

4. УСИЛИТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Усилитель – это устройство, предназначенное для усиления входного электрического сигнала по напряжению, току или мощности за счет преобразования энергии источника питания в энергию выходного сигнала.

Усилитель преобразует энергию источника питания в энергию выходного сигнала по закону, определяемому входным управляющим воздействием. Это возможно с помощью управляемого нелинейного элемента (БТ или ПТ). Транзистор выполняет роль управляемого сопротивления, включенного в цепь нагрузки и источника питания.

Усилитель содержит три основных элемента (рис. 4.1): источник питания, нагрузку и регулируемое сопротивление (транзистор). Величина регулируемого сопротивления изменяется с помощью электрического сигнала – входного напряжения или тока.



Рис. 4.1. Блок-схема усилителя

По типу усиливаемой величины усилители делятся на усилители напряжения, тока и мощности. В общем случае любой электронный усилитель является усилителем мощности входного сигнала.

По виду усиливаемого сигнала различают усилители гармонических колебаний и усилители импульсных сигналов. По диапазону усиливаемых частот усилители подразделяются на усилители постоянного тока (УПТ), операционные усилители (ОУ) и усилители переменного тока. УПТ усиливает входной сигнал в диапазоне от 0 до некоторой верхней частоты ω_v . Усилители переменного тока усиливают сигнал в диапазоне полосы пропускания от нижней до верхней частоты ($\omega_n - \omega_v$). Они в свою очередь, делятся на усилители низкой частоты (УНЧ), усилители высокой частоты (УВЧ), избирательные (резонансные).

По способу связи между каскадами, а также источником сигнала и нагрузки различают усилители с: резистивно-емкостной (RC-); трансформаторной; непосредственной (гальванической) связями между каскадами.

У **инвертирующих** усилителей выходной сигнал сдвинут по фазе на 180° относительно входного (сигналы противофазны); у **неинвертирующих** усилителей сигналы на входе и выходе совпадают по фазе (синфазны).

4.1. Основные параметры и характеристики усилителя

Коэффициент усиления. Основными параметрами усилителя являются коэффициенты усиления по: напряжению $K_U = U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}}$, току

$$K_I = I_{\text{ВЫХ}}/I_{\text{ВХ}} \text{ и мощности } K_P = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}} I_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}} I_{\text{ВХ}}} = K_U K_I, \text{ где } I_{\text{ВХ}}, I_{\text{ВЫХ}}, U_{\text{ВХ}}, U_{\text{ВЫХ}},$$

$P_{\text{ВХ}}, P_{\text{ВЫХ}}$ – действующие значения токов напряжений и мощностей на входах и выходах усилителя. Мощность сигнала на выходе любого усилителя больше мощности входного сигнала.

Одиночный усилительный каскад имеет невысокий коэффициент усиления. Для получения больших коэффициентов усиления применяют многокаскадные усилители, в которых каскады соединяют последовательно. Общий коэффициент усиления многокаскадного усилителя равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов:

$$K_u = K_{u1} \cdot K_{u2} \cdot \dots \cdot K_{un},$$

где K_{un} – коэффициент усиления n -каскада.

С увеличением числа каскадов коэффициент усиления возрастает, а полоса пропускания многокаскадного усиления уменьшается.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) – это зависимость модуля коэффициента усиления от частоты гармонического сигнала, $K(\omega)$, см. рис. 4.2. По АЧХ можно определить полосу усиливаемых частот. Её принято считать ограниченной частотами, на которых коэффициент усиления усилителя уменьшается в $\sqrt{2}$ раз от своего максимального значения. Если бы в усилителе не было искажений, то АЧХ представляла бы прямую линию, параллельную оси абсцисс, т.е. одинаково усиливались бы сигналы с частотой от 0 до ∞ . Причиной частотных искажений является присутствие в схеме усилителя реактивных элементов: конденсаторов, катушек индуктивности, p - n -переходов полупроводников с их емкостями и т.п.

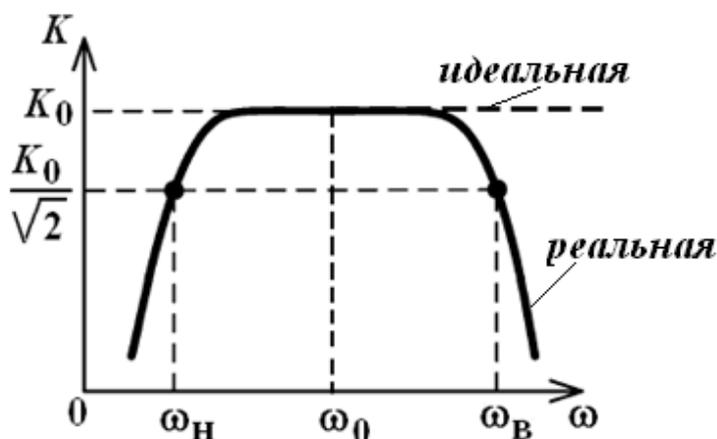


Рис. 4.2. АЧХ усилителя

Избирательные (резонансные) усилители предназначены для усиления электрических сигналов в узкой полосе частот (рис. 4.3, а). АЧХ УПТ охватывает область от нулевых частот ($\omega_H = 0$) до некоторой граничной частоты ω_B (рис. 4.3 б).

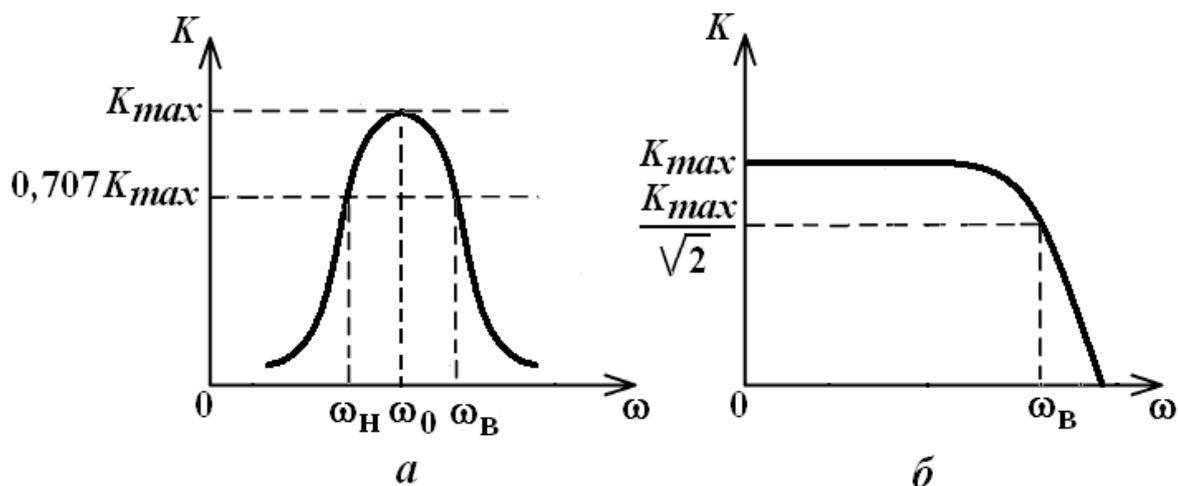


Рис. 4.3. АЧХ: а – резонансного усилителя и б – УПТ и ОУ (ω_B, ω_H – верхняя и нижняя граничные частоты рабочего диапазона частот; $\Delta\omega = \omega_B - \omega_H$ – диапазон рабочих частот (полоса пропускания))

Фазочастотная характеристика (ФЧХ) описывает зависимость угла сдвига фаз, вносимого усилителем, от частоты гармонического сигнала, $\varphi(\omega)$, рис. 4.4. ФЧХ усилителя без фазовых искажений – это прямая линия, проходящая через начало координат (пунктирная линия на рис. 3.4, а).

