

## Урок 8. ЭЛЕКТРОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Электронные усилители представляют собой радиотехнические устройства, усиливающие *мощность, напряжение* или *ток* электрического сигнала, подводимого к его входу.

Усилители электрических сигналов делятся в зависимости от диапазона рабочих частот на усилители *постоянного тока*, усилители *низких частот, широкополосные, радио- и промежуточных частот*; по схемному построению — на *однокаскадные* (с одним усиливающим элементом и его нагрузкой) и *многокаскадные, с несимметричным и симметричным* (двухтактным) выходом и входом и т. д.

Усилители *постоянного тока* (УПТ) усиливают электрические сигналы постоянного тока и все сигналы переменного тока до некоторой заданной рабочей частоты. Они применяются в устройствах электросвязи, автоматике и телемеханике, счетно-решающих и других устройствах.

Усилители *низкой частоты* (УНЧ) усиливают электрические сигналы звуковой частоты, занимающие полосу частот 20 - 20 000 Гц. Они получили очень широкое распространение там, где требуется громкое воспроизведение музыки и речи, и входят составной частью в видеоустановки, радиовещательные приемники, различные установки усиления речи и т. д.

*Широкополосные* усилители, работающие в полосе частот от 50 Гц до 6 МГц, применяются в радиолокации и телевидении, автоматике и вычислительной технике.

В некоторых случаях необходимо усилить сигналы в узкой полосе частот. Для этих целей используются в качестве нагрузки каскада резонансный контур (один или несколько) и другие устройства, обладающие способностью выделять полосу частот. Эти усилители называются *селективными* или *избирательными*. Они широко используются во всех радиоприемниках и радиопередатчиках.

На вход усилителя сигнал может подаваться от различных устройств — микрофона, детектора, воспроизводящей головки магнитофона, фотоэлемента и т. д. Все эти устройства маломощные, поэтому они выдают электрический сигнал такой малой амплитуды, что его недостаточно для воспроизведения без усиления. Для увеличения амплитуды входного сигнала применяются усилители, нагрузками которых могут быть громкоговорители, записывающая головка магнитофона, осциллограф, двигатели в автоматике и другие устройства.

В зависимости от назначения входных и выходных устройств усилитель может иметь только один каскад усиления, но для получения больших выходных мощностей может быть введен в его состав ряд каскадов.

В современной электронной технике транзисторные усилители получили очень широкое распространение. Они обладают некоторыми особенностями по сравнению с другими усилительными приборами.

### СХЕМЫ УСИЛИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

На рис. 1, а представлена схема усилителя с *общим эмиттером*, на рис. 2, а — схема усилителя с *общей базой*, а на рис. 3, а — схема усилителя с *общим коллектором*.

