

1. Назначение и характеристики электронных усилителей
2. Усилительный каскад на биполярном транзисторе.
3. Усилители мощности
4. Обратные связи в усилителях

1. Назначение и характеристики электронных усилителей

Электронное устройство, предназначенное для увеличения параметров (тока, напряжения, мощности) электрического сигнала, называется усилителем. Необходимость в таких устройствах возникает при измерении и передаче сигналов, построении систем контроля, автоматизации технологических процессов и т. п.

Независимо от используемых элементов и схемотехнических решений в простейшем виде структурную схему любого усилителя можно представить в виде двух последовательно соединенных элементов: линейного (*ЛЭ*) и нелинейного (*НЭ*), включенных в цепь источника питания  $E_{и.п}$  (рис. 16.1, а).

*Линейными* считают элементы, у которых сопротивление практически не зависит от тока и напряжения.

Обладают ли линейными свойствами резистор, индуктивность, емкость? — а) да; б) нет.

Сопротивление *нелинейных* элементов в значительной степени зависит от тока или напряжения. Эти приборы могут иметь три и более выводов (транзисторы, электрон-

296

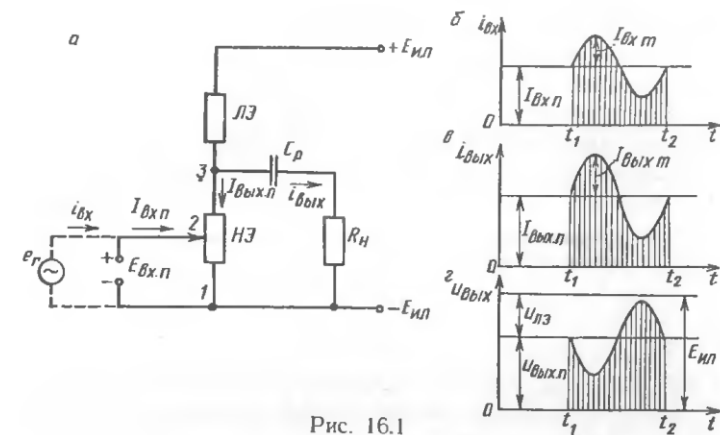


Рис. 16.1

ные лампы и др.). В усилителях в качестве *НЭ* чаще всего используются транзисторы.

Рассмотрим принцип действия усилителя (рис. 16.1, а).

Допустим, что ко входным зажимам 1—2 *НЭ* (рис. 16.1, а) подключен источник постоянной ЭДС  $E_{вх.п}$ , который называют источником начального смещения или тока входной цепи. Под действием  $E_{вх.п}$  во входной цепи  $+E_{вх.п}$ , *НЭ*,  $-E_{вх.п}$  будет протекать постоянный ток  $I_{вх.п}$ , который называют током начального смещения или тока покоя (интервал времени  $0 - t_1$  на рис. 16.1, б). Так как  $I_{вх.п} = \text{const}$ , то сопротивление *НЭ* будет постоянным.

Однако *НЭ* включен последовательно с *ЛЭ* и в цепь мощного источника питания  $E_{и.п}$ , поэтому через *ЛЭ* и *НЭ* будет протекать постоянный ток  $I_{вых.п}$ , обусловленный источником  $E_{и.п}$  (рис. 16.1, в). Цепь  $+E_{и.п}$ , *ЛЭ*, *НЭ*,  $-E_{и.п}$  называется главной (выходной) цепью усилителя.

Обычно  $E_{и.п} \gg E_{вх.п}$ , поэтому  $I_{вых.п} \gg I_{вх.п}$ . При этом напряжение распределяется между *ЛЭ* и *НЭ* прямо пропорционально их сопротивлениям (рис. 16.1, г). Ток  $I_{вых.п}$  и напряжение  $U_{вых.п}$  (рис. 16.1, в, г) называются соответственно током и напряжением начального смещения (или покоя) в выходной цепи.

Протекает ли ток начального смещения через резистор  $R_H$ ? — в) да; г) нет.

Если подключить параллельно источнику  $E_{вх.п}$  (можно и последовательно) источник переменной ЭДС  $e_r$  (генератор усиливаемого сигнала), то ток во входной цепи определяется суммарным действием  $E_{вх.п}$  и  $e_r$ . Во входной цепи

возникает переменная составляющая тока. На рис. 16.1, б (интервал времени  $t_1 - t_2$ ) показан характер изменения входного тока (заштрихованная площадь), когда  $e_r$  изменяется по синусоидальному закону.

Переменное напряжение  $e_r$  модулирует сопротивление  $HЭ$ , а следовательно, и ток в главной цепи усилителя, но его значение будет значительно больше тока входной цепи (рис. 16.1, в).

Наличие переменной составляющей тока в главной цепи приведет к перераспределению (во времени) напряжения источника  $E_{п.п}$  между  $LЭ$  и  $HЭ$ . Иначе говоря, в выходной цепи появляется переменная составляющая напряжения. На рис. 16.1, г показан график изменения напряжения на  $HЭ$  (заштрихованная площадь) при наличии во входной цепи ЭДС  $E_{вх.п}$  и  $e_r$ .

Если параллельно  $HЭ$  (зажимы 1—3) через конденсатор  $C_p$  подключить нагрузку  $R_n$  (приемник усиленного сигнала), то через  $R_n$  будет протекать только переменный ток, обусловленный переменной составляющей напряжения на  $HЭ$ .

Ток и напряжение в нагрузке  $R_n$  по величине могут значительно превышать переменные составляющие входного тока и напряжения, но имеют такую же форму, если соблюдаются условия  $I_{вх.п} > I_{вх.т}$ ,  $I_{вых.п} > I_{вых.т}$ ,  $U_{вых.п} > U_{вых.т}$ .

Можно ли получить режим усиления сигнала, если  $R_n$  подключить параллельно  $LЭ$ ? — д) да; е) нет.

