

## Работа 4.4. Усилители мощности

Усилители мощности используют в выходных каскадах усилителей. Их основное назначение – передача заданной мощности в нагрузку. Коэффициент усиления напряжения является для усилителей мощности второстепенным параметром. Наиболее важными являются коэффициент усиления мощности, КПД, степень нелинейных искажений выходного сигнала. Как правило, коэффициент усиления напряжения выходных каскадов близок к единице. Усиление мощности достигается за счет усиления тока. Необходимость увеличения КПД обусловлена тем, что большая часть мощности источника питания потребляется выходными каскадами усилителя. Поэтому слишком большая мощность, рассеиваемая усилителем, может привести к перегреву транзисторов.

Существует несколько режимов работы усилителей, отличающихся положением рабочей точки на передаточной характеристике и обеспечивающих различные значения КПД. Различают три основных режима усилительных каскадов или классов усиления: *A*, *B* и *C*. Они отличаются коэффициентом полезного действия и уровнем нелинейных искажений.

Рассмотрим основные режимы работы усилителей на примере эмиттерного повторителя (рис. 4.4.1), который часто используют в качестве усилителя мощности. Во всех рассматриваемых случаях коллекторный переход смещен в обратном направлении. Режим усилителя зависит от того, как смещен эмиттерный переход в отсутствие входного сигнала.

**Режим А.** В этом режиме эмиттерный переход смещен так, что схема всегда функционирует на линейном участке передаточной характеристики, а транзистор никогда не переходит в режим насыщения. В схеме на рис. 4.4.1 напряжения  $E_K$  и  $E_Э$  равны, и рабочая точка находится на линейном участке передаточной характеристики (рис. 4.4.2).

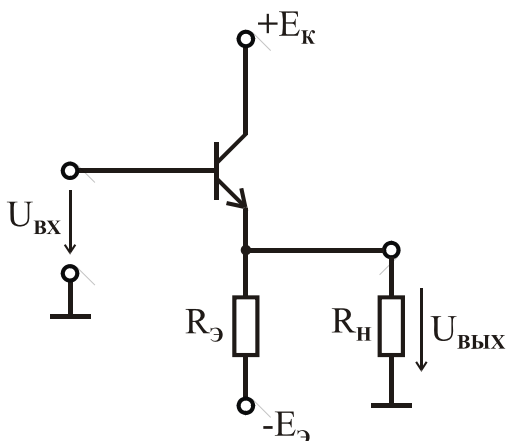


Рис. 4.4.1

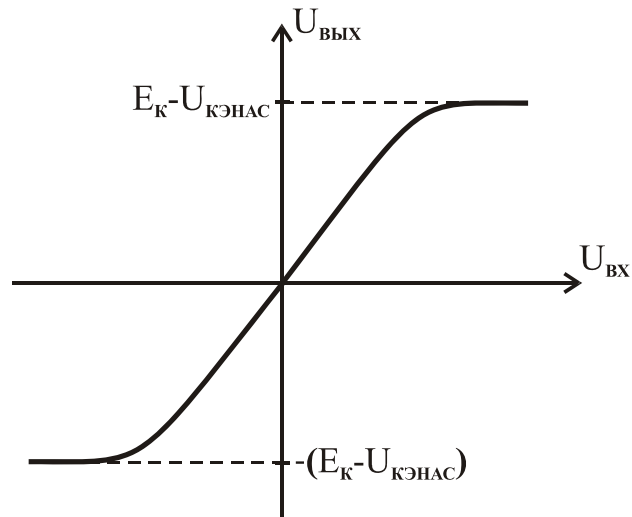


Рис. 4.4.2

Полный размах напряжения выходного сигнала не превышает напряжения питания  $E_k$ . Например, если  $E_k = 10$  В, то и амплитуда выходного напряжения не может превышать 10 В. Если к тому же необходимо обеспечить минимальные искажения выходного сигнала, его размах ограничивают значениями, меньшими  $E_k$ .

Мощность, отдаваемая в нагрузку усилителем, работающим в режиме А

$$P_H = \frac{(U_{\text{ВЫХ}} / \sqrt{2})^2}{R_H} = \frac{1}{2} \frac{U_{\text{ВЫХ}}^2}{R_H}.$$

Здесь  $U_{\text{ВЫХ}}$  – амплитуда выходного напряжения. Мощность, отдаваемая источником питания,

$$P_{\text{ист}} = 2E_k I.$$

В последнем выражении учтено, что в схеме на рис. 4.4.1 используется расщепленный источник и  $E_k = E_{\text{э}}$ .