Фазовые искажения возникают из-за непостоянства фазового сдвига для различных гармонических составляющих.

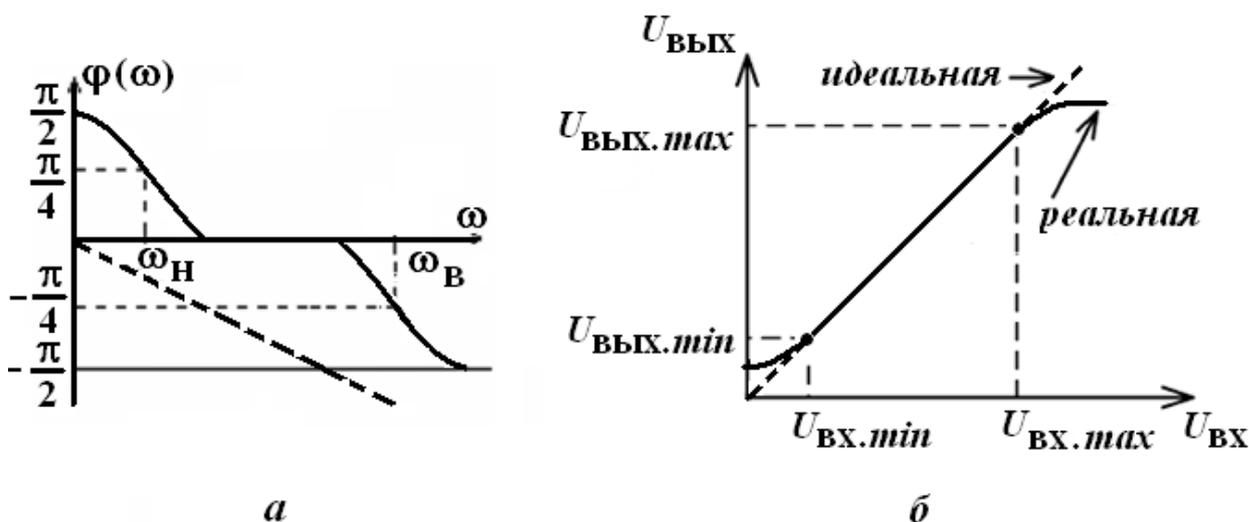


Рис. 4.4. Характеристики усилителя: а – ФЧХ б – и амплитудная

Амплитудная (передаточная) **характеристика** – это зависимость амплитуды выходного сигнала от амплитуды входного (рис. 4.4, б). В идеальном случае эта характеристика должна быть прямолинейной. При малых и больших значениях входного напряжения характеристика отклоняется от прямолинейной.

Искажения сигналов в усилителе – это отклонение формы сигнала на выходе по сравнению с формой сигнала на входе усилителя. Различают линейные и нелинейные искажения. *Линейные искажения* возникают за счёт зависимости частотной характеристики коэффициента усиления от частоты. *Нелинейные искажения* – это изменение формы сигнала, обусловленное нелинейностью характеристик его элементов и, прежде всего, нелинейностью ВАХ усилительных элементов и диодов.

Диапазон усиливаемых частот, или полоса пропускания усилителя, – это область частот, в которой коэффициент усиления изменяется не больше, чем это допустимо по техническим условиям.

4.2. Принцип построения усилительных каскадов

Усилительный каскад – это схема, содержащая один усилительный элемент. Обычно усилители состоят из нескольких каскадов, осуществляющих последовательное усиление сигнала. Схемы усилительных каскадов характеризуются большим разнообразием, но принцип построения главных цепей усилительных каскадов один и тот же.

На рис. 4.5 показана структурная схема усилительного каскада. **Основные элементы усилительного каскада:** управляемый элемент УЭ (БТ или ПТ), резистор R и источник питания E . Эти элементы образуют выходную цепь каскада. Усиливаемым сигналом является $U_{вх}$. Выходной сигнал $U_{вых}$ снимается с выхода УЭ или с резистора R . *Процесс усиления основывается на преобразовании энергии источника постоянного напряжения E в энергию переменного напряжения в выходной цепи за счет изменения сопротивления УЭ по закону, задаваемому входным сигналом.* Усиленный сигнал имеет большую мощность по сравнению с входным сигналом.

За счет изменения сопротивления УЭ изменяется ток, протекающий от источника питания с напряжением $E_{п}$ в цепи резистора R и УЭ. В результате будут меняться падение напряжения на резисторе, а следовательно, и выходное напряжение $U_{вых}$.

Так как для питания используется источник постоянного напряжения E , ток i в выходной цепи каскада является однонаправленным. При этом переменный ток (напряжение) выходной цепи (пропорциональные току и напряжению входного сигнала) следует рассматривать как переменные составляющие суммарного тока (напряжения), накладывающиеся на их постоянные составляющие $I_{п}$ ($U_{п}$).

