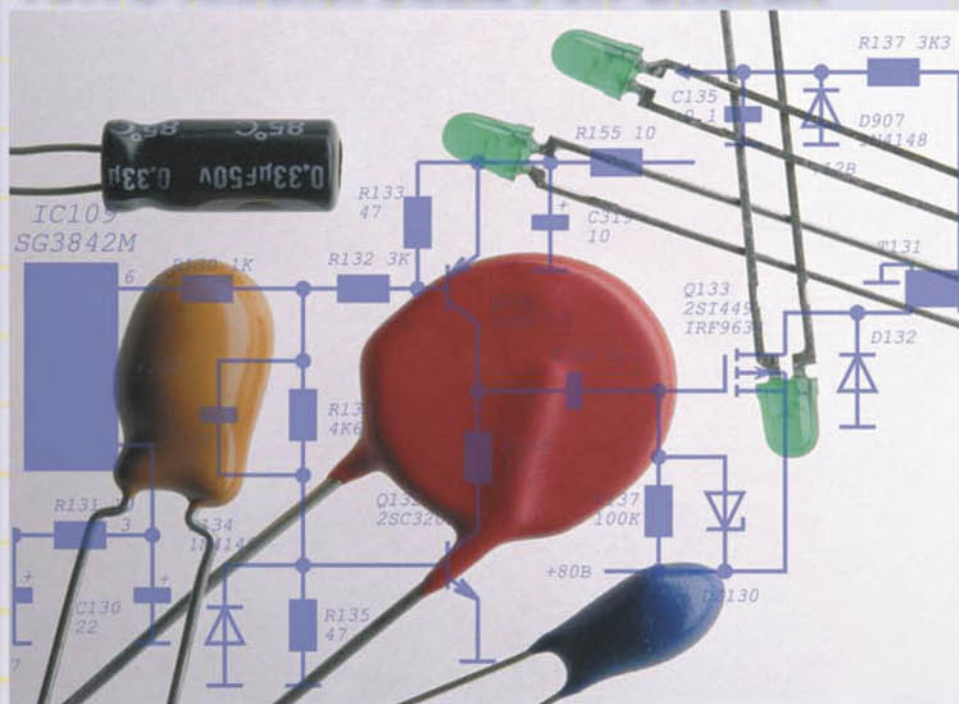


А. С. Колдунов

РАДИОЛЮБИТЕЛЬСКАЯ АЗБУКА

ТОМ 2 АНАЛОГОВЫЕ УСТРОЙСТВА



Постигаем азы — от простого к сложному

**Как устроены ламповые
и транзисторные усилители**

**Примеры согласования цифровых
и аналоговых схем**

**Подробный справочник по элементной базе
Рабочее место радиолюбителя**

ББК 621.38
УДК 32.852
К60

К 60 **А. С. Колдунов**

Радиоловительская азбука. Том 2. Аналоговые устройства. — М.: СОЛОН-Пресс, 2009. 288 с. — (Серия «СОЛОН — РАДИОЛЮБИТЕЛЯМ» выпуск 24)

ISBN 5-98003-134-0

Второй том «Радиоловительской азбуки» — это продолжение популярного бестселлера, принадлежащего перу А. С. Колдунова.

В первой части книги даны сведения об усилителях на электронных лампах и транзисторах. По многочисленным просьбам читателей в книгу включены материалы по согласованию цифровых и аналоговых схем.

Помимо теоретических выкладок, «Радиоловительская азбука» содержит обширный справочный раздел, в котором можно найти полезные советы по обустройству рабочего места, примеры расчета элементов конструкций, практические советы по изготовлению самодельных радиодеталей и многое другое. Книга написана живым языком и иллюстрирована наглядными примерами.

Книга адресована широкому кругу начинающих и опытных радиоловителей.

По вопросам приобретения обращаться:

ООО «Альянс-книга»

Тел.: (095) 258-91-94, 258-91-95, www.abook.ru

Фирменный магазин издательства «СОЛОН-Пресс»

г. Москва, ул. Бахрушина, д. 28 (м. Павелецкая кольцевая)

Тел.: 959-21-03, 959-20-94



КНИГА — ПОЧТОЙ

Книги издательства «СОЛОН-Пресс» можно заказать наложенным платежом по фиксированной цене. Оформить заказ можно одним из двух способов:

1. Послать открытку или письмо по адресу: 123242, Москва, а/я 20;
2. Передать заказ по электронной почте на адрес: magazin@solon-r.ru.

Бесплатно высылается каталог издательства по почте.

При оформлении заказа следует правильно и полностью указать адрес, по которому должны быть высланы книги, а также фамилию, имя и отчество получателя. Желательно указать дополнительно свой телефон и адрес электронной почты.

Через Интернет Вы можете в любое время получить свежий каталог издательства «СОЛОН-Пресс». Для этого надо послать пустое письмо на робот-автоответчик по адресу: katalog@solon-r.ru.

Получать информацию о новых книгах нашего издательства Вы сможете, подписавшись на рассылку новостей по электронной почте. Для этого пошлите письмо по адресу: news@solon-r.ru. В теле письма должно быть написано слово SUBSCRIBE.

ISBN 5-98003-134-0

© Макет и обложка «СОЛОН-Пресс», 2009

© А. С. Колдунов, 2009

Часть 1. Усилитель

1.1. Усилительные приборы

Усилитель — схема, усиливающая за счет энергии источника питания входной сигнал по напряжению и (или) току. Форма сигнала на выходе **хорошего** усилителя такая же, как и на входе.

Для усиления аналогового сигнала в современной электронике используются только транзисторы и очень редко — электронные лампы. Биполярные транзисторы получили наибольшее распространение по ряду причин: в зависимости от схемы включения они позволяют получить усиление или только по напряжению (каскад с общей базой), или только по току (каскад с общим коллектором), или и по напряжению, и по току (схема с общим эмиттером); потребляемый биполярным транзистором ток от источника сигнала практически линейно зависит от тока, «забираемого» от этого транзистора нагрузкой, — это сильно облегчает управление усилителем. Кроме того, с биполярными транзисторами легко работать и они стоят в несколько раз дешевле полевых.

Полевой транзистор — идеальный усилитель сигнала по току: он управляется напряжением (т. е. практически не потребляет ток от источника сигнала или, как говорят радиотехники — не нагружает источник сигнала), и ток управления не зависит от тока нагрузки. Но это справедливо лишь на низких частотах, когда можно не учитывать паразитную емкость затвора. Еще один «плюс» полевого транзистора — у него между стоком и истоком нет р-п-переходов, т. е. у усилителя на полевых транзисторах нет рекомбинационных шумов, которыми «страдают» все, даже самые лучшие, биполярные транзисторы. Полевые транзисторы при тех же характеристиках «шумят» гораздо слабее, чем биполярные, поэтому во всех современных высококачественных усилителях во входных каскадах (они наиболее чувствительны к шуму — ведь и полезный сигнал, который нужно усилить, тоже разновидность шума) преимущественно ставятся только полевые транзисторы.

Недостатки полевых транзисторов — значительный разброс параметров (из-за этого очень сложно предсказать поведение каждого конкретного транзистора в составе некоторой схемы), а также очень легкая «пробиваемость» подзатворного диэлектрика, в результате чего транзистор выходит из строя. Поэтому паять их можно только специально приспособленным для этого паяльником.