Коэффициент полезного действия равен отношению мощности, выделяемой в нагрузке, к мощности, отдаваемой источником питания:

$$\eta = \frac{P_H}{P_{\text{ист}}} = \frac{1}{4} \frac{U_{\text{ВЫХ}}^2}{R_H E_k I}.$$

Коэффициент полезного действия достигнет наибольшего значения, равного 25 %, когда амплитуда выходного напряжения максимальна, т. е.  $U_{\text{ВЫХ}} = E_k = R_H I$ . Поскольку для уменьшения нелинейных искажений амплитуду выходных напряжений ограничивают значениями, меньшими  $E_k$ , КПД усилителей, работающих в режиме А, оказывается еще меньше. Если в

нагрузке выделяется максимальная мощность (при равенстве выходного сопротивления повторителя и сопротивления нагрузки), а размах выходного напряжения равен  $E_k/2$ , то КПД равен всего лишь 6.25 %.

Низкий КПД в режиме А определяется тем, что постоянная составляющая тока через транзистор не зависит от входного сигнала. Поэтому мощность, потребляемая от источника в этом режиме, постоянна. Более того, мощность, рассеиваемая транзистором, максимальна при отсутствии входного сигнала.

Поскольку коэффициент полезного действия усилителей, работающих в режиме А, невелик, в качестве усилителей мощности их не используют. Главное достоинство режима А состоит в малой величине искажений усиливаемого сигнала.

**Режим В.** В этом режиме эмиттерный переход смещен так, что рабочая точка находится на границе области отсечки. Обратимся еще раз к схеме эмиттерного повторителя на рис. 4.4.1. Примем, что напряжение  $E_3 = 0$ . Передаточная характеристика, соответствующая этому случаю, показана на рис. 4.4.3.

Если входной сигнал отсутствует, эмиттерный переход смещен в обратном направлении и транзистор находится в состоянии отсечки. За счет этого снижается мощность, потребляемая от источника питания.

Когда входное напряжение положительно, эмиттерный переход отпирается и транзистор переходит в активный режим. Выходное напряжение повторяет форму положительной полуволны выходного напряжения. Во время отрицательной полуволны входного напряжения эмиттерный переход смещен в обратном направлении, транзистор находится в состоянии отсечки и выходное напряжение равно нулю. Графики напряжений на входе и выходе повторителя, работающего в режиме В, показаны на рис. 4.4.4.