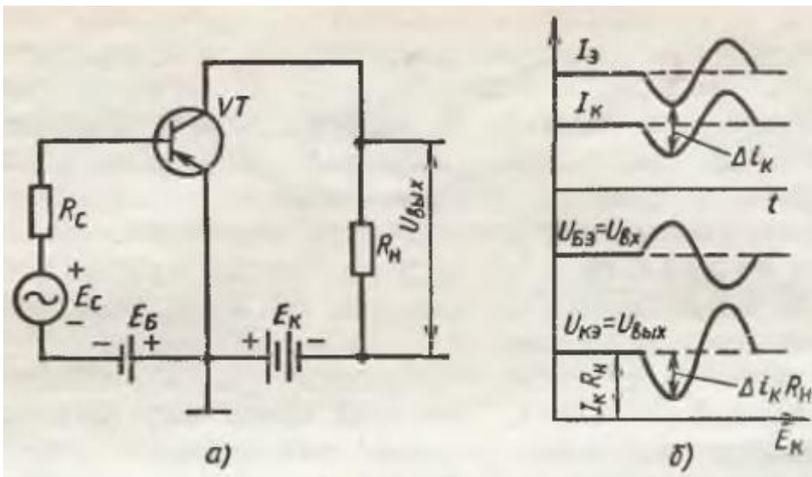


Рис. 1

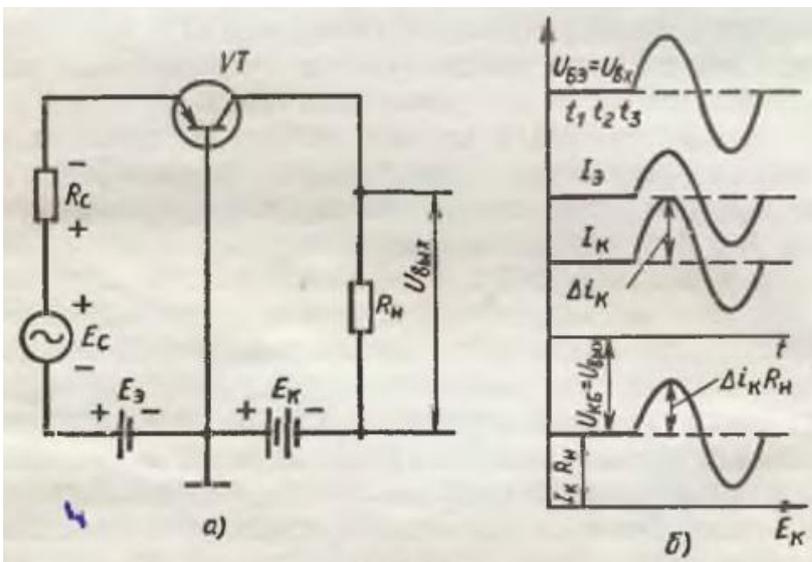


Рис. 2

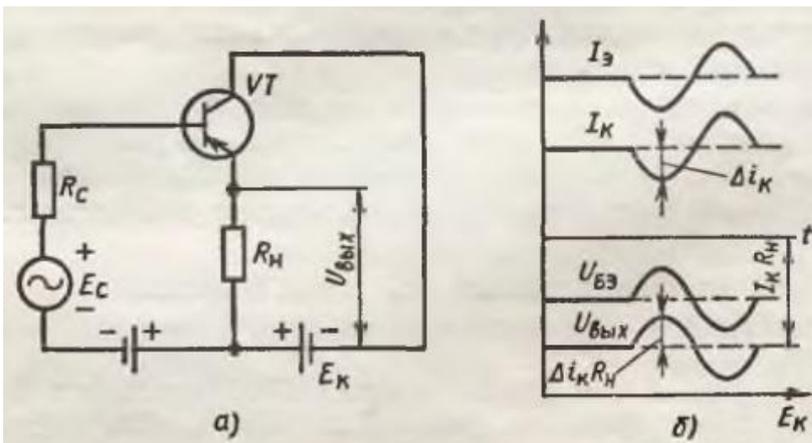


Рис. 3

На этих схемах обозначено:

$E_c$  — источник электрического сигнала (микрофон, головка воспроизведения и т. д.);

$R_n$  — сопротивление нагрузки;

$R_c$  — внутреннее сопротивление источника сигнала  $E_c$ .

На рис. 1, б дан график токов и напряжений для схемы с ОЭ. В схеме с ОЭ входной сигнал подается между выводами базы и эмиттера транзистора, последовательно с источником входного сигнала включена батарея смещения  $E_b$ , а выходной сигнал снимается с участка коллектор — эмиттер (между эмиттером и сопротивлением нагрузки  $R_n$  включен источник коллекторного напряжения  $E_k$ ). Во время положительного полупериода уменьшаются токи эмиттера и коллектора. Падение напряжения на нагрузке тоже уменьшается на  $\Delta I_k R_n$ . Одновременно напряжение на участке коллектор — эмиттер становится более отрицательным и потенциал коллектора уменьшается. Поэтому фаза выходного напряжения в схеме с общим эмиттером изменяется на  $\pi$  ( $180^\circ$ ) по сравнению с фазой  $u_{вх}$ .

Аналогично работают схемы, собранные с ОБ (рис. 2, а), и схема, собранная с ОК (схема эмиттерного повторителя, рис. 3, а).

Графики фазовых соотношений для схемы с ОБ приведены на рис. 2, б. Из этих графиков видно, что во время действия положительного полупериода входного сигнала напряжение прямого перехода между эмиттером и базой увеличивается. Токи эмиттера и коллектора увеличиваются. Это вызывает увеличение падения напряжения на нагрузке. В связи с этим потенциал коллектора повышается, так как напряжение между коллектором и базой  $U_{кб}$  делается менее отрицательным. В режиме покоя, когда нет сигнала (участок  $t_1, t_2$ ),  $U_{кб}$  постоянно, а при сигнале (точка  $t_3$ )  $U_{кб}$  уменьшилось.

Фазы выходного и входного сигналов совпадают, но переменная составляющая тока эмиттера создает на внутреннем сопротивлении источника входного сигнала  $R_c$  падение напряжения в противофазе с входным сигналом (это видно по знакам «+» и «-», проставленным около источника  $E_c$  и внутреннего сопротивления  $R_c$ ). Так как два напряжения (сигнал и падение напряжения на внутреннем сопротивлении) включены последовательно, то общее напряжение, действующее на входе транзистора, будет равно и разности.

В схеме с общей базой выходной ток коллектор является составной частью тока эмиттера (входного тока), который и создает падение напряжения на внутреннем сопротивлении  $R_c$ .

Графики фазовых соотношений схемы с ОК (эмиттерного повторителя) приведены на рис. 3, б. На участке база — эмиттер поступает входной электрический сигнал, выходной — снимается с сопротивления, включенного между эмиттером и корпусом. В схеме с общим коллектором фазы входного и выходного сигналов совпадают. Три схемы включения транзисторов имеют свои достоинства и недостатки.

