

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

ЭЛЕКТРОНИКА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
по выполнению лабораторных работ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА N 5

ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЬНЫХ СВОЙСТВ КАСКАДА
НА ТРАНЗИСТОРЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

Тула 2001

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ РАБОТЫ

1. Изучение принципа построения усилительных каскадов, принципа действия каскада на транзисторе с ОЭ и основных положений расчета каскада по постоянному и переменному току.

2. Исследование усилительных свойств каскада на транзисторе с ОЭ:

а) статического режима (режима покоя) транзистора;

б) зависимости максимальной амплитуды выходного неискаженного сигнала $U_{\text{выхmax}}$ от параметров элементов схемы каскада;

в) зависимости коэффициента усиления K_u (по напряжению) каскада от параметров элементов схемы каскада.

2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ

2.1. УСИЛИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

Многие усилители состоят из нескольких ступеней, осуществляющих последовательное усиление сигнала и обычно называемых каскадами. Число каскадов в таких многокаскадных усилителях зависит от требуемых значений коэффициентов усиления: по току - K_i , по напряжению - K_u , по мощности - K_p .

2.2. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ

Схемы усилительных каскадов характеризуются большим разнообразием. Они могут отличаться числом и режимом работы используемых транзисторов при усилении переменного сигнала. Но принцип построения главных цепей усилительных каскадов один и тот же.

Принцип построения и работы различных каскадов удобно показать на примере структурной схемы рис. 1,а, действительной для усилительных каскадов на одном транзисторе. Основными элементами каскада являются управляемый элемент УЭ, функцию которого выполняет биполярный или полевой транзистор, и резистор R . Совместно с напряжением питания E эти элементы образуют выходную цепь каскада. Усиливаемый сигнал $U_{\text{вх}}$, принятый на рис.1.а для простоты синусоидальным, подается на вход УЭ. Выходной сигнал $U_{\text{вых}}=E-iR$ (П закон Кирхгофа) снимается с выхода УЭ или с резистора R . Он создается в результате изменения сопротивления УЭ и, следовательно, тока i , в выходной цепи под воздействием входного напряжения. 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.

Для усилительных каскадов, питающихся постоянным напряжением, важно выявить сущность получения переменного выходного напряжения при переменном напряжении на входе. Ввиду использования для питания источника постоянного напряжения E ток i в выходной цепи каскада является однонаправленным (рис. 1.а). При этом переменный ток и напряжение выходной цепи (пропорциональные току и напряжению входного сигнала) следует рассматривать как переменные составляющие тока и напряжения, накладывающиеся на их постоянные составляющие I_n и U_n (рис. 1,б). Связь между постоянными и переменными составляющими должна быть такой, чтобы амплитудные значения переменных составляющих не превышали постоянных составляющих, т.е. $I_n \geq I_m$ и $U_n \geq U_m$. Если эти условия не будут выполняться, то ток i в выходной цепи на отдельных интервалах будет равен нулю, что приведет к искажению формы выходного сигнала.

Таким образом, для обеспечения работы усилительного каскада при переменном входном сигнале в его выходной цепи должны быть созданы постоянные составляющие тока I_n и напряжения U_n . Задачу решают путем подачи во входную цепь каскада помимо усиливаемого сигнала соответствующего постоянного напряжения $U_{\text{вхп}}$.

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

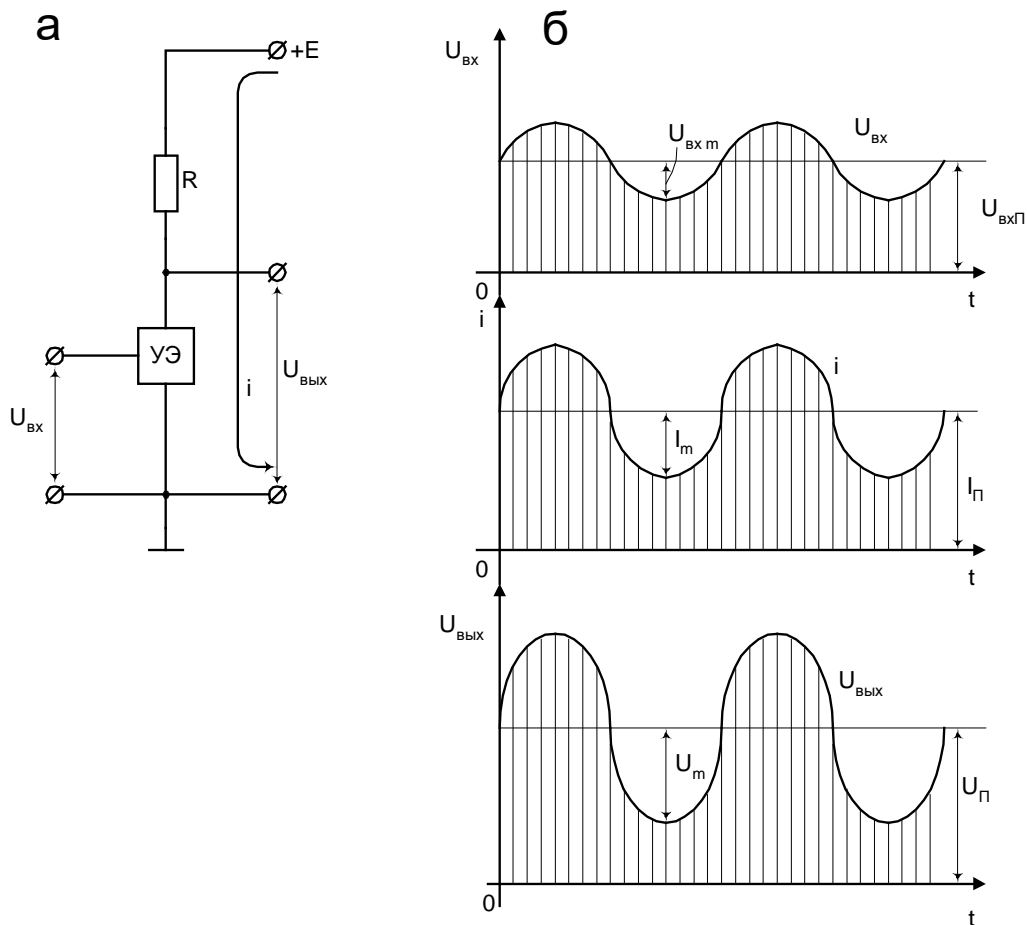


Рис.1. Усилительный каскад:
а - принцип построения;
б - временные диаграммы

Таким образом, усилительные свойства каскадов усиления основываются на следующем. При подаче на управляемый элемент напряжения входного сигнала в токе выходной цепи создается переменная составляющая, вследствие чего на управляемом элементе 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 изменения напряжения на управляемом элементе (т.е. чем выше сопротивление R).

2.3. УСИЛИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД НА БИПОЛЯРНОМ ТРАНЗИСТОРЕ С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

Существует множество вариантов выполнения схемы усилительного каскада на транзисторе с общим эмиттером (ОЭ). Это обусловлено главным образом особенностями задания режима покоя каскада. Рассмотрим усилительный каскад ОЭ на примере схемы рис. 2, получившей наибольшее применение при реализации каскада на дискретных компонентах.