Электронные лампы

Несмотря на то, что «лампочки» известны науке уже почти 100 лет (в то время как транзисторы начали активно использовать лет 30 назад), до сих пор электронная лампа — самый загадочный усилительный прибор. Если взять два усилителя — ламповый и транзисторный, обладающих примерно одинаковыми электрическими характеристиками, то качество звучания лампового усилителя

будет гораздо выше, чем у транзисторного. «По утверждению музыкантов, звук как бы с трудом «продирается» сквозь [транзисторный] усилитель. Создается впечатление, что на пути сигнала стоит какое-то препятствие. Из-за этого люди с тонким слухом предпочитают ламповые усилители. Было предложено много вариантов объяснения этого феномена, но ни один из них так до конца и не объяснил физическую суть явления». Эта цитата взята из статьи В. Федорова «Транзисторное звучание», опубликованной в журнале «Радиомир» 2002, № 12, с. 3. От себя лишь добавлю, что некоторые известные мне объяснения «физической сути явления» противоречат друг другу.

По этой причине электронные лампы «выжили» только в сверхвысококачественных усилителях звука (класс «Hi-End») и в мощных высокочастотных устройствах. Во всех остальных классах более экономичные и малогабаритные транзисторы (а также микросхемы на их основе) уже давным-давно полностью вытеснили «ламповых монстров».

Недостатки электронных ламп: они имеют значительные габариты, требуют высокого (более 100 В) напряжения питания, а также постоянного разогрева катода за счет энергии внешнего источника питания; лампы слишком хрупки (нельзя ронять) и имеют значительное внутреннее сопротивление (чем оно меньше, тем лучше).

В этой книге устройства на основе электронных ламп рассматриваться не будут. Ознакомьтесь с ними можно в любом учебнике, выпущенном в 60—80-х гг. прошлого столетия — с тех пор в ламповой схемотехнике мало что изменилось.

Транзисторные усилители

Принцип работы и основные схемы включения транзисторов были подробно рассмотрены в томе 1 книги. Поэтому в этом пункте я лишь кратко повторю уже изложенное.

Известны три основные схемы включения биполярных (полевых) транзисторов: схема **с общим эмиттером** (с общим истоком) — рис. 1.1, а, **с общим коллектором** (общим стоком) — рис. 1.1, б и **с общей базой** (общим затвором) — рис. 1.1, в. Ниже будут рассмотрены схемы включения биполярных транзисторов структуры п-р-п и полевых — с каналом п-типа. Р-п-р и р-канальные транзисторы включаются по тем же схемам, только полярность всех напряжений нужно изменить в противоположную сторону (т. е. «+U» нужно поменять на «-U» и наоборот).

Биполярный транзистор, включенный по схеме с общим эмиттером (рис. 1.1, а), в зависимости от выходного сопротивления источника сигнала (R_1) и сопротивления нагрузки R_n усиливает входной сигнал и по напряжению, и по току.

Коэффициент усиления биполярного транзистора обозначается как $h_{21э}$ (читается: «аш-два-один-э», «э» — схема с общим эмиттером), и у каждого транзистора он разный (для маломощных транзисторов — от 100 до 1000, для мощных — от 5 до 200). Величина коэффициента $h_{21э}$ (его полное название — статический коэффициент передачи тока базы $h_{21э}$) зависит только от толщины базы

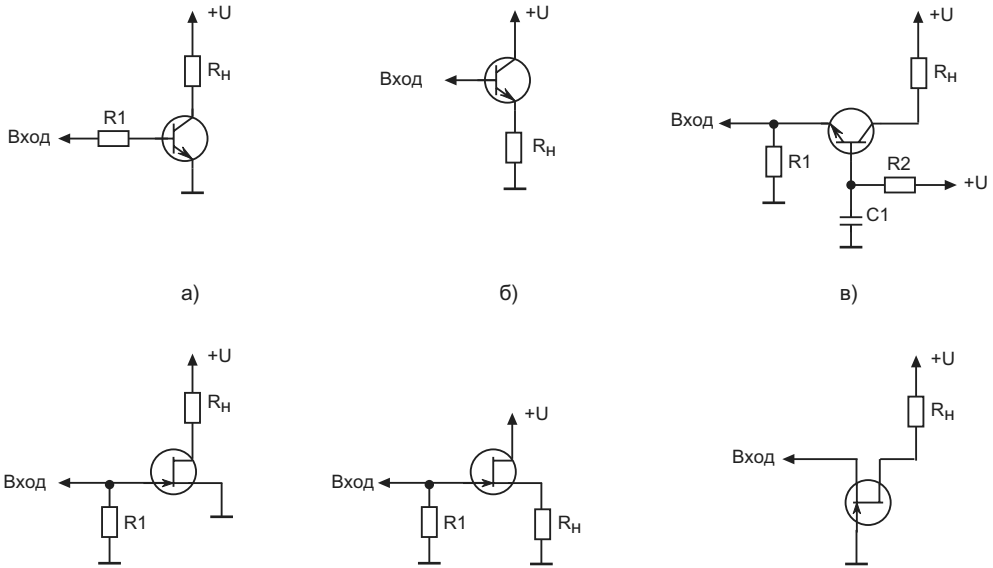


Рис. 1.1. Усилители на транзисторах

транзистора (ее изменить нельзя) и от напряжения между коллектором и эмиттером, поэтому при небольшом напряжении (менее 20 В) на транзисторе его коэффициент передачи тока при любом токе коллектора практически неизменен и незначительно увеличивается при увеличении напряжения на коллекторе.

Коэффициент усиления по току ($K_{y.c.I}$) и коэффициент усиления по напряжению ($K_{y.c.U}$) биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, зависит от отношения сопротивлений нагрузки (R_H) и источника сигнала (на схеме обозначено как R_1). Если сопротивление источника сигнала в $h_{21э}$ раза меньше сопротивления нагрузки, то коэффициент усиления по напряжению чуть меньше единицы (0,95...0,99), а коэффициент усиления по току равен $h_{21э}$. Когда сопротивление источника сигнала более чем в $h_{21э}$ раза меньше сопротивления нагрузки, то коэффициент усиления по току остается неизменным (равным $h_{21э}$), а коэффициент усиления по напряжению — уменьшается.

Если же, наоборот, входное сопротивление уменьшить, то коэффициент усиления по напряжению становится больше единицы, а коэффициент усиления по току, при ограничении протекающего через переход база-эмиттер транзистора тока, не изменяется.

Схема с общим эмиттером — единственная схема включения биполярного транзистора, которая требует ограничения входного (управляющего) тока. Как видно из рис. 1.2, переход база-эмиттер любого биполярного транзистора представляет собой обычный диод (точнее, «стабилитрон», напряжение

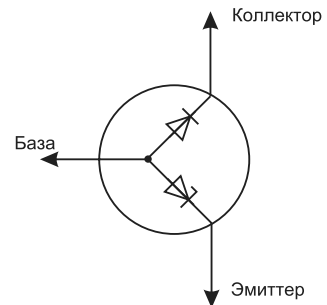


Рис. 1.2. Схема «внутренностей» биполярного транзистора

стабилизации которого равно 7...10 В — оно, кстати, начинает стабилизироваться уже при токе в несколько микроампер), и ток, поступающий в базу транзистора, течет только через этот диод. Усиление сигнала биполярным транзистором возможно только из-за его слишком «хитрого» строения, точнее, из-за очень малой толщины базового перехода, разделяющего коллектор и эмиттер. Так как к коллектору транзистора структуры п-р-п приложено положительное («притягивающее» электроны) напряжение, то при прямом смещении перехода база-эмиттер (т. е. когда через этот переход течет некоторый ток) часть электронов, «предназначенных» для базы, захватывается полем коллектора и течет в нагрузку. Причем в коллектор идет значительная часть электронов — один «базовый» электрон переносит к коллектору $h_{21э}$ электронов. Именно благодаря этим «магнитным» свойствам коллектора и возможно усиление тока с помощью биполярного транзистора. А так как ток коллектора жестко зависит от тока базы, то транзистор усиливает сигналы разной амплитуды в одинаковое число раз.