Ориентировочные показатели транзисторных схем, работающих в схемах усиления, приведены табл. 1.

Таблица 1

Тип схемы	Усиление			Входное сопротивление, Ом	Выходное сопротивление, кОм
	$K_u$	$K_i$	$K_p$		
ОБ	1	до 1000	До 1000	Единицы-десятки	До сотни
ОЭ	10 - 100	$\gg 100$	$\gg 10\ 000$	До тысячи	До десятков
ОК	10 - 100	1	$\gg 100$	Десятки тысяч	До единиц

В технике усиления электрических сигналов наибольшее распространение получили схемы включения транзисторов с общим эмиттером. Для согласования усилительных каскадов с разными сопротивлениями входа и выхода применяется схема с общим коллектором (эмиттерный повторитель).

## ОСНОВНЫЕ ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ УСИЛИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

К основным техническим показателям усилителей относятся:

коэффициенты усиления по току  $K_i$ ,

по напряжению  $K_u$

и по мощности  $K_p$ ,

ширина полосы пропускания  $\Delta F$ ,

чувствительность,

выходная мощность  $P_{\text{вых}}$ ,

искажения, вносимые усилителем.

**Коэффициентом усиления** называется величина, показывающая, во сколько раз выходной сигнал больше входного.

Коэффициент усиления по току

$$K_i = I_{\text{вых}} / I_{\text{вх}} \quad (1)$$

где  $I_{\text{вых}}$ ,  $I_{\text{вх}}$  — выходной и входной токи сигнала.

Кроме коэффициента усиления по току употребляются коэффициент усиления по напряжению  $K_u$  и коэффициент усиления по мощности  $K_p$ :

$$K_u = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}, \quad (2)$$

$$K_p = P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}}. \quad (3)$$

Если в усилителе имеется несколько каскадов усиления с коэффициентами  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ , ...,  $K_n$ , то общий коэффициент усиления усилителя

$$K = K_1 K_2 K_3 \dots K_n. \quad (4)$$

В современных усилителях коэффициент усиления очень большой ( $> 10\,000$ ), поэтому нередко его выражают в **логарифмических** единицах (в дБ):

$$K_u = 20 \lg U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}};$$

$$K_i = 20 \lg I_{\text{вых}} / I_{\text{вх}}$$

Поскольку мощность пропорциональна квадрату тока или напряжения:  $P = I^2 R = U^2 / R$ , коэффициент усиления по мощности (в дБ)

$$K_p = 10 \lg P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}} \quad (5)$$

Коэффициент усиления многокаскадного усилителя представляет собой сумму коэффициентов усиления каскадов (в дБ):

$$K = K_1 + K_2 + K_3 + \dots + K_n. \quad (6)$$

В реальном усилителе сигналы разных частот усиливаются по-разному. Зависимость коэффициента усиления от частоты сигнала называется **частотной** характери-

стикой. Она приведена на рис. 4. На этом графике  $K_{cp}$  — максимальный коэффициент усиления;  $F_H — F_B = \Delta F$  — ширина полосы пропускания ( $F_B$  — верхняя граничная частота,  $F_H$  — нижняя граничная частота).

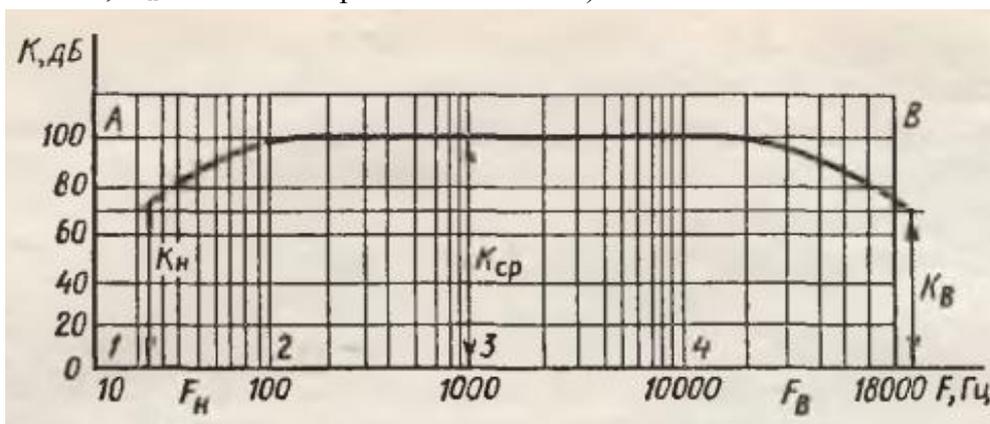


Рис. 4

В пределах полосы пропускания коэффициент усиления почти не меняется. Уменьшение коэффициента усиления в пределах полосы, не превышающее 3 дБ (25—30%), ухо человека почти не замечает. Из-за неравномерного усиления составляющих сложного сигнала в полосе рабочих частот усилителя возникают **частотные искажения**.