Из рассмотренного можно сделать следующие выводы.

1. При воздействии входного сигнала на  $HЭ$  изменяется его параметр (сопротивление), в результате чего в главной цепи усилителя возникают переменные составляющие тока и напряжения. Усилительные свойства схемы проявляются тем больше, чем в больших пределах изменяется параметр  $HЭ$ .

2. Усиление сигнала осуществляется за счет энергии источника питания главной цепи  $E_{п.п}$ .

3. Во входной цепи необходимо создать режим начального смещения.

Рассмотрим основные параметры усилителя.

**Коэффициентом усиления** усилителя называют отношение выходной величины ко входной. Для усилителя принято определять три коэффициента усиления: по напряжению  $K_U$ , по току  $K_I$ , по мощности  $K_P$ . Значения  $K_U$  и  $K_I$  определяют по отношению приращений или амплитуд выходных и входных величин, т. е.

$$K_U = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta U_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{вых т}}}{U_{\text{вх т}}}; \quad K_I = \frac{\Delta I_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{вх}}} = \frac{I_{\text{вых т}}}{I_{\text{вх т}}}$$

Значение  $K_P$  определяется как отношение переменной мощности, выделяющейся в нагрузке, к мощности входного сигнала  $K_P = P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$ . Коэффициент  $K_P$  можно определять как  $K_P = K_U K_I$ .

Из трех коэффициентов усиления всегда  $K_P > 1$ , так как при  $K_P < 1$  сигнал не усиливается. Из этого следует, что два других коэффициента ( $K_U$ ,  $K_I$ ) должны принимать значения  $K_U > 1$ ,  $K_I > 1$  или  $K_U > 1$ ,  $K_I < 1$ , либо  $K_U < 1$ ,  $K_I > 1$ .

В зависимости от того, какой из коэффициентов ( $K_U$  или  $K_I$ ) больше единицы, говорят об усилении напряжения или тока. В справочниках чаще всего дается значение  $K_U$ .

Приведенная на рис. 16.1, а схема называется однокаскадной. Для получения требуемого значения выходного напряжения иногда недостаточно одного каскада. В таких случаях прибегают к последовательному соединению каскадов (рис. 16.2).

Первый каскад называют входным, а последний — выходным. Их схемные решения могут отличаться. Связь между каскадами бывает непосредственная (гальваническая) или с помощью конденсаторов, индуктивностей или трансформаторов. Для многокаскадной схемы общий коэффициент усиления (например,  $K_U$ ) равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов, т. е.  $K_U = K_{U1} \cdot K_{U2} \dots K_{Un}$ .

При изменении частоты сигнала в широких пределах коэффициент усиления будет: ж) постоянным? з) изменится?

**Амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ)** усилителя называется зависимость амплитуды выходного сигнала от частоты. Параметры элементов усилителя зависят от частоты, поэтому величина выходного сигнала будет

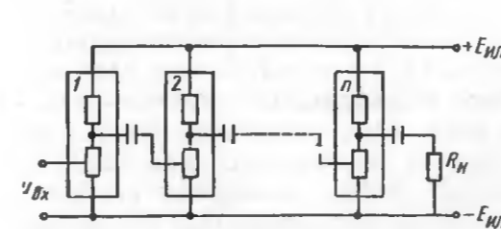


Рис. 16.2

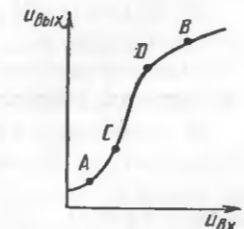


Рис. 16.3

постоянной только в определенном диапазоне частот, называемом полосой пропускания. За пределами полосы пропускания усиление может быть ничтожно малым.

*Фазочастотной характеристикой (ФЧХ)* усилителя называется зависимость фазы выходного сигнала от частоты. Причина появления фазовых сдвигов та же, что и в предыдущем случае.

Нестабильность коэффициента усиления и фазовый сдвиг определяют так называемые линейные искажения. Они не вызывают искажений формы синусоидального входного сигнала.

*Амплитудная характеристика (АХ)* усилителя представляет собой зависимость  $u_{\text{вых}} = f(u_{\text{вх}})$ . В силу нелинейных свойств транзисторов и ламп эта характеристика (рис. 16.3) имеет явно выраженный участок насыщения. Нелинейный характер АХ является причиной искажений формы выходного сигнала, которые называются нелинейными. По АХ можно определить рабочий участок, где будет минимальное искажение формы выходного сигнала.

Какой участок АХ (рис. 16.3) соответствует минимальному искажению формы выходного сигнала? — и) СД; к) АВ.

*Коэффициентом полезного действия (КПД)* усилителя называется отношение мощности, выделяющейся в нагрузке  $P_{\text{вых}}$ , к мощности, потребляемой от источника питания  $P_0$ , т. е.  $\eta = P_{\text{вых}}/P_0$ . КПД показывает, какая часть мощности источника питания преобразуется в переменный сигнал. Значение  $\eta$  существенно зависит от выбора начального смещения.

*Входным  $R_{\text{вх}}$  и выходным  $R_{\text{вых}}$  сопротивлением* усилителя называют соответственно сопротивление со стороны входных и выходных зажимов.

Усилители можно классифицировать по многим признакам, однако наиболее общим признаком является режим работы. По режиму работы усилители подразделяются на линейные и нелинейные.

В линейных усилителях сохраняется пропорциональность между мгновенными значениями выходного и входного напряжения (тока), в результате чего искажения формы сигнала у него минимальные.

В зависимости от вида АЧХ линейные усилители подразделяются на *усилители постоянного тока (УПТ)*, *усилители звуковых частот (УЗЧ)*, *усилители высоких частот (УВЧ)*, *широкополосные усилители (ШПУ)*, *узкополосные усилители (УПУ)*.