Из этого можно сделать несколько выводов:

- базовый ток транзистора, включенного по схеме с ОЭ, нужно ограничивать (с помощью резистора или генератора тока), иначе «сгорит» или транзистор, или управляющая им схема;
- с помощью транзистора, включенного по схеме с ОЭ, очень легко управлять высоковольтной нагрузкой низковольтным источником сигнала. Через базовый, а следовательно, и коллекторный переход протекает значительный ток при напряжении база-эмиттер всего 0,8...1,5 В. Если амплитуда (напряжение) управляющего сигнала больше этой величины — нужно поставить между базой транзистора и выходом управляющей схемы токоограничивающий резистор (R1). Рассчитать его сопротивление можно по формулам:

$$I_{R1} = I_{Rн} / h_{21э}, \quad R1 = U_{упр} / I_{R1},$$

где $I_{Rн}$ — ток через нагрузку, А; $U_{упр}$ — напряжение источника сигнала, В; $R1$ — сопротивление резистора, Ом.

Еще одна особенность схемы с ОЭ — падение напряжения на переходе коллектор-эмиттер транзистора можно уменьшить практически до нуля. Но для этого нужно значительно увеличить базовый ток (см. рис. 1.3), что не совсем выгодно. Поэтому такой режим работы транзистора используют только в импульсных, цифровых схемах.

Транзистор, работающий в усилителе аналогового сигнала, должен обеспечивать примерно одинаковое усиление для сигналов с разной амплитудой относительно некоторого «среднего» напряжения. Для этого его нужно немножко «приоткрыть», постаравшись не «переборщить». Как видно из рис. 1.3, ток коллектора и падение напряжения на транзисторе при плавном увеличении тока базы вначале изменяются **почти линейно**, и лишь потом, с наступлением **насыщения** транзистора «прижимаются» к осям графика. Нас интересуют только прямые части линий (до насыщения) — очевидно, что они символизируют линейное усиление сигнала, т. е. при изменении управляющего тока в несколько раз во столько же раз изменится и ток коллектора (напряжение в нагрузке).

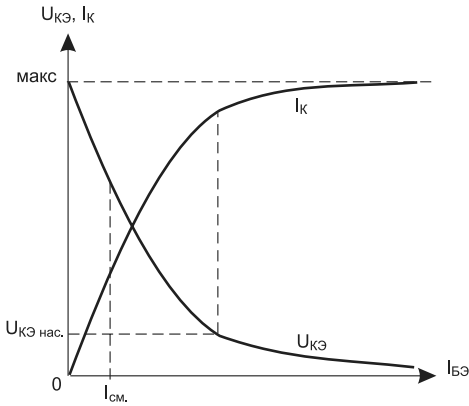


Рис. 1.3. Вольт-амперная характеристика (ВАХ) биполярного транзистора. Подбор оптимального тока смещения $I_{см}$



Рис. 1.4. Форма аналогового сигнала ($U_{ср}$ — «среднее» напряжение, или постоянная составляющая)

Форма аналогового сигнала показана на рис. 1.4. Как видно из этого графика, амплитуда сигнала постоянно пульсирует относительно некоего среднего напряжения $U_{ср}$, причем она может как увеличиваться, так и уменьшаться. Но ведь биполярный транзистор реагирует только на увеличение входного напряжения (вернее, тока)!

Вывод: нужно сделать так, чтобы транзистор даже при минимальной амплитуде входного сигнала был немножко приоткрыт. При «средней» амплитуде $U_{ср}$ он откроется чуть сильнее, а при максимальной $U_{макс}$ — откроется максимально. Но при этом он не должен входить в режим насыщения (см. рис. 1.3) — в этом режиме выходной ток перестает линейно зависеть от входного, вследствие чего — сильное **искажение** сигнала.

Обратимся снова к рис. 1.3. Так как и максимальная $U_{макс}$, и минимальная $U_{мин}$ амплитуды входного сигнала относительно «средней» $U_{ср}$ примерно одинаковы по величине (и противоположны по знаку), то нам нужно подать на базу транзистора такой постоянный ток (**ток смещения** — $I_{см}$), чтобы при «среднем» напряжении на входе транзистор был открыт ровно наполовину. Тогда при уменьшении входного тока (вплоть до амплитуды $U_{мин}$) транзистор будет закрываться и ток коллектора станет уменьшаться, а при увеличении входного тока он открывается еще сильнее.

Схемы однокаскадного усилителя на биполярном транзисторе, включенном по схеме с ОЭ, показаны на рис. 1.5. На рис. 1.5, а нарисована наиболее распространенная схема усилителя. Резистор R2 — нагрузка для транзистора, резистор R1 задает начальное смещение транзистора (чтобы при отсутствии сигнала транзистор был приоткрыт, т. е. на его нагрузке (R2) действовало напряжение, примерно равное половине напряжения питания), его сопротивление зависит от сопротивления нагрузки и коэффициента $h_{21э}$ транзистора. Конденсатор C1 — разделительный, он нужен для того, чтобы постоянная составляющая входного сигнала не перегружала транзистор.

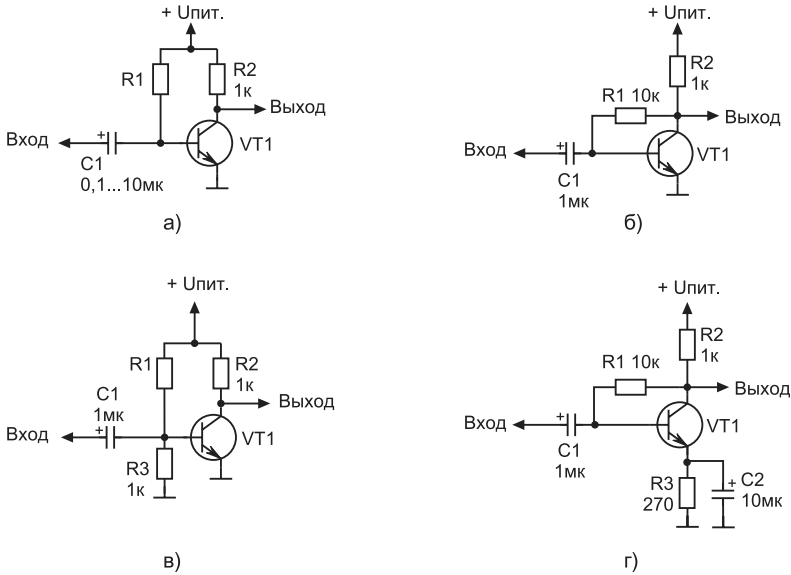


Рис. 1.5. Усилители. Во всех схемах подбором сопротивления резистора $R1$ добиваются напряжения на выходе, примерно равном $0,5 U_{пит}$. В схеме (г) при этом от $U_{пит}$ нужно отнять падение напряжения на резисторе $R3$

Напряжение на базе транзистора относительно эмиттера может колебаться (под воздействием входного сигнала) только в пределах $0,7...1,0$ В. При меньшем напряжении транзистор полностью закрыт (т. е. находится в **режиме отсечки**), а при большем — полностью открыт (**режим насыщения**). Но выходное напряжение источника сигнала, которым управляется этот транзистор, обычно равно половине напряжения питания, или при питании 9 В равно 4,5 В. Столь высокое напряжение мгновенно переведет транзистор в режим насыщения. Можно, конечно, в схеме на рис. 1.5, а вместо конденсатора поставить резистор, а $R1$ убрать, но тогда резко уменьшится усиление каскада — ведь этот резистор будет «заодно» ослаблять и полезный сигнал. Конденсатор же попросту зарядится до разности $U_{вх} - U_{бэ}$, тем самым «уменьшив» величину постоянной составляющей до напряжения на базе транзистора. Как известно (см. том I книги), сопротивление конденсатора зависит от частоты, и для нулевой частоты (т. е. постоянной составляющей) оно бесконечно. Поэтому на разность напряжений $U_{вх} - U_{бэ}$ транзистор не реагирует. В то же время для сигнала звуковой (или любой другой) частоты емкостное сопротивление конденсатора ничтожно мало (относительно), поэтому на звуковой сигнал транзистор реагирует так же, как если бы этого конденсатора не было, а постоянная составляющая источника сигнала равнялась базовому напряжению транзистора.