Частотные искажения оцениваются **коэффициентом частотных искажений**  $M$ , который представляет собой отношение коэффициента усиления на средней частоте к коэффициенту усиления на определенной частоте:

$$M = K_{cp} / K_F \quad (7)$$

Коэффициент частотных искажений на верхней и нижней граничных частотах одинаков и равен

Коэффициент частотных искажений может измеряться и в децибелах

$$M \text{ (дБ)} = 20 \lg M. \quad (8)$$

На границе полосы пропускания  $M = 3$  дБ.

Если усилитель состоит из нескольких каскадов и известны частотные искажения в каждом, то коэффициент частотных искажений всего усилителя определяется из формул

$$M = M_1 M_2 M_3 \dots M_n \quad (9)$$

$$M \text{ (дБ)} = M_1 \text{ (дБ)} + M_2 \text{ (дБ)} + M_3 \text{ (дБ)} + \dots + M_n \text{ (дБ)} \quad (10)$$

где  $M_1, M_2, M_3, \dots, M_n$  — частотные искажения, выраженные в относительных единицах;

$M_1 \text{ (дБ)}, M_2 \text{ (дБ)}, M_3 \text{ (дБ)}, \dots, M_n \text{ (дБ)}$  — частотные искажения каскадов, выраженные в децибелах.

**Чувствительностью** усилителя называется тот минимальный сигнал, подаваемый на вход, при котором на выходе усилителя создается выходное номинальное напряжение (мощность).

**Выходное номинальное напряжение (мощность)** — это наибольшее выходное напряжение (мощность), при котором искажения не превышают значений, оговорен-

ных в технической документации. Зависимость выходного напряжения усилителя от его входного при неизменной частоте сигнала называется амплитудной характеристикой (рис. 5).

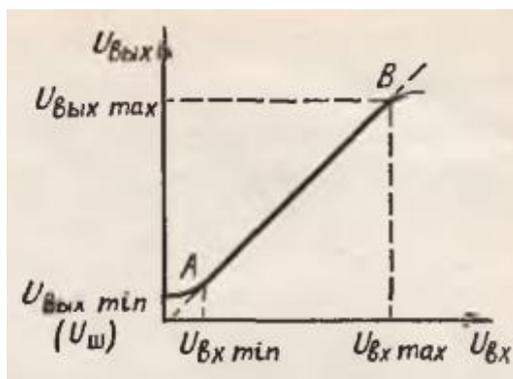


Рис. 5

На амплитудной характеристике имеются три участка. В нижней части она имеет изгиб, так как собственные шумы усилителя соизмеримы с амплитудой сигнала.

В средней части амплитудная характеристика линейна. Это рабочий участок (AB), при работе на нем не будет искажений формы сигнала, будут минимальными нелинейные искажения.

В верхней части амплитудная характеристика транзистора имеет изгиб. Если амплитуда входного сигнала такова, что работа усилителя идет на изогнутых участках (внизу или вверху) амплитудной характеристики, то в выходном сигнале появляются нелинейные искажения. Чем больше нелинейность, тем сильнее искажается синусоидальное напряжение сигнала, т. е. на выходе усилителя появляются новые колебания (высшие гармоники), которых не было в сигнале. Степень нелинейных искажений оценивается величиной коэффициента нелинейных искажений

$$k_{\text{ни}} = \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + \dots + P_n}{P_1}} 100 \quad (11)$$

где  $P_2 + P_3 + \dots + P_n$  — сумма электрических мощностей, выделяемая на нагрузке второй, третьей т. д. гармониками, появившимися в результате нелинейности амплитудной характеристики. Коэффициент нелинейных искажений обычно выражается в процентах.

Для многокаскадного усилителя общая величина  $k_{\text{ни общ}}$  определяется по формуле

$$k_{\text{ни общ}} = k_{\text{ни1}} + k_{\text{ни2}} + \dots + k_{\text{ни n}} \quad (12)$$

где  $k_{\text{ни1}}, k_{\text{ни2}}, \dots, k_{\text{ни n}}$  — коэффициенты нелинейных искажений первого, второго и т. д. каскадов усилителя.

Фазовые искажения возникают из-за наличия в усилителе *реактивных* элементов. Для разных частот сдвиги фаз на реактивном элементе неодинаковы. Фазовых искажений не будет в тех случаях, когда при усилении сдвиг фаз между входным и выходным напряжением остается постоянным для всех частот или он изменяется пропорционально частоте.

На рис. 6 приведена фазовая характеристика усилителя, не имеющего фазовых изменений (1) и с фазовыми искажениями (2).