В усилителях с нелинейным режимом работы отсутствует пропорциональность между мгновенными значениями выходного и входного сигналов. Такие усилители применяются для преобразования формы сигналов, ограничения амплитуд и т. п.

Ответы: а, г, д, з, и.

? 1. Что называется усилителем? Где он применяется? 2. Какие основные элементы содержит усилитель? 3. За счет какого источника энергии усиливается сигнал? 4. Что такое коэффициент усиления? 5. Какие основные характеристики усилителя? 6. Как классифицируются усилители?

## 2. УСИЛИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ

Для построения входных и промежуточных каскадов многокаскадных усилителей чаще всего используется схема ОЭ, приведенная на рис. 16.4, а. Для этой схемы коэффициенты усиления по напряжению, току и мощности больше единицы.

Источник питания  $E_K$ , резистор  $R_K$  и транзистор  $VT$  образуют главную цепь усилителя. Приемник усиленного сигнала  $R_H$  через разделительный конденсатор  $C_{p2}$  подключен к коллектору и эмиттеру  $VT$  — *выходная цепь* усилителя.

Генератор усиливаемого сигнала  $e_r$  подключен к базе и эмиттеру транзистора через разделительный конденсатор  $C_{p1}$ . Резистор  $R_r$  представляет внутреннее сопротивление

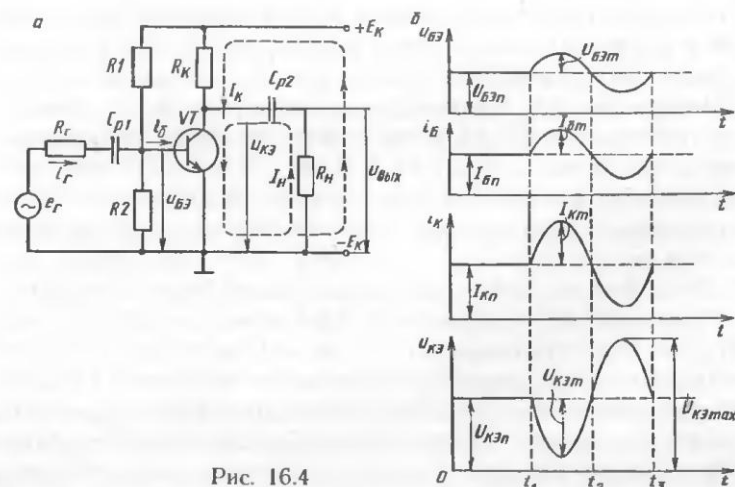


Рис. 16.4

генератора  $e_r$ . Цепь  $e_r, C_{p1}$ , база — эмиттер транзистора — это *входная цепь* усилителя. Эмиттер является общей точкой для входной и выходной цепей, отсюда и название схемы «общий эмиттер» (ОЭ).

Делитель напряжения на резисторах  $R_1, R_2$  создает режим начального смещения на базе транзистора, т. е. падение напряжения на резисторе  $R_2$  выполняет ту же роль, что источник  $E_{вх.н}$  в схеме рис. 16.1, а.

Рассмотрим работу схемы с помощью временных диаграмм (рис. 16.4, б).

В интервале времени  $0-t_1$  при  $e_r = 0$  в базовой цепи протекает постоянный ток  $I_{Бп}$ , определяемый напряжением  $U_{БЭп}$ . Ток в коллекторной цепи транзистора также постоянный и связан с током базы через коэффициент передачи транзистора по току  $\beta$  следующим образом:

$$I_{Кп} = \beta I_{Бп}. \quad (16.1)$$

Напряжение  $U_{КЭп}$  между коллектором и эмиттером транзистора постоянное. Интервал  $0-t_1$  соответствует режиму покоя.

Если на вход усилителя подан переменный сигнал  $e_r = U_m \sin \omega t$ , то в течение положительного полупериода (интервал  $t_1-t_2$ ) эмиттерный переход транзистора смещается в прямом направлении по синусоидальному закону. Это вызывает приращение тока базы, следовательно, и коллекторного тока, согласно (16.1). Увеличивается падение напряжения на резисторе  $R_K$  и уменьшается напряжение между коллектором и эмиттером транзистора  $U_{КЭ}$ . В течение отрицательного полупериода (интервал  $t_2-t_3$ ) уменьшается ток базы и коллектора. Уменьшается падение напряжения на резисторе  $R_K$  и увеличивается напряжение между коллектором и эмиттером. Временные диаграммы напряжений и токов в базовой и коллекторной цепях приведены на рис. 16.4, б.

Из рассмотренного видно, что при увеличении входного напряжения напряжение на нагрузке уменьшается, и наоборот.

Какой фазовый сдвиг между выходным и входным сигналами в схеме рис. 16.4, а? — а)  $0^\circ$ ; б)  $180^\circ$ .

Численные соотношения в схеме усилителя можно определить графоаналитическим методом, если воспользоваться статическими входными и выходными характеристиками транзистора (рис. 16.5, а, б).

При выборе значения напряжения начального смеще-

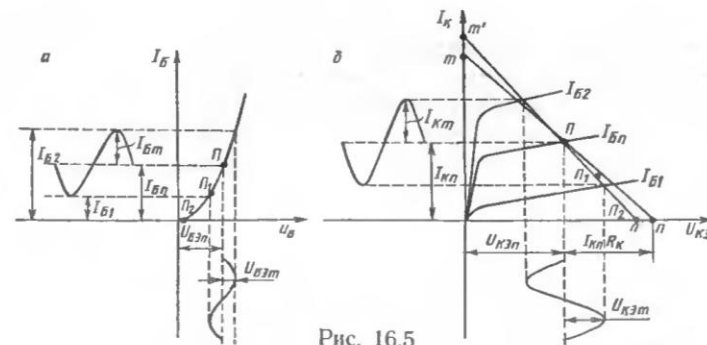


Рис. 16.5

ния в базовой цепи  $U_{БЭп}$  ток покоя базы  $I_{Бп}$  однозначно определяется по характеристике  $I_B = f(U_{БЭ})$  (точка  $P$  на рис. 16.5, а). На рис. 16.5, а показан также характер изменения тока базы при наличии на входе сигнала  $e_r = U_m \sin \omega t$ .