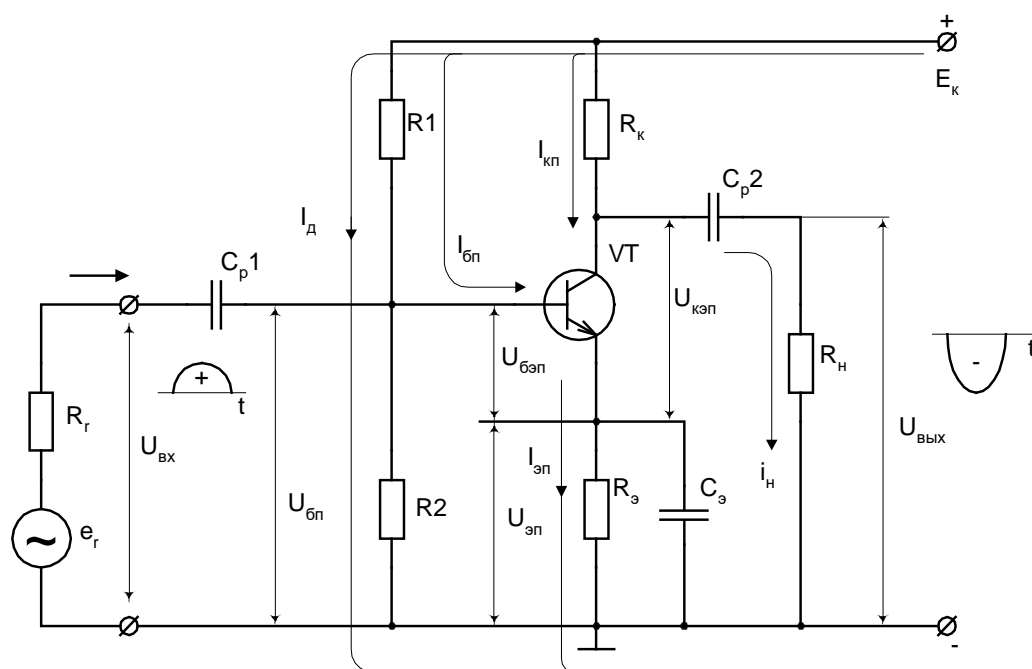


Рис. 2. Схема усилительного каскада ОЭ

Основными элементами схемы являются: источник питания E_k , управляемый элемент - транзистор VT -и резистор R_k . Эти элементы образуют главную цепь усилительного каскада, в которой за счет протекания управляемого по цепи базы коллекторного тока создается усиленное переменное напряжение на выходе схемы.

Остальные элементы каскада выполняют вспомогательную роль. Конденсаторы C_{p1} и C_{p2} являются разделительными. Конденсатор C_{p1} исключает шунтирование входной цепи каскада цепью источника входного сигнала по постоянному току, что позволяет, во-первых, исключить протекание постоянного тока через источник входного сигнала по цепи $E_k - R1 - R_r$ и во-вторых, обеспечить независимость от внутреннего сопротивления этого источника R_r напряжения на базе $U_{бп}$, в режиме покоя. Функция конденсатора C_{p2} сводится к пропуску в цепь нагрузки переменной составляющей напряжения и задержанию постоянной составляющей.

Резисторы $R1$ и $R2$ используются для задания режима покоя каскада. Поскольку биполярный транзистор управляется током, то ток покоя управляемого элемента (в данном случае ток $I_{кп}$) создается заданием соответствующей величины тока базы покоя $I_{бп}$. Резистор R_3 предназначен для создания цепи протекания тока $I_{бп}$. Совместно с $R2$ резистор $R1$ обеспечивает исходное напряжение на базе $U_{бп}$ относительно зажима "-" источника питания. Резистор R_3 является элементом отрицательной обратной связи (ООС), предназначенным для стабилизации режима покоя каскада при изменении температуры. Конденсатор C_3 , шунтирует резистор R_3 по переменному току, исключая тем самым проявление ООС в каскаде по переменным составляющим. Отсутствие C_3 привело бы к уменьшению коэффициентов усиления схемы.

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

Температурная зависимость параметров режима покоя обуславливается зависимостью коллекторного тока покоя $I_{кп}$ от температуры. Основными причинами такой зависимости являются изменения от температуры начального тока коллектора $I_{к0(э)}$, напряжения $U_{бэ}$ и коэффициента β . Температурная нестабильность указанных параметров приводит к прямой зависимости тока $I_{кп}$ от температуры. При отсутствии мер по стабилизации тока $I_{кп}$ его температурные изменения вызывают изменение режима покоя каскада, что может привести к режиму работы каскада в нелинейной области характеристик транзистора и искажению фор-

мы кривой выходного сигнала. Вероятность появления искажений повышается с увеличением амплитуды выходного сигнала.

Проявление ООС и ее стабилизирующего действия на ток $I_{кп}$ нетрудно показать непосредственно на схеме рис. 2. Предположим, что под влиянием температуры ток $I_{кп}$ увеличился. Это отражается на увеличении тока $I_{эп}$, повышении напряжения $U_{эп}=I_{эп}R_э$ и соответственно снижении напряжения $U_{бэп}=U_{бп}-U_{эп}$. Ток базы $I_{бп}$ уменьшается, вызывая уменьшение тока $I_{бп}$, чем создается препятствие наметившемуся увеличению тока $I_{кп}$. Иными словами, стабилизирующее действие ООС, создаваемой резистором $R_э$, проявляется в том, что температурные изменения параметров режима покоя передаются цепью ОС в противофазе на вход каскада, препятствуя тем самым изменению тока $I_{кп}$, а следовательно, и напряжения $U_{кэп}$.

Принцип действия каскада ОЭ заключается в следующем. При наличии постоянных составляющих токов и напряжений в схеме подача на вход каскада переменного напряжения приводит к появлению переменной составляющей тока базы транзистора и, следовательно, переменной составляющей тока в выходной цепи каскада (в коллекторном токе транзистора). За счет падения напряжения на резисторе $R_к$ создается переменная составляющая напряжения на коллекторе, которая через конденсатор $C_{р2}$ передается на выход каскада - в цепь нагрузки.

2.4. РАСЧЕТ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА ОЭ ПО ПОСТОЯННОМУ ТОКУ

Рассмотрим основные положения, на которых базируется расчет элементов схемы каскада, предназначенных для обеспечения требуемых параметров режима покоя (расчет по постоянному току).

Анализ по постоянному току проводят графоаналитическим методом, основанным на использовании графических построений и расчетных соотношений. Графические построения проводятся с помощью выходных (коллекторных) характеристик (рис. 3). Удобство метода заключается в наглядности нахождения связи параметров режима покоя каскада ($U_{кэп}$ и $I_{кп}$) с амплитудными значениями его переменных составляющих (выходного напряжения $U_{выхм}$ и тока $I_{кп}$), являющимися исходными при расчете каскада.

На выходных характеристиках рис. 3 проводят линию нагрузки каскада по постоянному току (а - б), представляющую собой геометрические места точек, координаты $U_{кэ}$ и $I_к$ которых соответствуют возможным значениям точки (режима) покоя каскада. Аналитически зависимость $U_{кэп}=F(I_{кп})$ находят из уравнения, характеризующего баланс напряжений в выходной цепи каскада (П закон Кирхгофа):

$$U_{кэп} = E_к - I_{кп} R_к - I_{эп} R_э = E_к - I_{кп} R_к - \frac{I_{кп}}{\alpha} R_э. \quad (1)$$

Поскольку коэффициент α близок к единице, то без особой погрешности можно записать

$$U_{кэп} \cong E_к - I_{кп} (R_к + R_э) \quad (2)$$

Выражение (2) является графическим уравнением прямой. В связи с этим построение линии нагрузки каскада по постоянному току удобно провести по двум точкам, характеризующим режим холостого хода (точка а) и короткого замыкания (точка б) выходной цепи каскада (рис. 3). Для точки а $I_{кп}=0$, $U_{кэп}=+E_к$ и для точки б $U_{кэп}=0$, $I_{кп} = \frac{E_к}{R_к + R_э}$. Выбрав по

входной (базовой) характеристике $I_б=F(U_{бэ})$ необходимое значение тока базы покоя $I_{бп}$, тем самым определим координаты точки П пересечения соответствующей выходной характеристики $I_б=I_{бп}$ с линией нагрузки каскада по постоянному току (рис. 3).

При определении переменных составляющих выходного напряжения каскада и коллекторного тока транзистора используют линию нагрузки каскада по переменному току. При этом необходимо учесть, что по переменному току сопротивление в цепи эмиттера транзистора равно нулю, так как резистор $R_э$ шунтируется конденсатором $C_э$, а к коллекторной цепи подключается нагрузка, поскольку сопротивление конденсатора $C_{р2}$ по переменному току

мало. Если к тому же учесть, что сопротивление источника питания E_K по переменному току также близко к нулю, то считается, что сопротивление каскада по переменному току определяется сопротивлением резисторов R_K и R_H , включенных параллельно, т.е. $R_{H\sim} = R_K \parallel R_H$. Сопротивление нагрузки каскада по постоянному току $R_{H\sim} = R_K + R_{\Sigma}$ больше, чем по переменному току $R_{H\sim} = R_K \parallel R_H$.