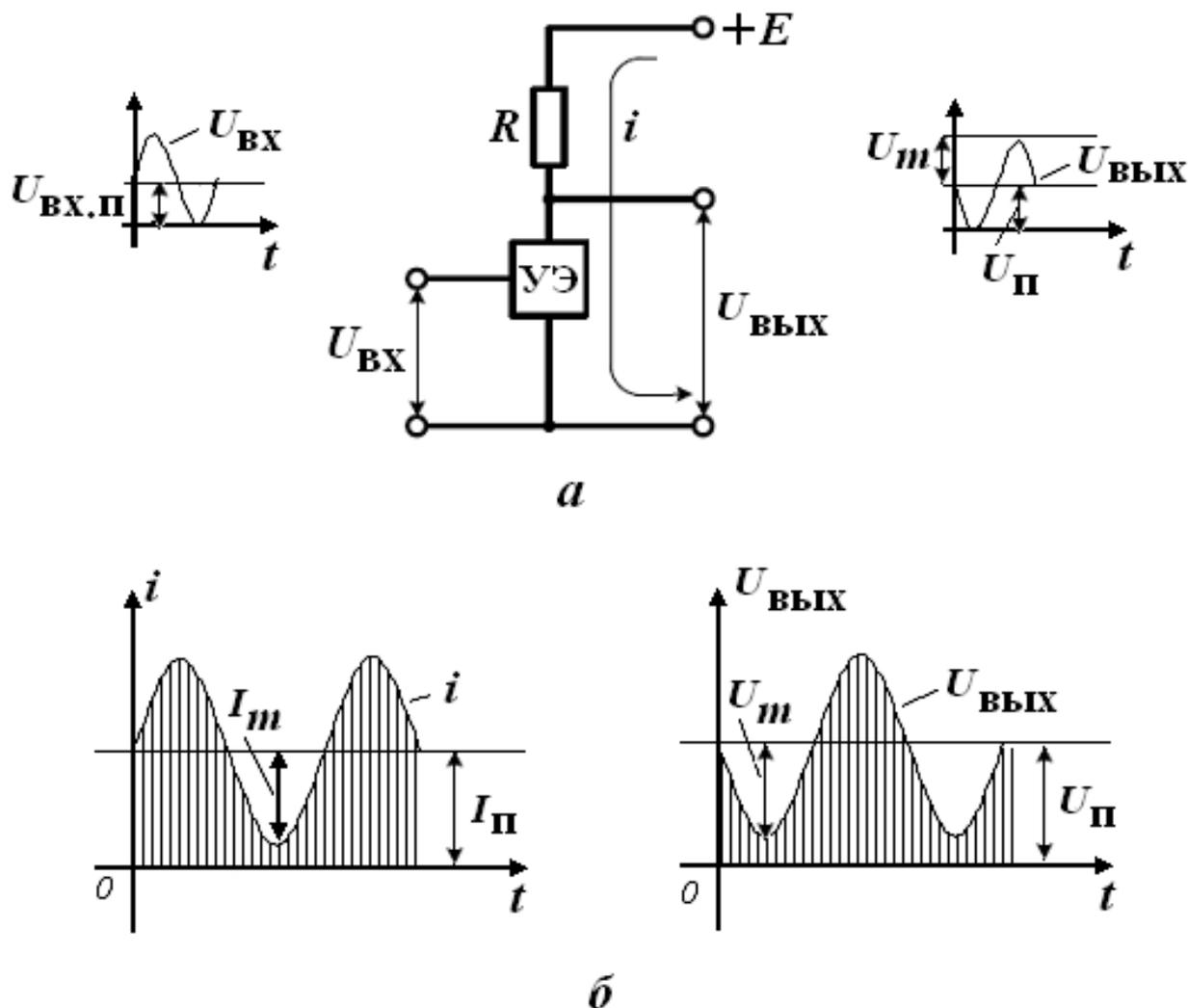


Рис. 4.5. Усилительный каскад: а – принцип построения и б – временные диаграммы

Связь между постоянными и переменными составляющими должна быть такой, чтобы амплитудные значения переменных составляющих не превышали постоянных составляющих, т. е. $I_{П} > I_m$ и $U_{П} > U_m$.

Если эти условия не будут выполняться, ток i в выходной цепи на отдельных интервалах будет равен нулю, что приведет к искажению формы выходного сигнала. При отсутствии входного постоянного напряжения невозможно усилить переменный (двуполярный) сигнал. Таким образом, для обеспечения работы усилительного каскада при переменном входном сигнале в его выходной цепи должны быть созданы постоянные составляющие тока $I_{П}$ и напряжения $U_{П}$. Задачу решают путем подачи во входную цепь каскада помимо усиливаемого сигнала соответствующего постоянного напряжения $U_{ВХ П}$ (или задания соответствующего постоянного входного тока $I_{ВХ П}$).

Постоянные составляющие тока и напряжения определяют **режим покоя** усилительного каскада. Параметры режима покоя по входной цепи ($I_{ВХ П}$, $U_{ВХ П}$) и по выходной цепи ($I_{П}$, $U_{П}$) характеризуют электрическое состояние схемы в отсутствие входного сигнала.

Усилительные свойства каскадов основываются на следующем: при подаче на УЭ напряжения входного сигнала в токе выходной цепи создается переменная составляющая, вследствие чего на УЭ образуется аналогичная составляющая напряжения, превышающая переменную составляющую напряжения на входе. Усилительные свойства проявляются тем сильнее, чем больше сказывается влияние входного сигнала на выходной ток управляемого элемента и чем сильнее проявляется воздействие изменения тока в выходной цепи на изменение напряжения на управляемом элементе (т.е. чем выше сопротивление R).

4.3. Основные схемы транзисторных усилителей

Для обеспечения работы усилительного каскада при переменном входном сигнале в его выходной цепи создаются постоянные составляющие тока $I_{\text{п}}$ и напряжения $U_{\text{п}}$. Это делается подачей во входную (базовую) цепь каскада помимо усиливаемого сигнала постоянного напряжения (см. п. 4.2).

Цепи задания и стабилизации режима покоя являются обязательными элементами любого усилителя. Так как характеристики и параметры полупроводниковых усилительных элементов имеют большой разброс и сильно зависят от температуры, то необходимо не только задать начальный режим, но и заставить его стабилизироваться.

Рассмотрим основные схемы термостабилизации рабочей точки, а вместе с тем и схемы питания усилительного элемента.

Схема со стабилизацией фиксированным током базы. Величина тока покоя базы задается номинальным значением сопротивления R_6 (рис.

4.7, а), так как $I_{\text{бп}} = \frac{E_{\text{п}} - U_{\text{бэп}}}{R_6} \approx \frac{E_{\text{п}}}{R_6}$. Таким образом, ток $I_{\text{бп}}$ почти не

изменяется при изменении $U_{\text{бэ}}$ с ростом температуры T , но ток $I_{\text{кп}}$ относительно последней оказывается нестабилизированным. Это является основным недостатком данной схемы стабилизации.

Схема стабилизации фиксацией потенциала базы с помощью делителя напряжения. Сопротивление резисторов делителя R_1 и R_2 выбирают так, чтобы выполнялось соотношение $I_{\text{дел}} \approx (5 - 10)I_{\text{бп}}$ для маломощных транзисторов и $I_{\text{дел}} \approx (2 - 5)I_{\text{бп}}$ для мощных (рис. 4.7, б). В этом случае при изменении температуры напряжение на базе транзистора остается почти неизменным. Недостаток данной схемы тот же, что и у схемы с фиксированным током базы.

Схема эмиттерной температурной стабилизации является наиболее распространенной (рис. 4.7, в). Здесь для температурной стабилизации рабочей точки введена ООС по току, для чего в цепь эмиттера включено сопротивление R_3 . Резистивный делитель R_1, R_2 предназначен для поддержания неизменным потенциала на базе транзистора, причем номинальные значения данных резисторов выбираются аналогично тому, как это делалось для схемы стабилизации фиксированным потенциалом базы.

Рассмотрим принцип эмиттерной термостабилизации. Допустим, что из-за повышения температуры увеличился ток $I_{кп}$. Вместе с ним увеличивается и ток эмиттера $I_{эп}$, так как эти токи связаны между собой равенством $I_{эп} = I_{кп} + I_{бп}$. Повышение тока эмиттера приводит к увеличению падения напряжения на сопротивлении R_3 . При неизменном потенциале базы это ведет к уменьшению разности потенциалов на переходе база – эмиттер, т.е. напряжения $U_{бэп}$. Понижение напряжения $U_{бэп}$ приводит к уменьшению тока базы и далее к уменьшению тока коллектора. В итоге происходит компенсация начального увеличения тока $I_{кп}$. Однако введение сопротивления R_3 ведет не только к стабилизации положения рабочей точки, но и к уменьшению коэффициента усиления K из-за влияния ООС по переменной составляющей коллекторного тока. Чтобы избежать этого, сопротивление R_3 блокируется по переменной составляющей конденсатором большой емкости (конденсатор на схеме показан пунктиром).