Конденсатор $C1$ в этой схеме совместно с резистором $R1$ и сопротивлением база-эмиттер транзистора образует так называемую **дифференцирующую RC-цепочку** (подробнее о ее работе см. том I). Эта цепочка замечательна тем, что является ничем иным, как **фильтром верхних частот (ФВЧ)**. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) ФВЧ показана на рис. 1.6. Как

видно из графика, при нулевой частоте ток на выходе ФВЧ равен нулю, т. е. сигнал через фильтр не проходит. При увеличении частоты сигнала выходной ток увеличивается, и на некоторой частоте «сопротивлением» фильтра можно пренебречь. Эта частота называется **частотой среза** фильтра ($f_{\text{ср}}$), и на ней **коэффициент передачи** (отношение выходного напряжения к входному) равен $1/\sqrt{2}$, т. е. примерно 0,7. Частота среза RC фильтра примерно равна

$$f_{\text{ср}} = 1/2\pi RC, \quad (1)$$

где 2π — число, примерно равное 6,28; R — сопротивление резистора (МОм); C — емкость конденсатора (мкФ); $f_{\text{ср}}$ — частота среза (Гц).

В усилителях, аналогичных показанному на рис. 1.5, а, сопротивление базового перехода определить довольно сложно, поэтому чаще всего емкость конденсатора $C1$ подбирают экспериментально: вначале в схему ставят конденсатор заведомо слишком малой емкости (например, вместо «нужного» на 1 мкФ впаивают емкостью 0,1 мкФ), ко входу усилителя подключают источник сигнала, а к выходу — нагрузку. Если вы до сих пор не включили напряжение питания усилителя — обязательно включите его! Это, кстати, наиболее распространенная ошибка у начинающих радиолюбителей — они пытаются настроить устройство, забыв подать на него напряжение питания. Тот же эффект будет, если вы попытаетесь завести машину с пустым бензобаком. Более опытные радиолюбители, если у них что-то не работает, первым делом проверяют наличие и величину напряжения питания.

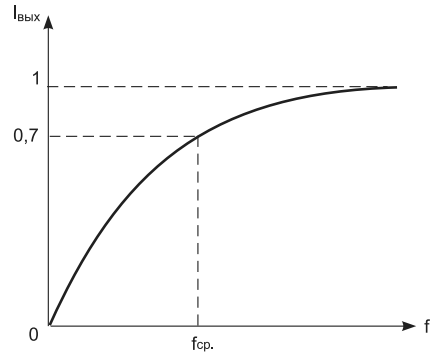


Рис. 1.6. Амплитудно-частотная характеристика фильтра нижних частот

Итак, вы включили усилитель. Так как емкость конденсатора $C1$ слишком мала, то он будет «обрезать» все низкие частоты, и на выходе усилителя будет «свистящий» звук. Если вы теперь параллельно конденсатору $C1$ подсоедините еще один, большей емкости, то звук станет гораздо лучше — частота среза «фильтра» переместилась в сторону более низких частот или, как обычно говорят, «в усилителе прибавилось басов» (bass (англ.) — низкие частоты). Емкость конденсатора $C1$ таким образом подбирают до тех пор, пока не добьются от усилителя «нормального» звука. Но желательно, чтобы его емкость была минимально возможной.

Схема на рис. 1.5, б практически ничем не отличается от уже рассмотренной. Но так как резистор $R1$ подключен к коллектору транзистора, а не к источнику питания, то эта схема менее чувствительна к пульсациям (колебаниям) питающего напряжения. Резистор $R1$ обеспечивает отрицательную обратную связь (ООС) — коэффициент усиления каскада от этого уменьшается, но и искажения также уменьшаются.

В схеме на рис. 1.5, *в* добавлен еще один резистор — R3. Из-за него входное сопротивление и **коэффициент усиления усилителя** (отношение выходного напряжения или тока ко входному) уменьшились, но благодаря ему стабильность работы усилителя заметно возросла. То есть, проще говоря, усилитель, собранный по этой схеме, работает лучше усилителей на рис. 1.5, *а* и *б*, но обладает худшим усилением.

Подобные явления в электронике встречаются сплошь и рядом. Очень часто при «придумывании» схемы практически любого устройства разработчики («придумывальщики») предъявляют к нему порой взаимоисключающие требования — в нашем случае высокий коэффициент усиления и высокое качество этого самого усиления. К сожалению, идеальных приборов в электронике не существует, поэтому в таких случаях всегда приходится идти на некоторый компромисс (в нашем случае — или несколько уменьшить усиление, чтобы улучшить качество усиленного сигнала, или «закрыть глаза» на некоторое ухудшение качества сигнала, дабы добиться большего коэффициента усиления).

Задача каждого разработчика — найти этот самый компромисс. Это не так сложно, как кажется, — очень часто процесс настройки устройства превращается в увлекательную игру. Важно только знать, **что именно** настраивать. Поэтому в книге так много места уделено всяким «мелочам», которые, как кажется любому опытному радиолюбителю, известны даже детям.

При настройке транзисторного усилителя не нужно пытаться получить от одного транзистора «огромный» коэффициент усиления. Если вам нужен коэффициент усиления, равный 100, то лучше использовать два последовательно включенных **каскада** (каскад — один из «вагонов» в усилителе — «поезде»: любой усилитель можно разбить на несколько частей (каскадов), каждая из которых выполняет ту или иную функцию. Количество деталей, в том числе и транзисторов, в одном каскаде не ограничено; простейшие усилительные каскады изображены на рис. 1.5) с коэффициентом усиления каждого, равным 10, при последовательном соединении усилителей их коэффициенты усиления перемножаются, — чем пытаться «раскачать» единственный транзистор, пусть даже у него h_{21} будет больше 1000. Просто при **плавном** уменьшении коэффициента усиления **коэффициент нелинейных искажений** (КНИ, измеряется в процентах; чем он меньше, тем лучше; у «хороших» усилителей он меньше 1%) **резко** уменьшается.

На рис. 1.5, *г* изображена еще одна, довольно интересная схема усилителя на транзисторе VT1, включенном по схеме с общим эмиттером. Особенность этой схемы — она нечувствительна к перегрузкам по входу: если подать на базу транзистора слишком высокое напряжение, то оно через «диод» перехода база-эмиттер зарядит конденсатор C2 и ограничится на уровне, определяемом резистором R3. В рассмотренных ранее схемах ток через эмиттерный переход ничем не ограничивается и транзистор при перегрузках неизбежно выходит из строя («сгорает»).

Сопротивление резистора R3 подбирается таким образом, чтобы падение напряжения на нем составляло $1/10 \dots 1/5$ напряжения питания, т. е. его сопротивление равняется 0,25...0,5 от сопротивления резистора R2. Конденсатор C2 нужен для того, чтобы несколько увеличить коэффициент усиления усилителя

на верхних частотах, и его емкость должна быть более чем в k_{ycl} раза больше емкости конденсатора $C1$, т. е. примерно в 5...20 раз. Если вы припаяете конденсатор $C2$ слишком большой емкости — ничего страшного не произойдет; эта схема попросту «превратится» в схему, изображенную в пункте «б». Нечувствительность к перегрузкам при этом исчезнет. Если же $C2$ не устанавливать совсем, то коэффициент усиления по току на высоких частотах несколько уменьшится; в целом работа усилителя ухудшится.

