегодня предлагается фирмой по цене 1250 долл. США. Он включает набор деталей на два канала, печатные платы, компоненты стабилизированного блока питания на триод-пентоде ECL82 (аналог 6Ф3П) с кенотронным выпрямителем 6X5, стальной корпус.



Примечание.

Высокое выходное сопротивление требует либо применения согласующего каскада по схеме катодного повторителя или (при условии применения сильноточного триода) по схеме резистивного усилителя. Такие каскады от фирмы «Audio Note» описывались ранее (см. рис. 2.6 и рис. 4.12). Их входное сопротивление составляет 100 кОм, а располагаются эти каскады в одном корпусе с каскадами, представленными на рис. 7.1 и рис. 7.2. Это исключает влияние соединительных кабелей на передачу высоких частот. Таким образом, предусилитель-корректор фактически содержит 3 или даже 4 каскада.

Напомню, что низкое выходное сопротивление необходимо не только для согласования с входным каскадом усилителя мощности (обычно равным 47 кОм), но и для исключения потерь на высоких частотах, обусловленных паразитной емкостью соединительного кабеля, которая оказывается подключенной параллельно выходу предусилителя.

7.3. Практические схемы



Примечание.

В этом разделе приведены относительно несложные схемы предусилителей-корректоров, построенных по следующим принципам:

- ♦ *использование только триодов;*
- ♦ *предпочтительное использование только двух каскадов;*
- ♦ *использование пассивных RC-цепей коррекции;*
- ♦ *применение в первом каскаде лампы с большим коэффициентом усиления, а во втором каскаде — лампы с большим током и низким внутренним сопротивлением для обеспечения выходного сопротивления порядка 1—2 кОм.*

Корректоры на пальчиковых триодах

Среди пальчиковых 9-штырьковых триодов для первого каскада хорошо подходит лампа 12AX7 и ее аналоги ECC83, E83CC. Постарайтесь их найти. В связи с «ламповым ренессансом» производство ламп 12AX7 налажено на российских предприятиях. Лампа доступна, например, на сайте <http://www.audioinstrument.narod.ru/> по цене 300 руб. РФ. По-видимому, эти же лампы, но от имени зарубежных «брендов» распространяются через сеть электромузыкальных товаров, так как используются в микрофонных и гитарных усилителях многих фирм.



Примечание.

Похожая на 12AX7 по характеристикам лампа 6Н2П, к сожалению, в данной схеме не пригодна из-за шума, порождаемого связью катода с нитью накала. Рекомендуемый некоторыми авторами триод лампы 6Ф12П, несмотря на великолепные электрические параметры ($\mu = 100$, $R_i = 5$ кОм), не рекомендуется для примене-

ния в предусилителях-корректорах из-за микрофонного эффекта, «бороться» с которым можно только при наличии большого запаса ламп и их тщательного отбора.

Триоды лампы 12AX7 имеют коэффициент усиления по напряжению 100 и внутреннее сопротивление 60—80 кОм при токе анода около 1 мА и напряжении на аноде 150—200 В. Лампа отлично подходит для входного каскада. Недостатком можно считать только необходимость высокого (250—350 В) напряжения источника питания.

Для выходного каскада требуется лампа с низким внутренним сопротивлением. Среди пальчиковых триодов на роль лампы выходного каскада подходят 6СЗП, 6С4П, 6Н23П, 6Н6П, 6Н30П. По-видимому, оптимальным можно считать лампу 6Н6П:

- по сравнению с 6СЗ(4)П — меньшее внутреннее сопротивление;
- два триода в баллоне;
- по сравнению с лампой 6Н23П — лучшее звучание;
- по сравнению с 6Н30П — большее значение коэффициента усиления по напряжению.



Примечание.

Весьма популярный и доступный двойной пальчиковый триод 6Н1П, к сожалению, не пригоден для действительно высококачественной аппаратуры. Причины — неравномерность вольтамперных характеристик, высокий уровень шума из-за связи нити накала с катодом.

Простейший вариант усилителя-корректора на пальчиковых триодах показан на рис. 7.3. Амплитудно-частотная характеристика формируется элементами R1, R2, C1, C2. Их необходимо подобрать с максимальной точностью. При выборе номиналов в качестве «отправной точки» принималось условие $R1 = (3—5)R_p$, а также $C1 = 10$ нФ из стандартного ряда. Конденсатор C2 образован двумя параллельно соединенными конденсаторами емкостью 3300 и 100 (или 120) пФ. Можно использовать слюдяные конденсаторы типа КСО.

Резистор номиналом 1 МОм в цепи сетки второго триода совместно с разделительным конденсатором емкостью 0,1 мкФ определяют коэффициент передачи на самых низких (менее 50 Гц) частотах. Уменьшая сопротивление этого резистора, можно ослабить проявление низкочастотного фона и других помех, возникающих при работе проигрывателя грампластинок.

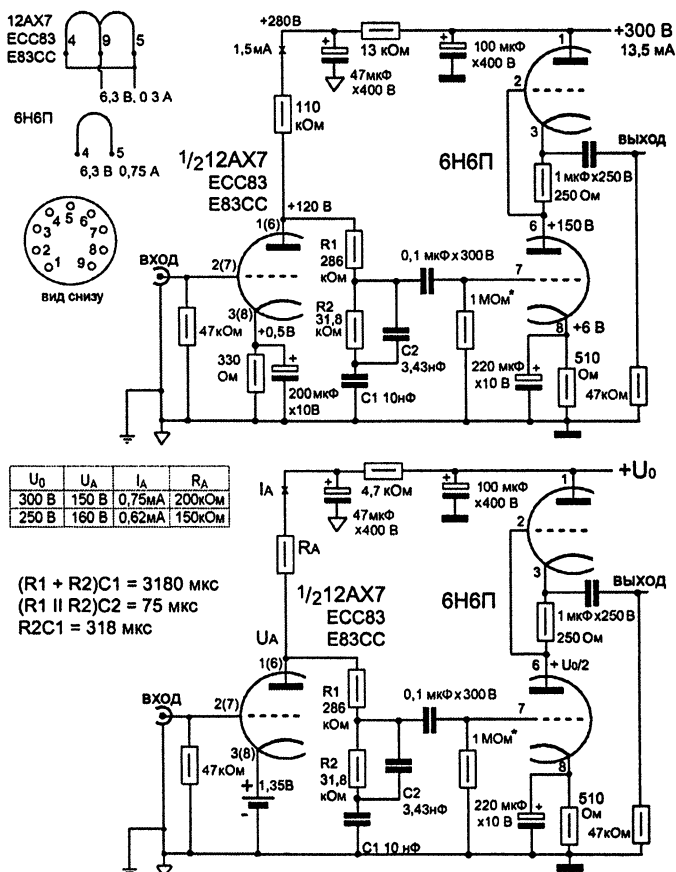


Рис. 7.4. Усовершенствованные варианты корректора на лампах 12AX7-6Н6П



Примечание.

Питание накала ламп 12AX7 и 6Н6П в этих случаях должно быть раздельным! На накал лампы 6Н6П подается $\frac{1}{4}$ от напряжения питания через делитель напряжения на двух резисторах, чтобы исключить появление большой разности потенциалов между катодом и подогревателем для верхнего по схеме триода и сделать равной разность потенциалов между подогревателем и катодом для обоих триодов лампы (см. рис. 6.18 и комментарий к нему).

В верхней части рис. 7.4 показан вариант включения лампы 12AX7 с катодным резистором. Шунтирующий его электролитический конденсатор должен быть высокого класса. Целесообразно параллельно ему подключить пленочный конденсатор емкостью порядка 1 мкФ.

Можно обойтись без катодного резистора и использовать батерейное смещение (нижняя часть рис. 7.4). Целесообразно применить аккумулятор формата AAA емкостью примерно 2000 мА·час.



Примечание.

Для уменьшения шумов входного каскада часто используют параллельное включение двух одинаковых триодов. Это целесообразно делать с использованием двойных триодов для обеспечения идентичности параметров параллельно соединяемых ламп. При этом сопротивление анодного резистора необходимо уменьшить в два раза.

Можно построить корректор на двух триодах 6С4П, включив их по схеме с резистивной нагрузкой. Схема одного каскада показана ранее на рис. 6.31. Корректирующие цепи можно применить такие же, как на рис. 7.3, рис. 7.4. В принципе, учитывая, что внутреннее сопротивление лампы 6С4П значительно меньше, чем лампы 12АХ7, можно изменить номиналы элементов частотной коррекции, уменьшив сопротивление резистора R1 до 143 кОм, и взяв остальные элементы такими: R2 = 15,9 кОм, C1 = 0,02 мкФ, C2 = 6860 пФ.

Комбинируя первый каскад на триоде 6С4П со вторым каскадом на триоде 6Н6П, можно построить двухкаскадный корректор с непосредственной связью. Такая схема показана на рис. 7.5. Следует предупредить, что коэффициент усиления такой комбинации триодов невелик: первый каскад — до 30, второй каскад — в диапазоне 12—15. Этого может оказаться недостаточно для работы с усилителем мощности чувствительностью 1 В.

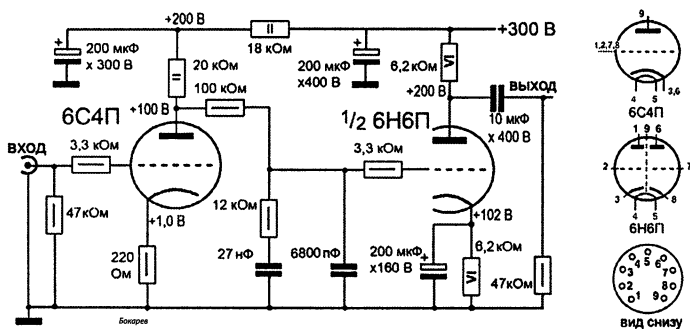


Рис. 7.5. Усилитель-корректор В. Бокарева («Вестник А.Р.А.» 1998, №5. с. 31)

**Внимание.**

Соблюдайте меры предосторожности и особую аккуратность при сборке, настройке и подключении ламп с непосредственной связью. Не подключайте сетку второго триода и не подавайте на второй триод анодное напряжение пока не убедитесь в установлении нужных режимов первого триода.

Кроме того, следует отметить, что выигрыш в отсутствии разделительного конденсатора емкостью порядка 0,1 мкФ на напряжение 300 В обеспечивается ценой применения высокого сопротивления в цепи катода второго триода. Кроме опасности «услышать» недостатки этого резистора, ситуация усугубляется необходимостью применения достаточно дорогого шунтирующего конденсатора (электролитического!) емкостью 200 мкФ на напряжение 160 В.

Корректоры на октальных триодах

Октальные триоды пользуются наибольшей популярностью при конструировании усилителей-корректоров среди радиолюбителей-аудиофилов. В данном разделе предлагаются две конструкции в качестве примера. В обоих случаях в выходном каскаде используются триоды 6Н8С, включенные по схеме с динамической нагрузкой.

По-видимому, это единственный октальный триод, способный обеспечить качественное звуковоспроизведение при выходном сопротивлении примерно 3 кОм. Он является прямым аналогом зарубежной лампы 6SN7. Вместо двойного триода и даже с несколько лучшим результатом можно применить два одиночных триода 6С2С. Автор, однако, столкнулся с тем, что лампа 6С2С малодоступна.

Во входном каскаде требуется малoshумящий триод с максимально возможным коэффициентом усиления. Предлагается использовать одиночный триод 6Г2 или двойной триод 6Н9С.

Старинный триод 6Г2 (в настоящее время не выпускается) имеет коэффициент усиления по напряжению 100 и удивительно линейные характеристики (см. главу 8). Кроме того, он может работать при нулевом смещении на сетке, что позволяет исключить соответствующие элементы (катодный резистор с шунтирующим конденсатором или гальванический элемент). Схема корректора с использованием этой лампы показана на рис. 7.6.



Корректоры на сверхминиатюрных лампах



Лампы 6С6Б и 6С7Б имеют одинаковую цоколевку, но существенно отличаются по режимам!

Сверхминиатюрные лампы в металлокерамическом корпусе (нувисторы) имеют повышенный срок службы (5000 час.) и высокую надеж-

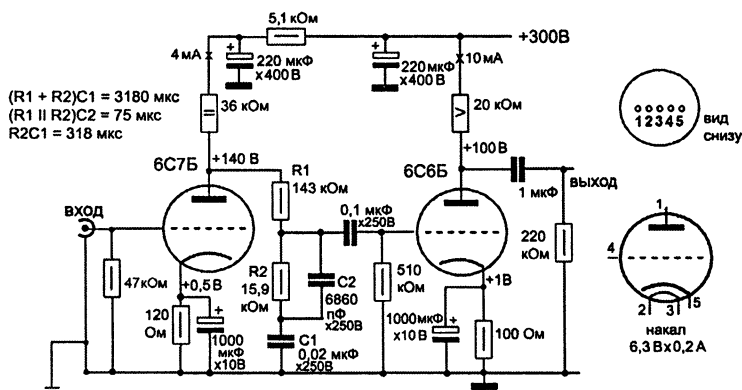


Рис. 7.8. Усилитель-корректор на лампах 6С7Б-6С6Б

ность. Для их работы требуется относительно невысокий ток для питания накала (130 мА). Такая положительная особенность нувисторов, по-видимому, обеспечивается их компактной конструкцией. Комбинируя нувистор 6С52Н ($\mu = 64$, $R_i = 7 \text{ кОм}$) с нувистором 6С51Н ($\mu = 30$, $R_i = 3 \text{ кОм}$), можно построить предусилитель-корректор с использованием напряжения питания в широком диапазоне: от 100 до 250 В.

Вариант такой схемы показан на рис. 7.9. Она содержит резистивный входной каскад на одном триоде и выходной каскад с динамической нагрузкой на двух триодах.



Примечание.

При изготовлении корректора на нувисторах следует принять меры к виброразвязке платы корректора от других элементов усилителя и корпуса. Для этого плату с основными элементами крепят к пластине из резины или другого вибропоглощающего материала длиной и шириной на 1—2 см больше, чем плата корректора, а затем вибропоглощающую пластину за края прикрепляют к корпусу устройства. Для удобства монтажа и настройки в пластине вырезают отверстие, обеспечивающее доступ к нижней стороне платы.

Проволочные выводы нувисторов расположены по три на четырех концентрических окружностях, часть из них обрезаны. Выводы нор-

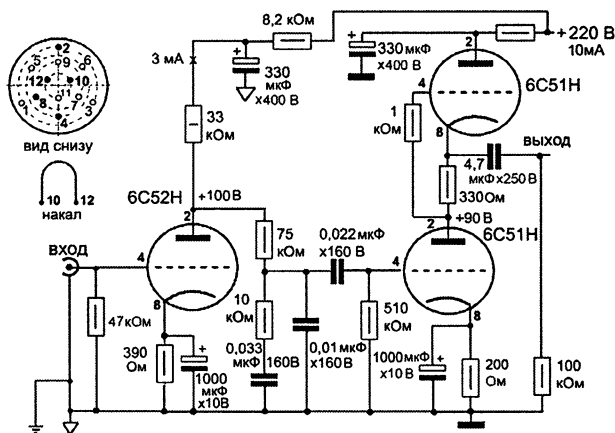


Рис. 7.9. Усилитель-корректор А. Гурского («Радиолюбби», 2006 г., №4, с. 52)

мальной длины показаны на вставке на рис. 7.9 черными, а обрезанные — светлыми кружками.



Внимание.

Обрезанные выводы нувисторов имеют электрический контакт с необрезанными, расположенными на одной окружности. Будьте внимательны и учитывайте это при монтаже и пайке!

Для накала рекомендуется использовать два независимых источника постоянного напряжения, желательно стабилизированного. Подайте на накал верхнего по схеме триода 6С51Н постоянное напряжение около 100 В с помощью делителя на двух резисторах (см. рис. 6.18). Если накалы всех триодов обеспечиваются одним источником, между катодом и нагревателем верхнего по схеме триода 6С51Н возникнет постоянное напряжение примерно 90 В.

Это может несколько повлиять на его работу, хотя такое значение не превышает предельно допустимой разности потенциалов в 100 В для данного типа ламп.

Обращаю внимание на неравномерность ВАХ нувисторов (см. главу 8). На характеристиках нувистора 6С52Н имеется два линейных участка. **Первый** соответствует рабочей точке 60—100 В 4—10 мА и может быть рекомендован для применения в малосигнальных цепях, где амплитуда входного сигнала заведомо меньше 0,5 В. Коэффициент усиления по напряжению для этого участка составляет около 70. **Второй**

Режимы триодов и номиналы элементов корректора на нувисторах (рис. 7.10)

Таблица 7.1

U ₀ , В	Входной каскад: 6C52H (7895)					Выходной каскад: 6C51H (7586)		
	Ua1, В	Ia1, мА	Ra1, кОм	Rk1, Ом	Ucm, В	Ia2, мА	Rk2, Ом	Ucm, В
250	70	8,5	20	120	-1,0	8,0	350	-2,8
150	60	6,0	13	82	-0,5	15,0	33	-0,5
120	60	4,0	13	120	-0,5	10,0	50	-0,5
100	50	3,0	15	160	-0,5	9,0	56	-0,5

В этом случае целесообразно использовать распределенные цепи коррекции, чтобы уменьшить проявление шумов второго каскада. Вариант такой схемы показан на рис. 7.11. Все каскады построены по схеме с резистивной нагрузкой.

Если продолжить тему построения усилителей-корректоров с пониженным напряжением питания, можно рассмотреть возможность построения корректора на сверхминиатюрных двойных триодах 6Н28Б (рис. 7.12). Эта лампа имеет прекрасные вольтамперные характеристики (см. главу 8) и работает при значениях напряжения на аноде, начиная с 40 В.

Эта лампа незаслуженно обойдена вниманием как аудиофилов-радиолюбителей, так и профессиональных разработчиков. По-видимому, причина связана с отсутствием ее точных зарубежных аналогов или малой распространенностью.