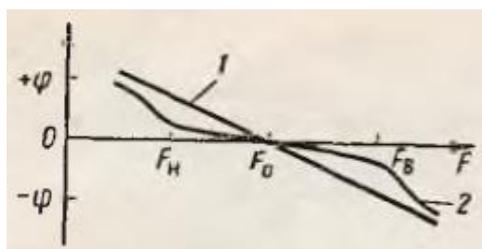


Рис. 6

К фазовым искажениям ухо человека *не чувствительно*, поэтому их в УНЧ не учитывают.

**Входное сопротивление** — сопротивление между входными зажимами усилителя для электрического сигнала:

$$\Delta R_{\text{вх}} = \Delta U_{\text{вх}} / I_{\text{вх}}$$

**Выходное сопротивление** усилителя

$$\Delta R_{\text{вых}} = \Delta U_{\text{вых}} / \Delta I_{\text{вых}}$$

Зная входное сопротивление усилителя, легко определить и оптимальное внутреннее сопротивление возбудителя, при котором будут обеспечены максимальная передача мощности сигнала на вход транзистора и шунтирующее действие усилителя на возбудитель.

Если известно  $R_{\text{вых}}$ , можно определить оптимальное сопротивление, при котором в нагрузке будет выделяться номинальная мощность при допустимых искажениях.

## Принцип работы усилителя низкой частоты на транзисторах

Рассмотрим работу усилительного каскада, выполненного на транзисторе, включенного по схеме с общим эмиттером (рис. 7).

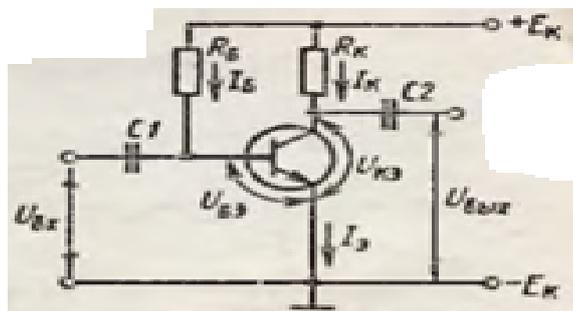


Рис.7

При отсутствии входного сигнала  $U_{\text{вх}} = 0$  усилитель находится в **режиме покоя** и  $U_{\text{вых}}$  также будет равно нулю (иногда этот режим называют *статическим*). При появлении сигнала  $U_{\text{вх}}$  усилитель будет работать в динамическом режиме, т. е. входной сигнал будет усиливаться.

В режиме покоя конденсаторы  $C1$  и  $C2$  отделяют вход усилителя и его выход от предыдущего и последующего каскадов. Если бы конденсаторов не было, то рези-



ние  $U_{кэ} = 0$ ;  $0 = E_k - I_k R_k$ ;  $I_k = E_k / R_k$  (точка К). Зная эти две точки, легко строим нагрузочную линию KF. Уравнение  $U_{кэ} = E_k - I_k R_k$  позволяет определить по двум известным величинам третью. Например, по известным напряжению источника питания и положению рабочей точки (положение рабочей точки задается двумя величинами  $U_{кэ}$  и  $I_k$ ) легко определить сопротивление нагрузки  $R_k = (E - U_{кэ}) / I_k$ .

Рабочий участок нагрузки будет линия АВ, так как из неё изменения тока базы от точки А в обе стороны вызывают одинаковые изменения тока коллектора.

Положение рабочей точки на нагрузочной прямой определяет режим покоя, т. е.  $U_{кэ а}$  и  $I_{к а}$ . При неправильном выборе рабочей точки, т. е. если положительная и отрицательная амплитуды выходного сигнала неодинаковы, в усилителе возникают нелинейные искажения.

Если режим усилительного каскада выбран правильно, то коэффициент нелинейных искажений не должен быть больше 5%.

Для создания режима покоя нужно в усилителе обеспечить определенный ток смещения (ток базы), при котором рабочая точка А находилась бы в середине нагрузочной прямой.

По входным характеристикам легко определить напряжение на базе транзистора. Для этого путем последовательного переноса точек выходной динамической характеристики строится входная динамическая характеристика, по которой и определяются пределы изменения тока базы под воздействием входного сигнала и соответствующие им точки коллектора.

Для получения необходимого смещения пользуются различными схемами.

Схема, приведенная на рис. 7, называется схемой с фиксированным током базы  $I_b$ . В этой схеме ток базы проходит через резистор  $R_b$ , который легко определить:

$$E_k = U_{бэ} + R_b I_b$$

$$R_b = (E_k - U_{бэ}) / I_b \approx E_k / I_b = h_{21э} = E_k / I_{к а}$$

В последнем выражении величиной  $U_{бэ}$  можно пренебречь, так как  $E_k \gg U_{бэ}$ . Резистор  $R_b$  получается очень большим (сотни тысяч омов). При смене транзистора положение рабочей точки изменится из-за разброса параметров транзистора, из-за влияния температуры окружающей среды. Поэтому эта схема не получила широкого распространения.