Для главной цепи усилителя можно записать выражение

$$U_{КЭ} = E_K - I_K R_K, \quad (16.2)$$

которое называется *уравнением линии нагрузки по постоянному току*. Оно характеризует распределение напряжения источника  $E_K$  между резистором  $R_K$  и транзистором  $VT$  при изменении тока коллектора. В координатах  $U_{КЭ} I_K$  (рис. 16.5, б) уравнение (16.2) можно построить по двум точкам: при  $I_K = 0$  все напряжение источника  $E_K$  приложено к транзистору (точка  $n$  на рис. 16.5, б); если же сопротивление транзистора ничтожно мало ( $U_{КЭ} = 0$ ), то в коллекторной цепи будет максимальный ток, равный  $I_K = E_K / R_K$  (точка  $m$  на рис. 16.5, б).

Поскольку ток покоя коллектора  $I_{Кп}$  удовлетворяет выражению (16.2), то пересечение линии нагрузки с характеристикой  $I_K = f(U_{КЭ})$  при  $I_B = I_{Бп}$  определяет положение точки покоя  $P$  в выходной цепи. Проекция этой точки на оси  $I_K$  и  $U_{КЭ}$  дает численное значение  $I_{Кп}$  и  $U_{КЭп}$  в главной цепи усилителя (рис. 16.5, б).

Наличие переменного сигнала  $e_r$  на входе усилителя вызывает переменную составляющую тока и напряжения в главной цепи усилителя. Для переменного тока внутренние сопротивление источника  $E_K$  и сопротивление конденсатора  $C_{p2}$  ничтожно малы. Поэтому относительно переменного напряжения, возникающего между коллектором и эмиттером транзистора ( $U_{КЭ}$ ), резисторы  $R_K$  и  $R_n$  соеди-



нены параллельно. Контуры, по которым протекает переменный ток в выходной цепи, показаны на рис. 16.4, *а* штриховыми линиями. Результирующее сопротивление выходной цепи для переменного тока определяется параллельным сложением резисторов  $R_K$  и  $R_H$  и равно  $R_{KH} = R_K R_H / (R_K + R_H)$ . Линия нагрузки для переменного тока определяется величиной  $R_{KH}$  и также проходит через точку  $\Pi$ , но идет несколько круче, так как  $R_{KH} < R_K$  (линия  $m'n'$  на рис. 16.5, *б*).

Мгновенные значения тока и напряжения в выходной цепи при наличии переменного сигнала определяются пересечением линии  $m'n'$  с выходными характеристиками транзистора. На рис. 16.5, *б* построены кривые изменения тока и напряжения в выходной цепи ( $i_K$ ,  $u_K$ ) для случая синусоидального входного сигнала. По результатам графического построения можно определить:

$$K_U = U_{KЭм} / U_{БЭм}; K_I = I_{Kм} / I_{Бм}.$$

При каких условиях выходной сигнал будет иметь минимальные искажения: в)  $U_{KЭм} < U_{KЭп}$ ,  $I_{Kм} < I_{KЭп}$ ? г)  $U_{KЭм} > U_{KЭп}$ ,  $I_{Kм} > I_{Кп}$ ?

В рассмотренной схеме положение точки начального смещения  $\Pi$  выбрано посередине линии  $mn$ . Такой режим носит название *режима класса А*. Он характеризуется условиями  $U_{KЭп} > U_{KЭм}$  и  $I_{Кп} > I_{Kм}$ . В этом режиме мощность, потребляемая от источника  $E_K$ , определяется  $P_0 = U_{KЭп} I_{Кп}$ , а мощность переменного выходного сигнала

$$P_{\text{вык}} = \frac{1}{2} U_{Kм} I_{Kм}. \text{ Следовательно, КПД усилителя } \eta = \frac{1}{2} \frac{U_{KЭм} I_{Kм}}{U_{KЭп} I_{Кп}}.$$

Очевидно, что максимальное значение КПД усилителя возможно при условии  $U_{KЭп} = U_{KЭм}$  и  $I_{Кп} = I_{Kм}$  и составит  $\eta = 0,5$ .

Достоинство режима класса А в том, что обеспечивает минимальное искажение формы усиливаемого сигнала. Главным недостатком этого режима является низкое значение КПД усилителя. Практическое значение КПД в этом режиме  $\eta \leq 0,35$ .

Более высокое значение КПД может быть достигнуто при работе усилителя в режиме класса АВ или В. Чтобы перейти в режим АВ или В, необходимо уменьшить величину начального смещения на базе транзистора.

Что для этого нужно сделать: д) увеличить  $R_1$  и уменьшить  $R_2$ ? е) уменьшить  $R_1$  и увеличить  $R_2$ ?

На рис. 16.5, *а*, *б* положение точки начального смещения, соответствующее режимам класса АВ и В, обозначено соответственно  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ .

Из приведенных рассуждений видно, что режим начального смещения зависит от  $R_1$  и  $R_2$ . Однако в действительности на режим начального смещения существенное влияние оказывает температура, так как с изменением температуры изменяются параметры элементов схемы.

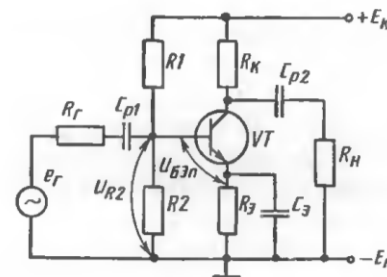


Рис. 16.6

Параметры каких элементов схемы будут в значительной степени зависеть от температуры: ж) резисторов? з) транзисторов?