Кроме двойных триодов 6Н28Б, в трехкаскадном усилителе-корректоре с распределенными цепями коррекции может работать и двойной триод 6Н16Б, а также его аналог 6Н18Б. Эти двойные триоды имеют хорошие характеристики. Их зарубежные аналоги,

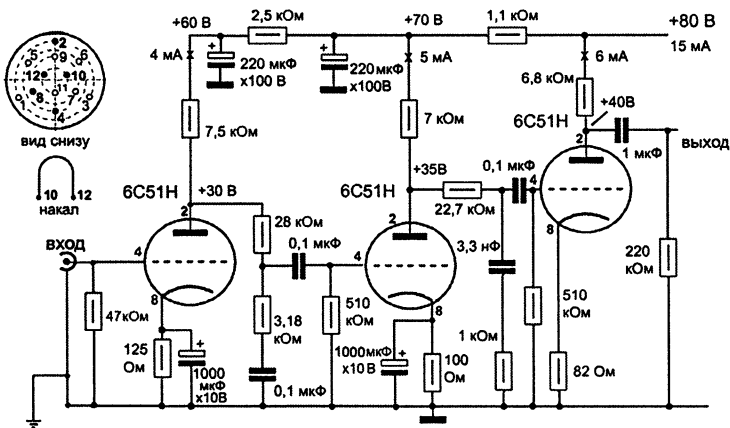


Рис. 7.11. Корректор на нувисторах с 3 каскадами и распределенной RC-коррекцией

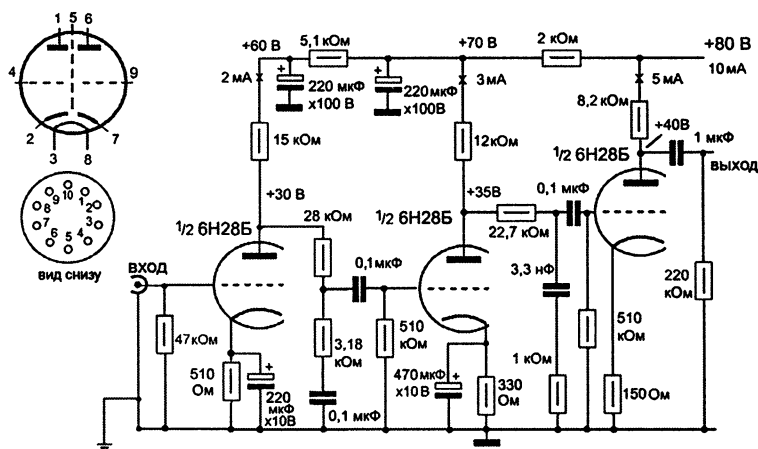


Рис. 7.12. Корректор с 3 каскадами усиления и распределенной RC-коррекцией на сверхминиатюрных триодах 6H28B

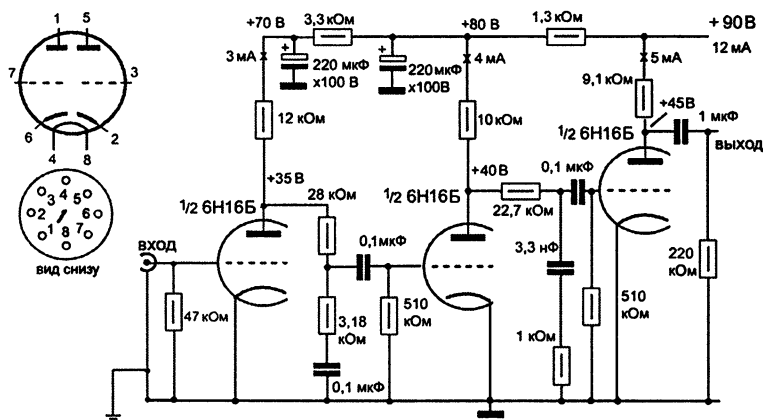


Рис. 7.13. Корректор с 3 каскадами усиления и распределенной RC-коррекцией на сверхминиатюрных триодах 6H16B (6H18B)

по-видимому, отсутствуют. Интересно отметить, что при напряжении на аноде +30—50 В оба типа указанных триодов могут работать с нулевым смещением на сетке. Это позволяет исключить из схемы катодные резисторы и шунтирующие их конденсаторы. Схема такого корректора показана на рис. 7.13.

7.4. Особенности блока питания усилителя-корректора

Многие авторы рекомендуют применять для питания предусилителей-корректоров стабилизированный источник анодного напряжения. Фирма «Audio Research» в своей разработке 1972 г. использовала мостовой выпрямитель на полупроводниковых диодах 1N4005 и простейший стабилизатор, представляющий собой транзистор, включенный по схеме с общей базой, в цепь базы которого включено нужное количество последовательно соединенных полупроводниковых стабилитронов.

В 90-е годы прошлого столетия, на заре «лампового ренессанса» фирма «Audio Note» для питания усилителя-корректора M7 (его схема показана на рис. 7.1) использовала кенотронный двухполупериодный выпрямитель со средней точкой, дроссель и электролитические конденсаторы общей емкостью 600 мкФ на два канала. Стабилизатор в источнике анодного напряжения в этой разработке отсутствует.

Для питания накала ламп также не используется стабилизированный источник. Эта часть блока питания состоит из мостового выпрямителя на полупроводниковых диодах, двух RC-фильтров (1 Ом, 1000 мкФ) и фильтра, представляющего собой транзистор, включенный по схеме с общей базой, в цепь базы которого включен электролитический конденсатор емкостью 4700 мкФ, а на выходе — еще один конденсатор емкостью 10000 мкФ.



Примечание.

Такое включение конденсатора и транзистора «воспринимается» усилителем как увеличенная емкость конденсатора в цепи базы, кратная коэффициенту усиления транзистора по току.

В то же время, как уже отмечалось ранее в этой главе, предлагаемый этой фирмой в настоящее время по цене 1250 долл. набор для самостоятельной сборки предусилителя-корректора на лампах 6072 (рис. 7.2), содержит стабилизатор на триод-пентоде ECL82 (аналог — 6ФЗП).

В выпрямителе источника анодного напряжения, кроме ранее упоминавшихся кенотронов 6Ц5С и 6Ц4П, обеспечивающих выпрямленный ток до 70 мА, можно в некоторых случаях применить маломощ-

ные двойные диоды косвенного накала 6Х2П (лучше серии ЕВ) — по одному двойному диоду на канал. Они позволяют получить выпрямленное напряжение 150—200 В при токе до 17 мА (см. подробнее параметры в главе 8). Этого достаточно для некоторых из приведенных в этой главе схем.

**Совет.**

Рекомендуется применять дроссели, а также конденсаторы повышенной емкости: 500 мкФ и более.

Можно изготовить и стабилизатор. Варианты высоковольтных стабилизаторов на лампах и на транзисторах можно найти в литературе.

ПАРАМЕТРЫ ЛАМП, ТРАНЗИСТОРОВ И ТРАНСФОРМАТОРОВ

Эта глава — минисправочник по лампам и транзисторам, упоминаемым в этой книге и рекомендуемым для применения в лампово-транзисторных усилителях. В дополнение приводятся сведения о серийных трансформаторах, которые без перемотки можно использовать в таких усилителях.

8.1. Параметры ламп



Примечание.

Параметры отечественных ламп приводятся по книгам: Ю. Л. Голубев, Т. В. Жукова «Электровакуумные приборы», Москва, «Энергия», 1969, 296 стр. и Б. В. Кацнельсон, А. С. Ларионов. Отечественные приемно-усилительные лампы и их зарубежные аналоги (справочник). Москва, Энергоиздат, 1961, в 2 т.

Параметры зарубежных ламп приводятся по данным производителей (фирмы «Philips», Нидерланды и «RCA», США).

Вольтамперные характеристики тетрода 6Э5П в триодном включении приводятся по книге: М. В. Торопкин. Ламповый Hi-Fi усилитель своими руками. Санкт-Петербург, «Наука и Техника», 2006, 272 с.

Типы ламп расположены в следующей последовательности:

- одиночные триоды (6С...) по возрастанию номера;
- триод-диод 6Г2 и тетроды 6Э...П;
- двойные триоды (6Н..., 12АХ7, 6072);
- выпрямительные лампы (6Ц..., 6Х...).

Последние буквы в обозначениях ламп означают:

С — октальный цоколь;

П — пальчиковая лампа с 7- или 9-штырьковым цоколем;

- Б — сверхминиатюрная лампа в стеклянном баллоне;
 Н — сверхминиатюрная лампа в металло-керамическом баллоне (нувистор).

Параметры ламп, не включенных в данную книгу, можно найти в указанных выше книгах, а также на сайтах:

- ♦ <http://next-tube.com/ru/datasheet.php>
- ♦ <http://istok2.com/data>
- ♦ <http://tubeamplifier.narod.ru>
- ♦ <http://oldradio.qrz.ru/>



Примечание.

Параметры отечественных транзисторов приводятся по книге Е. А. Москатов. Справочник по полупроводниковым приборам. — М.: Журнал «Радио», 2005. — 208 с.

Параметры зарубежных транзисторов приводятся по данным производителей.

Триод 6СЗП

Имеет стеклянный баллон с 9-штырьковым цоколем. Масса 15 г. Цоколевка показана на рис. 4.3. Лампа похожа по параметрам на триод 6С4П, но отличается цоколевкой и вольтамперными характеристиками. Она разработана для включения по схеме с общим катодом в ВЧ-устройствах, поэтому катод имеет 4 вывода, чтобы минимизировать длину подводящих проводников. Если не использовать выводы 7, 8, лампа взаимозаменяема с 6С4П.

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 6,3 В.
- ♦ Ток накала 300 ± 30 мА.
- ♦ Коэффициент усиления (при $I_A = 16$ мА, $U_A = 150$ В) 50 ± 15 .
- ♦ Крутизна (при $I_A = 16$ мА, $U_A = 150$ В) $19,5 \pm 5$ мА/В.
- ♦ Внутреннее сопротивление (при $I_A = 16$ мА, $U_A = 150$ В) 2,5 кОм.
- ♦ Нарботка 6СЗП >1500 час.
- ♦ Нарботка 6СЗП-ЕВ >10 000 час.

Предельно допустимые параметры

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 5,7—6,6 В.
- ♦ Напряжение на аноде 6СЗП 160 В.
- ♦ Напряжение на аноде 6СЗП-ЕВ 150 В.

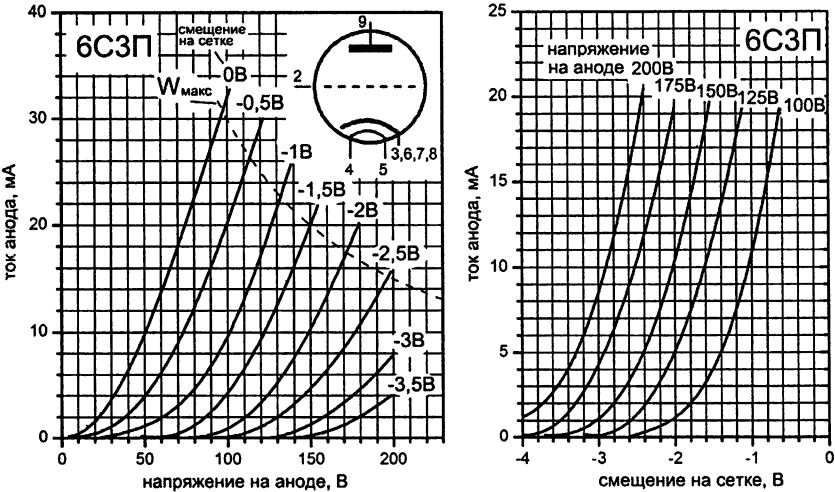


Рис. 8.1. Вольтамперные характеристики триода 6С3П

- ♦ Ток катода 6С3П — 35 мА, 6С3П-ЕВ 20 мА.
- ♦ Наибольшая мощность, рассеиваемая анодом 3 Вт.
- ♦ Напряжение между катодом и подогревателем:
 - при положительном потенциале подогревателя 100 В;
 - при отрицательном потенциале подогревателя 160 В.
- ♦ Наибольшая температура баллона 6С3П 135 °С.
- ♦ Наибольшая температура баллона 6С3П-ЕВ 90 °С.

Схемы с использованием лампы 6С3П в этой книге: рис. 2.8, 6.31, 6.32. Рекомендуемые режимы для различных схем: табл. 4.1, рис. 6.31, 6.32.

Триод 6С4П

Имеет стеклянный баллон с 9-штырьковым цоколем. Масса 15 г. Цоколевка показана на рис. 4.3. Лампа похожа по параметрам на триод 6С3П, но отличается цоколевкой и вольтамперными характеристиками. Она разработана для включения по схеме с общей сеткой в ВЧ-устройствах, поэтому сетка имеет 4 вывода, чтобы минимизировать длину подводящих проводников. Если не использовать выводы 1, 7, 8, лампа взаимозаменяема с 6С3П.

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 6,3 В.
- ♦ Ток накала 300 ± 30 мА.
- ♦ Коэффициент усиления (при $I_A = 16$ мА, $U_A = 150$ В) 50 ± 15 .
- ♦ Крутизна (при $I_A = 16$ мА, $U_A = 150$ В) $19,5 \pm 5$ мА/В.

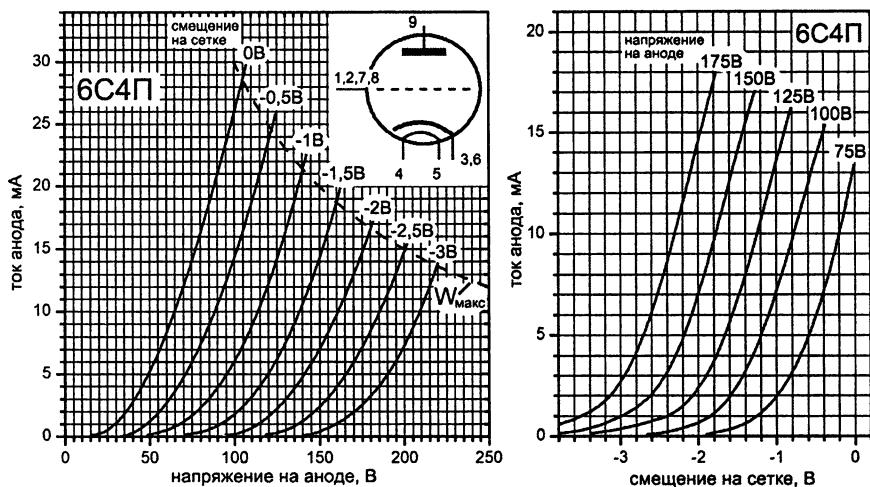


Рис. 8.2. Вольтамперные характеристики триода 6С4П

- ♦ Внутреннее сопротивление (при $I_A = 16$ мА, $U_A = 150$ В) 2,5 кОм.
- ♦ Нароботка 6С4П >1500 час.
- ♦ Нароботка 6С4П-ЕВ >10 000 час.

Предельно допустимые параметры

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 5,7—6,6 В.
- ♦ Напряжение на аноде 6С4П 160 В.
- ♦ Напряжение на аноде 6С4П-ЕВ 150 В.
- ♦ Ток катода 6С4П — 35 мА, 6С4П-ЕВ — 20 мА.
- ♦ Наибольшая мощность, рассеиваемая анодом 3 Вт.
- ♦ Напряжение между катодом и подогревателем:
 - при положительном потенциале подогревателя 100 В.
 - при отрицательном потенциале подогревателя 160 В.
- ♦ Наибольшая температура баллона 6С4П 135 °С.
- ♦ Наибольшая температура баллона 6С4П-ЕВ 90 °С.

Схемы с использованием лампы 6С4П в этой книге: рис. 6.31, 6.32, 7.5. Рекомендуемые режимы для различных схем: табл. 4.1, рис. 6.31, 6.32.

Триод 6С6Б

Сверхминиатюрная лампа в стеклянном баллоне с 5 проволоочными выводами. Масса 3,5 г. Цоколевка показана на рис. 8.3.

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 6,3 В.
- ♦ Ток накала 200 ± 20 мА.
- ♦ Коэффициент усиления (при $I_A = 9$ мА, $U_A = 120$ В) 25 ± 5 .
- ♦ Крутизна (при $I_A = 9$ мА, $U_A = 120$ В) 5 ± 1 мА/В.
- ♦ Внутреннее сопротивление (при $I_A = 9$ мА, $U_A = 120$ В) 5 кОм
- ♦ Нароботка 6С6Б >500 час.
- ♦ Нароботка 6С6Б-В >5 000 час.

Предельно допустимые параметры

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 5,7—6,9 В.
- ♦ Напряжение на аноде 250 В.
- ♦ Ток катода 14 мА.
- ♦ Наибольшая мощность, рассеиваемая анодом 1,2 Вт.
- ♦ Напряжение между катодом и подогревателем 150 В.
- ♦ Наибольшая температура баллона 170 °С.

Схемы с использованием лампы 6С6Б в этой книге: рис. 6.39, рис. 7.8. Рекомендуемые режимы для различных схем: рис. 6.39.

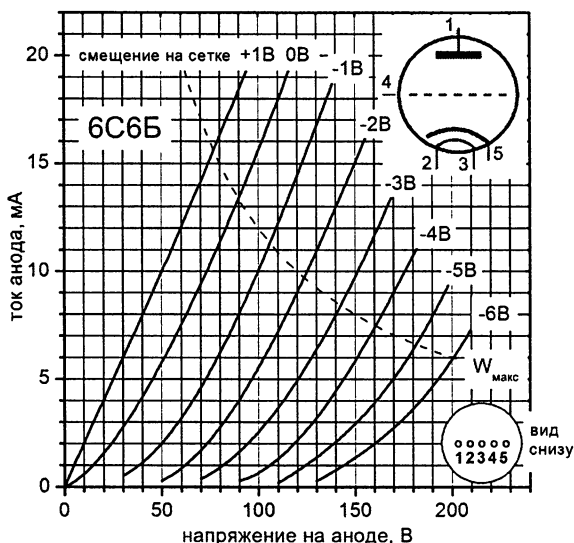


Рис. 8.3. Вольтамперные характеристики триода 6С6Б

Триод 6С7Б

Сверхминиатюрная лампа в стеклянном баллоне с 5 проводочными выводами. Масса 3,5 г. Цоколевка показана на рис. 8.4.

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 6,3 В.
- ♦ Ток накала 200 ± 20 мА.
- ♦ Коэффициент усиления ($I_A = 4,5$ мА, $U_A = 250$ В) 6С7Б 65 ± 15 .
- ♦ Коэффициент усиления ($I_A = 4,5$ мА, $U_A = 250$ В) 6С7Б-В 70 ± 15 .
- ♦ Крутизна (при $I_A = 16$ мА, $U_A = 150$ В) $4 \pm 0,9$ мА/В.
- ♦ Внутреннее сопротивление (при $I_A = 16$ мА, $U_A = 150$ В) 15 кОм.
- ♦ Нароботка >1500 час.