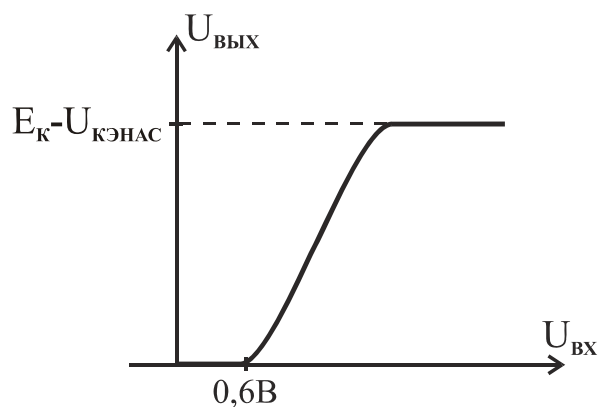


Рис. 4.4.3

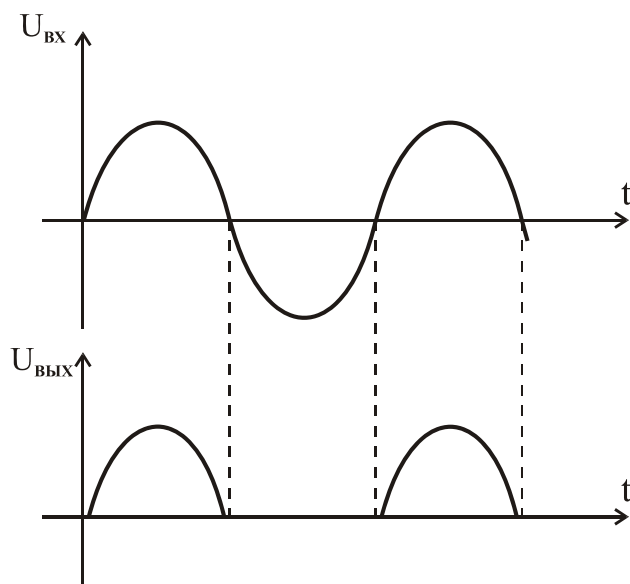


Рис. 4.4.4

Режим В позволяет значительно увеличить КПД усилителя, поскольку при отсутствии входного сигнала ток транзистора равен нулю. Следовательно, равна нулю и мощность, потребляемая от источника. Однако форма выходного сигнала при этом сильно искажена.

**Двухтактный эмиттерный повторитель.** Для того чтобы получить на выходе сигнал обеих полярностей, используют комплементарную схему, содержащую транзисторы  $n-p-n$  и  $p-n-p$ -типов (рис. 4.4.5). Она состоит по существу из двух эмиттерных повторителей, один из которых усиливает положительную, а другой – отрицательную полуволну входного сигнала. Эту схему часто называют *двухтактным эмиттерным повторителем*.

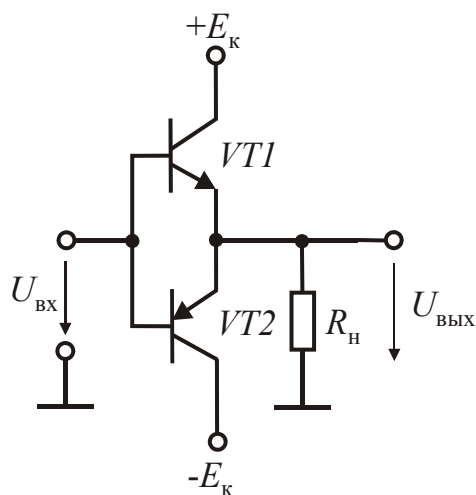


Рис. 4.4.5

При отсутствии входного сигнала оба транзистора находятся в состоянии отсечки, поскольку напряжения на эмиттерных переходах равны нулю. Во время положительной полуволны входного напряжения

открывается  $n-p-n$ -транзистор  $VT1$ , а во время отрицательной –  $p-n-p$ -транзистор  $VT2$ .

Коэффициент полезного действия двухтактного эмиттерного повторителя

$$\eta = \left( \frac{1}{2} \frac{U_{\text{ВЫХ}}^2}{R_{\text{H}}} \right) / \left( \frac{2}{\pi} \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{H}}} E_{\text{K}} \right) = \frac{\pi U_{\text{ВЫХ}}}{4 E_{\text{K}}}. \quad (4.4.1)$$

Здесь  $U_{\text{ВЫХ}}$  – амплитуда выходного напряжения.

Из (4.4.1) следует, что КПД схемы возрастает с увеличением амплитуды выходного напряжения и достигает своего максимального значения при  $U_{\text{ВЫХ}} = E_{\text{K}}$ :

$$\eta = \frac{\pi}{4} = 0.785.$$

Таким образом, двухтактная схема обладает значительно большим КПД, чем обычный эмиттерный повторитель.

Напряжение на выходе двухтактной схемы отличается от выходного на величину падения напряжения на эмиттерном переходе. Следовательно,  $U_{\text{ВЫХ}} \approx U_{\text{ВХ}}$ , т. е. схема является повторителем напряжения. Коэффициент усиления тока  $K_I \approx \beta$ . Усиление мощности происходит за счет усиления тока.

*Пример 4.4.1.* Рассчитать двухтактный усилитель мощности, если мощность нагрузки  $P_{\text{H}} = 20$  Вт, а сопротивление нагрузки  $R_{\text{H}} = 8$  Ом. Для уменьшения нелинейных искажений напряжение источника питания должно превышать амплитуду выходного напряжения на 5 В.

*Решение.* Поскольку мощность, выделяемая в нагрузке:

$$P_{\text{H}} = \frac{(U_{\text{ВЫХ}} / \sqrt{2})^2}{R_{\text{H}}},$$

амплитуда выходного напряжения

$$U_{\text{ВЫХ}} = \sqrt{2P_{\text{H}}R_{\text{H}}} = \sqrt{2 \cdot 20 \cdot 8} = 17.9 \text{ В}.$$

Напряжение питания  $E_{\text{K}} = U_{\text{ВЫХ}} + 5 = 17.9 + 5 \approx 23$  В.