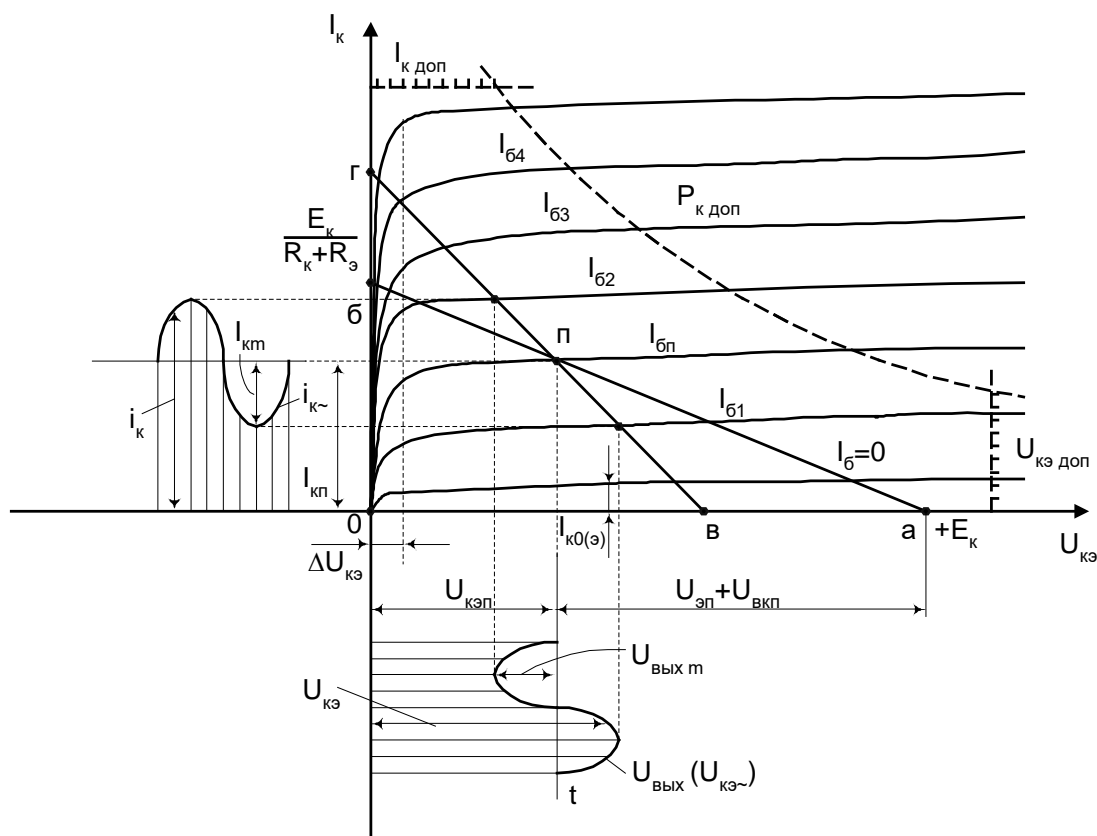


Рис. 3. Графическое определение режима покоя каскада ОЭ на коллекторных характеристиках транзистора.

Поскольку при наличии входного сигнала напряжение и ток транзистора представляют собой суммы постоянных и переменных составляющих, линия нагрузки по переменному току проходит через точку покоя П (рис. 3). Наклон линии нагрузки по переменному току будет больше, чем по постоянному току. Линию нагрузки по переменному току строят по отношению приращений напряжений к току: $\frac{\Delta U_{KЭ}}{\Delta I_K} = R_K \parallel R_H$.

При подаче на вход каскада (см. рис. 2) напряжения $U_{ВХ}$ в базовой цепи транзистора создается переменная составляющая тока $i_{Б\sim}$, связанная с напряжением $U_{ВХ}$ входной характеристикой транзистора (рис. 4). Так как ток коллектора через коэффициент β пропорционально зависит от тока базы, то в коллекторной цепи транзистора создаются переменная составляющая тока $i_{К\sim}$ (рис. 3) и переменное выходное напряжение $U_{ВЫХ}$, связанное с током $i_{К\sim}$ линией нагрузки по переменному току. При этом линия нагрузки по переменному току характеризует изменение мгновенных значений тока коллектора $i_{К\sim}$, и напряжения на транзисторе $U_{КЭ}$ или, как говорят, перемещение рабочей точки. Рабочая точка перемещается вниз от точки покоя П при отрицательной полуволне входного напряжения и вверх - при положительной полуволне. Очевидно, для исключения искажений выходного сигнала необходимо, чтобы

рабочая точка при перемещении вверх по нагрузке не заходила в область нелинейных начальных участков выходных характеристик, а при перемещении вниз - в область начальных токов коллектора $I_{ко(э)}$. Работа каскада без искажений входного сигнала достигается за счет обеспечения соответствующей величины входного сигнала и правильного выбора режима (точки) покоя.

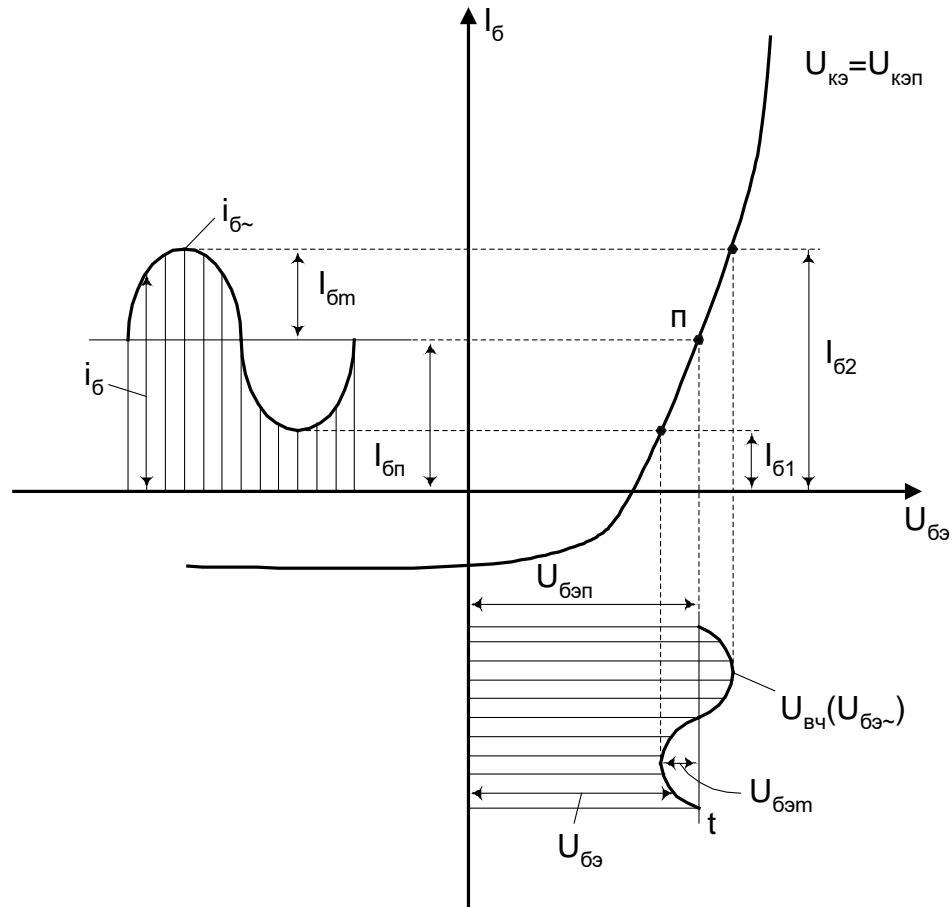


Рис. 4. Графическое определение режима покоя каскада ОЭ на базовой характеристике транзистора.