Предельно допустимые параметры

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 5,7—6,9 В.
- ♦ Напряжение на аноде 300 В.
- ♦ Ток катода 7 мА.
- ♦ Наибольшая мощность, рассеиваемая анодом 1,4 Вт.
- ♦ Напряжение между катодом и подогревателем при положительном потенциале подогревателя 150 В.
- ♦ Наибольшая температура баллона 170 °С.

Схемы с использованием лампы 6С7Б в этой книге: рис. 7.8.

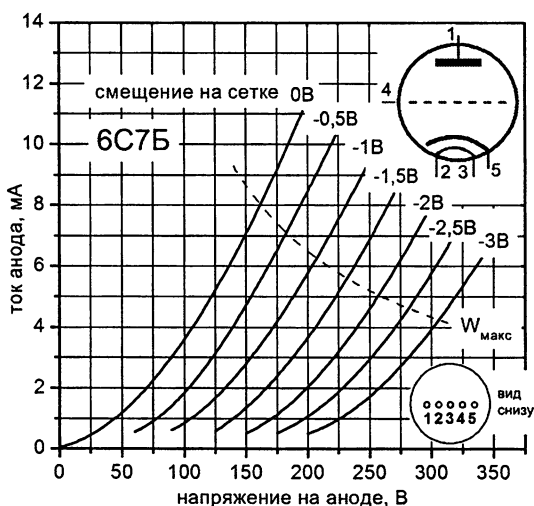


Рис. 8.4. Вольтамперные характеристики триода 6С7Б

Триод 6С45П

Лампа имеет стеклянный баллон с 9-штырьковым цоколем. Масса 20 г. Цоколевка показана на рис. 4.3. Лампа имеет полный аналог — 6С15П (рис. 4.3, табл. 4.1). Схожие с лампой 6С45П характеристики, но иную цоколевку имеют зарубежные лампы WE417A, 5842, CV2642.

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 6,3 В.
- ♦ Ток накала 440 ± 30 мА.
- ♦ Коэффициент усиления (при $I_A = 40$ мА, $U_A = 150$ В) 52 ± 16 .
- ♦ Крутизна (при $I_A = 16$ мА, $U_A = 150$ В) 45 ± 11 мА/В.
- ♦ Внутреннее сопротивление (при $I_A = 16$ мА, $U_A = 150$ В) 1,15 кОм.
- ♦ Нароботка (6С45П-Е) >3000 час.

Предельно допустимые параметры

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 6—6,6 В.
- ♦ Напряжение анода 150 В.
- ♦ Ток катода 52 мА.
- ♦ Наибольшая мощность, рассеиваемая анодом 7,8 Вт.
- ♦ Напряжение между катодом и подогревателем при отрицательном потенциале подогревателя 100 В.
- ♦ Наибольшая температура баллона 210 °С.

Схемы с использованием лампы 6С45П в этой книге: рис. 4.6, 6.9, 6.24, 6.25. Рекомендуемые режимы для различных схем: табл. 4.1.

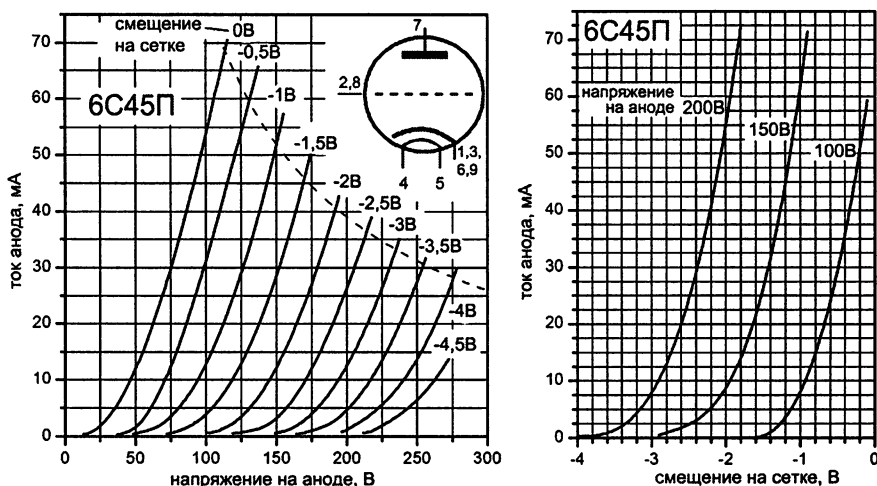


Рис. 8.5. Вольтамперные характеристики триода 6С45П.
Пунктирная кривая в левой части рисунка соответствует
максимально допустимой мощности, рассеиваемой анодом

Триод 6С51Н

Сверхминиатюрная лампа в металло-керамическом корпусе (нуви-стор). Масса 3 г. Зарубежный аналог — американская лампа 7586.

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 6,3 В.
- ♦ Ток накала 130 ± 20 мА.
- ♦ Коэффициент усиления (при $I_A = 10$ мА, $U_A = 80$ В) 36 ± 8 .
- ♦ Крутизна (при $I_A = 10$ мА, $U_A = 80$ В) 7,5—12 мА/В.
- ♦ Внутреннее сопротивление (при $I_A = 10$ мА, $U_A = 80$ В) 3,5 кОм.
- ♦ Нароботка >5000 час.

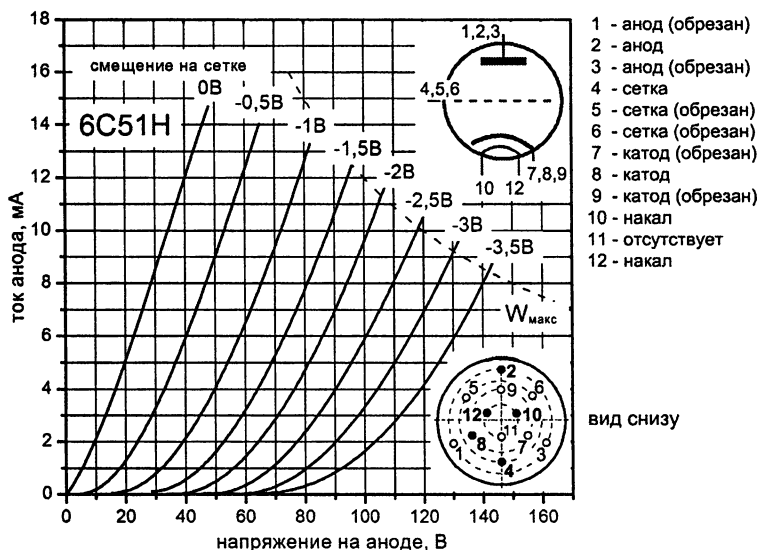


Рис. 8.6. Вольтамперные характеристики триода 6С51Н

Обратите внимание на заметную неравномерность вольтамперных характеристик этой лампы. На характеристиках имеется два линейных участка. Первый соответствует рабочей точке 50—60 В, 9—10 мА и может быть рекомендован для применения в малосигнальных цепях, где амплитуда входного сигнала заведомо меньше 0,5 В. Коэффициент усиления по напряжению для этого участка составляет 40. Второй участок соответствует рабочей точке 100—120 В, 8—10 мА. Коэффициент усиления по напряжению для этого участка составляет 30. Этот режим пригоден для работы в усилителях мощности.

Предельно допустимые параметры

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 5,7—7 В.
- ♦ Напряжение анода 120 В.
- ♦ Ток катода 15 мА.
- ♦ Наибольшая мощность, рассеиваемая анодом 1,2 Вт.
- ♦ Напряжение между катодом и подогревателем 100 В.
- ♦ Наибольшая температура баллона 250 °С.

Схемы с использованием лампы 6С51Н в этой книге: рис. 6.40, 7.9, 7.10, 7.11. Рекомендуемые режимы для различных схем: табл. 6.5, 7.1.

Триод 6С52Н

Сверхминиатюрная лампа в металло-керамическом корпусе (нуви-стор). Масса 3 г. Зарубежный аналог — американская лампа 7895.

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 6,3 В.
- ♦ Ток накала 130 ± 20 мА.
- ♦ Коэффициент усиления (при $I_A = 8$ мА, $U_A = 120$ В) 64 ± 20 .
- ♦ Крутизна (при $I_A = 8$ мА, $U_A = 120$ В) 9,5 мА/В.
- ♦ Внутреннее сопротивление (при $I_A = 8$ мА, $U_A = 120$ В) 7 кОм.
- ♦ Нароботка >5000 час.

Обратите внимание на неравномерность вольтамперных характеристик этой лампы. На характеристиках имеется два линейных

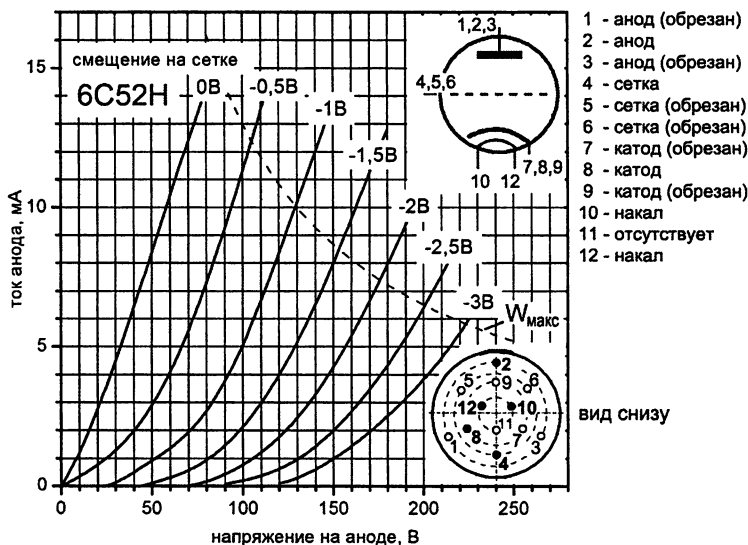


Рис. 8.7. Вольтамперные характеристики триода 6С52Н

участка. Первый соответствует рабочей точке 70—100 В 8—10 мА и может быть рекомендован для применения в малосигнальных цепях, где амплитуда входного сигнала заведомо меньше 0,5 В.

Коэффициент усиления по напряжению для этого участка составляет около 70. Второй участок соответствует рабочей точке 160—180 В 7—8 мА. Коэффициент усиления по напряжению для этого участка составляет примерно 60. Этот режим пригоден для работы в усилителях мощности.

Предельно допустимые параметры

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 5,7—7 В.
- ♦ Напряжение анода 120 В.
- ♦ Ток катода 15 мА.
- ♦ Наибольшая мощность, рассеиваемая анодом 1,3 Вт.
- ♦ Напряжение между катодом и подогревателем 100 В.
- ♦ Наибольшая температура баллона 250°C.

Схемы с использованием лампы 6С52Н в этой книге: рис. 7.9, 7.10.
Рекомендуемые режимы для различных схем: табл. 7.1.

Триод-двойной диод 6Г2

Лампа содержит один триод и два диода, имеющих общий катод с триодом. Имеет металлический корпус с октальным цоколем. Диоды в аудиоаппаратуре не используются. Масса 40 г. Цоколевка показана на рис. 4.3.

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 6,3 В.
- ♦ Ток накала 300 ± 25 мА.
- ♦ Коэффициент усиления (при $I_A = 1,15$ мА, $U_A = 250$ В) 100 ± 15 .
- ♦ Крутизна (при $I_A = 1,15$ мА, $U_A = 250$ В) $1,1 \pm 0,3$ мА/В.
- ♦ Внутреннее сопротивление (при $I_A = 1,15$ мА, $U_A = 250$ В) 91 кОм.
- ♦ Нарботка >2000 час.

Предельно допустимые параметры для триода

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 5,7—7 В.
- ♦ Напряжение анода 330 В.
- ♦ Наибольшая мощность, рассеиваемая анодом 1 Вт.
- ♦ Напряжение между катодом и подогревателем 100 В.

Схемы с использованием лампы 6Г2 в этой книге: рис. 7.6.
Рекомендуемые режимы для различных схем: табл. 4.1.

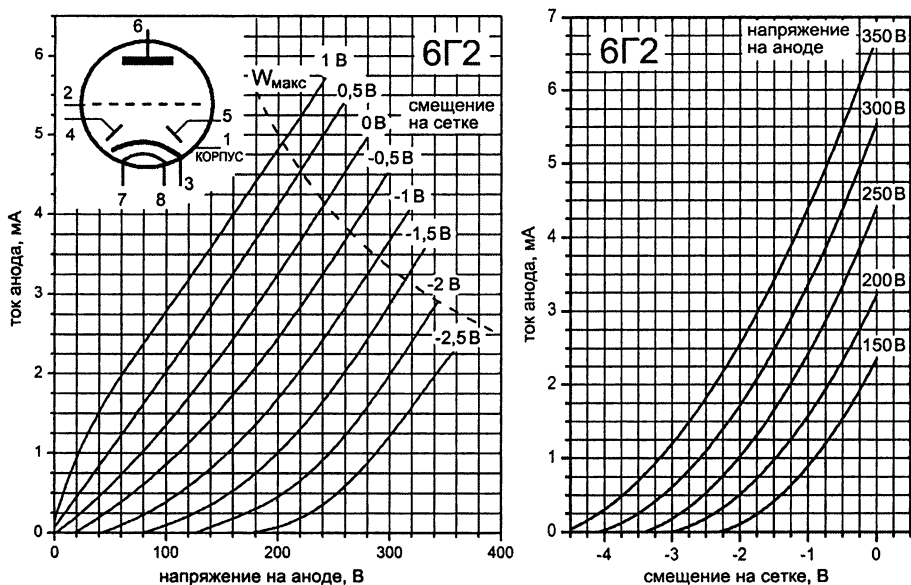


Рис. 8.8. Вольтамперные характеристики триода 6Г2

Тетроды 6Э5П и 6Э6П-Е

Лампа 6Э5П имеет стеклянный баллон с 9-штырьковым цоколем. Масса 20 г. Цоколевка показана на рис. 6.13. Лампа 6Э5П имеет зарубежный аналог — EL183.

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 6,3 В.
- ♦ Ток накала 600 ± 40 мА.
- ♦ Нароботка >500 час.

Параметры лампы 6Э5П в триодном включении:

- ♦ Коэффициент усиления (при $I_A = 25$ мА, $U_A = 150$ В) 30—35.
- ♦ Крутизна (при $I_A = 25$ мА, $U_A = 150$ В) 25 мА/В.
- ♦ Внутреннее сопротивление (при $I_A = 25$ мА, $U_A = 150$ В) 1,2 кОм.

Предельно допустимые параметры

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 5,7—7 В.
- ♦ Напряжение анода 250 В.
- ♦ Ток катода 100 мА.
- ♦ Наибольшая мощность, рассеиваемая анодом 8,3 Вт.
- ♦ Напряжение между катодом и подогревателем 100 В.
- ♦ Наибольшая температура баллона 210 °С.

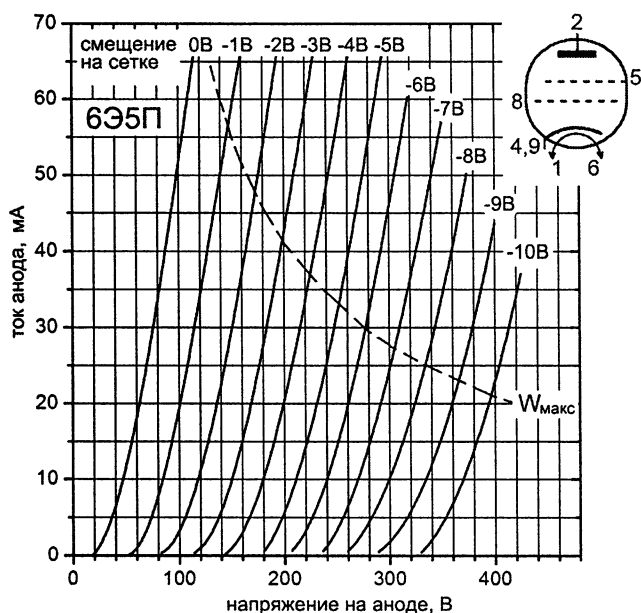


Рис. 8.9. Вольтамперные характеристики тетрода 6Э5П в триодном включении

Тетрод 6Э6П-Е по характеристикам близок к лампе 6Э5П, однако отличается цоколевкой (см. рис. 6.13) и повышенным сроком службы (10 тыс. часов!) при уменьшенных значениях предельного напряжения на аноде (150 В) и тока анода (70 мА).

Схема с использованием ламп 6Э5П, 6Э6П-Е в этой книге: рис. 6.13.

Двойной триод 6Н6П

Имеет стеклянный баллон с 9-штырьковым цоколем. Масса 20 г. Цоколевка показана на рис. 4.3. Лампа имеет близкую по параметрам зарубежную лампу 5687.

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 6,3 В.
- ♦ Ток накала 750 ± 60 мА.
- ♦ Коэффициент усиления (при $I_A = 30$ мА, $U_A = 120$ В) 20 ± 4 .
- ♦ Крутизна (при $I_A = 30$ мА, $U_A = 120$ В) 11 ± 3 мА/В.
- ♦ Внутреннее сопротивление (при $I_A = 30$ мА, $U_A = 120$ В) 1,8 кОм.
- ♦ Нароботка >3000 час.

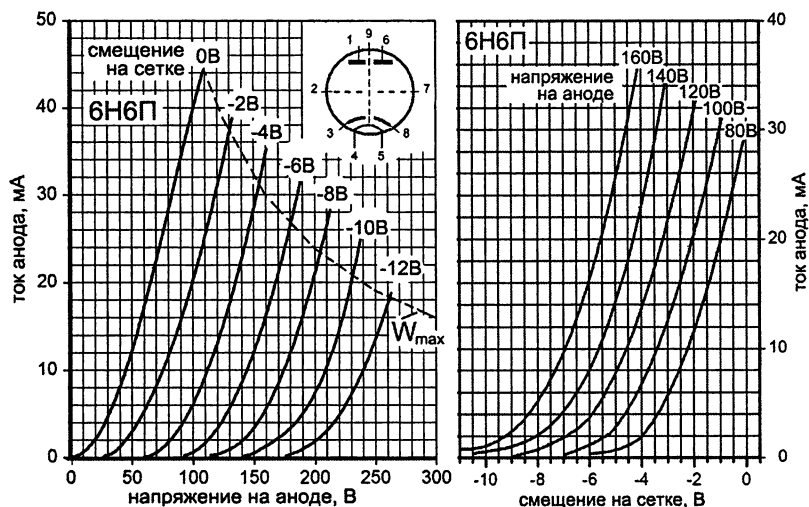


Рис. 8.11. Вольтамперные характеристики одного триода лампы 6Н6П

Предельно допустимые параметры

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 5,7—7 В.
- ♦ Напряжение на аноде 300 В.
- ♦ Ток катода каждого триода 45 мА.
- ♦ Мощность, рассеиваемая анодом каждого триода 4,8 Вт.
- ♦ Напряжение между катодом и подогревателем:
при положительном потенциале подогревателя 200 В.
при отрицательном потенциале подогревателя 200 В.
- ♦ Наибольшая температура баллона 220 °С.