Усилитель на полевом транзисторе, включенном по схеме с общим истоком (ОИ), также как и биполярный с ОЭ, обеспечивает усиление и по напряжению, и по току. Но у полевого транзистора есть две особенности, отличающие его от биполярного: 1) он не потребляет ток от источника сигнала и 2) его коэффициент усиления зависит только от сопротивления нагрузки.

Как я уже говорил в I томе, канал полевого транзистора, соединяющий выводы стока и истока, представляет собой резистор, и его сопротивление при некотором постоянном напряжении на затворе (относительно истока) неизменно. То есть полевой транзистор можно изобразить в виде схемы, изображенной на рис. 1.7. Входное напряжение (не ток!) «передвигает» движок «переменного резистора» R_{VT} (которым является канал транзистора), сопротивление этого «резистора» изменяется, и, так как сопротивление нагрузки неизменно, то напряжение на нагрузке изменяется. Соответственно, изменяется напряжение и на выходе усилителя.

Для полевого транзистора увеличение управляющего напряжения вызывает уменьшение сопротивления канала, и напряжение на выходе уменьшается. При уменьшении напряжения на затворе сопротивление канала увеличивается и напряжение на выходе, благодаря сопротивлению нагрузки R_{H} , увеличивается. То есть кроме усиления транзистор, включенный по схеме с общим истоком, заодно и **инвертирует** входной сигнал. От этого ничего не меняется, но знать это нужно. Входной сигнал инвертирует и биполярный транзистор, включенный по схеме с общим эмиттером.

Вольт-амперная характеристика одного из наиболее часто используемых радиолюбителями полевого транзистора изображена на рис. 1.8. Для других типов полевых транзисторов кривая имеет ту же форму, но числа на осях графика будут иными.

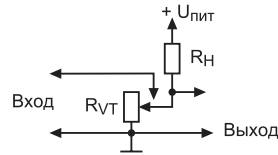


Рис. 1.7. Упрощенная эквивалентная схема полевого транзистора

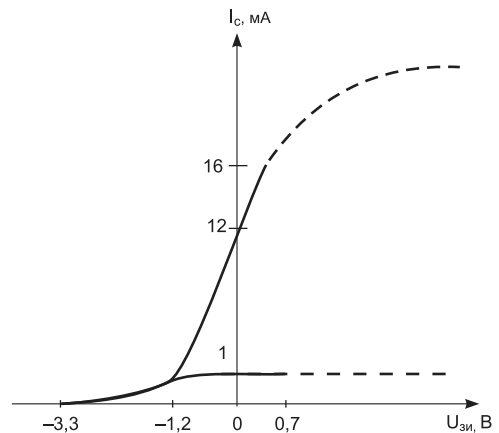


Рис. 1.8. Вольт-амперная характеристика транзистора КП307Б (n-канальный полевой с управляющим p-n переходом)

Как видно из графика, при нулевом напряжении на затворе ток стока транзистора имеет некоторое значение и для транзистора типа КП307 он равен 10...15 мА. Этот ток называется **начальным током стока** $I_{с.нач}$. При уменьшении напряжения на затворе ток стока уменьшается, а при увеличении — увеличивается (для р-канального полевого транзистора — наоборот). Напряжение на затворе n-канального транзистора с изоляцией р-п-переходом может колебаться в пределах $-20...+0,7$ В: при напряжении на затворе более 0,7 В относительно канала открывается диод, изолирующий затвор от канала и через затвор в канал начинает течь ток, а при напряжении менее -20 В может произойти пробой р-п-перехода.

Зависимость изменения тока нагрузки от изменения напряжения на затворе полевого транзистора называется «крутизна характеристики» и обозначается буквой S (у мощных транзисторов измеряется в амперах на вольт — А/В, у мало-мощных — в миллиамперах на вольт — мА/В). Крутизна характеристики современных полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом колеблется в пределах 1...100 мА/В, а у транзисторов с изолированным затвором — в пределах 0,1...60 А/В. Крутизна характеристики, так же как и статический коэффициент передачи тока биполярного транзистора, для каждого конкретного транзистора величина неизменная, но у разных транзисторов она разная. Коэффициента $h_{21э}$ у полевых транзисторов нет, также как у биполярных нет крутизны S . Связано это с разным принципом действия биполярных и полевых транзисторов. Вернее, эти коэффициенты у них есть, но они близки к бесконечности: у полевого транзистора входной ток примерно равен нулю, а при делении любого числа на нуль получается бесконечность; у биполярного транзистора, если не учитывать ток базы, при изменении напряжения на базе от 0,7 до 1,0 В ток коллектора изменяется от нуля до максимального значения, т. е. опять получается слишком большая величина. Поэтому усилительные свойства биполярных и полевых транзисторов измеряются по-разному и сравнивать $h_{21э}$ с S нельзя. Все остальные параметры (максимально допустимые напряжение, ток, мощность, емкость переходов и обратное сопротивление) для всех типов полупроводников измеряются одинаково.

Но вернемся к полевым транзисторам. Как видно из графика на рис. 1.8, зависимость тока стока от управляющего напряжения не совсем линейна. Аналогично линия графика «изгибается» параллельно оси управляющего тока и у биполярного транзистора, когда он входит в режим насыщения. Но так как у полевого транзистора ток стока достигает в таком режиме не максимальных, а **минимальных значений**, то этот режим у него называется **режимом отсечки**. Минимальное напряжение на затворе, при котором ток стока уже можно не учитывать, называется **напряжением отсечки** ($U_{зи\ отс}$). Сопротивление полностью закрытого канала большинства современных полевых транзисторов находится в пределах 100 МОм...30 ГОм, т. е. может быть даже больше, чем обратное сопротивление диодов. Это свойство полевых транзисторов сделало их незаменимыми в микромощных цифровых КМОП-микросхемах, а также в устройствах выборки-хранения и переключения аналоговых сигналов.

Для линейного усиления входных сигналов полевым транзистором нам нужно перевести его в такой режим, чтобы при изменении входного напряжения в сторону увеличения или уменьшения его крутизна характеристики практически не изменялась. А для большего коэффициента усиления крутизна характеристики должна быть максимальной. Как видно из рис. 1.8, это требование соблюдается только тогда, когда постоянная составляющая на затворе равна нулю или чуть меньше ($-0,1 \dots -0,3$ В) его: в таком режиме кривая графика представляет собой **почти** прямую линию, а крутизна характеристики максимальна и равна $(16 \text{ мА} - 12 \text{ мА}) : 0,7 \text{ В} = 5,7 \text{ мА/В}$.

Основные схемы включения полевых транзисторов (каскад с ОИ) показаны на рис. 1.9. На рис. 1.9, а изображена «стандартная» схема. Входное сопротивление каскада численно равно сопротивлению резистора R1, и его можно выбирать в пределах десятки килоом (меньше невыгодно) ... десятки мегаом. Так как входное сопротивление схемы значительно, то и емкость конденсатора C1 должна быть небольшой, а чем меньше емкость конденсатора, тем меньше его стоимость и габариты.