Рассмотрим факторы, которые следует учитывать при выборе точки покоя и расчете конкретного каскада. Исходными параметрами являются амплитудные значения переменных составляющих напряжения $U_{выхм}$ и тока нагрузки $I_{нм}$, мощность в нагрузке R_n и сопротивление нагрузки R_n . При существующих связях между указанными параметрами в принципе достаточно знать только два из них, например $U_{выхм}$ и R_n , чтобы найти все остальные.

Для исключения возможных искажений усиленного сигнала параметры режима покоя должны удовлетворять следующим условиям:

$$U_{кэп} > U_{выхм} + \Delta U_{кэ}; \quad (3)$$

$$I_{кп} > I_{км} + I_{ко(э)max}, \quad (4)$$

где $\Delta U_{кэ}$ - напряжение на коллекторе, соответствующее области нелинейных начальных участков выходных характеристик транзистора; $I_{ко(э)max}$ - начальный ток коллектора, соответствующий максимальной температуре.

Ток $I_{км}$ связан с выходным напряжением каскада соотношением

$$I_{км} = \frac{U_{выхм}}{R_k \parallel R_n} = \frac{U_{выхм}}{R_n}. \quad (5)$$

Чтобы увеличить коэффициенты усиления каскада, значение R_k выбирают в три - пять раз больше R_n . По выбранному току $I_{кп}$ находят ток базы покоя

$$I_{\text{бп}} = \frac{I_{\text{кп}} - I_{\text{ко(э)}}}{\beta}, \quad (6)$$

а по входным характеристикам транзистора - напряжение $U_{\text{бэп}}$.

Ток эмиттера покоя связан с токами $I_{\text{бп}}$ и $I_{\text{кп}}$ соотношением

$$I_{\text{эп}} = (1 + \beta)I_{\text{бп}} + I_{\text{ко(э)}} = \frac{I_{\text{кп}} - I_{\text{ко(э)}}}{\beta}(1 + \beta) + I_{\text{ко(э)}} \approx I_{\text{кп}}. \quad (7)$$

При выборе величины $E_{\text{к}}$ (если она не задана) необходимо руководствоваться условиями

$$E_{\text{к}} = U_{\text{кэп}} + I_{\text{кп}} R_{\text{к}} + U_{\text{эп}}, \quad (8)$$

где

$$U_{\text{эп}} = I_{\text{эп}} R_{\text{э}} \approx I_{\text{кп}} R_{\text{э}}. \quad (9)$$

При определении значения $U_{\text{эп}}$, исходят из следующих соображений. Повышение напряжения $U_{\text{эп}}$ сказывается на увеличении температурной стабильности режима покоя каскада, так как при этом сопротивление $R_{\text{э}}$ получается больше и тем самым увеличивается глубина отрицательной обратной связи по постоянному току в каскаде. Однако при этом необходимо повышать напряжение питания $E_{\text{к}}$ схемы. В соответствии с указанным, значение $U_{\text{эп}}$ выбирают равным $(0,1 - 0,3)E_{\text{к}}$. С учетом выражения (8) получаем

$$E_{\text{к}} = \frac{U_{\text{кэп}} + I_{\text{кп}} R_{\text{к}}}{0,7 \dots 0,9}. \quad (10)$$

Сопротивление $R_{\text{э}}$ находят из соотношения

$$R_{\text{э}} \cong U_{\text{эп}} / I_{\text{кп}}. \quad (11)$$

При расчете элементов входного делителя необходимо исходить из следующих соображений. С точки зрения температурной стабильности режима покоя нужно, чтобы изменение тока базы покоя $I_{\text{бп}}$ слабо отражалось на изменении напряжения $U_{\text{бп}}$. Для этого требуется, чтобы ток делителя $I_{\text{д}}$, протекающий через резисторы R_1 и R_2 , превышал ток $I_{\text{бп}}$ через резистор R_1 . Однако при условии $I_{\text{д}} \gg I_{\text{бп}}$ сопротивления R_1 и R_2 получаются малыми и оказывают сильное шунтирующее действие на входную цепь транзистора. Поэтому при расчете элементов входного делителя вводят ограничения:

$$R = R_1 \parallel R_2 = (2-5)r_{\text{вх}}; \quad (12)$$

$$I_{\text{д}} = (2 \dots 5)I_{\text{бп}} \quad (13)$$

где $r_{\text{вх}}$ - входное сопротивление транзистора, характеризующее сопротивление цепи база - эмиттер переменному току ($r_{\text{вх}} = \Delta U_{\text{бэ}} / \Delta I_{\text{б}}$).

Соотношение для расчета сопротивлений R_1 и R_2 , получаем из схемы (рис. 2):

$$R_2 = \frac{U_{\text{бп}}}{I_{\text{д}}} = \frac{U_{\text{эп}} + U_{\text{бэп}}}{I_{\text{д}}}, \quad R_1 = \frac{E_{\text{к}} - U_{\text{бп}}}{I_{\text{д}} + I_{\text{бп}}}. \quad (14)$$

Часто требования к стабильности режима покоя каскада задаются в отличие от рекомендаций (13) более конкретно с помощью коэффициента температурной стабильности $S = \Delta I_{\text{кпдоп}} / \Delta I_{\text{ко}}$, который выражается через параметры элементов схемы каскада как

$$S = \frac{R_{\text{э}} + R_{\text{б}}}{R_{\text{э}} + R_{\text{б}}(1 - \alpha)} = \frac{(R_{\text{э}} + R_{\text{б}})(1 + \beta)}{R_{\text{э}}(1 + \beta) + R_{\text{б}}},$$

где $R_{\text{б}} = R_1 \parallel R_2$. Тогда при известном $R_{\text{э}}$, определяемом соотношением (11), можно найти $R_{\text{б}}$:

$$R_{\text{б}} = R_{\text{э}} \frac{(1 + \beta)(S - 1)}{1 + \beta - S}.$$

Из условия обеспечения выбранного режима покоя

$$U = \frac{E_{\text{к}}}{R_1 + R_2} R_2 - I_{\text{бп}} R_{\text{б}} = \frac{E_{\text{к}} R_{\text{б}}}{R_1} - I_{\text{бп}} R_{\text{б}}$$

находим сопротивление R_1 верхнего плеча делителя:

$$R_1 = \frac{E_k R_6}{U_{бп} + I_{бп} R_6}.$$

Теперь нетрудно определить сопротивление R_2 , нижнего плеча делителя:

$$R_2 = \frac{R_1 R_6}{(R_1 - R_6)}.$$

Тип транзистора выбирают с учетом частотного диапазона работы каскада (по предельной частоте (f_α или f_β), а также параметров по току, напряжению и мощности. Максимально допустимый ток коллектора транзистора $I_{кдоп}$ должен быть больше наибольшего мгновенного значения тока коллектора в каскаде, т.е. согласно рис. 3

$$I_{кmax} = I_{кп} + I_{км} < I_{кдоп}.$$

Транзистор по напряжению обычно выбирают с учетом соотношения $U_{кэ,доп} > E_k$. Мощность $P_k = U_{кп} I_{кп}$, рассеиваемая в коллекторном переходе транзистора, должна быть меньше максимально допустимой мощности $P_{кдоп}$ транзистора. Кривая предельно допустимой мощности представляет собой гиперболу, для каждой точки которой $U_{кэ} I_k = P_{кдоп}$ (рис.3).

Таким образом, расчет каскада по постоянному току решает задачу выбора элементной схемы для получения в нагрузке необходимых параметров выходного сигнала

2.5. РАСЧЕТ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА ОЭ ПО ПЕРЕМЕННОМУ ТОКУ

Важными показателями каскада являются его коэффициенты усиления по току K_i , напряжению K_u и мощности K_p , а также входное $R_{вх}$ и выходное $R_{вых}$ сопротивления.

Задача определения этих показателей решается при расчете усилительного каскада по переменному току. Метод расчета основан на замене транзистора и всего каскада его схемой замещения по переменному току. Схема замещения каскада ОЭ приведена на рис. 5, где транзистор представлен его схемой замещения в h -параметрах. Расчет по переменному току можно также вести, используя схему замещения транзистора в физических параметрах.