Схемы с использованием лампы 6Н6П: рис. 4.19, 6.16, 6.17, 6.22, 6.24, 6.30, 7.3—7.5. Рекомендуемые режимы для различных схем: табл. 4.1, 4.7.

Двойной триод 6Н8С

Имеет стеклянный баллон с октальным цоколем. Масса 50 г. Цоколевка показана на рис. 4.3. Лампа имеет полный зарубежный аналог — 6SN7. Лампа 6С2С идентична по электрическим характеристикам лампе 6Н8С, но имеет один триод в баллоне и иную цоколевку (см. рис. 4.3).

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 6,3 В.
- ♦ Ток накала 600 ± 60 мА.
- ♦ Коэффициент усиления (при $I_A = 9$ мА, $U_A = 250$ В) $21 \pm 3,5$.

- ♦ Крутизна (при $I_A = 9 \text{ mA}$, $U_A = 250 \text{ B}$) $3 \pm 1 \text{ mA/B}$.
- ♦ Внутреннее сопротивление (при $I_A = 9 \text{ mA}$, $U_A = 250 \text{ B}$) 7 кОм .
- ♦ Нароботка $>2000 \text{ час}$.

Предельно допустимые параметры

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) $5,7\text{—}7 \text{ B}$.
- ♦ Напряжение на аноде 330 B .
- ♦ Ток катода каждого триода 20 mA .
- ♦ Мощность, рассеиваемая анодом каждого триода $2,75 \text{ Вт}$.
- ♦ Напряжение между катодом и подогревателем 100 B .

Схемы с использованием лампы 6Н8С: рис. 2.4, 2.9, 4.5, 4.13, 6.20, 6.29, 7.6, 7.7. Рекомендуемые режимы для различных схем: табл. 4.1, 4.5—4.8.

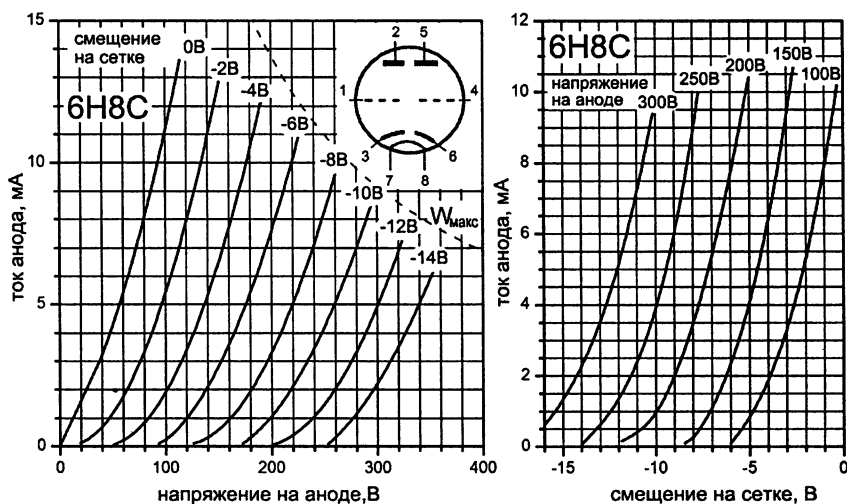


Рис. 8.12. Вольтамперные характеристики одного триода лампы 6Н8С

Двойной триод 6Н9С

Имеет стеклянный баллон с октальным цоколем. Масса 34 г. Цоколевка показана на рис. 4.3. Лампа имеет полный зарубежный аналог — 6SL7.

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) $6,3 \text{ B}$.
- ♦ Ток накала $300 \pm 60 \text{ mA}$.
- ♦ Коэффициент усиления (при $I_A = 2,3 \text{ mA}$, $U_A = 250 \text{ B}$) 70 ± 15 .
- ♦ Крутизна (при $I_A = 2,3 \text{ mA}$, $U_A = 250 \text{ B}$) $1,7 \pm 0,5 \text{ mA/B}$.
- ♦ Внутреннее сопротивление (при $I_A = 2,3 \text{ mA}$, $U_A = 250 \text{ B}$) 40 кОм .
- ♦ Нароботка $>1500 \text{ час}$.

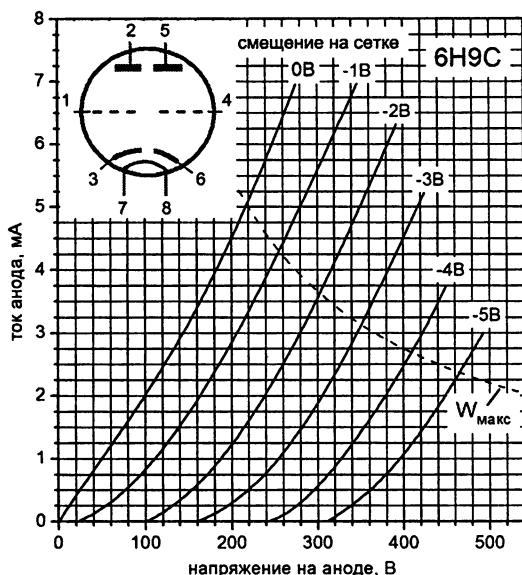


Рис. 8.13. Вольтамперные характеристики одного триода лампы 6Н9С

Предельно допустимые параметры

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 5,7—7 В.
- ♦ Напряжение на аноде 275 В.
- ♦ Ток катода каждого триода 20 мА.
- ♦ Мощность, рассеиваемая анодом каждого триода 1,1 Вт.
- ♦ Напряжение между катодом и подогревателем 100 В.
- ♦ Наибольшая температура баллона 90 °С.

Схемы с использованием лампы 6Н9С в этой книге: рис.7.7. Рекомендуемые режимы для различных схем: табл. 4.1, 4.4, 4.6, 4.7.

Двойной триод 6Н16Б

Сверхминиатюрная лампа со стеклянным баллоном. Масса 4 г. Лампа имеет полный аналог — 6Н18Б со сроком службы более 1500 час.

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 6,3 В.
- ♦ Ток накала 400 ± 60 мА.
- ♦ Коэффициент усиления (при $I_A = 6$ мА, $U_A = 100$ В) 25 ± 5 .
- ♦ Крутизна (при $I_A = 6$ мА, $U_A = 100$ В) 5 ± 1 мА/В.
- ♦ Внутреннее сопротивление (при $I_A = 6$ мА, $U_A = 100$ В) 5 кОм.
- ♦ Нарботка 6Н16Б, 6Н16Б-В, 6Н16Б-И, 6Н16Б-ВИ >750 час.
- ♦ Нарботка 6Н16Б-ВР, 6Н16Б-ВИР >2000 час.

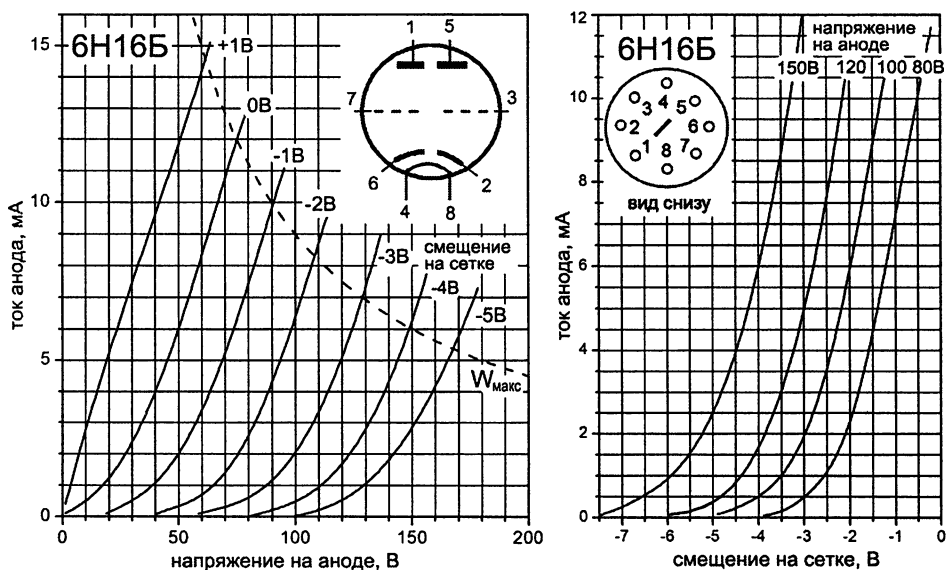


Рис. 8.14. Вольтамперные характеристики одного триода лампы 6H16Б

Предельно допустимые параметры

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 5,7—6,9 В.
- ♦ Напряжение на аноде 200 В.
- ♦ Ток катода каждого триода 14 мА.
- ♦ Мощность, рассеиваемая анодом каждого триода 0,9 Вт.
- ♦ Напряжение между катодом и подогревателем 150 В.
- ♦ Наибольшая температура баллона 170 °С.

Схемы с использованием лампы 6H16 в этой книге: рис. 6.35, 6.36, 7.13. Рекомендуемые режимы для различных схем: табл. 4.1.

Двойной триод 6H23П (ECC88, E88CC, 6DJ8)

Имеет стеклянный баллон с 9-штырьковым цоколем. Масса 16 г. Цоколевка показана на рис. 4.3. Лампа имеет зарубежные аналоги: ECC88, E88CC, 6DJ8.

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 6,3 В.
- ♦ Ток накала 310 ± 25 мА.
- ♦ Коэффициент усиления (при $I_A = 30$ мА, $U_A = 120$ В) 34 ± 9 .
- ♦ Крутизна (при $I_A = 30$ мА, $U_A = 120$ В) 13 мА/В.
- ♦ Внутреннее сопротивление (при $I_A = 30$ мА, $U_A = 120$ В) 3 кОм.
- ♦ Нароботка >5000 час.

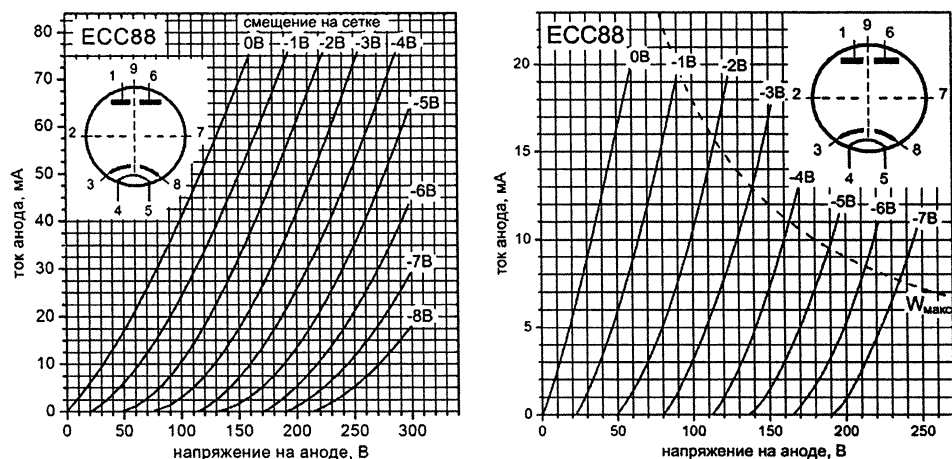


Рис. 8.15. Вольтамперные характеристики одного триода лампы ECC88

Лампа 6Н23П и ее аналоги очень популярны среди радиолюбителей. Однако автор не является поклонником этой лампы во всех ее версиях: лампа, к сожалению, не «зазвучала» ни в одной из схем. Обычно полагается, что зарубежные аналоги (прототипы?) качественнее отечественных ламп. Поэтому вольтамперные характеристики приведены для лампы ECC88. Как видно из левой части рис. 8.15, они очень линейны за пределами допустимых значений по рассеиваемой на аноде мощности (1,8 Вт). Внутри рабочего диапазона мощностей (правая часть рис. 8.15) характеристики довольно нелинейны.

Предельно допустимые параметры

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 5,7—7 В.
- ♦ Напряжение на аноде 300 В*.
- ♦ Ток катода каждого триода 20 мА.
- ♦ Мощность, рассеиваемая анодом каждого триода 1,8 Вт.
- ♦ Напряжение между катодом и подогревателем 200 В*.
- ♦ Наибольшая температура баллона 120 °С.



Примечание.

* — эти параметры могут отличаться в меньшую сторону для зарубежных аналогов.

Схемы с использованием лампы 6Н23П в этой книге: рис. 4.19, 4.21, 6.19. Рекомендуемые режимы для различных схем: табл. 4.3, 4.6—4.8.

Двойной триод 6Н28Б

Сверхминиатюрная лампа со стеклянным баллоном. Масса 5 г.

- Напряжение накала (постоянное или переменное) 6,3 В.
- Ток накала 250 ± 20 мА.
- Коэффициент усиления (при $I_A = 6$ мА, $U_A = 100$ В) 22 ± 6 .
- Крутизна (при $I_A = 7$ мА, $U_A = 50$ В) 7 ± 2 мА/В.
- Внутреннее сопротивление (при $I_A = 6$ мА, $U_A = 100$ В) 3 кОм.
- Наробotka >2000 час.

Предельно допустимые параметры

- Напряжение накала (постоянное или переменное) 5,7—6,9 В.
- Напряжение на аноде 150 В.
- Ток катода каждого триода 10 мА.
- Мощность, рассеиваемая анодом каждого триода 0,9 Вт.
- Напряжение между катодом и подогревателем 150 В.
- Наибольшая температура баллона 125 °С.

Схемы с использованием лампы 6Н28Б в этой книге: рис. 6.37, 6.38, 7.12. Рекомендуемые режимы для различных схем: рис. 6.37, 6.38, 7.12.

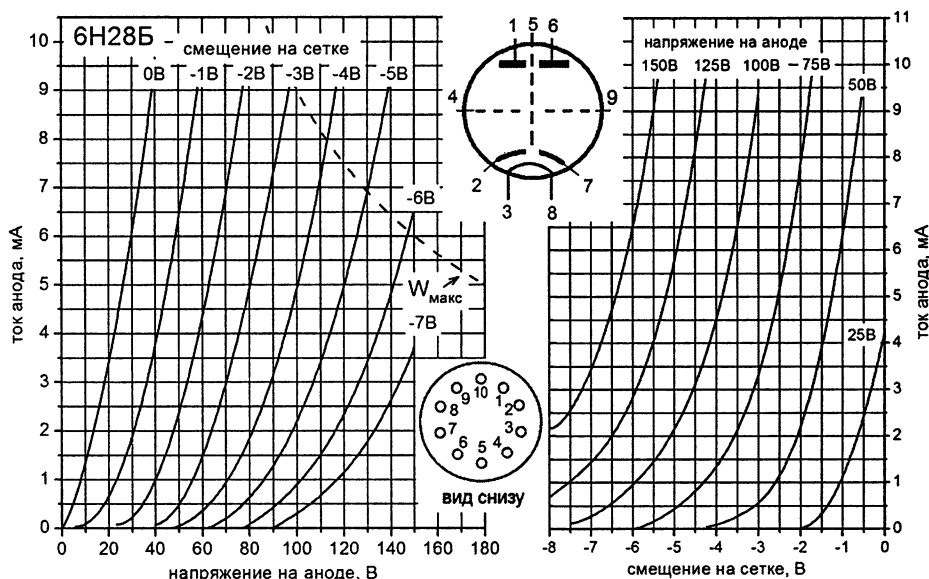


Рис. 8.16. Вольтамперные характеристики одного триода лампы 6Н28Б

Двойной триод 6Н30П

Имеет стеклянный баллон с 9-штырьковым цоколем. Масса 20 г. Цоколевка показана на рис. 4.3.

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 6,3 В.
- ♦ Ток накала 800 ± 100 мА.
- ♦ Коэффициент усиления (при $I_A = 40$ мА, $U_A = 80$ В) 15 ± 3 .
- ♦ Крутизна (при $I_A = 40$ мА, $U_A = 80$ В) 18 ± 5 мА/В.
- ♦ Внутреннее сопротивление (при $I_A = 40$ мА, $U_A = 80$ В) 0,8 кОм.
- ♦ Наробotka $>10\,000$ час.

Предельно допустимые параметры

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 6—6,6 В.
- ♦ Напряжение на аноде 250 В.
- ♦ Ток катода каждого триода 100 мА.
- ♦ Мощность, рассеиваемая анодом каждого триода 4 Вт.
- ♦ Напряжение между катодом и подогревателем 400 В.
- ♦ Наибольшая температура баллона 250°C .

Схемы с использованием лампы 6Н30П в этой книге: рис. 6.15, 6.17. Рекомендуемые режимы для различных схем: табл. 4.1, 4.7, 4.8.

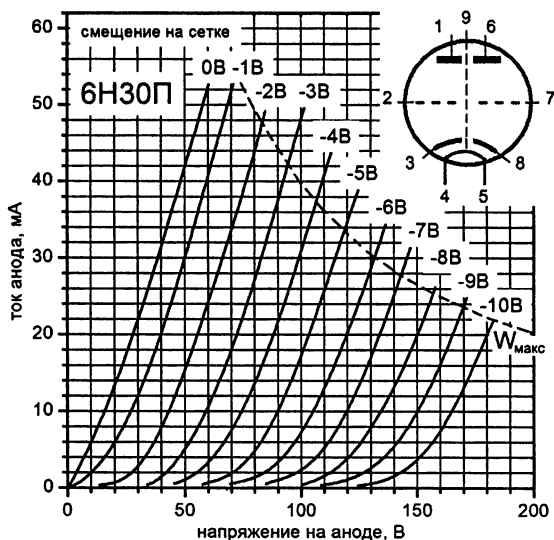


Рис. 8.17. Вольтамперные характеристики одного триода лампы 6Н30П

Двойной триод 12AX7 (ECC83, E83CC)

Имеет стеклянный баллон с 9-штырьковым цоколем. Масса 20 г. Цоколевка показана на рис. 4.3.