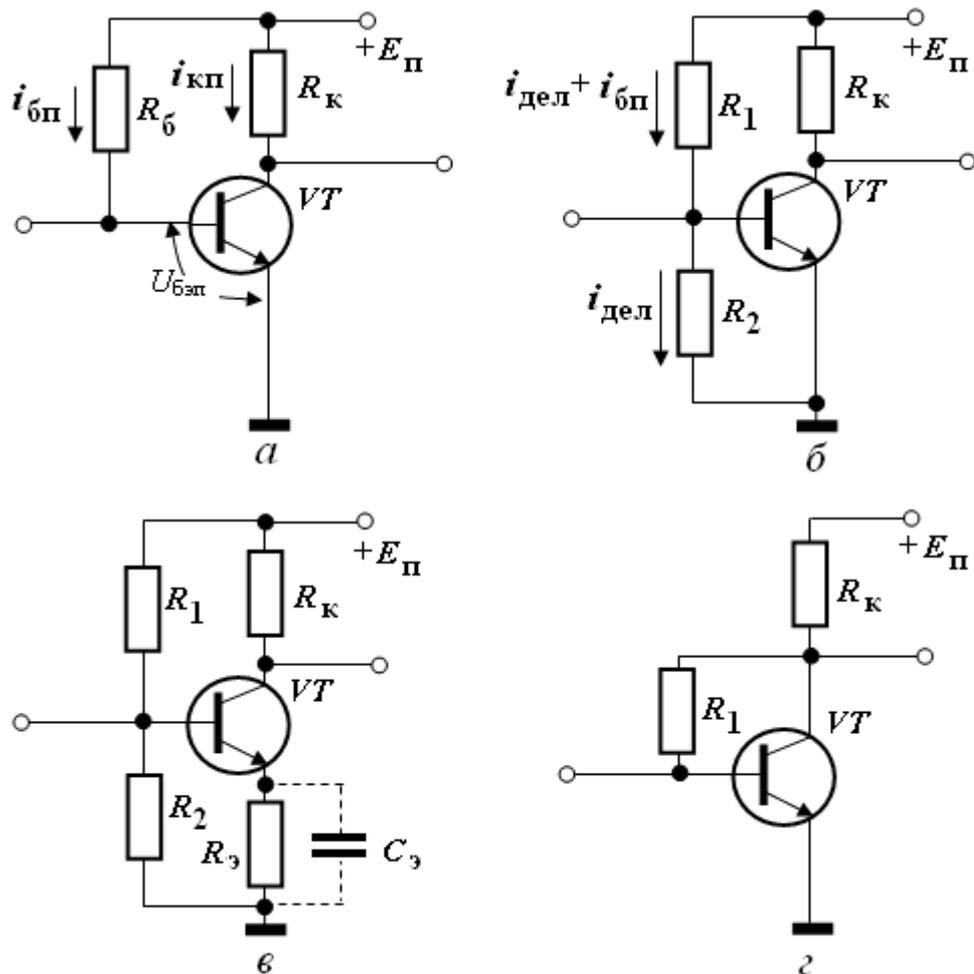


Рис. 4.7. Схемы температурной стабилизации: а – током базы; б – фиксацией потенциала базы; в – эмиттерная; г – коллекторная

Схема коллекторной температурной стабилизации: введение ООС по напряжению с помощью резистора R_1 улучшает термостабильность усилительного каскада (рис. 4.7, г). Положим, что в некоторый момент времени произошло увеличение температуры усилительного элемента и,

следовательно, возрастание тока покоя коллектора $I_{кп}$. Это приведет к увеличению падения напряжения на резисторе R_k , поскольку оно равно $U_{R_k} = R_k I_{кп}$, и, следовательно, к уменьшению потенциала U_k на коллекторе транзистора относительно земли. Это понижение напряжения через резистор R_1 передается на базу транзистора и приводит к уменьшению напряжения $U_{бэп}$. В свою очередь, понижение напряжения $U_{бэп}$ вызовет уменьшение тока $I_{бп}$ и, следовательно, уменьшение тока $I_{кп}$.

Режимы работы усилительных каскадов. Режимы работы активных элементов часто называют **классами усиления**.

Начальный режим работы определяется видом входного сигнала – разнополярный, однополярный; необходимой амплитудой выходного сигнала, экономичностью (КПД); допустимыми искажениями. В зависимости от положения рабочей точки П в режиме покоя на семействе выходных характеристик транзисторов и уровня входных сигналов ($u_{вх}$, $i_{вх}$) различают несколько основных режимов работы усилительного каскада: *A, B, AB, C* и *D*.

В **режиме A** начальная рабочая точка П находится примерно в *середине линейной части проходной характеристики* (рис. 4.8, *a*). Выходной ток $I_{вых}$ протекает непрерывно в течение всего периода сигнала и воспроизводит форму входного переменного напряжения. Транзистор работает в активном режиме. Положение рабочей точки П не выходит за пределы прямолинейного участка динамической характеристики. Из-за большого тока покоя КПД в этом режиме менее 50 % – это основной недостаток рассматриваемого режима. Режим *A* используют в каскадах предварительного усиления.

В **режиме B** рабочая точка выбирается вблизи точки отсечки в самом начале динамической вольт-амперной характеристики (рис. 4.8, *б*). Ток в выходной цепи протекает лишь в течение половины периода (в течение другой половины периода активный элемент находится в состоянии отсечки). Чтобы получить усиление полного сигнала применяются двухтактные схемы, в которых положительные составляющие сигнала усиливаются одним активным элементом, а отрицательные – другим. КПД каскада, работающего в режиме *B*, значительно выше, чем для режима *A*. В режиме *B* КПД достигает 80 %.