Амплитуда выходного тока

$$I_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{H}}} = \frac{17.9}{8} = 2.24 \text{ А}.$$

Мощность, потребляемая транзисторами от источников питания:

$$P_+ + P_- = \frac{2 U_{\text{ВЫХ}}}{\pi R_{\text{Н}}} E_{\text{к}} = \frac{2 \cdot 17.9}{\pi \cdot 8} 23 = 32.8 \text{ Вт.}$$

Максимальная мощность, рассеиваемая каждым транзистором:

$$P_{\text{VT1}} = P_{\text{VT2}} = \frac{E_{\text{к}}^2}{\pi^2 R_{\text{Н}}} = \frac{529}{\pi^2 \cdot 8} = 6.7 \text{ Вт.}$$

Двухтактной схеме на рис. 4.4.5 свойственны значительные нелинейные искажения, называемые *переходными*. Они обусловлены нелинейностью начального участка передаточной характеристики эмиттерного повторителя (рис. 4.4.6). В диапазоне изменения входного напряжения  $-0.6 < u_{\text{ВХ}} < 0.6$  В оба транзистора находятся в режиме отсечки и передаточная характеристика имеет горизонтальный излом. Переходные искажения проявляются тем сильнее, чем меньше размах входного напряжения.

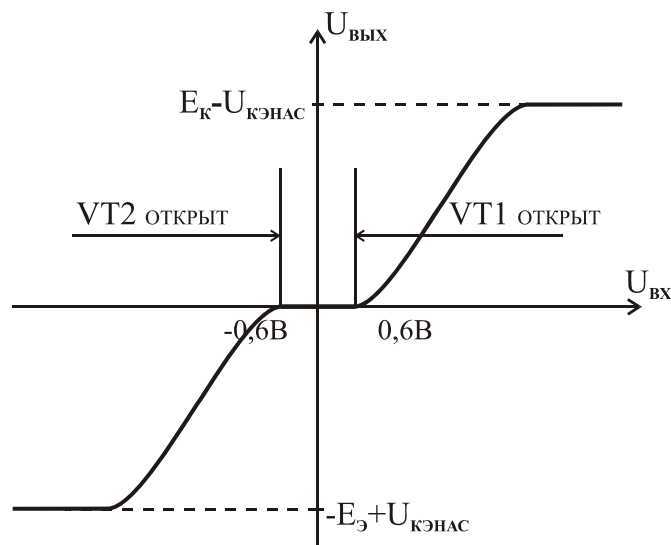


Рис. 4.4.6

Для уменьшения переходных искажений используют промежуточный режим АВ. В этом режиме на базы транзисторов подаются небольшие напряжения смещения. Это позволяет устранить излом начального участка передаточной характеристики и уменьшить переходные искажения.

Обычно источником смещения служат диоды, стабилитроны или транзисторы в диодном включении. Один из вариантов схемы, работающей в режиме АВ, показан на рис. 4.4.7.

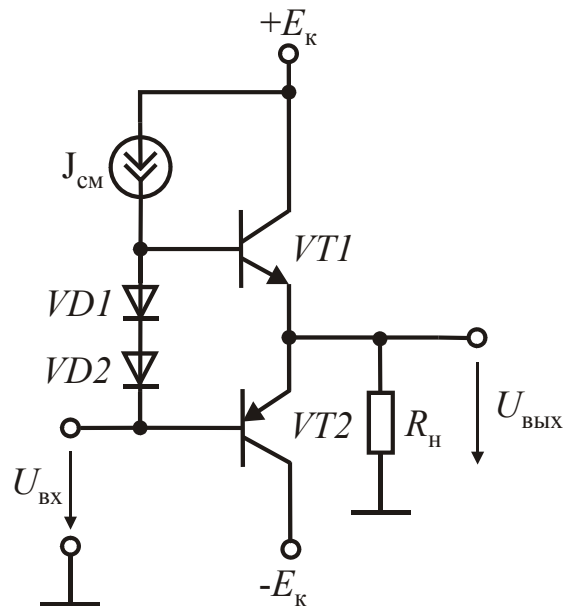


Рис. 4.4.7

Диоды, включенные между базами транзисторов, создают на эмиттерных переходах транзисторов дополнительное смещение. За счет этого при  $u_{\text{вх}} = 0$  транзисторы работают в активном режиме. Как только входное напряжение становится положительным, транзистор  $VT2$  переходит в режим отсечки. При отрицательном входном напряжении в отсечке находится  $VT1$ . При  $u_{\text{вх}} = 0$  по крайней мере один из транзисторов находится в активном режиме. Таким образом, диоды существенно уменьшают переходные искажения и позволяют получить передаточную характеристику, близкую к линейной. Часто в качестве диодов используют транзисторы с зашунтированными коллекторными переходами.