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 6,3 В или 12,6 В*.
- ♦ Ток накала (при напряжении накала 6,3 В) 300 мА.
- ♦ Коэффициент усиления (при $I_A = 1,2$ мА, $U_A = 250$ В) 100.
- ♦ Крутизна (при $I_A = 1,2$ мА, $U_A = 250$ В) 1,6 мА/В.
- ♦ Внутреннее сопротивление (при $I_A = 1,2$ мА, $U_A = 250$ В) 62 кОм.



Примечание.

*При использовании для накала напряжения 12,6 В используются выводы 4 и 5. При использовании источника напряжением 6,3 В выводы 4 и 5 соединяются, а напряжение накала подается на выводы 9 и 4(5).

Предельно допустимые параметры

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 5,7—6,9 В.
- ♦ Напряжение на аноде 300 В.
- ♦ Ток катода каждого триода 8 мА.
- ♦ Мощность, рассеиваемая анодом каждого триода 1 Вт.
- ♦ Напряжение между катодом и подогревателем 180 В.
- ♦ Наибольшая температура баллона 180 °С.

Схемы с использованием лампы 12AX7 в этой книге: рис. 4.6, 4.14, 6.22, 7.3, 7.4. Рекомендуемые режимы для различных схем: табл. 4.1, 4.2, 4.6—4.8.

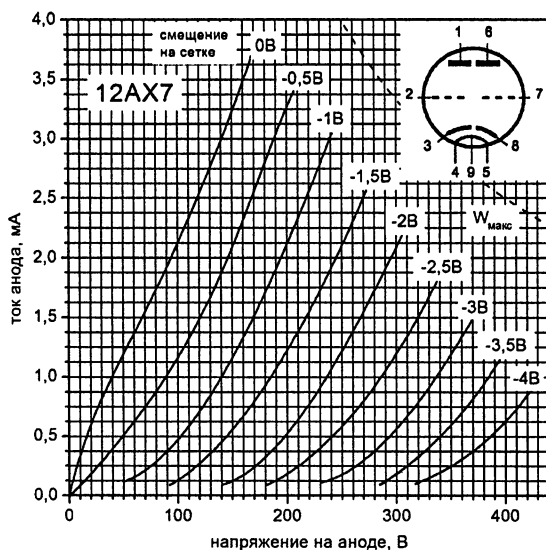


Рис. 8.18. Вольтамперные характеристики одного триода лампы 12AX7

Двойной триод 6072 (12AY7)

Двойной триод 6072 используется фирмой Audio Note (Великобритания) во многих разработках. Имеет стеклянный баллон с 9-штырьковым цоколем. Цоколевка показана на рис. 8.19.

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 6,3 В или 12,6 В*.
- ♦ Ток накала (при напряжении накала 6,3 В) 350 мА.
- ♦ Коэффициент усиления (при $I_A = 1,2$ мА, $U_A = 250$ В) 44.
- ♦ Крутизна (при $I_A = 1,2$ мА, $U_A = 250$ В) 1,7 мА/В.
- ♦ Внутреннее сопротивление (при $I_A = 1,2$ мА, $U_A = 250$ В) 25 кОм.



Примечание.

* При использовании для накала напряжения 12,6 В используются выводы 4 и 5. При использовании источника напряжением 6,3 В выводы 4 и 5 соединяются, а напряжение накала подается на выводы 9 и 4(5).

Предельно допустимые параметры

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 5,7—6,9 В.
- ♦ Напряжение на аноде 330 В.
- ♦ Мощность, рассеиваемая анодом каждого триода 1,6 Вт.
- ♦ Напряжение между катодом и подогревателем 100 В.
- ♦ Наибольшая температура баллона 160 °С.

Схемы с использованием лампы 6072 в этой книге: рис. 2.6, 4.12, 4.18, 4.20, 7.1, 7.2.

Рекомендуемые режимы для различных схем: табл. 4.7, 4.8.

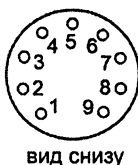
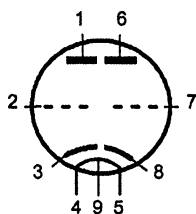
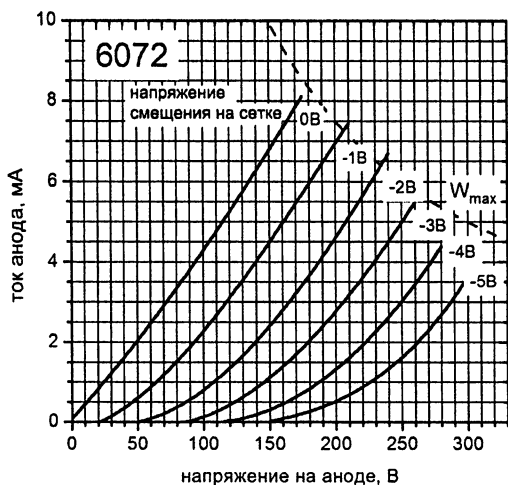


Рис. 8.19. Вольтамперные характеристики одного триода лампы 6072

Двуханодный кенотрон 6Ц5С

Предназначен для выпрямления переменного напряжения в двухполупериодном выпрямителе со средней точкой (схема Миткевича). Имеет стеклянный баллон и октальный цоколь. Масса 40 г.

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 6,3 В.
- ♦ Ток накала 600 ± 60 мА.
- ♦ Выпрямленный ток, не менее 70 мА.
- ♦ Время разогрева катода 15 с.
- ♦ Долговечность, более 1000 час.
- ♦ Критерий долговечности — выпрямленный ток, не менее 60 мА.

Предельно допустимые параметры

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 5,7—6,9 В.
- ♦ Наибольшее обратное напряжение анода 1100 В.
- ♦ Наибольшее постоянное напряжение между катодом и подогревателем:
при положительном потенциале подогревателя 0 В;
при отрицательном потенциале подогревателя 450 В.
- ♦ Наибольшая температура баллона 120 °С.

Схемы с использованием лампы 6Ц5С в этой книге: рис. 6.10.

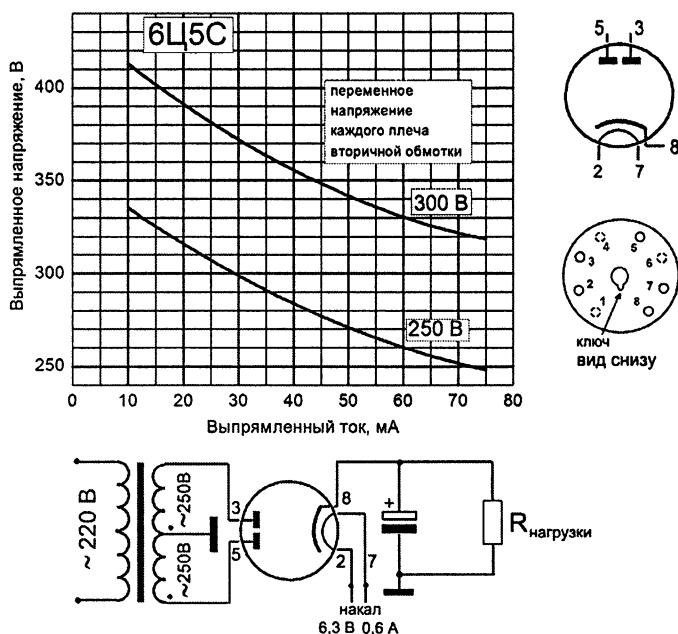


Рис. 8.20. Зависимость выпрямленного напряжения от выпрямленного тока, цолевка кенотрона и пример включения

Двуханодный кенотрон 6Ц4П

Предназначен для выпрямления переменного напряжения в двухполупериодном выпрямителе со средней точкой (схема Миткевича). Имеет стеклянный баллон и 7-штырьковый цоколь. Масса 15 г.

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 6,3 В.
- ♦ Ток накала 600 ± 60 мА.
- ♦ Выпрямленный ток, не менее 75 мА.
- ♦ Время разогрева катода 15 с.
- ♦ Долговечность 6Ц4П более 1500 час.
- ♦ Долговечность 6Ц4П-ЕВ более 5000 час.
- ♦ Критерий долговечности: выпрямленный ток, не менее 75 мА

Предельно допустимые параметры

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 5,7—6,9 В.
- ♦ Наибольшее обратное напряжение анода 1000 В.
- ♦ Наибольшее постоянное напряжение между катодом и подогревателем:
при положительном потенциале подогревателя 100 В;
при отрицательном потенциале подогревателя 400 В.
- ♦ Наибольшая температура баллона 160 °С.

Схемы с использованием лампы 6Ц4П в этой книге: рис. 6.10.

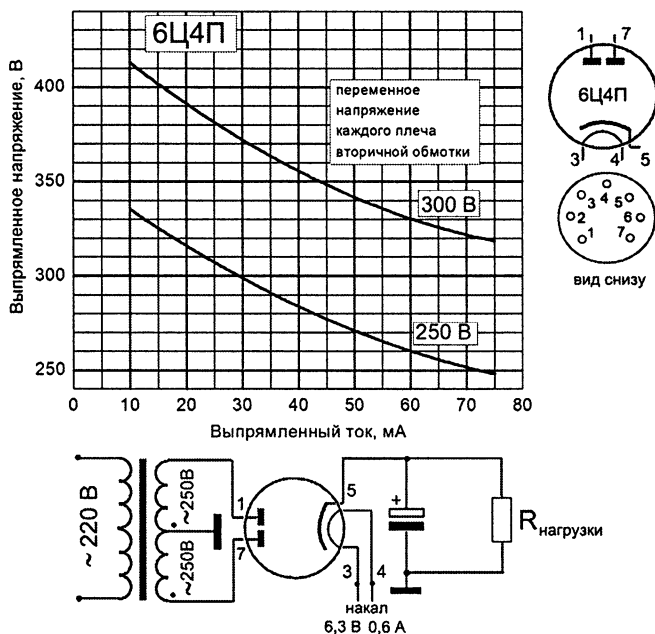


Рис. 8.21. Зависимость выпрямленного напряжения от выпрямленного тока для кенотрона 6Ц4П, цолевка и пример включения

Двойной диод 6Х2П

Предназначен для выпрямления переменного напряжения в двух-полупериодном выпрямителе со средней точкой (схема Миткевича). Имеет стеклянный баллон и 7-штырьковый цоколь. Масса 15 г.

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 6,3 В.
- ♦ Ток накала 300 ± 25 мА.
- ♦ Выпрямленный ток, не менее 17 мА.
- ♦ Долговечность более 5000 час.
- ♦ Критерий долговечности: выпрямленный ток, не менее 16 мА.

Предельно допустимые параметры

- ♦ Напряжение накала (постоянное или переменное) 5,7—6,9 В.
- ♦ Наибольшее обратное напряжение анода 450 В.
- ♦ Наибольшее постоянное напряжение между катодом и подогревателем:
при положительном потенциале подогревателя 0 В;
при отрицательном потенциале подогревателя 350 В.
- ♦ Выпрямленный ток 20 мА.
- ♦ Наибольшая температура баллона 120 °С.

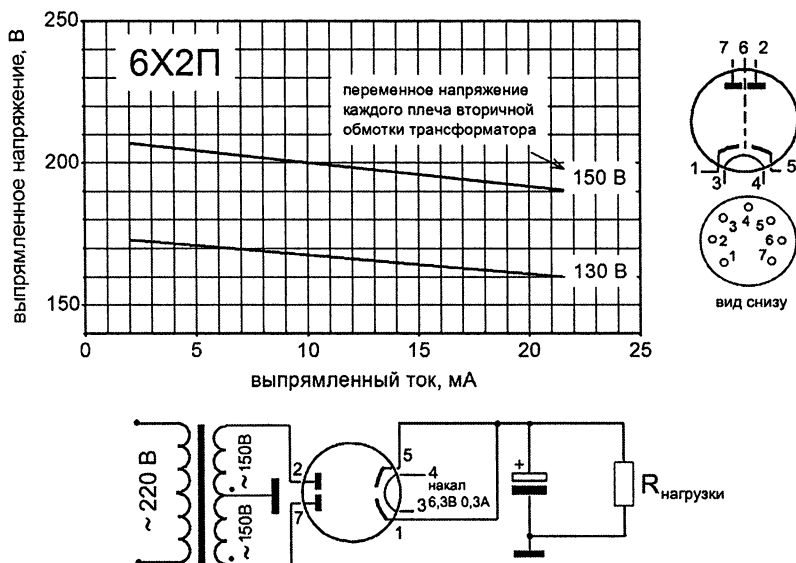


Рис. 8.22. Зависимость выпрямленного напряжения от выпрямленного тока, и цолевка лампы 6Х2П

8.2. Параметры биполярных и полевых транзисторов

Биполярные комплементарные кремниевые транзисторы большой мощности для работы в параллельном выходном усилителе тока

Параметры транзисторов обозначаются так:
 $h_{21Э}$ — коэффициент передачи по току в схеме с общим эмиттером;
 $f_{гр}$ — граничная частота;
 $U_{к-э}$ — напряжение коллектор-эмиттер;
 I_K — ток коллектора;
 P_K — мощность, рассеиваемая на коллекторе.

Параметры мощных кремниевых транзисторов, образующих комплементарные пары

Таблица 8.1

Тип транзистора		Параметры		Максимально допустимые значения		
		$h_{21Э}$	$f_{гр}$ МГц	$U_{к-э}$, В	I_K , А	P_K , Вт
2SA1943	2SC5200	55—160	30	230	15	150
2SA1302	2SC3281	55—160	-	200	16	150
KT8102A	KT8101A	>20	>10	200	18	150
KT8102Б	KT8101Б	>20	>10	160	18	150
KT818ГМ	KT819ГМ	12—225	>3	100	15	100
2SA1942	2SC5199	55—160	30	160	12	120
2SA1908	2SC5100	50—180	20	120	8	75
MJE15033	MJE15032	>50	30	250	8	50
KT818Г	KT819Г	12—225	>3	90	10	60

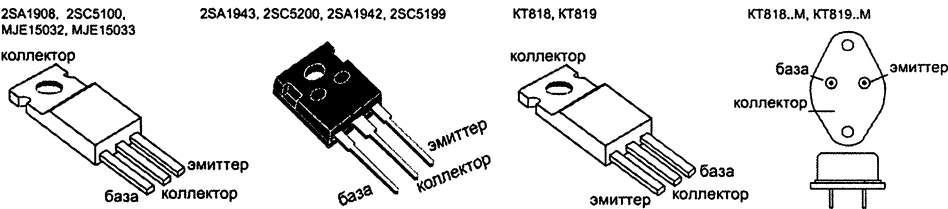


Рис. 8.23. Цоколевка кремниевых транзисторов большой мощности

Биполярные п-р-п кремниевые транзисторы средней мощности для работы в усилителе тока на полевых транзисторах

Параметры биполярных п-р-п кремниевых транзисторов средней мощности Таблица 8.2

Тип транзистора	Типичные значения параметров		Максимально допустимые значения		
<div>п-р-п</div> <div></div>	h_{213}	$f_{гр}$ МГц	$U_{кз}$, В	$I_{к}$, А	$P_{к}$, Вт
BD135	25—250	-	45	1,5	12,5
BD139	25—350	-	80	1,5	12,5
КТ815А	40—275	>3	40	1,5	10
КТ815Б	40—275	>3	50	1,5	10
КТ815В	40—275	>3	70	1,5	10
КТ815Г	40—275	>3	100	1,5	10
КТ817А	25—275	>3	40	3	25
КТ817Б	25—275	>3	45	3	25
КТ817В	25—275	>3	60	3	25
КТ817Г	25—275	>3	100	3	25
КТ851А	40—200	20	200	2	25
КТ851Б	20—200	20	250	2	25
КТ851В	20—20	20	150	2	25

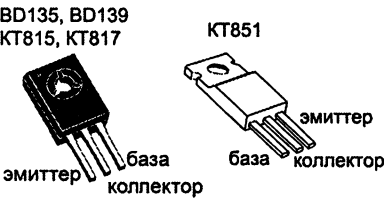


Рис. 8.24. Цоколевка кремниевых п-р-п транзисторов средней мощности

Полевые кремниевые транзисторы большой мощности для работы в усилителе тока на полевых транзисторах

Параметры транзисторов обозначаются так:

- S — крутизна (ампер/вольт);
- t_R — время включения (наносекунды);
- $C_{вх}$ ($C_{вых}$) — емкость входная (выходная) (пикофарады);
- $U_{ис}$ — напряжение исток-сток (вольт);
- $U_{из}$ — напряжение исток-затвор (вольт).

Параметры мощных полевых транзисторов

Таблица 8.3

Тип транзистора	Типичные значения параметров			Максимально допустимые значения			
	S, A/B	t _Р , нс	C _{вх} (C _{вых}), пФ	U _{ис} , В	U _{из} , В	I _с (I _{с имп}), А	P _{общ} , Вт
IRF250	19	120	2000(800)	200	200	30(120)	150
IRFP150	20	140	2000(1000)	100	100	40(160)	180
IRFP250	10—25	50	2850 (420)	200	200	20 (33)	180
IRF240	9	27	1275(500)	200	200	18(72)	125
IRFP240	11	51	1275(500)	200	200	20(80)	150

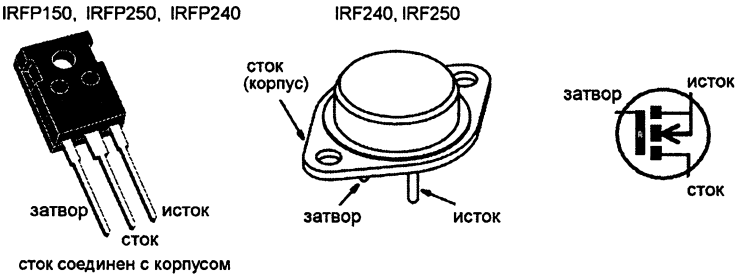


Рис. 8.25. Цоколевка мощных полевых транзисторов

8.3. Параметры интегральных полупроводниковых стабилизаторов напряжения

Параметры стабилизатора на фиксированное напряжение 6 В

Таблица 8.4

Тип стабилизатора	Полярность	Входное напряжение, В	Выходное напряжение, В			Макс. ток, А
			мин.	тип.	макс.	
LM7806	« + »	9—13	5,7	6,0	6,3	1,5

Схема включения и цоколевка стабилизатора LM7806 показаны на рис. 6.14. Стабилизатор устанавливается на радиатор, изолированный от шасси усилителя.