Для температурной стабилизации схемы используют различные способы. Наиболее широкое применение получила схема стабилизации с помощью резистора  $R_3$  в эмиттерной цепи транзистора (рис. 16.6). Схема стабилизации работает следующим образом: при изменении тока смещения  $I_{Кп}$  в главной цепи под действием температуры изменяется падение напряжения на резисторе  $R_3$ .

Но так как для схемы на рис. 16.6 напряжение постоянного смещения  $U_{БЭп}$  определяется выражением  $U_{БЭп} = U_{R2} - I_{Кп} R_3$ , где  $U_{R2}$  — напряжение на резисторе  $R_2$ , то изменение тока  $I_{Кп}$  под действием температуры приведет к автоматическому изменению напряжения начального смещения  $U_{БЭп}$ .

Чтобы резистор  $R_3$  не влиял на значение переменного тока, он шунтируется конденсатором  $C_3$ , сопротивление которого для переменного тока мало.

Рассмотрим влияние элементов схемы на коэффициенты усиления.

Коэффициент усиления схемы по току (16.4, *а*, 16.6)

определяется как отношение переменного тока в нагрузке к переменной составляющей тока базы:

$$K_I = \frac{I_{им}}{I_{Бм}}. \quad (16.4)$$

Для переменной составляющей тока коллектора справедливо соотношение (16.1), поэтому

$$I_{Км} = \beta I_{Бм}. \quad (16.4)$$

Но ток  $I_{Км}$  распределяется обратно пропорционально сопротивлениям  $R_K$  и  $R_H$ , поэтому ток в нагрузке

$$I_{им} = \beta I_{Бм} \frac{R_K}{R_K + R_H}. \quad (16.5)$$

Подставив значение  $I_{им}$  из (16.5) в (16.3), получим

$$K_I = \beta \frac{R_K}{R_K + R_H}.$$

Из последнего выражения нетрудно показать, что если  $R_K \rightarrow \infty$ , то  $K_I \rightarrow \beta$ .

Возможен ли такой режим работы, когда  $R_K \rightarrow \infty$ ? — и) да; к) нет.

Процесс усиления возможен тогда, когда в главной цепи протекает ток. Если же  $R_K = \infty$ , то ток в главной цепи равен нулю. Следовательно, усиления не будет. На практике обычно принимают  $R_K = (3 - 5)R_H$ . Коэффициент усиления по напряжению через параметры схемы определяется следующим образом:

$$K_U = K_I \frac{R_H}{R_r + R_{вх}},$$

где  $R_{вх}$  — входное сопротивление усилителя;  $R_r$  — сопротивление генератора сигналов. Для схемы ОЭ значения  $K_U$  и  $K_P$  лежат в пределах  $K_U = 20 - 100$ ,  $K_P = (0,2 - 5) \cdot 10^3$ .

Ответы: б, в, д, з, к.

- ? 1. Какие элементы образуют входную и выходную цепи усилителя? 2. За счет каких элементов обеспечивается режим начального смещения? 3. Что означает режим работы в классах А, АВ, В? 4. На что влияет выбор режима начального смещения? 5. Что такое линия нагрузки? Как она строится? 6. Для чего нужна термостабилизация схемы? 7. Как влияют параметры схемы усилителя на коэффициенты  $K_U$  и  $K_I$ ?

**Общие положения.** Основное назначение выходных каскадов (усилителей мощности) — обеспечить заданную мощность в нагрузке. Они работают в режиме большого сигнала, что обуславливает большое потребление мощности от источника питания. Поэтому КПД и уровень нелинейных искажений являются существенными показателями и определяют выбор начального смещения. Чаще всего выходные каскады работают в режиме класса В или АВ. В режиме класса А они выполняются на мощность не более десятка милливольт.

Второй особенностью этих каскадов является то, что они, как правило, работают на низкоомную нагрузку. Известно, что максимальная мощность в нагрузке выделяется при равенстве сопротивления нагрузки и выходного сопротивления усилителя. Таким условиям удовлетворяют не все схемы включения транзисторов. Поэтому приходится решать вопрос согласования сопротивлений. Для этой цели используются согласующие трансформаторы. В последнее время широко применяются и бестрансформаторные схемы в интегральном исполнении.

Выходные каскады выполняются двух типов: *однотактные* и *двухтактные*. Однотактные выполняются на малую мощность и имеют КПД не выше 40%. В двухтактных схемах возможно получить КПД до 70% при удовлетворительном уровне нелинейных искажений.

Рассмотрим некоторые схемы выходных каскадов. **Схема ОК.** В приведенной на рис. 16.7 схеме элементы  $R_1, R_2, C_{p1}, C_{p2}$  выполняют ту же роль, что и в схеме на рис. 16.4. Функции ЛЭ главной цепи усилителя выполняет резистор  $R_3$ , включенный в эмиттерную цепь транзистора.

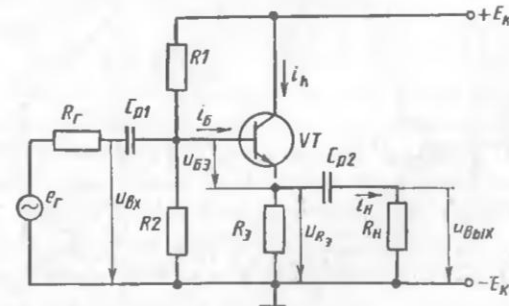


Рис. 16.7

Для переменного тока сопротивление источника  $E_K$  мало, поэтому вывод коллектора транзистора можно соединить с общей (заземленной) точкой схемы. Отсюда и название схемы «общий коллектор» (ОК). Схема ОК обладает малым выходным сопротивлением.