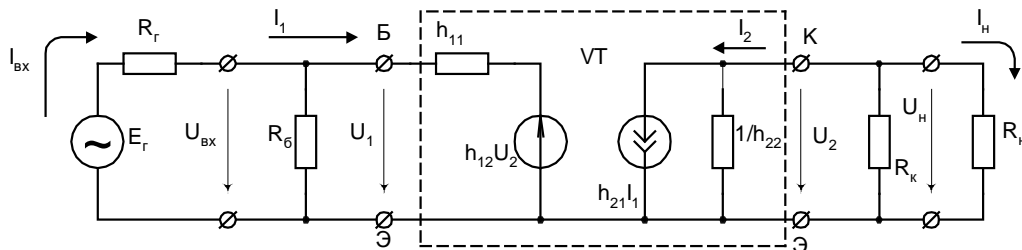


Рис. 5. Схема замещения усилительного каскада ОЭ в h -параметрах ($h_{12} \neq 0$)

Расчет каскада производится для области средних частот, в которой зависимость параметров от частоты не учитывается, а сопротивления конденсаторов в схеме равны нулю и на схеме (рис. 5) не показаны. (Величины емкостей конденсаторов C_π , C_{p1} , C_{p2} выбираются конструктором таким образом, чтобы их сопротивления в рабочем диапазоне частот были во много раз меньше по сравнению с сопротивлениями цепей, куда эти емкости включаются). Входной сигнал, как и раньше, принимается синусоидальным. Токи и напряжения в схеме характеризуются их действующими значениями, связанными с амплитудными значениями коэффициентом $1/\sqrt{2}$. По переменному току сопротивление источника питания E_k равно нулю, поэтому верхний вывод резистора R_1 на схеме замещения связан с нижним выводом резистора R_2 . Эти два резистора соединяются на схеме замещения параллельно и заменены на $R_6 = R_1 || R_2$.

Если учесть, что у транзистора коэффициент обратной связи по напряжению (параметр h_{12}) сравнительно мал, то полагая h_{12} равным нулю, можно существенно упростить схему замещения каскада (рис. 5). В этом случае источника напряжения $h_{12}U_2$ во входной це-

пи не будет, получаем упрощенную схему (Рис. 6), по которой проводятся все дальнейшие расчеты.

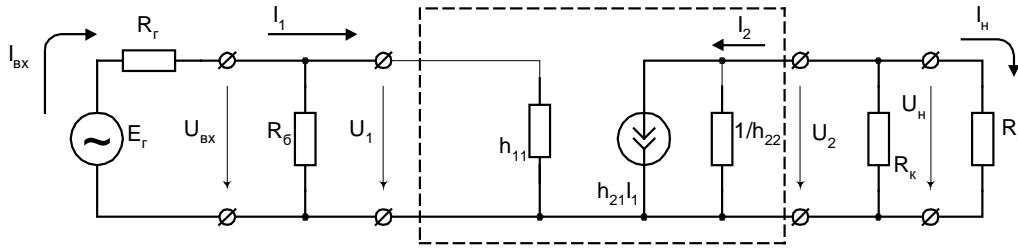


Рис. 6. Упрощенная схема замещения усилительного каскада ОЭ в h-параметрах ($h_{12}=0$)

Определим входное сопротивление каскада $R_{ВХ}$. Его находят из параллельного соединения сопротивления R_6 и сопротивления $r_{ВХ}$ входной цепи транзистора

$$R_{ВХ} = R_6 \parallel r_{ВХ} = R_1 \parallel R_2 \parallel r_{ВХ} \quad (15)$$

где $r_{ВХ} = U_1/I_1 = h_{11}$.

С учетом условия $R_6 = R_1 \parallel R_2 \geq (2...5)r_{ВХ}$ получаем, что входное сопротивление каскада ОЭ определяется входным сопротивлением транзистора и не превышает 1 - 3 кОм.

Для определения коэффициента усиления каскада по току $K_I = I_Н/I_{ВХ}$ выразим ток $I_Н$ через $I_{ВХ}$. С этой целью вначале определим ток I_1 через $I_{ВХ}$:

$$I_1 = U_{ВХ}/r_{ВХ} = I_{ВХ} R_{ВХ}/r_{ВХ} \quad (16)$$

Затем найдем ток $I_Н$:

$$I_Н = \frac{U_Н}{R_Н} = -h_{21} I_1 \frac{\frac{1}{h_{22}} \parallel R_К \parallel R_Н}{R_Н}. \quad (17)$$

С учетом выражения (16) имеем

$$I_Н = -I_{ВХ} \frac{R_{ВХ}}{r_{ВХ}} h_{21} \frac{\frac{1}{h_{22}} \parallel R_К \parallel R_Н}{R_Н}. \quad (18)$$

Подставив соотношение (18) в выражение для K_I получим:

$$K_I = -\frac{R_{ВХ}}{r_{ВХ}} h_{21} \frac{\frac{1}{h_{22}} \parallel R_К \parallel R_Н}{R_Н}. \quad (19)$$

Видно, что коэффициент K_I пропорционален коэффициенту передачи по току (h_{21}) транзистора и зависит от шунтирующего действия входного делителя и значений сопротивлений $R_К$, $R_Н$. Соотношение (19) подтверждает сказанное ранее о необходимости выбора $R_1 \parallel R_2 = R_6 > r_{ВХ}$ и выполнения условия $R_К > R_Н$. Для ориентировочной оценки K_I можно принять $R_{ВХ} \approx r_{ВХ}$ и $1/h_{22} \gg R_К \parallel R_Н$. Тогда выражение (19) принимает вид

$$K_I \cong -h_{21} \frac{R_К \parallel R_Н}{R_Н}. \quad (20)$$

Таким образом, каскад ОЭ обладает довольно значительным коэффициентом усиления по току, стремящимся в пределе при $R_К \gg R_Н$ к коэффициенту передачи тока транзистора $h_{21} \cong \beta$.

Коэффициент усиления каскада по напряжению $K_U = U_{ВЫХ}/E_Г = U_Н/E_Г$ можно найти, выразив напряжение на нагрузке через ток нагрузки $U_Н = I_Н R_Н$, а напряжение источника - через входной ток каскада $E_Г = I_{ВХ}(R_Г + R_{ВХ})$:

$$K_U = \frac{I_Н R_Н}{I_{ВХ}(R_Г + R_{ВХ})} = K_I \frac{R_Н}{R_Г + R_{ВХ}}. \quad (21)$$

Подставив в (21) соотношение (20), находим

$$K_u \cong -h_{21} \frac{R_k \parallel R_n}{R_r + R_{вх}}. \quad (22)$$

В соответствии с выражением (22) можно заключить, что коэффициент усиления каскада по напряжению тем больше, чем выше коэффициент передачи тока h_{21} транзистора и сопротивление выходной цепи каскада по сравнению с сопротивлением входной цепи. В частности, коэффициент усиления по напряжению возрастает с уменьшением внутреннего сопротивления R_r источника сигнала. Коэффициент K_u в схеме ОЭ составляет 20-100.

Усилительный каскад ОЭ осуществляет поворот по фазе на 180° выходного напряжения относительно входного. Для иллюстрации этого положения предположим, что напряжение $U_{вх}$, имеющее положительную полярность, увеличивается (или воздействует, например, положительная полуволна входного напряжения, рис. 2). Повышение напряжения $U_{вх}$ увеличивает ток базы и соответственно ток коллектора транзистора. Падение напряжения на резисторе R_k увеличивается, что вызывает уменьшение напряжения на коллекторе (или появление на выходе каскада отрицательной полуволны напряжения). Инверсия фазы выходного напряжения в каскаде ОЭ учитывается знаком "-" в выражениях для K_u .