Параметры стабилизаторов с регулируемым напряжением

Таблица 8.5

Тип стабилизатора	Полярность	Выходное напряжение, U _{вых} , В	Входное напряжение, В		Макс. ток, А
			мин.	макс.	
LM317T	« + »	+1,2... +37	U _{вых} +3	40	1,5
LM337T	« - »	-1,2... -37	-|U _{вых} +3|	-40	1,5

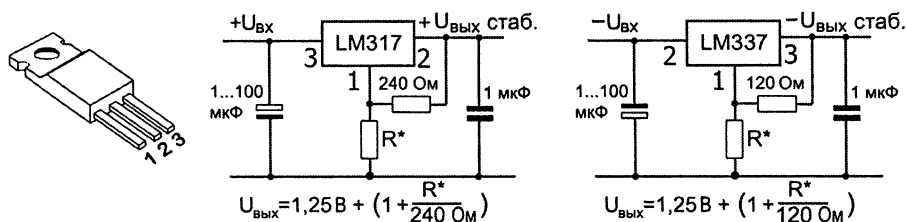


Рис. 8.26. Цоколевка и схемы включения стабилизаторов LM317 и LM337

Выходное напряжение стабилизаторов LM317, LM337 задается резистором R^* в соответствии с формулами, показанными на рис. 8.26. Входной электролитический конденсатор необходим только в случае, если длина проводников от основных конденсаторов до стабилизатора превышает 15 см. Выходной конденсатор обязателен! Буква «Т» указывает тип корпуса, изображенный на рис. 8.26 (ТО-220). Стабилизаторы в иных корпусах имеют другую последнюю букву и меньший максимальный ток нагрузки. Стабилизаторы устанавливаются на радиаторах, изолированные от шасси усилителя.

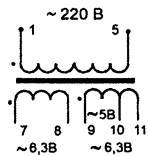
8.4. Серийные трансформаторы для применения в гибридных усилителях

Трансформаторы серии ТН мощностью 13—30 Вт для питания накаливаемых ламповых усилителей напряжения

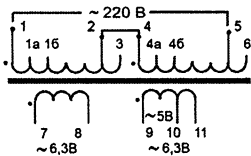
Трансформаторы ТН (трансформатор накаливаемый) имеют в обозначении номер серии (1, 2, 3, ...), номинальное напряжение на первичной обмотке в вольтах (220 или 127/220), номинальную частоту сетевого напряжения в герцах (50). Например, обозначение «ТН36-127/220-50» означает «трансформатор накаливаемый номер 36 для напряжения сети 127 или 220 В и частоты сети 50 Гц». Ниже приведены марки трансформаторов мощностью 13—30 Вт, пригодные для питания накалов ламп в ламповых усилителях напряжения и питания накала кенотрона в анодном блоке питания.

Трансформатор с двумя вторичными обмотками

ТН4 - 220-50 20 Вт



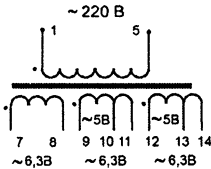
ТН4 - 127/220-50 20 Вт



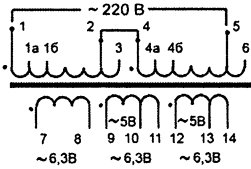
Тр-р	Мощность Вт	Ток первичн. обмотки, А	Ток вторичной обмотки, А номера выводов	
			7-8	9-11
ТН4	20,0	0,12	1,65	1,65

Трансформаторы с тремя вторичными обмотками

ТН13 - ТН16 (220-50)



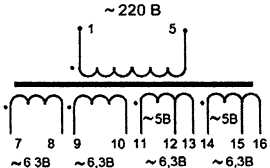
ТН13 - ТН16 (127/220-50)



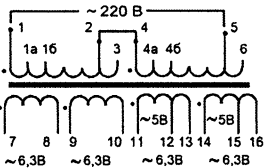
Тр-р	Мощность Вт	Ток первичн. обмотки, А	Ток вторичной обмотки, А номера выводов		
			7-8	9-11	12-14
ТН13	13,3	0,08	0,71	0,71	0,71
ТН14	20,0	0,12	1,40	0,92	0,92
ТН15	20,0	0,12	0,92	1,13	1,13
ТН16	20,0	0,12	0,80	1,20	1,20

Трансформаторы с четырьмя вторичными обмотками

ТН30,ТН32-ТН36 (220-50)



ТН30,ТН32 - ТН36 (127/220-50)



Тр-р	Мощность Вт	Ток первичн. обмотки, А	Ток вторичной обмотки, А номера выводов			
			7-8	9-10	11-13	14-16
ТН-30	13,3	0,087	0,55	0,55	0,55	0,55
ТН-32	20,0	0,12	0,65	0,65	1,00	1,00
ТН-33	20,0	0,12	0,20	1,00	1,00	1,00
ТН-34	30,0	0,17	2,40	0,80	0,80	0,80
ТН-35	30,0	0,17	1,00	2,00	0,80	0,85
ТН-36	30,0	0,17	1,20	1,20	1,20	1,20

Рис. 8.27. Трансформаторы серии ТН, рекомендуемые для использования в блоке питания лампового усилителя напряжения

Трансформаторы серии ТА мощностью 26—40 Вт для источника анодного напряжения ламповых усилителей напряжения

Трансформаторы ТА (трансформатор анодный) имеют в обозначении номер серии (1, 2, 3, ...), номинальное напряжение на первичной обмотке в вольтах (220 или 127/220), номинальную частоту сетевого напряжения в герцах (50). Например, обозначение «ТА40-127/220-50» обозначает трансформатор анодный номер 40 для напряжения сети 127 или 220 В и частоты сети 50 Гц. Ниже приведены марки трансформаторов мощностью 26—40 Вт, пригодные для применения в анодном блоке питания в ламповых усилителях напряжения.



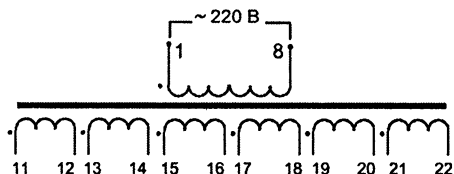
Внимание.

Обеспечьте запас по максимальному напряжению конденсаторов в блоке питания с учетом того, что напряжение на вторичной обмотке без нагрузки выше на 15—20 %!

АНОДНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Тр-р	Мощность Вт	Ток первичн. обмотки, А	Напряжение на вторичн. обмотке, В / Ток, А номера выводов			
			11-12 ; 13-14	15-16; 17-18	19-20	21-22
ТА-19	26	0,16	125/0,055	112/0,048	14/0,055	14/0,055
ТА-38	36	0,20	80/0,120	80/0,120	20/0,120	20/0,120
ТА-40	36	0,20	125/0,079	112/0,063	14/0,079	14/0,079
ТА-43	36	0,20	180/0,056	112/0,060	14/0,060	14/0,060
ТА-46	36	0,20	160/0,053	140/0,059	20/0,059	20/0,059
ТА-68	40	0,22	125/0,090	112/0,079	14/0,090	14/0,090
ТА-71	40	0,22	180/0,065	112/0,065	20/0,065	20/0,065
ТА-73	40	0,22	160/0,090	140/0,030	20/0,090	20/0,090
ТА-74	40	0,22	160/0,068	140/0,064	20/0,068	20/0,068

ТА-XX - 220-50



ТА-XX - 127/220-50

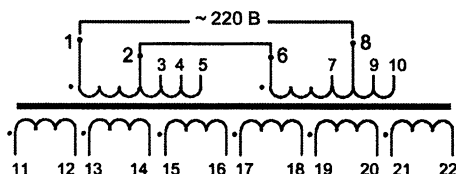


Рис. 8.28. Анодные трансформаторы, рекомендуемые для использования в блоке питания лампового усилителя напряжения

Трансформаторы серии ТАН мощностью 36—60 Вт для источника анодного и накального напряжений ламповых усилителей напряжения

Трансформаторы серии ТАН (анодно-накальные) содержат несколько вторичных обмоток с напряжением 6,3 В с отводами на 5 В и несколько обмоток с напряжением от 13 до 250 В, комбинируя которые можно получать различные напряжения для питания ламповых схем. На рис. 8.29 приведены данные трансформаторов мощностью, достаточной для питания всех ламповых усилителей напряжения, описанных в данной книге.

Эти трансформаторы содержат парные обмотки, что позволяет использовать двухполупериодное выпрямление с отводом от средней точки с использованием кенотрона или быстрых полупроводниковых диодов, а в случае применения мостовой схемы выпрямления — сформировать отдельные источники питания для каждого канала.

Тр-р	Мощность Вт	Напряжение на вторичн. обмотке, В / Ток, А номера выводов			
		7-8, 9-10	11-12, 13-14	15-16, 17-18	19-20(21), 22-23(24)
ТАН6	36	125/0,055	112/0,048	13/0,055	5(6,3)/0,80
ТАН7	36	180/0,036	112/0,050	20/0,050	5(6,3)/0,80
ТАН8	36	160/0,040	140/0,040	20/0,040	5(6,3)/0,80
ТАН10	36	200/0,032	180/0,032	20/0,032	5(6,3)/0,80
ТАН11	36	250/0,026	224/0,026	26/0,026	5(6,3)/0,80
ТАН12	36	224/0,032	125/0,040	25/0,040	5(6,3)/0,80
ТАН17	50	80/0,120	80/0,080	20/0,120	5(6,3)/1,05
ТАН18	50	125/0,080	112/0,063	13/0,080	5(6,3)/1,05
ТАН19	50	180/0,056	112/0,060	20/0,060	5(6,3)/1,05
ТАН20	50	160/0,053	140/0,060	20/0,060	5(6,3)/1,05
ТАН21	50	200/0,047	180/0,045	20/0,047	5(6,3)/1,05
ТАН22	50	224/0,043	125/0,057	25/0,057	5(6,3)/1,05
ТАН24	50	250/0,035	224/0,038	26/0,038	5(6,3)/1,05
ТАН31	60	80/0,100	80/0,100	20/0,120	5(6,3)/1,60
ТАН32	60	125/0,087	112/0,073	13/0,087	5(6,3)/1,60
ТАН33	60	180/0,063	112/0,065	20/0,065	5(6,3)/1,60
ТАН34	60	160/0,065	140/0,060	20/0,065	5(6,3)/1,60
ТАН35	60	224/0,045	125/0,065	25/0,065	5(6,3)/1,60
ТАН36	60	200/0,050	180/0,050	20/0,050	5(6,3)/1,60
ТАН37	60	250/0,040	224/0,040	26/0,040	5(6,3)/1,60

ТАН-XX-220-50



ТАН-XX-127/220-50

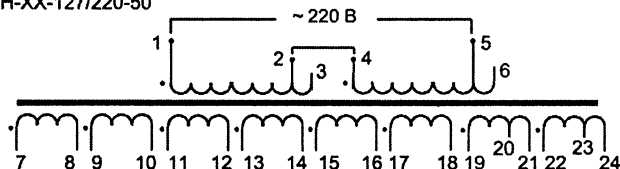


Рис. 8.29. Анодно-накальные трансформаторы, рекомендуемые для использования в блоке питания лампового усилителя напряжения



Внимание.

Обеспечьте запас по максимальному напряжению конденсаторов в блоке питания с учетом того, что напряжение на вторичной обмотке без нагрузки выше на 15—20 %!

Мощные трансформаторы ТН, пригодные для применения в блоке питания транзисторной части гибридных усилителей

Существуют накальные трансформаторы серии ТН, содержащие четыре обмотки по 6,3 В с отводами в двух обмотках для получения напряжений по 5 В. Некоторые из этих трансформаторов имеют равные или почти равные значения номинального тока для всех обмоток. При построении однополярного блока питания для усилителя класса А на полевых транзисторах, можно использовать в каждом канале трансформаторы ТН56 (98 Вт), ТН60 (152 Вт).

Рекомендуемое соединение обмоток $6,3 + 6,3 + 5 + 5 = 22,6$ В.



Внимание.

Соблюдайте фазировку обмоток при их последовательном соединении. Постоянное напряжение после мостового выпрямителя составит 30 В.

При использовании трансформатора ТН61 можно применить один трансформатор на 2 канала с таким же соединением обмоток. Если есть возможность применить в усилителе два ТН61 (по одному на канал), можно использовать 4 последовательно соединенные обмотки по 6,3 В. Постоянное напряжение на выходе мостового выпрямителя составит 33,5 В.



Внимание.

Обеспечьте запас по максимальному напряжению конденсаторов в блоке питания с учетом того, что напряжение на вторичной обмотке без нагрузки выше на 15—20 %!

Трансформаторы ТНХХ-127/220-50, допускающие подключение к сети напряжением 127 В, имеют в первичной обмотке дополнительные секции (2-3 и 5-6). Если их задействовать, можно понизить напряжение на вторичных обмотках в $(127 + 127)/220 = 1,15$ раз, т. е. вместо 6,3 В будем иметь 5,5 В, а вместо 5 В — 4,3 В.

Для этого надо соединить выводы 3 и 4 вместо 2 и 4, а напряжение 220 В подать на выводы 1 и 6 вместо 1 и 5. Если, соединив выводы 3 и 4, подать 220 В на выводы 1 и 5, напряжения на вторичных обмотках

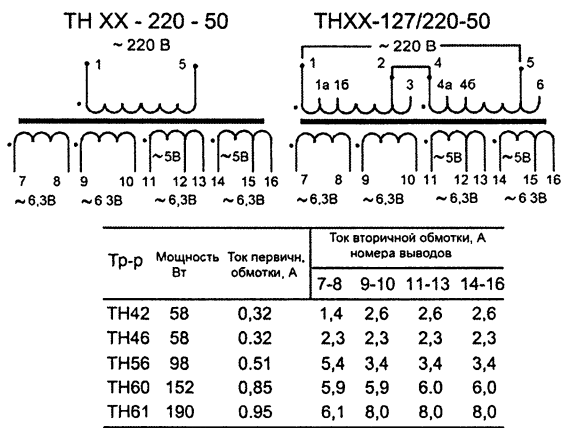


Рис. 8.30. Мощные трансформаторы ТН, рекомендуемые для использования в блоке питания транзисторной части гибридных усилителей

уменьшатся не на 15 %, а на 7,5 %. Эту опцию можно использовать для получения при последовательном соединении обмоток ряда постоянных напряжений 26 В, 28 В, 29 В, 30 В, 31 В, 33,5 В.

Подключение дополнительных секций первичной обмотки благоприятно скажется на надежности, так как первичная обмотка будет работать с неполной нагрузкой.

Эти рекомендации справедливы и при построении двухполярного блока питания. Кроме перечисленных ранее трансформаторов, можно использовать и пару менее мощных ТН42 и ТН46 (58 Вт). При построении усилителей малой мощности можно ограничиться включением последовательно 3 обмоток по 6,3 В. Постоянное напряжение составит в этом случае $(6,3 \times 3) \times 1,414 - 2 = 24,6$ В, а используя 5-вольтовые обмотки в комбинации с 6,3-вольтовыми, можно получить 21 В (5 + 5 + 6,3 В) или 23 В (5 + 6,3 + 6,3 В). Для двухполярного источника питания необходимо иметь два трансформатора. Поэтому, если делать раздельное питание для каждого канала, потребуется 4 трансформатора. При раздельном питании четыре ТН46 — отличный вариант.

Трансформаторы серии ТПП для блока питания транзисторной части гибридных усилителей

С 1979 г. часть трансформаторов серии ТПП выпускается с уменьшенным количеством выводов первичной обмотки без изменения их нумерации. Подключение напряжения сети 220 В для таких трансформаторов производится к выводам 2 и 7, а выводы 3 и 9 соединяются перемычкой.

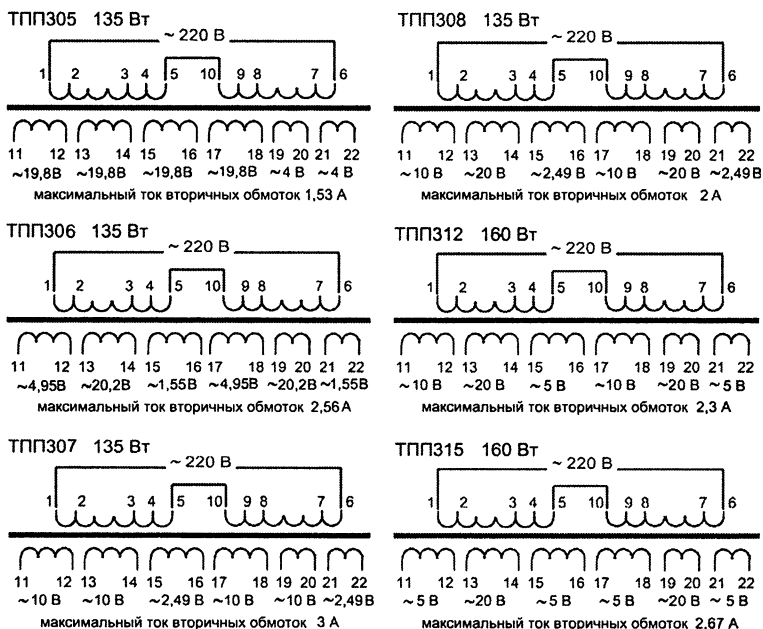


Рис. 8.31. Параметры трансформаторов серии ТПП мощностью 135 и 160 Вт

ОБЗОР ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСОВ ПО АУДИОТЕХНИКЕ

Для большинства радиолюбителей во всем мире Интернет становится сегодня главным источником информации и местом для дискуссий. В этой главе содержится обзор полезных русско- и англоязычных сайтов по высококачественной аудиотехнике с краткой аннотацией, а также список сайтов, предлагающих качественные электронные компоненты.

9.1. Русскоязычные сайты

<http://audioportal.su/> — сайт содержит форумы, описания любительских конструкций, статьи, а также справочные данные для любителей качественного звука.

<http://metaleater.narod.ru/> — сайт Михаила Торопкина, автора трех книг по ламповой аудиоаппаратуре для самоделщиков. Сайт содержит необходимую информацию по расчету каскадов ламповых усилителей, звуковых трансформаторов, акустических систем и блоков питания. Большое количество схем самодельных и промышленных аппаратов. Справочники по электронным компонентам. Около полусотни статей по ламповой аудиотехнике. Отдельный раздел содержит 30 описаний разработок Анатолия Манакова.

<http://www.next-tube.com/> — сайт Евгения Карпова. Содержит большую подборку статей по ламповой и гибридной (лампово-транзисторной) схемотехнике высококачественных аудиоусилителей, библиотеку вольтамперных характеристик электронных ламп, справочные данные по лампам в формате «dјvi», библиотеку моделей электронных ламп для расчетов с использованием программных пакетов PSpise, Micro-Cap, ORCAD.