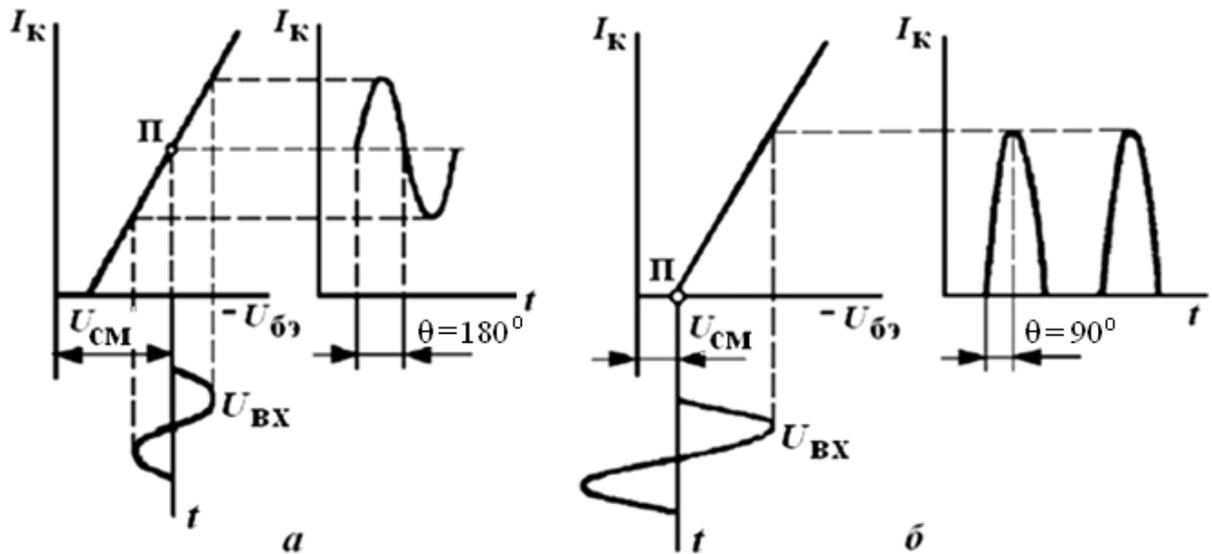


Рис. 4.8. Классы усиления: *a* – режим *A*; *б* – режим *B*

В **режиме C** ток коллектора проходит в течение времени, меньшем полупериода напряжения входного сигнала, причем искажение сигнала большее, чем в режиме *B*. КПД каскада выше, чем в режиме *B*.

Режим D – ключевой режим. Рабочая точка может находиться только в двух возможных положениях: либо в зоне отсечки (транзистор заперт), либо в зоне насыщения (транзистор открыт).

4.3.1. Резистивный усилитель низкой частоты (усилительный каскад с общим эмиттером)

Резистивным называется усилитель, нагрузкой которого является активное сопротивление. *Резистивный усилитель является базовым для построения схем усилителей переменного и постоянного токов.*

Рассмотрим усилительный каскад ОЭ с резистивно-емкостной связью, выполненный на базе *n-p-n*-транзистора (рис. 4.9).

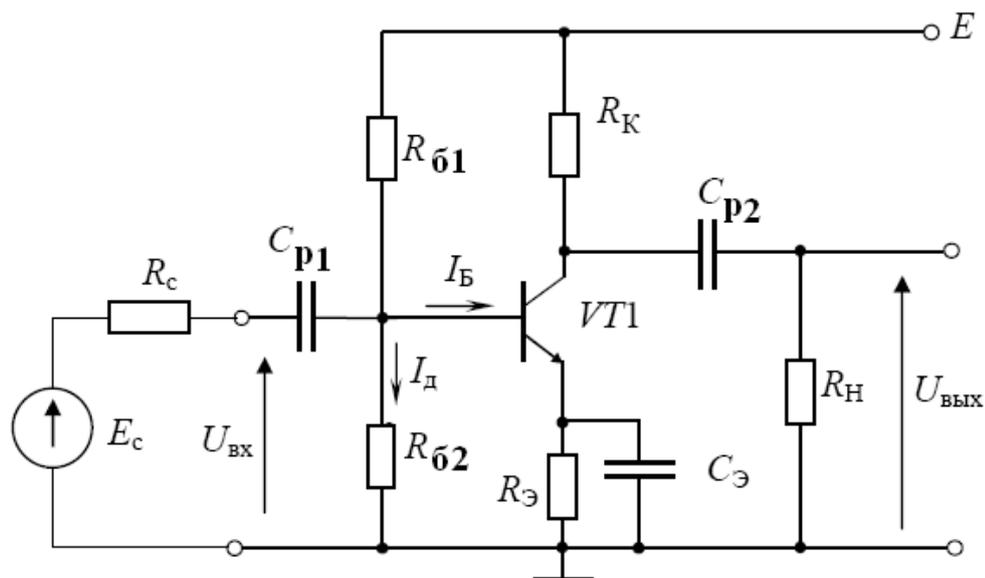


Рис. 4.9. Усилительный каскад с эмиттерной температурной стабилизацией

Усилитель работает в режиме *A*. К входной цепи усилительного каскада относятся все элементы, подсоединяемые между базой и эмиттером транзистора, а также источник входного сигнала $U_{вх}$. Выходная цепь каскада содержит источник питания $E_{к}$, управляемый элемент-транзистор VT и резистор $R_{к}$. Эти элементы образуют главную цепь усилительного каскада, в которой за счет протекающего коллекторного тока $i_{к}$, управляемого током базы $i_{б}$, создается усиленное переменное напряжение на выходе схемы $U_{вых}$. Остальные элементы играют вспомогательную роль. Конденсаторы C_{p1} и C_{p2} являются разделительными элементами. Они препятствуют попаданию постоянного напряжения на вход и выход усилителя и обеспечивают независимый выбор исходного положения рабочей точки по постоянному току, т.е. устраняют влияние сопротивления нагрузки ($R_{н}$) и сопротивления источника сигнала на положение рабочей точки.

Резистор $R_{э}$ обеспечивает температурную стабилизацию исходного положения рабочей точки транзистора. Конденсатор $C_{э}$ называется блокировочным. Он шунтирует резистор $R_{э}$ по переменному току, т.е. через него проходит переменная составляющая тока транзистора. Это положение имеет место при выборе величины емкости из условия $\frac{1}{\omega_{н}C_{э}} \ll R_{э}$. В этом

случае резистор $R_{э}$ не создает ООС для усиливаемого переменного сигнала. Отсутствие конденсатора $C_{э}$ привело бы к уменьшению коэффициентов усиления схемы.

Резистор $R_{к}$ является нагрузкой усилительного элемента и обеспечивает заданный угол наклона линии нагрузки по постоянному току на выходной характеристике усилительного элемента.

Таким образом, резисторы в схеме усилительного каскада обеспечивают исходное положение рабочей точки и ее стабилизацию; а

конденсаторы – развязку каскада по постоянному току и наилучшие условия работы каскада для переменного усиливаемого сигнала.

Название схемы «с общим эмиттером» означает, что вывод эмиттера транзистора по переменному току является общим для входной и выходной цепей каскада.

Принцип действия каскада ОЭ заключается в следующем. При наличии постоянных составляющих токов и напряжений в схеме подача на вход переменного напряжения приводит к появлению переменной составляющей тока базы транзистора, следовательно, переменной составляющей тока в выходной цепи каскада (в коллекторном токе транзистора).

За счет падения напряжения на резисторе R_k создается переменная составляющая напряжения на коллекторе, которая через конденсатор C_{p2} передается на выход каскада – в цепь нагрузки. Для коллекторной цепи усилительного каскада в соответствии со вторым законом Кирхгофа можно записать следующее уравнение:

$$E_k = U_{кэ} + I_k \cdot R_k \text{ или } U_k = E_k - I_k \cdot R_k. \quad (4.4)$$

Расчет такой нелинейной цепи, т.е. определение I_k , U_{R_k} и $U_{кэ}$ для различных значений токов базы I_b и сопротивлений резистора R_k , можно провести графически. Для этого на семействе коллекторных характеристик (рис. 4.10) строят **линию нагрузки** по постоянному току (ВАХ R_k). Ее проводят по двум точкам: $U_{кэ} = E_k$ при $I_{\hat{e}} = 0$ на оси абсцисс и $I_k = \frac{E}{R_k}$ при

$U_{кэ} = 0$ на оси ординат. Точки пересечения линии нагрузки с коллекторными характеристиками дают графическое решение уравнения (4.3) для данного сопротивления R_k и различных значений тока базы I_b . По этим точкам можно определить коллекторный ток I_k , одинаковый для транзистора и резистора R_k , а также напряжения U_{R_k} и U_k . Линия нагрузки по постоянному току проходит под углом α .