Принцип работы схемы такой же, как и схемы на рис. 16.4, т. е. при увеличении входного сигнала ток в главной цепи усилителя возрастает, а при уменьшении входного сигнала — уменьшается.

Какой будет в этой схеме фазовый сдвиг между  $u_{\text{вых}}$  и  $u_{\text{вх}}$ : а)  $0^\circ$ ? б)  $180^\circ$ ?

Отличительная особенность данной схемы в том, что при увеличении тока в главной цепи увеличивается напряжение на резисторе  $R_3$ , а следовательно, увеличивается  $u_{\text{вых}}$ .

Напряжение усиливаемого сигнала  $u_{\text{вх}}$  уравнивается падением напряжения на резисторе  $R_3 (u_{R_3})$  и на эмиттерном переходе транзистора  $u_{БЭ}$ , т. е.  $u_{\text{вх}} = u_{БЭ} + u_{R_3}$ . Переменная составляющая выходного напряжения снимается с резистора  $R_3$ , следовательно,

$$u_{\text{вых}} = u_{R_3} = u_{\text{вх}} - u_{БЭ}.$$

Численное значение  $u_{БЭ}$  по сравнению с  $u_{R_3}$  мало, поэтому можно считать  $u_{\text{вых}} = u_{\text{вх}}$ . Отсюда вытекает, что  $K_U = u_{\text{вых}}/u_{\text{вх}} < 1$ . В этой схеме выходное напряжение повторяет входное, поэтому ее часто называют эмиттерный повторитель.

Коэффициент усиления по току  $K_I \gg 1$ , а коэффициент усиления по мощности  $K_P \simeq K_I$ .

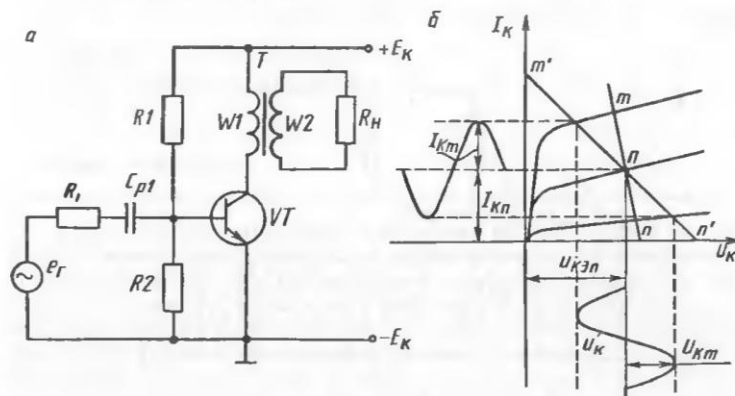


Рис. 16.8

**Однотактный каскад с трансформаторной связью.** В схеме на рис. 16.8, а роль ЛЭ выполняет трансформатор  $T$ , первичная обмотка которого включена в коллекторную цепь транзистора. При отсутствии во входной цепи переменного сигнала в главной цепи усилителя  $+E_K$ ,  $W_1$ ,  $VT$ ,  $-E_K$  протекает только ток начального смещения  $I_{Кп}$ .

В этом случае будет ли протекать ток во вторичной обмотке трансформатора? — в) да; г) нет.

Сопротивление первичной обмотки трансформатора постоянному току мало, поэтому в режиме покоя почти все напряжение источника  $E_K$  приложено к транзистору. Линия нагрузки  $m\eta$  по постоянному току идет почти вертикально (рис. 16.8, б).

При наличии переменного сигнала в главной цепи возникает переменный ток, который трансформируется во вторичную обмотку  $W_2$ . Для переменного тока сопротивление в коллекторной цепи велико и определяется выражением  $R'_n = n^2 R_n$ , где  $n = W_1/W_2$  — коэффициент трансформации трансформатора.

Линия нагрузки по переменному току займет положение  $m'n'$  (рис. 16.8, б), а ее пересечение с характеристиками транзистора определит переменные составляющие тока и напряжения в выходной цепи. На рис. 16.8, б показан характер изменения тока и напряжения в выходной цепи при синусоидальном входном сигнале.

Ток в нагрузке  $R_n$  определяется значением коэффициента трансформации. Режим согласования каскада с нагрузкой обеспечивается, если  $R_{\text{вых}} = n^2 R_n$ . Обычно из этого выражения определяют коэффициент трансформации трансформатора  $n = \sqrt{R_{\text{вых}}/R_n}$ .

Если сопротивление нагрузки  $R_n$  мало, а  $R_{\text{вых}}$  велико, то какая обмотка трансформатора должна иметь больше витков: д) первичная? е) вторичная?

**Двухтактный каскад с трансформаторной связью.** Приведенная на рис. 16.9, а схема обеспечивает высокий КПД при значительной мощности выходного сигнала. Такие каскады работают в режиме класса В или АВ.

Источник усиливаемого сигнала подключается к базовым цепям транзисторов через входной трансформатор  $T_1$ , вторичная обмотка которого состоит из двух одинаковых секций  $W_{2-1}$  и  $W_{2-2}$ . Средняя точка вторичной обмотки трансформатора  $T_1$  подключена через резистор  $R_2$  к эмиттерам транзисторов и минусу источника питания.

Первичная обмотка выходного трансформатора  $T_2$  также состоит из двух одинаковых секций  $W_{1-1}$  и  $W_{1-2}$ . Коллекторная цепь транзистора  $VT_1$  подключена к секции  $W_{1-1}$ , а транзистора  $VT_2$  — к  $W_{1-2}$ . Средняя точка первичной обмотки соединена с плюсом источника питания. Относительно источника  $E_K$  транзисторы включены параллельно.

Рассмотрим работу схемы, используя временные диаграммы тока и напряжения (рис. 16.9, б) для режима класса В.