<http://www.radiohobby.qrz.ru/> — сайт журнала «Радиохобби» (Киев) — без сомнения самого «аудиотехнического» русскоязычного журнала для радиолюбителей.

<http://tubeamplifier.narod.ru/> — сайт называется «Ее величество лампа: физика и схемотехника». Содержит много интересных статей как по физике, так и по истории ламповых усилителей, параметры ламп, описания ламповых конструкций для аудиотехники.

<http://zzxm.narod.ru/> — содержит несколько десятков старинных книг или отдельных глав по ламповой электронике 1940-х — 1960-х годов.

<http://musicangel.ru/data.htm> — более сотни интересных статей по высококачественной, главным образом ламповой, аудиотехнике, сгруппированных в следующие разделы: ламповый звук, схемотехника ламповых усилителей, акустика, полезные советы разработчиков Hi-End аппаратуры, теория схемотехники и звуковой техники.

<http://www.vegalab.ru/> — сайт содержит описание нескольких десятков конструкций усилителей, акустических систем, регуляторов громкости и других компонентов для высококачественного звуково-произведения. В контексте настоящей книги особенное внимание рекомендуем обратить на следующие страницы:

- ♦ <http://www.vegalab.ru/content/view/25/52/> — мощный лампово-транзисторный усилитель с двухтактным выходным каскадом на полевых транзисторах;
- ♦ <http://www.vegalab.ru/content/view/24/52/> — гибридный усилитель с выходным каскадом класса А в виде истокового повторителя;
- ♦ <http://www.vegalab.ru/content/view/17/52/> — двухтактные транзисторные усилители без общей отрицательной обратной связи;
- ♦ <http://www.vegalab.ru/content/view/106/52/> — параллельный усилитель Агеева.

<http://datagor.ru/amplifiers/hybrides/> — подборка описаний гибридных усилителей для наушников, справочная литература по лампам и транзисторам.

<http://www.elitan.ru/price/> — продажа электронных компонентов, включая радиолампы, через Интернет.

<http://www.bluesmobil.ru/shikhman/> — сайт Михаила Шихатова. Великолепная подборка по теории высококачественного звуковоспроизведения, большое количество схем, доступное описание принципов. Уклон делается на автомобильную акустику, но много интересного найдет на этом сайте каждый радиолюбитель-аудиофил.

<http://cxem.net/> — сайт содержит множество различных схем, включая схемы старинных ламповых приборов: генераторов, усилителей и др.

<http://www.tchernovaudio.com/> — этот сайт содержит описания промышленных и самодельных конструкций для высококачественного звуковоспроизведения, среди которых, например, винил-корректор В. Ульянова (<http://www.tchernovaudio.com/?s=audioportal&sub=faq&view=0000000221>).

9.2. Англоязычные сайты

<http://www.tubecad.com/> — сайт интернет-журнала Джона Броски «The Tube Cad Journal». Сайт содержит множество аналитических статей с обзорами и описанием принципа работы различных ламповых схем. Отдельный выпуск журнала http://www.tubecad.com/april_may2001/ посвящен гибридным, т. е. лампово-транзисторным схемам.

<http://www.audiodesignguide.com/> — сайт Андреа Чиффоли. Этот итальянский аудиоконструктор-любитель является автором целой серии замечательных ламповых, транзисторных и гибридных усилителей, получивших высокую оценку самодельщиков-аудиофилов по всему миру. Особое внимание рекомендуем обратить на описание истокового повторителя (<http://www.audiodesignguide.com/PowerFollower/index.html>) и мощного гибридного усилителя с параллельным усилителем тока на выходе (<http://www.audiodesignguide.com/Ibridone/index2.html>).

www.passlabs.com — сайт фирмы Pass Laboratories, основанной Нельсоном Пассом — идеологом высококачественного звуковоспроизведения с использованием предельно короткого усилительного тракта без общей обратной связи. Содержит несколько интересных статей об усилителях класса А без обратной связи, о влиянии общей отрицательной обратной связи на спектр искажения усилителя, и принципах построения усилителей с минимальным количеством элементов.

<http://sound.westhost.com/index.html> — сайт Рода Эллиота. Содержит более сотни статей по теории высококачественного звуковоспроизведения и столько же подробных описаний конкретных транзисторных и ламповых конструкций, включая предварительные

усилители, усилители мощности, винил-корректоры и акустические системы.

<http://sound.westhost.com/project83.htm> — истоковый повторитель Павла Мацуры с комментариями Рода Эллиота.

<http://web.telecom.cz/macura/audiopage.html> — сайт чешского радиоконструктора Павла Мацуры. Содержит несколько интересных конструкций с очень коротким спектром гармоник и низким общим коэффициентом нелинейных искажений.

<http://tdsl.duncanamps.com/schematics.php> — великолепная библиотека схем промышленных ламповых усилителей, напр., Conrad Jonson, Marantz, Harman Kardon, Marshall, Quad, Vox, Yamaha.

<http://www.svetlana.com> — сайт содержит технические характеристики ламп, применяемых в высококачественных аудиоусилителях, включая как старые советские (российские) лампы, так и современные версии классических зарубежных ламп, возрожденных и клонированных в России в период лампового ренессанса в аудиотехнике.

<http://diyaudioprojects.com/> — сайт англоязычных радиолюбителей-аудиофилов. Содержит много интересных ламповых конструкций, а также форумов с их обсуждением. Обращаем внимание на страницы <http://diyaudioprojects.com/Solid/Tube-Mosfet-Hybrid-Headphone-Amp/>, посвященную гибриднему лампово-транзисторному усилителю для головных телефонов.

www.audionote.co.uk/ — сайт фирмы «Audio Note» — одного из флагманов ламповой Hi-End индустрии. Содержит подробные описания многих разработок этой фирмы.

<http://www.glass-ware.com/tubecad/> — сайт содержит описание программ для расчета ламповых усилителей.

9.3. Покупка радиодеталей

<http://ru.farnell.com/> — сайт российского филиала крупнейшего розничного поставщика радиодеталей «Farnell». Гарантируется четкая и быстрая доставка и сертифицированное качество компонентов. Автор пользовался и подтверждает это на собственном опыте.

<http://www.chipdip.ru>, <http://www.platan.ru> — сайты российских поставщиков электронных компонентов. Здесь можно приобретать рекомендованные в настоящей книге транзисторы, радиаторы для

транзисторов, паяльную станцию, некоторые силовые трансформаторы, микросхемы-стабилизаторы напряжения.

<http://www.audioinstrument.narod.ru/> — сайт российской фирмы «Аудиоинструмент». Продажа российских и зарубежных ламп по очень разумным ценам, а также силовых, согласующих и выходных трансформаторов для ламповых усилителей. Автор подтверждает высокое качество всех компонентов.

<http://istok2.com/> — продажа российских и старых советских электронных ламп. Сайт содержит обширный справочный материал по лампам. Отмечаем, однако, определенную степень риска получить некондиционный товар. Не торопитесь делать крупные заказы!

<http://samodelka.ru/> — российский сайт по продаже элитных аудиокomпонентов с дилерами во многих городах России, Украины, Беларуси. Берегите деньги! Не торопитесь выкладывать заоблачные суммы за конденсаторы с серебряной фольгой и т. п. эксклюзив. Рекомендуем пленочные конденсаторы «MultiCap» и электролитические «Mundorf». Эти затраты себя оправдают.

<http://audiomania.ru/> — российский сайт по продаже элитных радиодеталей. Автор столкнулся, однако, с проблемой очень долгого ожидания своего заказа.

9.4. Статьи по теории звукоусиления

Р. Эллиотт (Rod Elliott). Усилители класса А — краткое объяснение (на англ. языке).

Статья содержит описание принципа работы и преимуществ усилителей класса А по сравнению с другими типами усилителей. Доступна на сайте <http://sound.westhost.com/class-a.htm>.

Дж. Л. Худ (John Linsley Hood). Простой усилитель класса А. 10-ваттная конструкция, обеспечивающая субъективно лучшие результаты, чем транзисторные усилители класса В (на англ. языке).

Знаменитая статья, опубликованная в 1969 г. в журнале *Wireless World* (апрель, с. 148). В статье предлагается конструкция усилителя на 5 транзисторах с целью получения субъективного звучания, не уступающего ламповому усилителю по схеме Вильямсона. Доступна на сайте http://sound.westhost.com/jll_hood.htm.

Р. Эллиотт (Rod Elliott). Искажение и обратная связь (на англ. языке).

Статья содержит анализ заметности гармонических искажений и влияния на них местной и общей отрицательной обратной связи. Сопоставляются схемы на транзисторах, триодах и пентодах. Доступна на сайте <http://sound.westhost.com/articles/distortion+fb.htm>.

Дж. Аткинсон (John Atkinson). Отрицательная обратная связь не всегда уменьшает искажения усилителя (на англ. языке).

Статья опубликована в журнале «Stereophile» в январе 1998. Сообщается, что введение отрицательной обратной связи понижает уровень низших гармоник с одновременным повышением уровня высших гармоник. При глубине обратной связи в усилителе 40 дБ уровень пятой гармоники оказался выше, чем без обратной связи. Сообщается об экспериментах, в которых установлено, что большинство слушателей не замечают присутствия второй гармоники на уровне 1%, однако замечают наличие седьмой гармоники при уровне 0,1%. Доступна на сайте <http://www.stereophile.com/news/10065/>.

Н. Пасс (Nelson Pass). Звук, искажения и обратная связь (на англ. языке).

Статья руководителя фирмы Pass Labs — известного идеолога аудиоусилителей с предельно коротким сигнальным трактом — анализирует влияние общей отрицательной обратной связи на спектр гармонических искажений. Доступна на сайте <http://www.passlabs.com/articles.htm>.

Н. Пасс (Nelson Pass). Однотактный класс А (на англ. языке).

Статья руководителя фирмы Pass Labs — известного идеолога аудиоусилителей с предельно коротким сигнальным трактом — анализирует свойства усилителей класса А, построенных на полевых транзисторах. Доступна на сайте <http://www.passlabs.com/pdfs/articles/seclassa.pdf>.

М. Отала (M. Otala). Переходные искажения в транзисторных аудиоусилителях мощности (на англ. языке).

Знаменитая статья Матти Отала, опубликованная в журнале IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics (т. AU-18, №3, 1970 г.), ставшая знаковой в исследованиях причин т. н. «транзисторного» звучания. В статье показывается, что искажения в высококачественных

транзисторных усилителях связаны с присутствием многоступенчатой обратной связи в условиях, когда полоса пропускания усилителя мощности до подключения обратной связи уже, чем полоса пропускания предварительного усилителя. Отмечается, что устранение искажений возможно, если полоса пропускания усилителя мощности до охвата его петлей обратной связи будет не уже 20 кГц. В этом случае после замыкания петли обратной связи полоса пропускания усилителя мощности, расширяющаяся пропорционально глубине обратной связи, составит, например, 630 кГц при глубине обратной связи 30 дБ (т. е. около 31 раза) и 2 МГц при глубине обратной связи 40 дБ (т. е. 100 раз). Доступна на сайте <http://www.shabad.ru/IEEE/otala.pdf>.

Е. Лейнонен, М. Отала, Дж. Кёрл (E. Leinonen, M. Ojala, J. Curl) Метод измерения переходных интермодуляционных искажений (на англ. языке).

Статья была опубликована в журнале *Journal of the Audio Engineering Society* (т. 25, № 4, апрель 1977 г.). Отмечается, что многие усилители с низкими коэффициентами гармонических и интермодуляционных искажений имеют неприемлемое качество звучания. Предлагается метод анализа переходных интермодуляционных искажений с помощью тестового сигнала, состоящего из нескольких гармонических сигналов с кратными частотами. Отмечается, что результаты предложенного теста коррелируют со значениям скорости нарастания выходного напряжения усилителя. Подчеркивается, что для качественного звучания скорость нарастания выходного напряжения должна быть не ниже 100 В/мкс. Доступна на сайте <http://jockohomo.net/data/7470.pdf>.

Л. Ольсон (Lynn Olson). Звучание машины. Гармоники, спрятанные внутри коэффициента общих гармонических искажений (на англ. языке).

В статье анализируется спектр гармонических искажений каскадов на вакуумных триодах: простого каскада с общим катодом и каскада с динамической нагрузкой. Статья опубликована в 1997 г. в журнале *Glass Audio*. Доступна на сайте <http://www.nutshellhifi.com/library/FindingCG.html>.

А. Агеев. «Параллельный» усилитель в УМЗЧ.

Статья опубликована в журнале «Радио» (1985 г., №8). Содержит описание принципа работы и практической конструкции транзи-

сторного усилителя мощности с общей отрицательной обратной связью, выходной каскад которого представляет собой параллельный усилитель тока. Доступна на сайте <http://www.vegalab.ru/content/view/106/52/>.

Д. Х. Чивер (Daniel H. Cheever). Новая методология тестирования усилителей мощности звуковой частоты.

Перевод магистерской диссертации (2001 г.), сделанный Александром Гурским. В диссертации сформулирован и обоснован критерий высокой верности звуковоспроизведения, согласно которому, уровень гармоник, убывающий с номером гармоники, должен быть для каждой гармоники ниже, чем ауральный спектр гармоник — спектр гармонических искажений, генерируемых человеческим ухом. Доступен на сайте <http://www.next-tube.com/ru>.

П. Квортруп (Peter Qvortrup). Отрицательные эффекты обратной связи (на англ. языке).

В статье подчеркивается, что обратная связь в усилителях приводят к переходным искажениям, ограничению скорости нарастания выходного напряжения, искажению формы импульсного сигнала. Доступна на сайте http://www.audionote.co.uk/articles/art_negative_feedback.shtml.

Сергей Лачинян. Гибридный лампово-транзисторный усилитель с компенсацией тепловых искажений в оконечном каскаде.

Изложение статьи, опубликованной в журнале «Радио» (№4, 2001 г., с. 13) с обоснованием подхода к конструированию высококачественных усилителей мощности звуковой частоты, состоящем в применении лампового усилителя напряжения на входе и транзисторного параллельного усилителя тока на выходе. Доступна на сайте <http://meltech.narod.ru/shems/amp/lachinyan.html>.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЧХ	....	амплитудно-частотная характеристика
ВАХ	....	вольтамперная характеристика
ВЧ	.....	высокочастотный
КНИ	....	коэффициент нелинейных искажений
НЧ	.....	низкочастотный
ОС	.....	обратная связь
ООС	....	отрицательная обратная связь
ОООС	..	общая отрицательная обратная связь
ОУ	.....	операционный усилитель
СЧ	.....	среднечастотный
ФЧХ	....	фазочастотная характеристика
ШИМ	...	широтно-импульсная модуляция

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

C	.....	емкость электрическая (фарада, Ф)
E	.....	энергия (джоуль, Дж)
f	.....	частота (герц, Гц = с^{-1})
G	.....	коэффициент усиления по напряжению
$h_{21э}$	.....	статический коэффициент усиления по току
I	.....	сила тока (ампер, А)
I_A	.....	анодный ток (ампер, А)
K	.....	коэффициент передачи по напряжению
L	.....	индуктивность (генри, Гн)
P	.....	давление (паскаль, Па = $\text{н}/\text{м}^2$)
q	.....	заряд электрона ($= 1,6 \times 10^{-19}$ Кл)
R	.....	сопротивление (Ом)
R_A	.....	сопротивление анодного резистора
R_K	.....	сопротивление катодного резистора
S	.....	крутизна триода (мА/В)
T	.....	период колебаний (секунда, с)
U	.....	напряжение (вольт, В)
$U_{\text{Анод}}$	...	напряжение на аноде относительно общего провода

U_A	анодное напряжение (напряжение на аноде относительно катода)
U_0	абсолютное значение напряжения источника питания
U_C	абсолютное значение напряжения на сетке относительно катода
$U_{зи}$	напряжение «затвор-исток»
$U_{си}$	напряжение «сток-исток»,
v	скорость (м/с)
W	мощность (ватт, Вт = В·А)
Z	комплексное сопротивление (Ом)
λ	длина волны (метр, м)
μ	коэффициент усиления триода

ФОРМУЛЫ, СВЯЗЫВАЮЩИЕ ОСНОВНЫЕ ЭЛЕКТРО- И РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Закон Ома: напряжение (В) на резисторе сопротивлением R (Ом), через который протекает ток силой I (А)

$$U = IR.$$

Мощность (Вт), выделяемая на резисторе R (Ом), через который протекает ток силой I (А)

$$W = IU \equiv I^2 R \equiv \frac{U^2}{R}.$$

Сопротивление (Ом) конденсатора емкостью C (Ф) на частоте f (Гц)

$$R_C = \frac{1}{6,28 f C}.$$

Сопротивление катушки индуктивностью L (Гн) на частоте f (Гц)

$$R_L = 6,28 f L.$$

Энергия, запасенная конденсатором емкостью C (Ф) при разности потенциалов на его обкладках U (В)

$$E = \frac{CU^2}{2}.$$

Заряд (Кл) в конденсаторе емкостью C (Ф), на обкладках которого разность потенциалов равна U (В)

$$Q = CU.$$

Период (с) колебаний частотой f (Гц)

$$T = 1/f.$$

Длина звуковой волны (м) в воздухе ($v = 330$ м/с — скорость волны, T — период колебаний (с), f — частота колебаний (Гц))

$$\lambda = vT \equiv v/f.$$

Емкость плоского конденсатора с площадью пластин s (м²), промежутком между ними d (м), заполненным средой с диэлектрической проницаемостью ϵ , $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м

$$C = \frac{s}{\epsilon \epsilon_0 d}.$$

Коэффициент усиления триода с крутизной S (мА/В) и внутренним сопротивлением R_i (кОм)

$$\mu = R_i S.$$

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Термины и понятия

А

аккорд, 14
анод, 96
ауральный спектр гармоник, 31

Б

бинауральный эффект, 15

В

винил-корректор, 280
внутреннее сопротивление, 100
выпрямитель, 193
двухполупериодный, 220
мостовой, 220

Г

гармонические искажения, 28
спектр, 50
генератор тока
в истоковом повторителе, 182
в катодном повторителе, 146
в схеме с общим катодом, 153
герц, 10
громкоговоритель, 40
режимы работы, 89
громкость, 11

Д

давление звуковое, 11
демпинг-фактор, 43
децибел, 11
динамический диапазон, 12
диод, 67, 161
вакуумный, 97