Другая схема усилителя мощности, имеющего малые переходные искажения, показана на рис. 4.4.8. На входе включены эмиттерные повторители на транзисторах  $VT1$  и  $VT2$ . Они создают необходимое напряжение смещения на эмиттерных переходах транзисторов  $VT3$  и  $VT4$ . Кроме того, эмиттерные повторители обеспечивают высокое входное сопротивление схемы.

Резисторы  $R_1$  и  $R_2$  используются для задания эмиттерных токов  $VT1$   $VT2$  и базовых токов выходных транзисторов. Если транзисторы  $VT1 - VT4$  согласованы, то при  $u_{\text{вх}} = 0$  и  $R_{\text{н}} = \infty$  их токи одинаковы. Резисторы  $R_3$  и  $R_4$  являются цепями обратной связи соответственно для  $VT3$  и  $VT4$ .

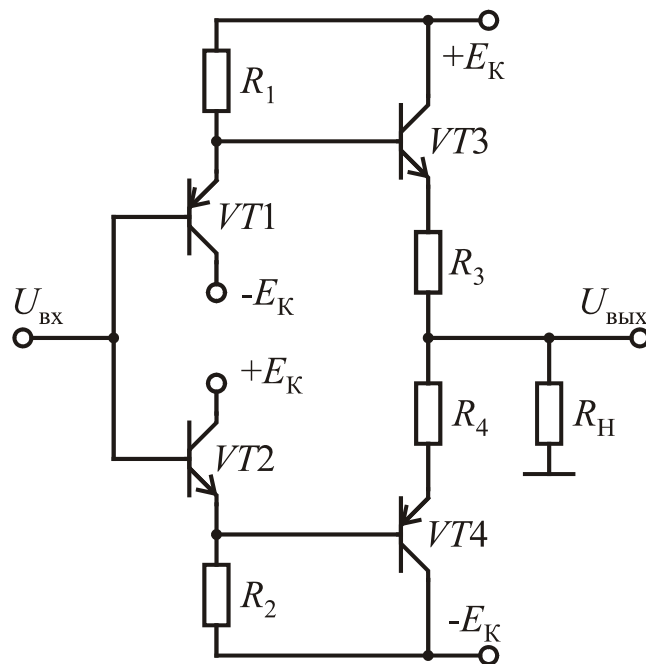


Рис. 4.4.8

Таким образом, цепь на рис. 4.4.8 является буферным усилителем, работающим в режиме АВ, и имеющим коэффициент усиления напряжения, равный единице.

### Рекомендации по сборке схем

В схемах усилителей мощности использовать модели *n-p-n* транзисторов Q2N3904 или Q2N2222 и модели *p-n-p* –транзисторов Q2N3907A и Q2N3906 из библиотеки EVAL.slb. Примеры схем можно найти в файлах W4\_4\_1, W4\_4\_2, W4\_4\_3 в папке MsimEv\_8\Labs.

### Рекомендуемая литература

1. Гусев, В. Г. Электроника и микропроцессорная техника: учеб. для вузов / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2004. – 790 с.
2. Быстров, Ю. А. Электронные цепи и микросхемотехника: учеб. / Ю. А. Быстров, И. Г. Мироненко. – М.: Высш. шк., 2002. – 384 с.: ил.
3. Степаненко, И. П. Основы микроэлектроники: учеб. пособие для вузов / И.П. Степаненко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2003. – 488 с.: ил.
4. Хоровиц, П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл: пер. с англ. – 6-е изд. – М.: Мир, 2003. – 704 с., ил.
5. Довгун, В. П. Электротехника и электроника: учеб. пособие: в 2-х ч. Ч. 2 / В. П. Довгун. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 252 с.