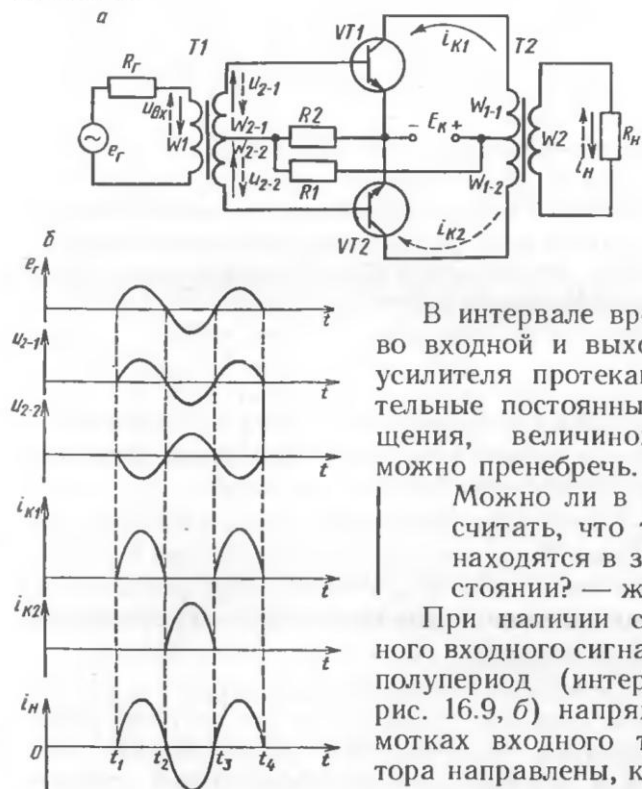


Рис. 16.9

В интервале времени  $0 - t_1$  во входной и выходной цепях усилителя протекают незначительные постоянные токи смещения, величиной которых можно пренебречь.

Можно ли в этом случае считать, что транзисторы находятся в закрытом состоянии? — ж) да; з) нет.

При наличии синусоидального входного сигнала в первый полупериод (интервал  $t_1 - t_2$ , рис. 16.9, б) напряжения в обмотках входного трансформатора направлены, как показано сплошными стрелками на рис. 16.9, а. Потенциал базы транзистора  $VT_1$  будет положительный, а потенциал базы

транзистора  $VT_2$  — отрицательный. Транзистор  $VT_1$  будет открыт, а  $VT_2$  — закрыт. В верхнем контуре выходной цепи ( $+E_K, W_{1-1}, VT_1, -E_K$ ) будет протекать ток  $i_{K1}$ , как показано сплошной стрелкой на рис. 16.9, а.

Во второй полупериод (интервал  $t_2 - t_3$ , рис. 16.9, б) напряжение в обмотках входного трансформатора изменит направление на противоположное, как показано штриховой стрелкой на рис. 16.9, а. Потенциал базы транзистора  $VT_2$  станет положительным, а базы транзистора  $VT_1$  — отрицательным. Закроется транзистор  $VT_1$  и откроется  $VT_2$ . Выходной ток  $i_{K2}$  будет протекать в нижнем контуре ( $+E_K, W_{1-2}, VT_2, -E_K$ ), как показано штриховой стрелкой на рис. 16.9, а.

Поскольку в секциях первичной обмотки выходного трансформатора  $T_2$  в течение периода ток  $i_K$  меняет направление, то во вторичной обмотке этого трансформатора и через нагрузку  $R_H$  будет протекать переменный ток. Значение выходного напряжения, приложенного к нагрузке  $R_H$ , будет зависеть от коэффициента трансформации выходного трансформатора  $T_2$ .

Из рассмотренного видно, что транзисторы работают поочередно, отсюда и название схемы «двухтактная». Продолжительность открытого состояния каждого транзистора составляет полупериод. Это позволяет выбрать транзисторы на мощность меньшую, чем мощность нагрузки. Данная схема обеспечивает также высокий КПД ( $\sim 70\%$ ) и удовлетворительные нелинейные искажения.

Можно ли схему на рис. 16.9, а выполнить в полном объеме в интегральном исполнении? — и) да; к) нет.

**Бестрансформаторные двухтактные каскады.** В рассмотренных схемах (рис. 16.8, а, рис. 16.9, а) неотъемлемыми элементами являются трансформаторы. По массе и габаритам трансформаторы могут превосходить остальные элементы схемы. Трансформаторы невозможно выполнить по интегральной технологии. Поэтому в настоящее время разработано много бестрансформаторных схем. Одна из таких схем приведена на рис. 16.10. Отличительной особенностью схемы является наличие двух источников питания и транзисторов с различной проводимостью:

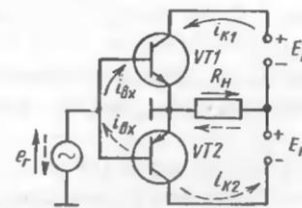


Рис. 16.10



$VT_1$   $n-p-n$ -типа, а  $VT_2$   $p-n-p$ -типа. Параметры цепи смещения (на рис. 16.10 не показаны) подбираются таким образом, чтобы обеспечить работу в режиме класса В или АВ, поэтому при отсутствии входного сигнала транзисторы закрыты и ток нагрузки равен нулю.

При воздействии входного сигнала схема работает так же, как и предыдущая (рис. 16.9, а), т. е. в течение положительного полупериода открыт транзистор  $VT_1$ , а в отрицательный полупериод —  $VT_2$ . Направление тока в нагрузке и во входных и выходных контурах показано на рисунке соответственно сплошной и штриховой стрелками.

#### 4. Обратные связи в усилителях

Обратной связью (ОС) называется процесс передачи энергии из выходной цепи усилителя во входную. Этот процесс происходит в силу физических свойств усилительных элементов (внутренняя ОС) или вследствие емкости и индуктивности схемы (паразитная ОС). Внутренняя и паразитная ОС являются неуправляемыми, и их нельзя полностью исключить.