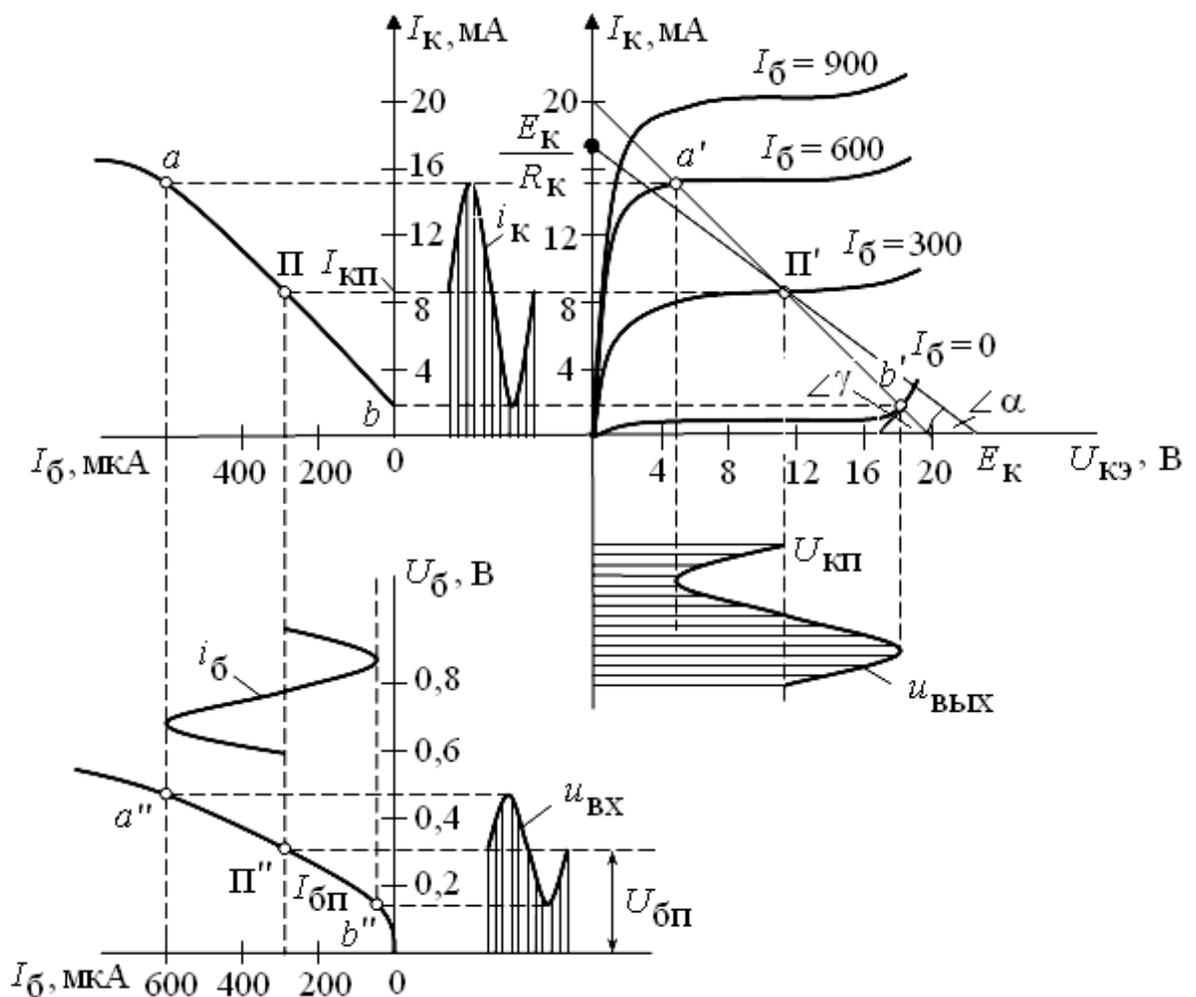


Рис. 4.10. Графический анализ работы усилительного каскада

Нагрузочная линия переменного тока отличается от нагрузочной линии постоянного тока. Она пересекается с нагрузочной линией постоянного тока в начальной рабочей точке, так как в момент прохождения переменного сигнала через ноль рабочая точка находится в начальном положении. Наклон нагрузочной линии переменного тока определяется углом γ . На рис. 4.10 она проходит через начальную рабочую точку Π круче соответствующей нагрузочной прямой постоянного тока.

Для анализа работы каскада используют входную и переходную (проходную) характеристики.

Входная динамическая характеристика – зависимость $I_{ВХ} = f(U_{ВХ})$ в динамическом режиме. Для схемы усилителя с транзистором, включенным по схеме с ОЭ, – это зависимость $I_б = f(U_б)$. На рис. 4.10 входная характеристика повернута на 90° .

Переходная динамическая характеристика – зависимость $U_{ВЫХ} = f(U_{ВХ})$ или $I_{ВЫХ} = f(I_{ВХ})$ в динамическом режиме. Для усилителя с транзистором, включенным по схеме с ОЭ, – это зависимость $I_к = f(I_б)$ или $U_к = f(U_б)$ (рис. 4.10), ее строят по точкам пересечения линии нагрузки с коллекторными характеристиками.

Переходная характеристика имеет практически линейный участок ab при изменении тока базы от нуля до некоторого значения, зависящего от транзистора и сопротивления R_k . Проецируя этот участок на линию нагрузки и входную характеристику, отметим на них соответствующие участки $a'b'$ и $a''b''$. Сопротивление резистора R_k выбирают, исходя из требуемого усиления входных сигналов. Линия нагрузки должна лежать внутри области допустимых значений $U_{k \max}$, $I_{k \max}$, $P_{k \max}$.

Резисторы $R_{\beta 1}$ и $R_{\beta 2}$ обеспечивают требуемую работу транзистора в **режиме покоя**, т.е. в отсутствие входного сигнала. С их помощью можно получить оптимальные значения тока базы $I_{\beta \text{п}}$ и напряжения $U_{\beta \text{п}}$, соответствующие середине линейного участка входной характеристики. В режиме покоя рабочая точка П транзистора выбирается в середине линейного участка переходной характеристики.

Благодаря тому, что коллекторный ток во много раз превышает ток базы, а сопротивление R_k больше $R_{\text{вх}}$, выходное напряжение усилительного каскада с ОЭ получается во много раз больше входного напряжения.

Если на вход усилителя подается сигнал, например синусоидальной формы $u_c = U_{\text{см}} \sin \omega t$ (рис. 4.10), то он алгебраически суммируется с постоянным напряжением смещения на эмиттерном переходе и рабочая точка П перемещается между точками a и b .