Коэффициент усиления по мощности

$$K_p = P_{вых} / P_{вх} = K_u K_I$$

В соответствии с выражениями (20), (21) имеет вид

$$K_p \cong h_{21}^2 \frac{(R_k \parallel R_n)^2}{(R_r + R_{вх}) R_n} = h_{21}^2 \frac{R_k^2 R_n}{(R_r + R_{вх})(R_k + R_n)^2}$$

и в схеме ОЭ составляет $(0,2...5) \cdot 10^3$. Из выражения для K_p можно заключить, что максимальное значение K_p получается при неограниченном увеличении коллекторного сопротивления R_k . Но неограниченное увеличение сопротивления нагрузки R_n снижает до нуля эффект усиления мощности. Путем вычисления производной выражения для K_p по R_n с последующим приравниванием ее нулю можно установить, что при заданном R_k максимальное усиление по мощности получается при условии $R_n = R_k$, т.е. при равенстве сопротивлений нагрузки и цепи коллектора транзистора.

Выходное сопротивление каскада рассчитывают относительно его выходных зажимов:

$$R_{вых} = R_k \parallel r_{вых}, \quad (23)$$

где $r_{вых}$ - выходное сопротивление нагруженного транзистора, причем $r_{вых} = U_2 / I_2$ при $E_r = 0$. Из схемы замещения (рис. 6) видно, что при $E_r = 0$ во входной цепи каскада и транзистора токи будут отсутствовать, т.е. $I_1 = 0$. Тогда будет отсутствовать и источник тока $h_{21} I_1$ в выходной цепи. В этом случае отношение U_2 / I_2 будет равно $1 / h_{22}$, а значит, и $r_{вых} = 1 / h_{22}$.

Поскольку выходная проводимость (параметр h_{22}) при постоянном входном токе транзистора сравнительно мала, т.е. обычно $1 / h_{22} \gg R_k$, выходное сопротивление каскада ОЭ определяется величиной R_k .

2.6. ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА

Наличие в схеме усилительного каскада конденсаторов и зависимость параметров транзистора от частоты приводят к тому, что при изменении частоты входного сигнала напряжение на выходе усилителя изменяется как по амплитуде, так и по фазе. В соответствии с этим коэффициент усиления по напряжению характеризуется комплексной величиной, определяемой модулем коэффициента усиления $|K_u|$ и углом фазового сдвига φ выходного синусоидального напряжения усилителя относительно входного. Зависимость модуля K_u от частоты определяет амплитудно - частотную характеристику усилителя, а зависимость угла фазового сдвига φ от частоты - его фазочастотную характеристику. В области низких частот полосы пропускания указанные зависимости при чисто активной нагрузке обуславливаются наличием конденсаторов в схеме, а в области высоких частот - главным образом частотными параметрами транзисторов.

2.6.1. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА В ОБЛАСТИ НИЗКИХ ЧАСТОТ

При расчете коэффициентов усиления одиночных каскадов сопротивление конденсаторов переменному току $X_c = 1/(\omega C)$ равно нулю. Такое предположение действительно для полосы средних частот. Коэффициент усиления усилителя для этих частот соответствует величине K_{u0} (рис. 7.а). По мере снижения частоты начинает сказываться

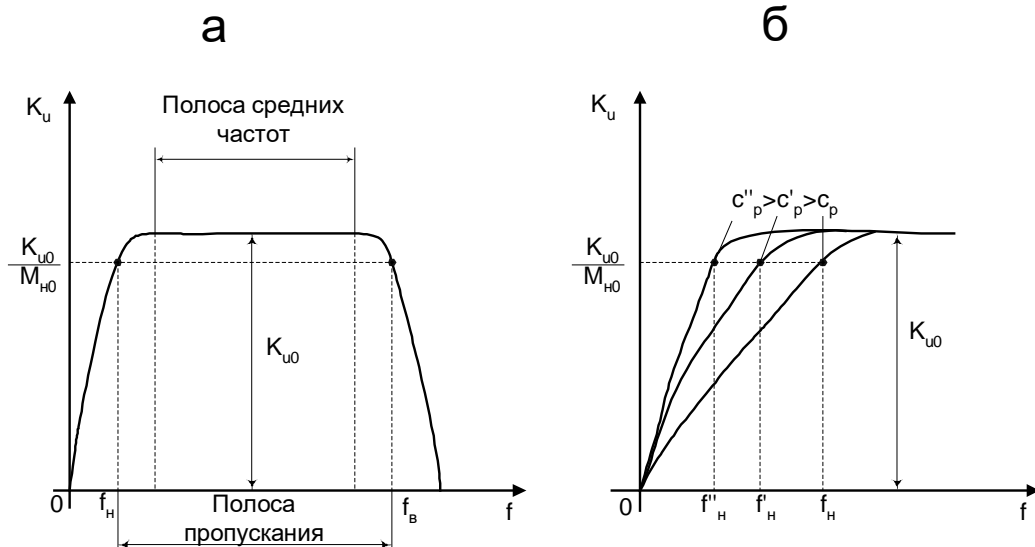


Рис. 7. Амплитудно-частотная характеристика усилительного каскада с RC -связью:
а - общий вид;
б - влияние емкости конденсаторов связи на характеристику в области низких частот

уменьшение проводимости конденсаторов связи C_p в усилительном каскаде. Вследствие падения напряжения на конденсаторах уменьшается напряжение сигнала, поступающее на вход транзистора от источника входного сигнала и с коллектора транзистора на нагрузку.

Падение напряжения на конденсаторах приводит к уменьшению амплитудных значений сигналов на выходе каскада и усилителя в целом, что проявляется снижением его коэффициента усиления в области низких частот (рис. 7.а). Влияние конденсаторов C_p является причиной того, что в усилителе с конденсаторной связью коэффициент усиления $K_u \rightarrow 0$ при $f \rightarrow 0$. Характер зависимости коэффициента усиления в области низких частот определяется величиной емкости конденсаторов C_p . В частности, с увеличением их емкости снижение коэффициента усиления происходит при более низких частотах (рис. 7.б).

Необходимо отметить, что на коэффициент усиления каскада в области низких частот оказывает влияние также конденсатор C_3 . Его влияние проявляется в том, что с уменьшением частоты снижается коэффициент усиления каскада вследствие уменьшения шунтирующего действия конденсатора на резистор R_3 .

Определим коэффициенты усиления каскада- потока и напряжению на нижних частотах. Для этого воспользуемся схемой замещения (рис. 8) с включенными разделительными емкостями C_1 и C_2 (эмиттерной емкостью C_3 пренебрегаем).

Коэффициент усиления по току на нижних частотах K_{in} в операторной форме найдем следующим образом:

$$K_{in}(P) = \frac{I_n(P)}{I_{bx}(P)},$$

где $I_H(P) = \frac{U_2}{R_H + \frac{1}{PC_2}} = -h_{21}I_1 \frac{r_{\text{вых}} \parallel R_K \parallel (P_H + \frac{1}{PC_2})}{R_H + \frac{1}{PC_2}}$.

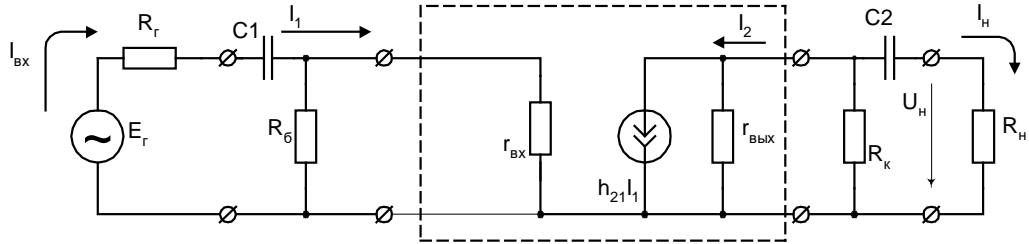


Рис.8. Схема замещения усилительного каскада с RC -связью на низких частотах

Учитывая выражение (16) и условие $r_{\text{вых}} \gg R_K$, получим

$$I_H(P) \cong -I_{\text{вх}}(P) \frac{R_{\text{вх}}}{r_{\text{вх}}} h_{21} \frac{R_K}{R_K + R_H + \frac{1}{PC_2}}.$$

Подставив полученное соотношение в выражение для $K_{\text{Ин}}$, находим

$$K_{\text{Ин}}(P) = -\frac{R_{\text{вх}}}{r_{\text{вх}}} h_{21} \frac{R_K}{R_K + R_H} \frac{1}{1 + \frac{1}{(R_K + R_H)PC_2}}.$$

Обозначим $(R_K + R_H)C_2 = \tau_H$ и, учитывая выражение (20), получим:

$$K_{\text{Ин}}(P) = \frac{I_H(P)}{I_{\text{вх}}(P)} = K_I \frac{1}{1 + \frac{1}{P\tau_H}}, \quad (24)$$

где $-K_I$ - коэффициент усиления каскада на средних частотах;

τ_H - постоянная времени выходной цепи, $\tau_H = (R_K + R_H)C_2$.