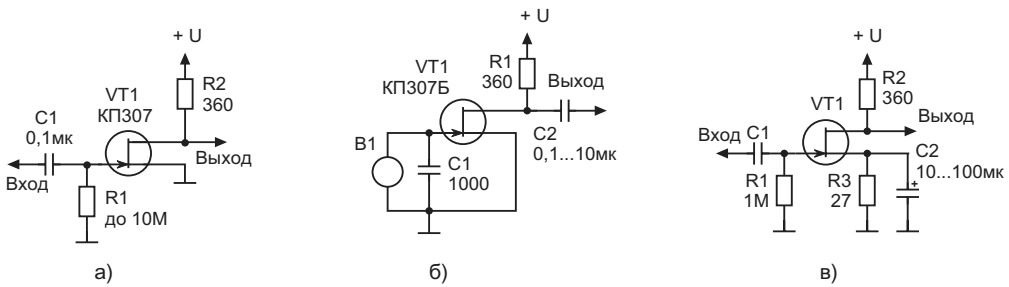


Рис. 1.9. Включение полевого транзистора по схеме с общим истоком

Резистор R2 — сопротивление нагрузки. Его рассчитывают по формуле:

$$R2 = \frac{0,5 \cdot U_{\text{пит}}}{I_{\text{с.нач.}}}$$

В нашем случае напряжение питания равно 9 В, а начальный ток стока транзистора — 12 мА (рис. 1.8), поэтому сопротивление резистора R2 равно $0,5 \cdot 9 : 0,012 = 375$ (Ом). Только при таком сопротивлении напряжение на стоке транзистора VT1 будет равно половине напряжения питания; при большем сопротивлении оно будет меньше, а при меньшем — больше его. Так как резисторов сопротивлением 375 Ом в ряду E24 (см. в конце книги) нет, то, учитывая возможное снижение напряжения питания (батарейки «сели»), выбираем ближайшее меньшее сопротивление — т. е. 360 Ом.

Выходное сопротивление каскада, при напряжении на стоке транзистора, равном $0,5 U_{\text{пит}}$, численно равно сопротивлению резистора R2. Если напряжение на стоке больше или меньше $0,5 U_{\text{пит}}$, то выходное сопротивление будет больше сопротивления R2; если напряжение на стоке меньше $0,5 U_{\text{пит}}$, значит, сопротивление резистора R2 слишком большое для данного транзистора и его нужно

уменьшить — тогда и выходное сопротивление уменьшится, а работа усилителя — улучшится; если же напряжение на стоке VT1 больше $0,5 U_{пит}$, значит, сопротивление резистора слишком мало (когда сопротивление R2 равно нулю — напряжение на стоке равно $U_{пит}$, а когда — бесконечности (т. е. его попросту нет), напряжение на стоке транзистора близко к нулю) и его желательно увеличить — выходное сопротивление от этого не изменится (но лишь до тех пор, пока напряжение на стоке не станет меньше $0,5 U_{пит}$), а коэффициент усиления увеличится (он максимален, когда напряжение на стоке равно половине напряжения питания).

Одно из отличий усилителя на полевом транзисторе (рис. 1.9) от аналогичного усилителя на биполярном (рис. 1.5) — постоянная составляющая напряжения на входе (затворе) равна нулю. Благодаря этой особенности стал не нужен разделительный конденсатор C1, если ко входу усилителя в качестве источника сигнала подключен генератор напряжения с постоянной составляющей, равной нулю (например, электродинамический микрофон или головка воспроизведения кассетного магнитофона). Схема такого усилителя изображена на рис. 1.9, б. Датчик В1 — головка воспроизведения, конденсатор C1 совместно с индуктивностью катушки головки образует колебательный контур, благодаря которому качество звука несколько улучшается; его емкость — около 2000 пФ.

Так как в усилителе на входе нет разделительного конденсатора, то его АЧХ представляет собой практически прямую линию и коэффициент усиления усилителя даже на частотах в единицы герц значителен (сравните с АЧХ «обычного» усилителя, с разделительным конденсатором, изображенной на рис. 1.6). Благодаря этому свойству, усилитель очень хорошо усиливает столь ценимые нынешними аудиофилами «басы» (низкие частоты). Кроме того, из-за отсутствия разделительного конденсатора во входном каскаде улучшится работа всего усилителя в целом: идеальных конденсаторов не существует, а неидеальные, установленные в чувствительных входных каскадах, довольно сильно «портят» сигнал. Поэтому в большинстве качественных усилителей, даже собранных на основе биполярных транзисторов, во входных каскадах установлены полевые транзисторы. Дополнительный «плюс» полевого транзистора — отсутствие р-п-переходов между выводами стока и истока (а в транзисторах с изолированным затвором р-п-переходов вообще нет — если не учитывать изоляцию канала от подложки); впрочем, в некоторых очень дорогих сверхмалошумящих транзисторах канал изолирован диэлектриком, т. е. рекомбинационных шумов, возникающих из-за хаотического проникновения («залета») основных носителей тока в соседнюю область, в которой они являются неосновными и в которой рекомбинируют (взаимоуничтожаются) с основными носителями для той области, нет. Например, в транзисторе структуры п-р-п для базы основными носителями тока являются дырки, а неосновными — электроны; в коллекторе основные носители тока — электроны, а неосновные — дырки. Если «коллекторный» электрон случайно залетит в базу, то там он практически мгновенно рекомбинирует с дыркой. В результате в коллекторе станет меньше на 1 электрон, а в базе — на 1 дырку. Так как на базу транзистора подано некоторое неизменное напряжение смещения, то для восстановления равновесия коллектор забирает один электрон

у источника питания. А так как в коллектор ток течет через нагрузку, то при этом ток через нагрузку (напряжение на ней) **резко и кратковременно** (на время прохождения одного электрона) увеличится, после чего снова уменьшится до прежнего значения.

Так как площадь р-п-переходов транзистора, по сравнению с размерами одного электрона, огромна, то за единицу времени даже у самого лучшего транзистора с р-п-переходами происходит огромное множество рекомбинаций. Из-за этого ток в нагрузке такого транзистора, при неизменном входном сигнале, не постояен, а пульсирующий. Эти пульсации называются **шумом**; коэффициент шума нелинейно зависит от частоты и при увеличении частоты резко уменьшается. Поэтому даже высокочастотные транзисторы шумят преимущественно в низкочастотной области, и получить высокочастотные (более 1 МГц) колебания из шума, отфильтровав с помощью ФНЧ более низкие частоты, практически невозможно. Но если приходится усиливать слишком слабый сигнал, то шум нужно учитывать на любых частотах.

У транзисторов коэффициент шума измеряется в децибелах, и у хороших биполярных транзисторов он находится в пределах 3...10 дБ, а у полевых — 2...6 дБ. У усилителей шумы измеряются в других, более сложных для понимания единицах, поэтому останавливаться на них я не буду.

Как видно из графика на рис. 1.8, середина линейного участка ВАХ транзистора соответствует напряжению, примерно равному $-0,1...-0,5$ В. Поэтому, для того чтобы усилитель более равномерно усиливал входной сигнал, на его затвор относительно истока нужно подать именно такое напряжение. Сделать это можно двумя способами: или понизить с помощью внешнего источника питания напряжение (постоянную составляющую) на затворе, или оставить напряжение на затворе равным нулю, а напряжение на истоке немножко повысить. Последний вариант более удобен, поэтому им пользуются чаще.

Схема такого усилителя изображена на рис. 1.9, в. Так как при нулевом напряжении на затворе через канал транзистора и последовательно соединенный с ним резистор R_2 течет некоторый ток (в нашем случае — около 12 мА), то на резисторе R_3 создается некоторое падение напряжения, которое сглаживается фильтрующим конденсатором C_2 . Сопротивление резистора R_3 подбирается таким образом, чтобы падение напряжения на нем составляло 0,1...0,5 В (или больше — в зависимости от типа транзистора). Так как напряжение на истоке чуть больше нуля, то напряжение на затворе, соединенном с общим проводом, чуть меньше, чем на истоке. То есть это равносильно тому, как если бы мы на рис. 1.8 ось тока стока «сдвинули» влево.