В положительные полупериоды напряжение сигнала складывается с положительным напряжением смещения, напряжение смещения базы увеличивается, в результате чего возрастают ток базы и коллекторный ток, и рабочая точка плавно перемещается из положения П (П' и П'') в положение a (a' и a''). В отрицательные полупериоды напряжение сигнала, складываясь с положительным напряжением смещения, снижает напряжение смещения базы, поэтому токи базы и коллектора уменьшаются, а рабочая точка плавно перемещается в положение b , b' и b'' . Токи i_b и i_k изменяются в фазе с изменениями мгновенного значения суммарного напряжения. В цепи источник ЭДС смещения – коллекторный переход проходит пульсирующий ток, состоящий из постоянной $I_{\text{кп}}$ и переменной i_k составляющих тока. Переменная составляющая тока создаст на резисторе R_k падение напряжения, амплитуда которого равна амплитуде выходного сигнала $U_{\text{вых}}$. При этом напряжение на резисторе изменяется синфазно, а выходное напряжение находится в противофазе с напряжением сигнала (рис. 4.10). Таким образом, **усилительный каскад ОЭ осуществляет поворот по фазе на 180° выходного напряжения относительно входного**. При большом сопротивлении R_k амплитуда выходного сигнала значительно больше амплитуды напряжения входного сигнала.

Описанный режим работы усилителя соответствует классу А. В схеме происходит усиление как напряжения, так и тока сигнала, а следовательно, мощности.

4.3.2. Эмиттерный повторитель (усилительный каскад с ОК)

Эмиттерным повторителем (ЭП) называют резистивный усилитель со стопроцентной последовательной ООС по напряжению. Основной особенностью ЭП (как усилителя с глубокой ООС) является то, что он не дает усиления по напряжению, в то время как коэффициент усиления по току значительный. ЭП позволяет получить высокое входное и низкое выходное сопротивления, обладает малыми нелинейными и частотными искажениями.

Действительно, при $\beta_{ООС} = \frac{U_{ОС}}{U_c} = 1$ и $K = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} > 1$ коэффициент усиления усилителя с ООС не превышает единицы:

$$K_{ООС} = \frac{U_{ВЫХ}}{U_c} = \frac{K}{K + \beta K} < 1.$$

Все разновидности схем эмиттерных повторителей выполняют свои функции только в области средних частот, когда коэффициент усиления по напряжению имеет вещественное значение, т.е. ОС является отрицательной.

Схема простейшего ЭП изображена на рис. 4.11. Если учесть, что внутреннее сопротивление источника питания E_K по переменному току равно нулю, то входное переменное напряжение усилителя приложено к переходу «база – коллектор» транзистора, а выходное – снимается с электродов «эмиттер – коллектор», т.е. реализована схема включения транзистора с ОК.

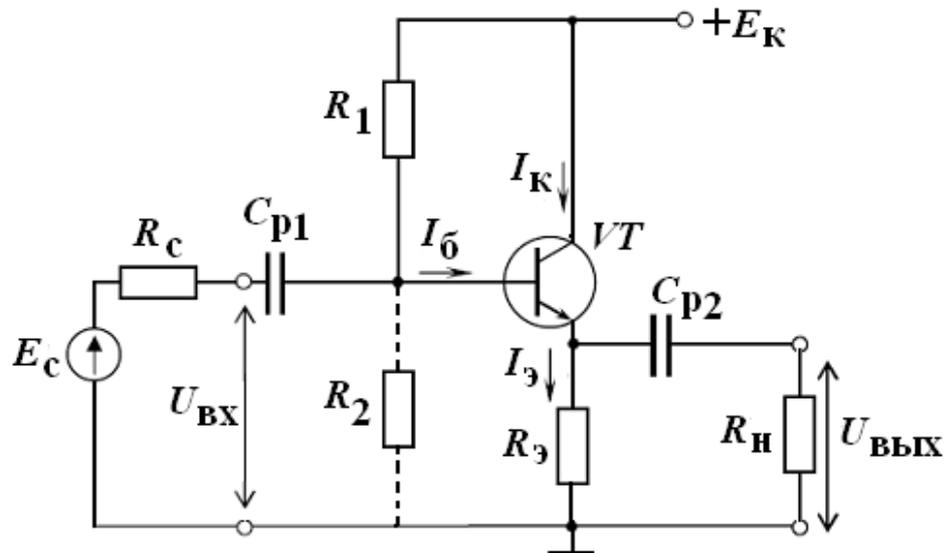


Рис. 4.11. Схема эмиттерного повторителя

Питание транзистора по постоянному току может осуществляться фиксированным током базы или фиксированным напряжением базы.

Резисторы $R_{б1}$, $R_{б2}$ предназначены для задания режима покоя каскада. Для повышения входного сопротивления резистор $R_{б2}$ в схему часто не вводят. Резистор R_3 (сопротивление нагрузки для постоянного тока) обеспечивает эмиттерную стабилизацию рабочей точки по постоянному току

и является элементом цепи последовательной ОС по напряжению. Для переменного тока резисторы R_3 и R_n включены параллельно и вместе составляют нагрузку усилителя по переменному току. C_{p1} и C_{p2} – разделительные конденсаторы. Функция конденсатора C_{p2} сводится к передаче в нагрузку переменной составляющей выходного сигнала.

Рассмотрим работу схемы ЭП. При отсутствии входного переменного сигнала в цепи базы, коллектора и эмиттера протекают соответственно токи $I_{бп}$, $I_{кп}$, $I_{эп}$, обусловленные исходным положением рабочей точки транзистора.

Эти токи вызывают падение напряжения на резисторах схемы, так что обеспечивают исходную рабочую точку транзистора.

При наличии переменного входного сигнала появляется переменная составляющая тока базы. Переменная составляющая тока эмиттера создает на резисторе R_3 падение переменной составляющей напряжения. Это напряжение через конденсатор C_{p2} подается на выход усилителя ($U_{вых}$) и, кроме того, полностью приложено ко входу усилительного каскада последовательно с входным напряжением.

Напряжение на выходе усилителя совпадает по фазе с напряжением на входе. Схема эмиттерного повторителя не дает усиления по напряжению.

Схема с общим коллектором обладает низким выходным и высоким входным сопротивлениями. Поэтому она часто применяется как согласующий каскад.

4.3.3. Избирательные усилители

Избирательные усилители предназначены для усиления сигналов в узкой полосе частот. По принципу действия избирательные усилители делятся на резонансные и усилители с ОС.

В **резонансных усилителях** в качестве нагрузки применяется параллельный колебательный LC -контур, имеющий большое сопротивление на резонансной частоте f_0 и малое – для других частот.

Схема однокаскадного резонансного усилителя показана на рис. 4.12. Резонансный усилитель содержит три основных элемента: усилительный элемент, источник питания и резонансную цепь (фильтр) с цепями связи УЭ с последующим каскадом. В качестве активного элемента используется биполярный транзистор. Связь с последующим усилительным каскадом или нагрузкой может осуществляться через разделительный конденсатор (как в приведенной схеме) или трансформатор, первичная обмотка которого определяет индуктивность L колебательного контура.