Схема рис. 9 называется схемой с фиксированным напряжением смещения на базе. Напряжение смещения снимается с резистора, входящего в делитель напряжения R1, R2. Ток делителя выбирается достаточно большим, значительно больше тока базы в режиме покоя. Это необходимо для того, чтобы температурные изменения токов эмиттера и коллектора незначительно влияли на ток базы. Резисторы делителя определяются из формул:

$$R1 = (E_k - U_{бэ}) / (I_d + I_b);$$

$$R2 = U_{бэ} / I_d;$$

$$I_d = (2 \div 5) I_b$$

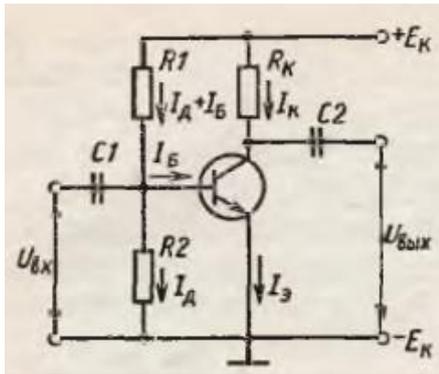


Рис. 9

Схема рис. 9 менее экономична, чем схема на рис. 7, но стабильность режима работы ее повышена. Из схемы рис. 9 видно, что ее резистор R1 подключен параллельно входному сопротивлению транзистора  $R_{вх}$ . Источник питания всегда имеет малое внутреннее сопротивление, поэтому, пренебрегая им, можно считать, что резисторы R1 и R2 включены между собой параллельно. Поэтому делитель R1, R2 должен иметь большое сопротивление (несколько килоом) и обеспечивать выполнение условия:

$$\frac{R1R2}{R1+R2} \gg R_{вх}$$

### Температурная стабилизация режима работы транзисторов

Изменения температуры окружающей среды и разброс характеристик транзисторов приводят к изменению положения рабочей точки А на нагрузочной прямой. При этом резко возрастают искажения. Для стабилизации тока коллектора очень часто применяется отрицательная обратная связь (ООС) по постоянному току или напряжению.

На рис. 10 приведена схема, где резистор смещения подключен непосредственно к коллектору транзистора.

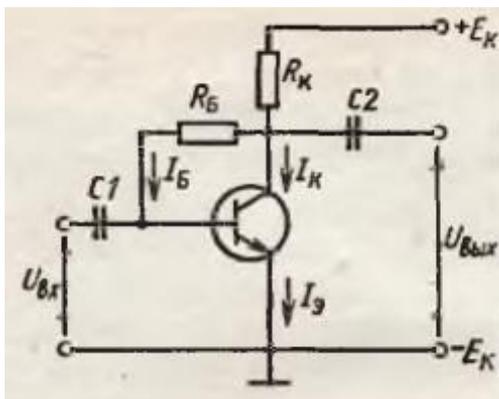


Рис. 10

Если по каким-либо причинам ток коллектора увеличился, рабочая точка переместится по нагрузочной кривой вверх. Это вызовет возрастание падения напряжения на резисторе  $R_K$ , что приведет к снижению напряжения коллектор — эмиттер и соответственно к снижению  $U_{кб}$ . Ток базы уменьшится:

$$I_6 = \frac{U_{кб}}{R_6} = \frac{U_{кэ} - U_{бэ}}{R_6} = \frac{E_к - I_к R_к - U_{бэ}}{R_6}$$

а при уменьшении тока базы рабочая точка смещается вниз по нагрузочной прямой, в свое прежнее положение. В этой схеме часть напряжения усиленного сигнала через резистор смещения  $R_6$  поступает на базу — вход транзистора в противофазе с входным напряжением сигнала. Это означает, что в схеме рис. 10 действует отрицательная обратная связь по напряжению. Такая стабилизация рабочей точки получила название коллекторной.

В схеме рис. 11 стабилизация наиболее эффективна. Стабилизация рабочей точки по постоянному току в этой схеме осуществляется применением делителя напряжения  $R_1, R_2$  и  $R_3$ .