Заменив P на $j\omega$ в выражении (24), можно найти зависимость модуля коэффициента усиления каскада по току от частоты:

$$K_{\text{Ин}}(\omega) = K_I \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega\tau_H)^2}}}. \quad (25)$$

Видно, что коэффициент $K_{\text{Ин}}$ с ростом частоты приближается к значению K_I ; на средних частотах, а при $\omega \rightarrow 0$ $K_{\text{Ин}}$ убывает до нуля.

Коэффициент усиления каскада по напряжению $K_{\text{Ун}}$ на нижних частотах найдем, выразив напряжение на нагрузке через ток нагрузки $U_H(P) = I_H(P)R_H$, а напряжение источника - через входной ток каскада

$$E_r(P) = I_{\text{вх}}(P)(R_r + R_{\text{вх}} + \frac{1}{PC_1});$$

$$K_{\text{Ун}}(P) = \frac{U_H(P)}{E_r(P)} = \frac{I_H(P)}{I_{\text{вх}}(P)} \frac{R_H}{R_r + R_{\text{вх}} + \frac{1}{PC_1}}.$$

С учетом выражения (24) получим

$$K_{\text{Ун}}(P) = K_{\text{Ин}}(P) \frac{R_H}{R_r + R_{\text{вх}}} \frac{1}{1 + \frac{1}{(R_r + R_{\text{вх}})PC_1}}.$$

Обозначив $(R_{\Gamma}+R_{BX})C_1=\tau_{BX}$ и учитывая выражения (21) и (24), находим:

$$K_{UH}(P) = \frac{U_H(P)}{E_{\Gamma}(P)} = K_U \frac{1}{1 + \frac{1}{P\tau_H}} \frac{1}{1 + \frac{1}{P\tau_{BX}}}, \quad (26)$$

где τ_{BX} - постоянная времени входной цепи каскада, $\tau_{BX}=(R_{\Gamma}+R_{BX})C_1$;

K_U - коэффициент усиления каскада на средних частотах.

Зависимость модуля коэффициента усиления каскада по напряжению от частоты принимает вид

$$K_{UH}(\omega) = K_U \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega\tau_{BX})^2}} \sqrt{1 + \frac{1}{(\omega\tau_H)^2}}} \quad (27)$$

и представляет собой амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) усилительного каскада на нижних частотах.

С ростом частоты $\omega \rightarrow \infty$ в соответствии с выражением (27) K_{UH} стремится к значению K_U на средних частотах, а при $\omega \rightarrow 0$ K_{UH} убывает до нуля, что подтверждает частотные характеристики рис.7 для нижних частот.

Определим коэффициент частотных искажений M_H на нижних частотах:

$$M_H = \frac{K_U}{K_{UH}(\omega)} = \sqrt{1 + \frac{1}{(\omega\tau_{BX})^2}} \sqrt{1 + \frac{1}{(\omega\tau_H)^2}} = M_{p2}M_{p1}, \quad (28)$$

где M_{p1} - коэффициент частотных искажений, вносимых разделительной емкостью C_{p1} на входе каскада, а M_{p2} - емкостью C_{p2} на выходе каскада.

Таким образом, общий коэффициент искажений каскада M_H на нижних частотах определяется произведением коэффициентов частотных искажений, вносимых каждым элементом в отдельности.

На нижних частотах искажения вносятся и эмиттерной емкостью C_3 :

$$M_3 = \sqrt{1 + \frac{1}{(\omega\tau_3)^2}}, \quad (29)$$

где τ_3 - постоянная времени эмиттерной цепи, $\tau_3 = \left(R_3 \parallel \frac{R_{\Gamma} + R_{BX}}{1 + h_{21}} \right) C_3$;

если выполняется условие $(R_{\Gamma}+R_{BX}) \ll R_3(1+h_{21})$, то $\tau_3 \cong \frac{(R_{\Gamma} + R_{BX})C_3}{1 + h_{21}}$. В итоге получа-

ем зависимость коэффициента усиления каскада по напряжению от частоты, обусловленную эмиттерной и разделительной емкостями:

$$K(\omega) = K \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega\tau_{BX}} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega\tau_H} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega\tau_3} \right)^2}}, \quad (30)$$

а также коэффициент частотных искажений

$$M_H = M_{p1}M_{p2}M_3 = \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega\tau_{BX}} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega\tau_H} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega\tau_3} \right)^2}. \quad (31)$$

Из этих выражений видно, что для уменьшения частотных искажений необходимо увеличивать постоянные времени, например, повышая величины емкостей. При этом и целью уменьшения* величины (и габаритов) эмиттерной емкости C_3 для нее отводится основная часть частотных каскада на каскада на нижних частотах.

Фазочастотная характеристика (ФЧХ) каскада на нижних частотах определяется по выражению

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{1}{\omega \tau_{\text{вх}}} + \arctg \frac{1}{\omega \tau_{\text{н}}} + \arctg \frac{1}{\omega \tau_{\text{э}}}. \quad (32)$$

Каждое из слагаемых этого выражения при уменьшении частоты до нуля дает фазовый сдвиг 90° , а при возрастании частоты (в области средних частот) фазовые сдвиги уменьшаются до нуля.

При расчете каскада на требуемую область низких частот исходным параметром является низшая частота полосы пропускания $f_{\text{н}}$ для усиливаемых сигналов. Частоте $f_{\text{н}}$ соответствует предельное значение коэффициента частотных искажений $M_{\text{н}}=M_{\text{нп}}$ (рис. 7,а), величина которого зависит от назначения усилителя. Для усиления звуковых частот величину $M_{\text{нп}}$ часто принимают равной $\sqrt{2}$. Согласно выражению (31) задача сводится к выбору таких значений емкостей конденсаторов, чтобы $M_{\text{н}}$ не превышало предельного $M_{\text{нп}}$ ($M_{\text{н}} \leq M_{\text{нп}}$).

2.6.2. ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА В ОБЛАСТИ ВЕРХНИХ ЧАСТОТ

На верхних частотах начинают сказываться частотные свойства транзистора:

$$h_{21}(P) = \frac{h_{21}}{1 + P\tau_{\beta}},$$

где h_{21} - коэффициент передачи тока транзистора на низких и средних частотах, $\tau_{\beta}=1/(2\pi f h_{21})$; $f h_{21}$ - предельная частота коэффициента передачи тока транзистора.

С ростом частоты модуль h_{21} уменьшается, а следовательно, уменьшаются коэффициенты усиления каскада по току (20) и напряжению (22). Кроме этого, уменьшение коэффициентов усиления на верхних частотах происходит за счет шунтирующего действия выходной емкости транзистора $C_{\text{кэ}}$.