АЧХ резонансного усилителя приведена на рис. 4.3, а. Подбором элементов C и L контур настраивается на частоту усиливаемого сигнала. На

резонансной частоте $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ сопротивление колебательного контура

оказывается наибольшим, поэтому коэффициент усиления будет максимален. Благодаря этому усиливается лишь напряжение одной частоты, а напряжения

других частот подавляются. Полоса пропускания избирательного усилителя равна $2\Delta f = f_{\text{в}} - f_{\text{н}}$.

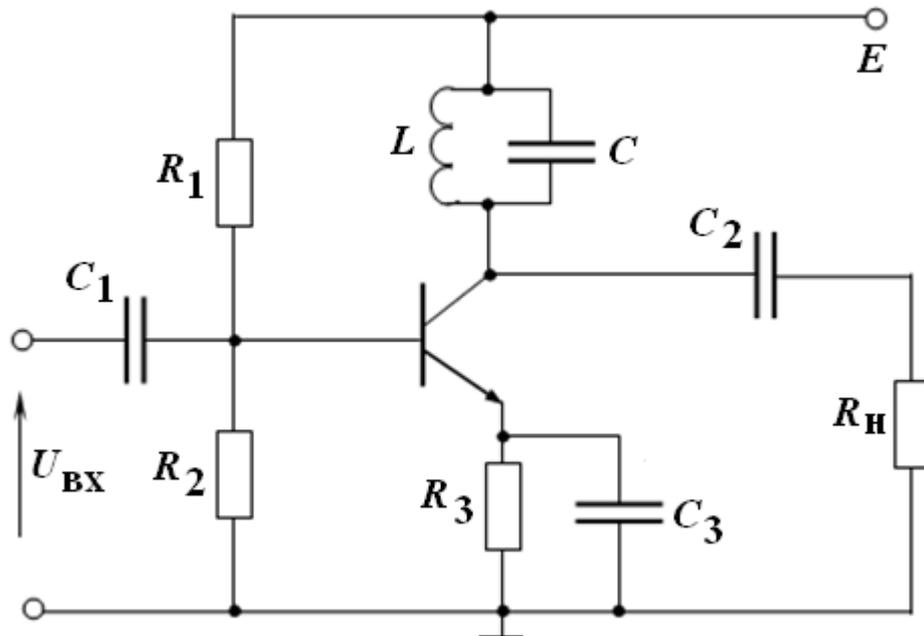


Рис. 4.12. Схема резонансного усилителя с параллельным LC -контуром.

Назначение элементов усилителя аналогично схеме на рис. 4.9. Усилитель собран на n - p - n -транзисторе по схеме с ОЭ. В качестве коллекторной нагрузки используется параллельный колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности L и конденсатора C .

4.4. Усилители на полевых транзисторах

Принципы построения и работы усилительных устройств на ПТ в целом аналогичны усилителям на БТ. На рис. 4.16 приведена типовая схема усилительного каскада с общим истоком (ОИ) – аналог схемы ОЭ, хорошо усиливает и по току, и по напряжению.

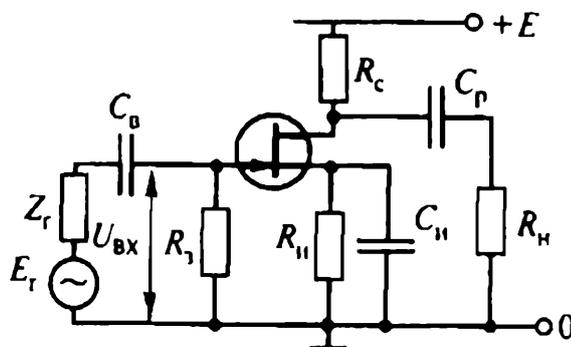


Рис. 4.16. Усилительный каскад на ПТ с общим истоком

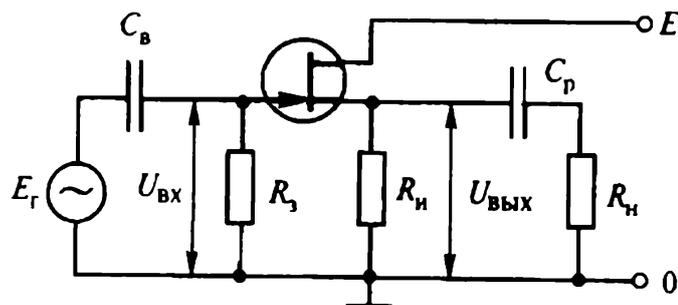


Рис. 4.17. Усилительный каскад на ПТ с общим стоком

На рис. 4.17 показана схема с общим стоком (ОС) – истоковый повторитель, аналог схемы ОК, эмиттерного повторителя, он усиливает только по току.

Показанные в качестве примера на рис. 4.16 и 4.17 схемы построены на ПТ с управляющим переходом, которые должны работать в режиме обеднения канала, т.е. при обратном напряжении на затворе. С этой целью в цепи истока обязательно должен быть резистор $R_{и}$, «поднимающий» (при протекании тока стока I_c) потенциал истока относительно «земли» и потенциала затвора. Аналогичный вид будет и у схем на МОП-транзисторе со встроенным каналом.

Резистор в цепи затвора необходим для протекания тока от источника входного сигнала, поскольку в затвор полевого транзистора ток не втекает ввиду большого входного сопротивления (напомним, что у затвора p-n-переход в обратном направлении или слой диэлектрика).

Назначение остальных элементов схемы такое же, как в усилителях на БТ.

Схема на МОП-транзисторе с индуцированным каналом (рис. 4.18) будет аналогична схеме на БТ: поскольку изначально транзистор закрыт (в нем отсутствует канал), на затвор необходимо подавать отпирающее напряжение через делитель R1, R2 (сравните с рис. 4.9, 4.11).

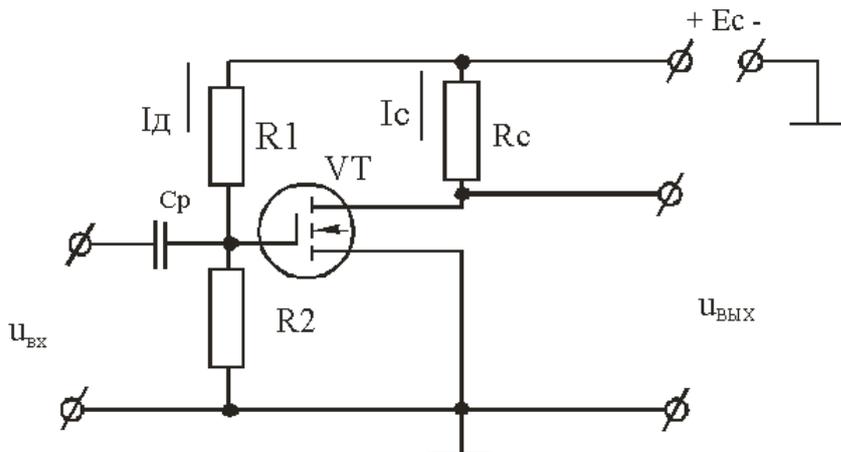


Рис. 4.18. Усилительный каскад с общим истоком на МОП-транзисторе с индуцированным каналом n-типа