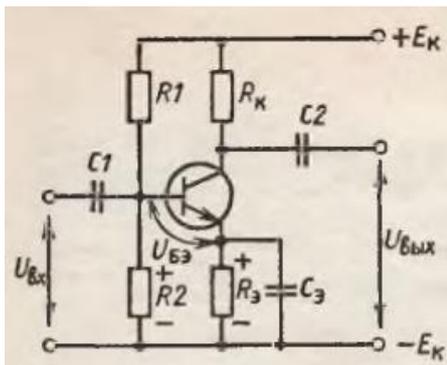


Рис. 11

Напряжение, управляющее током коллектора, состоит из двух напряжений, включенных встречно. Одно из них — прямое фиксированное напряжение  $U_{R2}$ , снимаемое с резистора  $R_2$  делителя  $R_1, R_2$ , а другое — напряжение на резисторе  $U_{R3}$  от тока эмиттера  $I_э$ . Если при изменении температуры увеличится ток коллектора, то увеличится и падение напряжения на  $R_3$  от тока эмиттера, так как  $I_э = I_б + I_к$ . Напряжение же  $U_{R2}$  остается постоянным. Напряжение между базой и эмиттером  $U_{бэ}$  уменьшится:  $U_{бэ} = U_{R2} - U_{R3}$ . Это вызывает уменьшение тока базы и тока коллектора. Рабочая точка вернется в начальное положение. К резистору  $R_3$  подключается параллельно конденсатор  $C_3$  большой емкости. Величина емкости конденсатора выбирается так, чтобы реактивное сопротивление конденсатора на самой низшей частоте усиливаемых частот было бы значительно меньше сопротивления резистора  $R_3$ :

$$\frac{1}{\omega_n C_3} \ll R_3$$

Это необходимо для избежания отрицательной обратной связи по напряжению для сигнала, т. е. для того, чтобы переменная составляющая точка эмиттера прошла, минуя резистор  $R_3$ , а это дает возможность увеличить коэффициент усилителя каскада.

### Определение параметров каскада усиления графическим путем

Динамические (реальные) параметры усилительного каскада в режиме малого сигнала можно рассчитывать графическим путем. Для этого необходимо построить нагрузочную прямую в семействе выходных статических характеристик транзистора, а также воспользоваться статической входной характеристикой, снятой при  $U_{кэ} \neq 0$ .

Такие построения для усилительного каскада по схеме ОЭ были приведены на рис. 8.

По результатам графических построений можно определить основные параметры усилительного каскада:

коэффициент усиления по напряжению

$$K_u = U_{m \text{ вых}} / U_{m \text{ вх}}, \quad \text{где } U_{m \text{ вых}} = (U_{кэ \text{ max}} - U_{кэ \text{ min}}) / 2$$

$$U_{m \text{ вх}} = (U_{бэ \text{ max}} - U_{бэ \text{ min}}) / 2$$

коэффициент усиления по току

$$K_i = I_{m \text{ вых}} / I_{m \text{ вх}} = I_{к \text{ м}} / I_{б \text{ м}}$$

коэффициент усиления по мощности

$$K_p = K_u K_i$$

входное сопротивление

$$R_{\text{вх}} = U_{m \text{ вх}} / I_{m \text{ вх}} = U_{бэ \text{ м}} / I_{б \text{ м}}$$

Усилительный каскад с ОЭ наряду с усилением входного переменного сигнала изменяет его фазу на  $180^\circ$ , т. е. входное и выходное напряжения усилителя противофазны.

### Аналитический метод определения параметров усилительного каскада

Для аналитического расчета необходимо представить транзистор схемой его замещения и к ней присоединить элементы схемы усилителя.

Удобнее пользоваться  $h$ -параметрами транзистора. Для прикидочных расчетов можно предположить, что коэффициент обратной связи  $h_{12э}$  и напряжение обратной связи  $h_{12э} U_{\text{вых}}$  незначительны и ими можно пренебречь.

С учетом сделанного допущения эквивалентная схема усилителя значительно упростится. Она представлена на рис. 12, где транзистор представлен П-образной схемой замещения. В этой схеме:

$h_{11э}$  — входное сопротивление транзистора;

$h_{21э}$  — коэффициент усиления транзистора по току;

$1/h_{22э}$  — выходное сопротивление транзистора;

$h_{21э} I_{б}$  — источник тока коллектора.

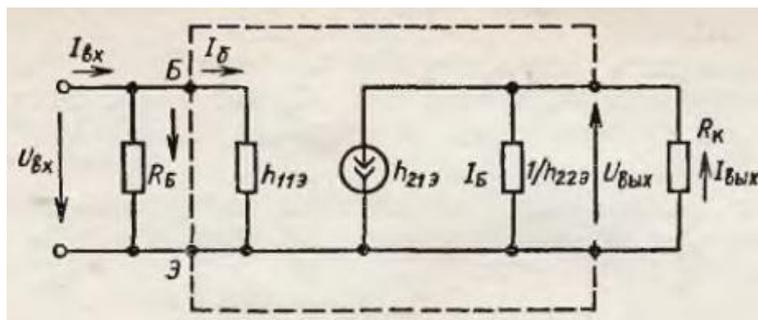


Рис. 12

Для упрощенной схемы входное и выходное сопротивления равны

$$R_{\text{вх}} = R_6 h_{11э} / (R_6 + h_{11э})$$

$$R_{\text{вых}} = \frac{1/h_{22э} R_K}{\frac{1}{h_{22э}} + R_K} = \frac{R_K}{1 + R_K h_{22э}}$$