На практике применяют внешнюю ОС путем введения в схему специальных цепей. Замкнутый контур (рис. 16.11), образованный цепью ОС и частью схемы усилителя, к которой ОС подключена, называется петлей ОС. Петля ОС может охватывать как отдельный каскад (местная ОС), так и весь усилитель (общая ОС).

Параметром ОС является коэффициент передачи, который показывает, какая часть выходного напряжения передается на вход усилителя, т. е.  $\kappa = u_{oc} / u_{вых}$ .

Если напряжение ОС  $u_{oc}$  пропорционально напряжению на нагрузке  $u_{вых}$  (рис. 16.11, а, в), то имеет место ОС по напряжению.

Как изменится  $u_{oc}$  в схемах рис. 16.11, а, в, если замкнут сопротивление нагрузки  $R_H$ : а)  $u_{oc}$  увеличится? б)  $u_{oc}$  уменьшится?

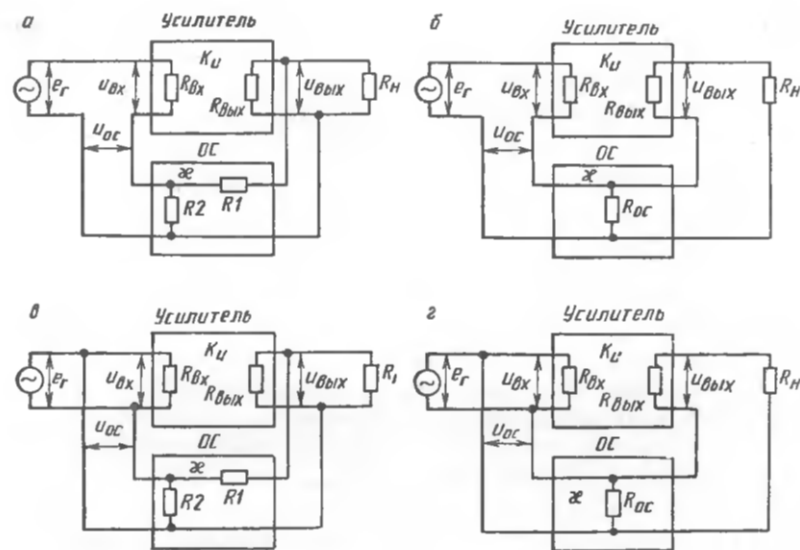


Рис. 16.11

Когда напряжение ОС  $u_{oc}$  пропорционально току нагрузки, то такая связь называется ОС по току (рис. 16.11, б, г).

Как изменится  $u_{oc}$ , если в схемах на рис. 16.11, б, г замкнут  $R_H$ : в)  $u_{oc}$  увеличится? г)  $u_{oc}$  уменьшится?

По способу передачи энергии через цепь ОС во входную цепь усилителя по отношению ко входному сигналу различают последовательную (рис. 16.11, а, б) и параллельную (рис. 16.11, в, г) ОС. Таким образом, в зависимости от схемы подключения ОС к выходу и входу усилителя можно выделить четыре схемы ОС: последовательная по напряжению, последовательная по току; параллельная по напряжению, параллельная по току. Возможны и комбинированные схемы.

Сигнал ОС, поступающий на вход усилителя, может складываться с усиливаемым сигналом или вычитаться из него. В первом случае имеет место положительная ОС, во втором — отрицательная ОС. В усилителях применяется только отрицательная ОС.

Влияет ли ОС на параметры усилителя? — д) да; е) нет.

Рассмотрим этот вопрос на примере последовательной отрицательной ОС по напряжению (рис. 16.11, а).

Для этой схемы можно записать  $e_r = u_{вх} + u_{oc}$ , поэтому

общий коэффициент усиления схемы по напряжению с учетом ОС

$$K_{U_{oc}} = \frac{u_{вых}}{u_{вх} + u_{oc}}. \quad (16.6)$$

Но напряжения  $u_{вых}$ ,  $u_{вх}$  и  $u_{oc}$  связаны между собой через коэффициент усиления усилителя  $K_U$  и коэффициент передачи звена ОС  $\kappa$  следующим образом:

$$u_{вых} = K_U u_{вх}; \quad (16.7)$$

$$u_{oc} = \kappa u_{вых} = \kappa K_U u_{вх}. \quad (16.8)$$

Подставив значения  $u_{вых}$  и  $u_{oc}$  из (16.7) и (16.8) в (16.6) и сократив на  $u_{вх}$ , получим

$$K_{U_{oc}} = \frac{K_U}{1 + \kappa K_U}. \quad (16.9)$$

Из последнего выражения видно, что ОС уменьшает коэффициент усиления схемы, но ОС стабилизирует численное значение коэффициента усиления в более широком диапазоне частот.

Если коэффициент усиления усилителя очень большой, ( $K_U \rightarrow \infty$ ), то выражение (16.9) примет вид

$$K_{U_{oc}} = \frac{1}{\kappa}.$$

В этом случае говорят о *глубокой ОС*.

Можно ли считать, что при глубокой ОС зависимость между входным и выходным сигналами определяется только коэффициентом передачи ОС  $\kappa$ ? — ж) да; з) нет.

Аналогичным образом можно показать, что для схемы на рис. 16.11, а входное и выходное сопротивления с учетом ОС будут определяться выражениями:

$$R_{вх. ос} = R_{вх}(1 + \kappa K_U); \quad R_{вых. ос} = R_{вых}/(1 + \kappa K_U),$$

где  $R_{вх}$  и  $R_{вых}$  — соответственно входное и выходное сопротивления усилителя без ОС.

Из двух последних выражений видно, что отрицательная ОС увеличивает входное и уменьшает выходное сопротивления.

В заключение отметим, что применение отрицательной ОС позволяет уменьшить влияние внутренних помех на искажение формы усиливаемого сигнала.