полупроводниковый, 160
параметры, 214
Шоттки, 86, 212, 214

диэлектрик, 155, 157
длина волны, 12
Допплера эффект, 90

З

звук, 10
инфразвук, 10
ультразвук, 10

И

интегральные стабилизаторы, 239
параметры, 325
интенсивность, 11
истоковый повторитель, 179
мощный, 182, 262
с генератором тока, 182
Чиффоли, 184

К

каскад с динамической нагрузкой, 57, 60, 133
каскад с общей сеткой, 144
каскад с общим катодом, 102
с генератором тока, 153
каскадный усилитель, 142, 283
катод, 96
катодный повторитель, 122
Броски, 149
с источником тока, 146
Уайта, 147
кенотрон, 86, 97
классы усилителей, 22
конденсатор, 193, 194
коэффициент гармонических искажений, 28

коэффициент интермодуляционных искажений, 33

коэффициент нелинейных искажений, 28

зависимость от глубины обратной связи, 78

зависимость от мощности, 68
для каскада с динамической нагрузкой, 141

коэффициент усиления триода, 101

крутизна триода, 100

крутизна полевого транзистора, 178

Л

литцентр, 206

М

металл, 155

мостовой усилитель, 25, 38, 65, 67
гибридный, 255

мощность

максимальная, 27
музыкальная, 27
номинальная, 27

музыка, 13

музыкальный звукоряд, 14

Н

нагрузочная прямая, 116

напряжение смещения, 97

ноты, 14

нувистор, 104, 273, 292

О

обертон, 13, 76

октава, 14

отрицательная обратная связь, 43

общая 44, 46, 54, 72, 78,
местная, 58, 59, 105, 123

П

параллельный усилитель тока, 170

Агеева, 173, 216

Лачиняна, 172

Ульянова, 174

Чуффоли, 173

период колебаний, 10

полупроводник, 158

припой, 197, 207

провода, 197, 204

Р

резисторы, 196

С

сбавуфер, 15

сетка, 97

скорость звука, 12

смещение, 97, 100

автоматическое, 105

фиксированное, 105

фиксированное, батарейное, 114

стереофония, 15

субъективные критерии качества, 19

схема Вильямсона, 44

схема с общей базой, 168

схема с общим истоком, 178

схема с общим эмиттером, 163

Т

такт, 13

тембр, 13

тон, 13

тонкомпенсация, 12

транзистор, 162, 198

биполярный, 162

полевой, 176

параметры, 219, 228, 323

трансформатор силовой, 192, 199, 211

триод вакуумный, 96

вольтамперные

характеристики, 99

параметры, 104

система обозначений, 98

схема с общим катодом, 102

цоколевка, 103

трифоническая система, 15

У

усилитель «Айкидо», 151, 252

усилитель Вильямсона, 44

усилитель

Лофтина-Уайта, 58, 62, 132

уха, 11

Ф

фазочастотная

характеристика, 76, 77, 79, 81

Ц

цоколевка триодов, 103

Ч

частота, 10

чувствительность

динамической головки, 17

уха человека, 12

Э

экранирование, 200

эмиттерный повторитель, 169

Электронные компоненты*Лампы***6Г2**

в винил-корректоре, 290

параметры, 104, 308

цоколевка, 103

6Н1П

в каскаде с динамической нагрузкой, 142

в катодном повторителе, 151

параметры, 104

цоколевка, 103

6НЗП, 272, 273

цоколевка, 103

6Н8С (6С2С, 6SN7), 55, 62, 63, 113

в винил-корректоре, 290, 291

в каскаде с динамической нагрузкой, 142, 269

в катодном повторителе, 126

в комбинированном каскаде, 129

в усилителе напряжения 247, 269

в схеме с общим катодом, 113

параметры, 104, 311

цоколевка, 103

6Н9С (6SL7)

в винил-корректоре, 291

в каскаде с динамической нагрузкой, 142

в катодном повторителе, 126

в схеме с общим катодом, 113

параметры 104, 312

цоколевка, 103

6Н16Б (6Н18Б),

в винил-корректоре, 296

в усилителе

напряжения, 273, 274, 275

параметры 104, 314

6Н18Б, см. 6Н16Б**6С2С, см. 6Н8С****6Н23П(ЕСС88, Е88СС, 6DJ8)**

в каскаде с динамической нагрузкой, 141, 142

в каскаде с общим катодом, 112

в катодном

повторителе, 126, 146, 151

параметры, 104, 314

цоколевка, 103

6Н28Б

в усилителе напряжения, 275, 276

в винил-корректоре, 295, 296

параметры, 104, 316

6Н30П

в каскаде с динамической нагрузкой, 142, 243

в катодном повторителе, 151

в усилителе напряжения, 241, 243

параметры, 104, 317

цоколевка, 103, 317

6Н5С, 109

6Н6П

в винил-корректоре, 286, 287, 288
в катодном повторителе, 151
в каскаде с динамической
нагрузкой, 141, 142
в схеме «Айкидо», 253
в усилителе напряжения, 242, 243
параметры, 104, 310
цоколевка, 103, 310

6С1П, 103, 104**6С2П, 103, 104****6С2Б, 104****6С3П**

в усилителе напряже-
ния, 61, 271, 272
параметры, 104, 300
цоколевка, 103, 300

6С4П

в винил-корректоре, 278
в усилителе напряжения, 271, 272
параметры, 104, 301
цоколевка, 103, 301

6С6Б

в винил-корректоре, 291
в усилителе напряжения, 277
параметры, 104, 303
цоколевка, 103, 303

6С7Б

в винил-корректоре, 291
параметры, 104, 304
цоколевка, 103, 304

6С15П, см. 6С45П**6С45П (6С15П, WE417)**

в мостовом усилителе, 261
в схеме с общим катодом, 114
в усилителе напряжения, 231, 257
параметры, 104, 305
цоколевка, 103

6С51Н

в винил-корректоре, 291
в усилителе напряжения, 277
параметры, 104, 303
цоколевка, 103, 303

6С52Н

в винил-корректоре, 291
в усилителе напряжения, 277
параметры, 104, 303
цоколевка, 103, 303

6С53Н, 104**6Ф12П, 63, 284****6Х2П, 298, 322****6Ц4П, 232, 321****6Ц5С, 232, 320****6Э5П (6Э6П),**

параметры, 309
тетродное включение, 143
в усилителе напряже-
ния, 236, 237, 249

12АХ7(ЕСС83, Е83СС)

в винил-корректоре, 286
в каскаде «Айкидо», 253
в каскаде с динамической
нагрузкой, 142
в катодном повторителе, 126, 117, 151
в комбинированном каскаде, 131
в схеме с общим катодом, 112, 114
параметры, 318
цоколевка, 103

2А3, 60**6DJ8, см. 6Н23П****6SL7, см. 6Н9С****6SN7, см. 6Н8С****300В, 51, 52, 55, 61, 74****5692, 142, 269****6072(12АУ7), 128**

в каскаде с динамической
нагрузкой, 140, 142
в винил-корректоре, 282, 283
в комбинированном каскаде, 129
в катодном повторителе, 151
каскадное включение, 143
параметры, 319

6550 (КТ88), 50, 62, 63**6922, 60****ЕСС32, 110****ЕСС83 (Е83СС) — см. 12АХ7**

ECC88 (E88CC) — см. 6Н23П
 ECC85, 104
 КТ88, см. 6550
 WE417, см. 6С45П

Транзисторы

КТ815, 183, 324
 КТ817, 324
 КТ851, 324
 КТ8101, 183, 219, 323
 КТ8102, 219, 323
 КТ818, 219, 323
 КТ819, 219, 323
 BD135, 324
 BD139, 324
 2SA1302, 219, 323
 2SC3281, 219, 323
 2SA1908, 323
 2SC5100, 323
 2SA1942, 323
 2SC5199, 323
 2SA1943, 166, 167, 217, 219, 323
 2SC5200, 166, 167, 217, 219, 323
 IRF240, 325
 IRF250, 325
 IRFP150, 325
 IRFP250, 325

MJE15033, 228, 323
 MJE15032, 228, 323

Микросхемы

AD744, 258
 AD797, 80, 82, 171, 258
 AD825, 80, 81, 82, 258
 LH0002, 170
 LM31 , 325
 LM317, 325
 LM3886, 65, 66, 68, 82
 LM7171, 80
 LM7806, 239, 325
 NE5532, 83, 258
 OPA445, 81
 OPA551, OPA552, 82
 OPA604, 79, 81, 258
 OPA627, 258
 TL072, 83

Трансформаторы

ТА, 26...40 Вт, 327
 ТАН, 36...60 Вт, 328
 ТН, 13...30 Вт, 326
 ТН, 58...190 Вт, 330
 ТПП, 130...160 Вт, 332

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Artzt M. Balanced direct and alternating current amplifiers. — USA Patent No 2,310,342. — 1943.
2. Bardeen J., Brattain W. The transistor, a semiconductor triode // Phys. Rev. — 1948. — V. 47. — P. 230.
3. Cheever D.H. A new methodology for audio frequency power amplifier testing based on psychoacoustic data that better correlates with sound quality. — Univ. New Hampshire Thesis. — 2001. *Рус. пер. А. Гурского доступен на сайте* <http://www.next-tube.com/ru>
4. Duncan B. High Performance Audio Power Amplifiers for Music Performance and Reproduction. — Oxford: Newnes. — 1996.
5. Loftin E.H., White S.Y. Cascaded direct-coupled tube systems operated from alternating current // Proc. Inst. Radio Eng. — 1930. — V. 18, №4. — P. 669.
6. Olson H. F. Music, Physics, and Engineering. — NY.: Dover Publ. — 1967.
7. Self D. Audio Power Amplifier Design Handbook. — Amsterdam: Elsevier. — 2009.
8. Williamson D.T.N. Design for a high-quality amplifier // Wireless World. — April-May 1947.
9. White E.L.C. Improvements in or relating to thermoionic valve amplifier circuit. — British Patent GB564,250. — 1944.
10. Авраменко Ю. Качественный звук — сегодня это просто. — К.: МК-Пресс. — 2007.
11. Агеев А. Усилительный блок любительского радиоконкомплекса // Радио. — 1982. — №8. — С. 31.
12. Агеев А. Параллельный усилитель в УМЗЧ // Радио. — 1985. — №8. — С. 35.
13. Андреев Д.А., Торопкин М.В. Аудиосистема класса Hi-Fi своими руками. СПб.: Наука и Техника. — 2006.
14. Атаев Д. И., Болотников В. А. Практические схемы высококачественного звукопроизводства. — М.: Радио и связь. — 1986.
15. Бокарев В. Усилитель-корректор // Вестник А.Р.А. — 1998. — №5. — С. 31.
16. Бондаренко И. Лампо-поле-биполярно-микросхемный безтрансформаторный УМЗЧ без ООС // Радиолюбби. — 2000. — №5. — С. 66.
17. Брускин В. Мой «бюджетный» Лифтин-Уайт // Радиолюбби. — 2000. — №3. — С. 53.
18. Голубев Ю. Л., Жукова Т. В. Электровакуумные приборы. М.: Энергия. — 1969.
19. Гурский А. К 70-летию изобретения каскада SRPP // Радиолюбби. — 2010. — №6. — С. 2.
20. Гурский А. Винил-корректор на нувисторах // Радиолюбби. — 2006. — №4. — С. 52.
21. Дайджест зарубежной периодики // Радиолюбби. — №4. — 2000.
22. Кацнельсон Б.В., Ларионов А.С. Отечественные приемно-усилительные лампы и их зарубежные аналоги (справочник). — М.: Энергоиздат. — 1961.
23. Лачинян С. Комбинированный УМЗЧ без общей ООС // Радио. — 2001. — №4. — С. 13.
24. Ложников А.П., Сонин Е.К. Каскодные усилители. — М.: Энергия. — 1964 г.
25. Москатов Е. А. Справочник по полупроводниковым приборам. М.: Журнал «Радио». — 2005.

26. Немчинов В.М. Усилители с полевыми транзисторами. — М.: Советское радио. — 1980.
27. Петров А.А. Звуковая схемотехника для радиолюбителей. — СПб.: Наука и Техника. — 2003.
28. Радиолюбительский High-End. 40 лучших конструкций ламповых УМЗЧ за 40 лет. — К.: Радиоаматар. — 1999.
29. Ридико Л. УМЗЧ ВВ на современной элементной базе с микроконтроллерной системой управления // Радиохобби. — 2001. — №5. — С. 52.
30. Солнцев Ю. Высококачественный усилитель мощности // Радио. — 1984. — №5. — С. 29.
31. Сухов Н.Е. УМЗЧ высокой верности // Радио. — 1989. — №6. — С. 55.
32. Торопкин М.В. Ламповый Hi-Fi усилитель своими руками. — СПб.: Наука и Техника. — 2008.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ РЕСУРСОВ ИНТЕРНЕТ

<http://cxem.net/sound/amps/amp50.php>
<http://istok2.com/data>
<http://metaleater.narod.ru>
<http://musicangel.ru>
<http://oldradio.qrz.ru>
<http://tdsl.duncanamps.com/schematics.php>
<http://tubeamplifier.narod.ru>
<http://www.audionote.co.uk>
<http://www.geocities.com/ResearchTriangle/8231/>
<http://www.glass-ware.com>
<http://www.next-tube.com/ru>
<http://www.passlabs.com>
<http://www.pha.inetnet.cz/macura/audiopage.html>
<http://www.radiohobby.qrz.ru>
<http://www.salonav.com>
<http://www.stereo.ru>
<http://www.svetlana.com>
<http://www.tchernovaudio.com/?s=audiportal&sub=faq&view=0000000221>
<http://www.tubecad.com>



Книжный магазин

издательства «Наука и Техника»
приглашает за покупками

... ➤ **Предлагаем широкий ассортимент технической литературы ведущих издательств (более 2000 наименований):**

- Компьютерная литература
- Радиоэлектроника
- Телекоммуникации и связь
- Транспорт, строительство
- Научно-популярная медицина, педагогика, психология

... ➤ **Чем привлекателен наш магазин:**

- низкие цены;
- ежедневное пополнение ассортимента;
- поиск книг под заказ;
- обслуживание за наличный и безналичный расчет;
- гибкая система скидок;
- комплектование библиотек;
- обеспечение школ учебниками по информатике;
- возможна доставка.

Наш адрес: г. Санкт-Петербург
пр. Обуховской Обороны д. 107
ст. метро Елизаровская

Справки о наличии книг по тел. 412-70-25

E-mail: admin@nit.com.ru
(рассылка ассортиментного прайс-листа по запросу)

**Мы работаем с 10 до 19 часов без обеда и выходных
(в субботу и воскресенье до 18 час)**

Уважаемые господа!

Книги издательства «Наука и Техника»

Вы можете заказать наложенным платежом
в нашем интернет-магазине

www.nit.com.ru,

а также приобрести

➤ в крупнейших магазинах г. Москвы:

Т Д «БИБЛИО-ГЛОБУС»	ул. Мясницкая, д. 6/3, стр. 1, ст. М «Лубянка»	тел. (495) 781-19-00, 624-46-80
Московский Дом Книги,	ул.Новый Арбат, 8, ст. М «Арбатская», «ДК на Новом Арбате»	тел. (495) 789-35-91
Московский Дом Книги,	Ленинский пр., д.40, ст. М «Ленинский пр.», «Дом технической книги»	тел. (499) 137-60-19
Московский Дом Книги,	Комсомольский пр., д. 25, ст. М «Фрунзенская», «Дом медицинской книги»	тел. (499) 245-39-27
Дом книги «Молодая гвардия»	ул. Б. Полянка, д. 28, стр. 1, ст. М «Полянка»	тел. (499) 238-50-01
Сеть магазинов «Новый книжный»	тел. (495) 937-85-81, (499) 177-22-11	

➤ в крупнейших магазинах г. Санкт-Петербурга:

Санкт-Петербургский Дом Книги	Невский пр. 28 тел. (812) 448-23-57
«Энергия»	Московский пр. 57 тел. (812) 373-01-47
«Аристотель»	ул. А. Дундича 36, корп. 1 тел. (812) 778-00-95
Сеть магазинов «Книжный Дом»	тел. (812) 559-98-28

➤ в регионах России:

г. Воронеж, пл. Ленина д. 4	«Амитель»	(4732) 24-24-90
г. Екатеринбург, ул. Антона Валека д. 12	«Дом книги»	(343) 253-50-10
г. Екатеринбург	Сеть магазинов «100 000 книг на Декабристов»	(343) 353-09-40
г. Нижний Новгород, ул. Советская д. 14	«Дом книги»	(831) 277-52-07
г. Смоленск, ул. Октябрьской революции д. 13	«Кругозор»	(4812) 65-86-65
г. Челябинск, ул. Монакова, д. 31	«Техническая книга»	(904) 972 50 04
г. Хабаровск	Сеть книжно-канцелярских магазинов фирмы «Мирс»	(4212) 26-87-30

➤ и на Украине (оптом и в розницу) через представительство издательства

г. Киев, ул. Курчатова 9/21, «Наука и Техника», ст. М «Лесная»

(044) 516-38-66

e-mail: nits@voliacable.com, nitkiev@gmail.com

ЛР

Мы рады сотрудничеству с Вами!

Издательство «Наука и Техника»
(г. Санкт-Петербург)
и самый схемотехнический журнал СНГ «РАДИОхобби»
представляют серию книг Николая Сухова

«РАДИОХОББИ: лучшие конструкции...»

?

Хотите сделать сами ламповый Hi-End? Сабвуфер?
Радиостанцию? Периферию для своего ПК?
Программатор мобильного? Бесперебойник?

?

Хотите быть в курсе последних достижений
мировой электронной техники и технологии?

?

Хотите иметь под рукой схемный дайджест лучших
конструкций из трех десятков журналов США, Японии,
Германии, Чехии, Франции?

?

Хотите уметь эффективно работать в эфире, в сети
INTERNET и любительской FidoNET?



**УЖЕ В
ПРОДАЖЕ**

Тогда эта **серия книг**
и популярный **журнал** для Вас!



Подробности
на сайте издательства «Наука и Техника»
www.nit.com.ru
и официальном сайте журнала Радиохобби
<http://radiohobby.grz.ru>

Россия: Санкт-Петербург, пр. Обуховской обороны, д.107
Для писем: 192029 Санкт-Петербург, а/я 44
+7 (812) 412-70-25, 412-70-26, e-mail: admin@nit.com.ru

Украина: 02166, Киев - 166, ул. Курчатова, д. 9/21
+38 (044) 516-38-66, e-mail: nits@voliacable.com

ISBN 978-5-94387-858-9