входное и выходное напряжения:  $U_{\text{вх}} = I_6 h_{11э}$

$$U_{\text{вых}} = h_{21э} I_6 R_{\text{вых}} = \frac{h_{21э} I_6 R_K}{1 + R_K h_{22э}}$$

входной и выходной токи:

$$I_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} / R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} / (R_6 + h_{11э}), \quad I_{\text{вых}} = U_{\text{вых}} / R_K$$

Отсюда легко определить параметры усиления:

$$K_u = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = \frac{h_{21э} R_K}{h_{11э} (1 + R_K h_{21э})};$$

$$K_i = I_{\text{вых}} / I_{\text{вх}} = \frac{h_{21э} R_6}{(R_6 + h_{11э}) (1 + R_K h_{22э})}$$

$$K_p = K_u K_i$$

## Задачи

1. На рис. 1 представлена схема термостабильного каскада с общим эмиттером. Как осуществляется стабилизация коллекторного тока покоя? Предположим, что ток коллектора увеличился на величину  $\Delta I_K$ . В какую сторону изменятся параметры  $U_{R3}$ ,  $U_{60}$ ,  $I_6$ ?

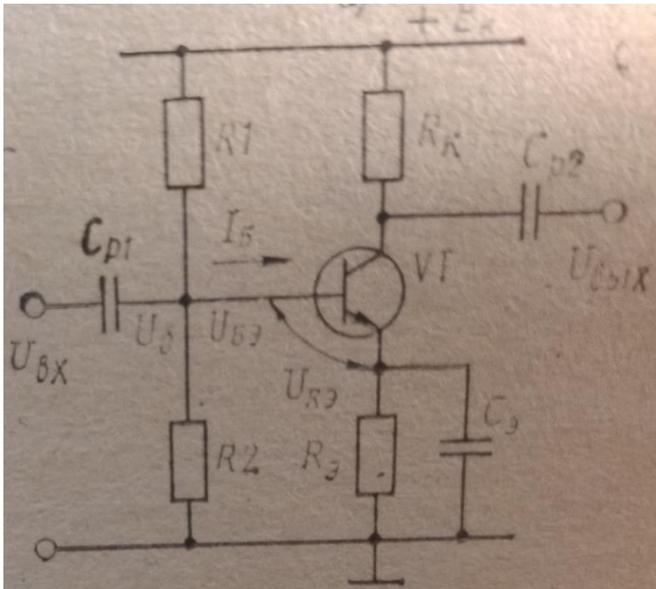


Рис. 1

2. Определить сопротивление резистора  $R_3$ , если через транзистор проходит ток  $I_{K0} \approx I_0 = 5 \text{ mA}$ , а напряжение  $U_{60} = 1.6 \text{ V}$ . Падение напряжения на эмиттерном переходе транзистора  $U_{630} = 0.6 \text{ V}$ .

3. Определить напряжение питания каскада (рис. 1), при котором обеспечивается режим  $I_{\text{эо}} \approx I_{\text{кo}} = 10 \text{ мА}$ ,  $U_{\text{кэо}} = 5 \text{ В}$ . Номиналы резисторов:  $R_3 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R_{\text{к}} = 1 \text{ кОм}$ .
4. Определить сопротивления резисторов в цепи смещения базы транзистора, если напряжение  $U_{\text{бo}} = 2 \text{ В}$ , а ток через резистор  $R_1$  определяется соотношением  $I_{R1} = 2I_{\text{бo}} = 1 \text{ мА}$ . Напряжение питания  $E_{\text{к}} = 10 \text{ В}$ .
5. В схеме каскада (рис. 1) коэффициент усиления по напряжению определяется формулой  $K_{\text{u}} = -h_{21\text{э}} R_{\text{к}} / R_{\text{вх.э}} = -h_{21\text{э}} R_{\text{к}} / [r_{\text{б}} + (1 + h_{21\text{э}} r_{\text{э}})]$ . Можно ли пользоваться приведенной формулой для определения коэффициента усиления  $K_{\text{u}}$  в схеме каскада (рис. 1)?
6. В схеме каскада (рис. 1) произошел обрыв цепи шунтирующего конденсатора  $C_3$ . Останутся ли при этом неизменными коэффициент усиления по напряжению и входное сопротивление?
7. Какой должна быть выбрана емкость конденсатора  $C_3$  в схеме усилителя (рис.1), если известно, что нижняя граница полосы пропускания равна  $100 \text{ Гц}$ , а  $R_3 = 500 \text{ Ом}$ ? Найти падение напряжения от постоянной и переменной составляющей тока, если  $I_{\text{эо}} = 2 \text{ мА}$ , а переменная составляющая —  $2 \text{ мА}$ .