Коэффициент усиления по напряжению полевого транзистора, включенного по схеме с ОИ, очень сильно зависит от сопротивления нагрузки. При нулевом сопротивлении нагрузки (короткое замыкание, или, сокращенно, КЗ — этот режим, кстати, безопасен для маломощных полевых транзисторов и опасен для биполярных и всех остальных полупроводников) коэффициент усиления по напряжению равен нулю. При сопротивлении нагрузки, равном сопротивлению канала (при некоторой неизменной постоянной составляющей на затворе) $k_{y,c.U} = S$. При бесконечно большом сопротивлении нагрузки $k_{y,c.U}$ равен бесконечности. Ко-

эффицент усиления по току у полевого транзистора близок к бесконечности, но выходной ток при увеличении сопротивления нагрузки уменьшается. Поэтому «золотая середина» — это когда $R_H \approx R_{си}$.

Биполярный транзистор, включенный по схеме с **общим коллектором (ОК)**, и полевой, включенный по схеме с **общим стоком (ОС)** — рис. 1.1, б, усиливают сигнал только по току; коэффициент усиления по напряжению у таких каскадов чуть меньше единицы. Поэтому в литературе эти схемы часто называют соответственно **эмиттерным и истоковым повторителями**. Входной сигнал они, в отличие от рассмотренных выше схем, не инвертируют.

Коэффициент усиления по току эмиттерного повторителя примерно равен $h_{21э}$, а напряжение на эмиттере транзистора структуры п-р-п всегда на 0,6...1,0 В меньше напряжения на базе (напряжения измеряются относительно общего провода). Этот 1 В падает на открытом р-п-переходе транзистора. Если напряжение на базе транзистора ни при каких условиях не превысит напряжение на коллекторе, то токоограничивающий резистор между источником сигнала и базой эмиттерного повторителя не нужен — транзистор сам «решит», какой ток отобразить ему от источника сигнала. Этот ток всегда в $h_{21э}$ раза меньше тока нагрузки; если источник сигнала не может отдать транзистору столь большой (сравнительно) ток, то напряжение на нагрузке эмиттерного повторителя будет уменьшаться. Это явление радиолюбители называют «нагрузка «садит» источник сигнала».

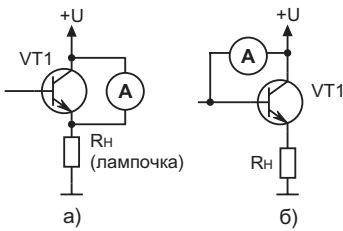


Рис. 1.10. Измерение статического коэффициента передачи тока базы биполярного транзистора

эмиттера транзистора (рис. 1.10, а), при этом базу транзистора ни к чему подключать не нужно, а потом измеряют ток базы $I_б$, замкнув амперметром выводы базы и коллектора. При обоих измерениях сопротивление нагрузки и напряжение питания должно оставаться неизменным. Разделив ток нагрузки на ток базы, мы получим статический коэффициент передачи тока, т. е.

$$h_{21э} \approx \frac{I_H}{I_б} . \quad (2)$$

Ток базы и ток нагрузки должны измеряться в одних единицах, т. е. или оба — в миллиамперах, или оба — в амперах.

Коэффициент $h_{21э}$ при увеличении тока нагрузки незначительно уменьшается, а при увеличении напряжения питания — увеличивается. Эмиттерные повторители используются в основном только в выходных каскадах устройств — для уменьшения выходного сопротивления. Очень широко распространены **комплементарные** (т. е. выполненные на транзисторах с одинаковыми (иден-

тичными) параметрами, но разной структурой — для биполярных транзисторов, или разным типом канала — для полевых) эмиттерные повторители (рис. 1.11) — в таком случае, если нагрузка к выходу усилителя подключается через разделительный конденсатор, резистор R_H , потребляющий значительный ток, не нужен.

Единственный недостаток комплементарных эмиттерных повторителей — сравнительно большое падение напряжения на переходах коллектор — эмиттер, достигающее в сумме для обоих транзисторов величины 1,2...2,0 В.

Зависимость напряжения на выходе эмиттерных повторителей от напряжения на входе показана на рис. 1.12. Если нагрузка включена между выходом и общим проводом, то напряжение на нагрузке увеличивает транзистор структуры p-p и напряжение на выходе повторителя символизирует нижняя линия на графике. Если нагрузка включена между выходом и «плюсовой» шиной, напряжение на выходе (относительно общего провода) соответствует верхней линии. И, наконец, если нагрузка подключена через разделительный конденсатор между выходом и одной из шин питания, напряжение на ней соответствует средней, пунктирной линии.

Рассмотрим работу повторителя в последнем случае, т. е. когда нагрузка подключена через разделительный конденсатор (для большей простоты примем, что емкость этого конденсатора близка к бесконечности). Если на вход повторителя подать некоторое напряжение, большее нуля, но меньшее «+U», на выходе повторителя установится напряжение U_0 . Через некоторое время разделительный конденсатор зарядится и ток, текущий через нагрузку, станет равным нулю. Соответственно, уменьшится до нуля и ток, протекающий через транзисторы VT1 и VT2; напряжение на их эмиттерах станет равным входному напряжению, т. е. напряжению на их базах. Если мы теперь начнем плавно увеличивать входное напряжение, то, пока оно не увеличится на 0,5...0,7 В, напряжение на выходе изменяться не будет — транзистор VT1 начнет открываться только после того, как напряжение на его базе относительно эмиттера не станет больше 0,5...0,7 В. На рис. 1.12 это напряжение обозначено как U_{max} . Если теперь входное напряжение начнет уменьшаться, то после того, как оно станет равным, относительно выходного напряжения, +0,5...+0,7 В, транзистор VT1 полностью закроется; транзистор VT2 в это время тоже закрыт и начнет открываться только после того, как напряжение на входе станет равным -0,5...-0,7 В относительно

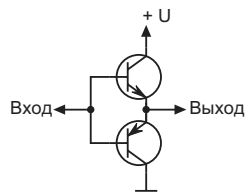


Рис. 1.11. Составной эмиттерный повторитель (комплементарная пара)

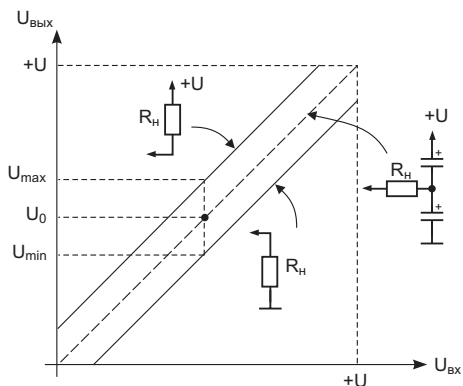


Рис. 1.12. Вольт-амперная характеристика комплементарной пары на биполярных транзисторах

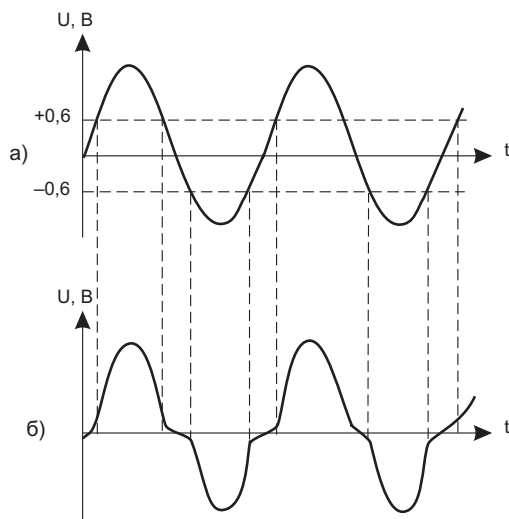


Рис. 1.13. а — входной синусоидальный сигнал, б — искаженный выходной (искажение типа «ступенька»)

входного сигнала протекал некоторый, очень небольшой, ток — тогда даже при незначительном изменении входного тока напряжение на выходе будет довольно резко изменяться; можно между базами и эмиттерами транзисторов включить резистор небольшого сопротивления (равного или чуть больше сопротивления нагрузки) — тогда, пока входной сигнал находится в пределах зоны нечувствительности, ток в нагрузке будет изменяться благодаря этому резистору; и, наконец, можно с помощью специальной схемы попросту контролировать напряжение на выходе эмиттерного повторителя и подавать на его вход такие сигналы, чтобы форма выходного напряжения полностью повторяла форму входного.

Наибольшее распространение в электронике получил третий способ — с функцией контроля выходного напряжения, а также предварительного усиления «слабого» входного сигнала прекрасно справляется операционный усилитель (он будет рассмотрен чуть ниже). Вторым способом пользуются гораздо реже — только в тех случаях, когда источник сигнала достаточно мощный, чтобы кратковременно работать непосредственно с нагрузкой; к тому же у этой схемы коэффициент усиления по току уменьшен до 2...10 раз — с помощью дополнительного резистора; первый же способ используется очень редко, — у такой схемы даже при отсутствии сигнала через транзисторы течет некоторый ток, уменьшающий экономичность усилителя и вызывающий повышенный нагрев транзисторов — за счет бесполезно рассеиваемой на них драгоценной энергии источника питания. Но некоторые видоизмененные варианты этой схемы, потребляющие при отсутствии сигнала значительно меньший ток, используются довольно широко, — они встречаются в мощных выходных каскадах практически всех известных низкочастотных усилителей мощности.

Сфера применения усилителей тока на полевых транзисторах противоположна таковой для биполярных. Полевые транзисторы часто незаменимы во входных

выходного. То есть у такого «усилителя» есть **зона нечувствительности** шириной 1,0...1,5 В и из «красивого» синусоидального сигнала, изображенного на рис. 1.13, а, он «делает» сигнал, изображенный на рис. 1.13, б. Как видно, форма сигнала практически полностью искажена (испорчена), и для приемника сигнала (телевизора, человеческого уха) он не несет практически никакой информации.

Этот **тип искажений** радиолюбителями называется «**ступенька**». Все искажения, по определению, вредные, поэтому с ними борются всеми силами. Со «ступенькой» можно «расправиться» тремя путями: немножко приоткрыть транзисторы VT1 и VT2 — чтобы через их переходы коллектор-эмиттер при отсутствии

каскадах, через которые протекает ничтожный ток, но в мощных выходных каскадах их использовать, со схемотехнической точки зрения, очень сложно (то есть очень сложно «нарисовать» «правильную», работоспособную схему).

Основное отличие усилителя с общим стоком (истоковый повторитель) от усилителя с общим истоком — единичный коэффициент усиления по напряжению. Но это справедливо только при довольно большом сопротивлении нагрузки (более 10...100 кОм) — при меньшем сопротивлении $k_{у, U}$ уменьшается (сказывается крутизна характеристики).

Когда затвор транзистора, изображенного на рис. 1.14, соединен с общим проводом, на резисторе R_H создается некоторое падение напряжения. Измерив это напряжение, можно узнать напряжение отсечки (см. рис. 1.6) используемого транзистора при сопротивлении нагрузки, равном R_H . Для транзистора КП307Б падение напряжения на резисторе сопротивлением 10 кОм равно 3,3 В, поэтому если его включить по схеме с общим истоком, то транзистор полностью закроется при напряжении на затворе, которое на 3,3 В меньше напряжения на истоке. Для других типов полевых транзисторов (транзисторов с изолированным затвором и индуцируемым каналом — см. том 1) напряжение отсечки может «лежать» между напряжением на стоке и напряжением на истоке — в таком случае $U_{отс}$ удобнее измерять, включив транзистор по схеме с общим истоком (рис. 1.9); такие транзисторы непригодны для работы в истоковом повторителе.

Истоковые повторители применяются в основном только в **генераторах тока**. Как известно, ток, протекающий через обычный резистор, зависит от напряжения на его выводах (разности потенциалов) и равен $I = \frac{U}{R}$ (закон Ома).

Но очень часто возникает надобность в такой схеме, протекающий через которую ток практически не зависит от напряжения. Такая схема и называется генератором тока.

Генераторы тока строятся как на биполярных, так и на полевых транзисторах. Наибольшее распространение получили генераторы тока на основе полевых (с управляющим р-п-переходом или с изолированным затвором и встроенным каналом) транзисторов — они крайне просты как схематически (рис. 1.15), так и в применении.

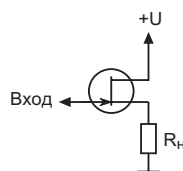


Рис. 1.14. Истоковый повторитель

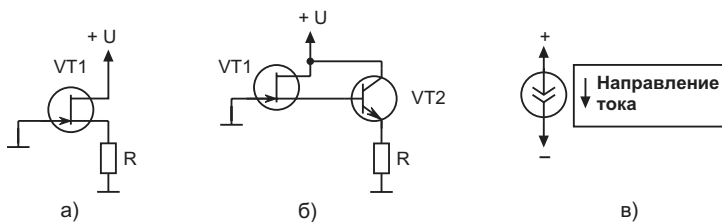


Рис. 1.15. Генераторы тока на основе полевых транзисторов: а — типовая схема; б — с усилителем тока на биполярном транзисторе; в — схематическое обозначение генератора тока

Содержание

Часть 1. Усилитель	3
1.1. Усилительные приборы	3
Электронные лампы	3
Транзисторные усилители	4
1.2. Операционные усилители	22
1.3. Обратная связь. Отрицательная обратная связь	39
1.4. Положительная обратная связь	57
1.5. Усилители со сложной ООС	63
1.6. Усилители с изменяющимся коэффициентом усиления. Измерение напряжения, внутреннего сопротивления и тока короткого замыкания	79
1.7. Усилители со сложной обратной связью	99
1.8. Нагрев радиоэлементов: причины, последствия и борьба с ним. Импульсные источники питания	106
Мощные интегральные УМЧЗ	121
Часть 2. Согласование схем	126
2.1. Согласование аналоговых схем	126
2.2. Примеры согласования аналоговых схем	145
2.3. Согласование цифровых и аналоговых схем	154
Цифроаналоговые и аналого-цифровые преобразователи	170
Часть 3. Приложение	180
3.1. Обустройство рабочего места	180
Источник электропитания	180
Измерительные приборы	188
Монтажные инструменты	189
Изготовление платы	193
3.2. Расчет элементов	223
Расчет трансформаторов	223
Последовательное и параллельное соединение резисторов и конденсаторов. Делители напряжения	230
3.3. «Самодельные» радиодетали	238
Конденсатор	238
Резистор	239
Полупроводниковые приборы	241
Плавкие предохранители	243
3.4. Условная маркировка элементов	245
Маркировка резисторов	245
Маркировка конденсаторов	249
Маркировка полупроводниковых элементов	253
3.5. Справочный материал	258
Транзисторы	258
Диоды, варикапы, стабилитроны, тиристоры	269
Тиристоры	277
Стабилизаторы напряжения	279
Микросхемы памяти	281