Определим коэффициенты усиления каскада на верхних частотах. Для этого воспользуемся схемой замещения каскада на верхних частотах (рис.9) с включенной емкостью $C_{\text{кэ}}$ и

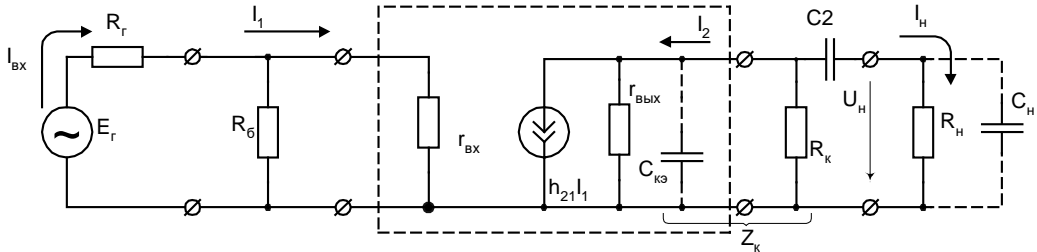


Рис.9. Схема замещения усилительного каскада ОЭ на верхних частотах

комплексным коэффициентом передачи тока $h_{21}(P)$. Обозначим вначале $Z_{\text{к}} = R_{\text{к}} \parallel \frac{1}{P C_{\text{кэ}}}$ или

$$Z_{\text{к}} = \frac{R_{\text{к}}}{1 + R_{\text{к}} P C_{\text{кэ}}}.$$

Определим ток нагрузки $I_{\text{н}}(P)$:

$$I_{\text{н}}(P) = \frac{U_{\text{н}}(P)}{R_{\text{н}}} = -h_{21}(P) I_1 \frac{r_{\text{вых}} \parallel Z_{\text{к}} \parallel R_{\text{н}}}{R_{\text{н}}}.$$

Учитывая выражение (16) и условие $r_{\text{вых}} \gg R_{\text{к}}$, получим

$$I_{\text{н}}(P) \cong -I_{\text{вх}}(P) \frac{R_{\text{вх}}}{r_{\text{вх}}} h_{21}(P) \frac{Z_{\text{к}}}{Z_{\text{к}} + R_{\text{н}}}.$$

Подставив полученное соотношение в выражение для $K_{\text{Ив}}(P)=I_{\text{н}}(P)/I_{\text{вх}}(P)$, находим

$$K_{\text{Ив}}(P) = -\frac{R_{\text{вх}}}{r_{\text{вх}}} h_{21}(P) \frac{Z_{\text{к}}}{Z_{\text{к}} + R_{\text{н}}}.$$

Подставляя сюда выражение для Z_k и учитывая частотные свойства транзистора, получим

$$K_{Ib}(P) = -\frac{R_{Bx}}{r_{Bx}} h_{21} \frac{1}{1 + P\tau_\beta} \frac{R_k}{R_k + R_H (1 + PR_k C_{k3})}.$$

Упрощая это выражение, находим

$$K_{Ib}(P) = -\frac{R_{Bx}}{r_{Bx}} \frac{h_{21}}{R_k + R_H} R_k \frac{1}{1 + P\tau_\beta} \frac{1}{1 + PR_{KH} C_{k3}}.$$

где $R_{KH} = R_k \parallel R_H = \frac{R_k R_H}{R_k + R_H}$.

Принимая по-прежнему $R_{Bx} \approx r_{Bx}$ и учитывая выражение (20), получим

$$K_{Ib}(P) \cong K_I \frac{1}{1 + P\tau_\beta} \frac{1}{1 + PR_{KH} C_{k3}}.$$

В последнее выражение подставим известное соотношение:

$$C_{k3} \cong h_{21}(P)C_k = \frac{h_{21}}{1 + P\tau_\beta} C_k,$$

где C_k - емкость коллекторного перехода транзистора. Тогда после упрощений получаем

$$K_{Ib}(P) = K_I \frac{1}{1 + P(\tau_\beta + h_{21} C_k R_{KH})}.$$

Полученное выражение можно записать в виде

$$K_{Ib}(P) = K_I \frac{1}{1 + P\tau_b}, \quad (33)$$

где τ_b - эквивалентная постоянная времени каскада в области верхних частот, $\tau_b = \tau_\beta + h_{21} C_k R_{KH}$; K_I - коэффициент усиления каскада на средних частотах.

Коэффициент усиления по напряжению определим с учетом соотношения (33) как

$$K_{Ub}(P) = \frac{I_H(P)R_H}{I_{Bx}(P)(R_\Gamma + R_{Bx})} = K_{Ib}(P) \frac{R_H}{R_\Gamma + R_{Bx}} = K_I \frac{R_H}{R_\Gamma + R_{Bx}} \frac{1}{1 + P\tau_b}.$$

В соответствии с выражением (21) получаем

$$K_{Ub}(P) = K_U \frac{1}{1 + P\tau_b}. \quad (34)$$

Тогда зависимость модуля K_{Ub} от частоты будет иметь вид

$$K_{Ub}(\omega) = K_U \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau_b)^2}}, \quad (35)$$

откуда видно, что с ростом частоты коэффициент усиления по напряжению падает до нуля при $\omega \rightarrow \infty$, а при $\omega \rightarrow 0$ K_{Ub} стремится к значению K_U в области средних частот.

Аналогично можно найти соотношения для коэффициентов усиления с учетом влияния емкости монтажных проводов и нагрузки C_H . В этом случае

$$K_{Ub}(P) = K_U \frac{1}{(1 + P\tau_b)(1 + P\tau_{CH})}, \quad (36)$$

где $\tau_{CH} = C_H R_H$.

Тогда в области верхних частот АЧХ каскада примет вид

$$K_{Ub}(\omega) = \frac{K_U}{\sqrt{1 + (\omega\tau_b)^2} \sqrt{1 + (\omega\tau_{CH})^2}}, \quad (37)$$

коэффициент частотных искажений

$$M_b = \sqrt{1 + (\omega\tau_b)^2} \sqrt{1 + (\omega\tau_{CH})^2}, \quad (38)$$

фазочастотная характеристика

$$\varphi(\omega) = -\arctg\omega\tau_b - \arctg\omega\tau_{сн}. \quad (39)$$

Каждое из слагаемых $\varphi(\omega)$ при неограниченном возрастании частоты ($\omega \rightarrow \infty$) дает фазовый сдвиг -90° , а при уменьшении частоты (в область средних частот) фазовые сдвиги уменьшаются до нуля.

Для уменьшения частотных искажений в области верхних частот необходимо уменьшать постоянные времени τ_b и $\tau_{сн}$. Для этого выбирают транзистор с малым значением τ_b (с высокими частотными свойствами), уменьшают R_k и R_n , принимают меры с целью уменьшения монтажной емкости (конструктивным путем).

Расчет каскада в области высоких частот связан с обеспечением верхней частоты f_v полосы пропускания (см. рис. 7,а), определяемой на уровне $M_v=M_{вп}$. На Рис. 7.а принято, $M_v=M_n$, хотя их равенство при определении полосы пропускания частот в принципе не обязательно. Расчет сводится к выбору типа транзистора по частоте f_{h21} и определению τ_b и $\tau_{сн}$, при которых M_v не превышает требуемого значения (предельного).

$$M_{вп}(M_v \leq M_{вп}).$$

2.7. КПД УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА С RC- СВЯЗЬЮ

Благодаря простоте, дешевизне, компактности, широкой полосе рабочих частот каскад с RC -связью является самой распространенной схемой усилительного каскада, в том числе и в качестве выходного каскада в широкополосных радиотехнических устройствах. Но эта схема обладает очень низким коэффициентом полезного действия (КПД) порядка 5%.

Определим предельно возможное значение КПД этого каскада, а также отношение сопротивления нагрузки R_n к сопротивлению коллекторной цепи транзистора R_k , при котором КПД максимален. При этом будем пренебрегать потерями во вспомогательных цепях каскада и разделительном конденсаторе C_{p2} (см. рис. 2) и положим остаточное напряжение $\Delta U_{кз}$ на транзисторе (см. рис. 3) равным нулю ("идеальный" транзистор).

Как известно, для полного использования транзистора (как усилительного элемента) и по току и по напряжению нагрузочная прямая по переменному току (прямая в - г) должна делиться точкой покоя II пополам (рис. 10). Определим для этого случая мощность P_o , потребляемую от источника питания E_k .

Вначале выразим через параметры элементов каскада амплитуду напряжения на нагрузке U_m . Из рис. 2 и 10 видно, что при $I_k=0$ через нагрузку R_n и сопротивление R_k течет одинаковый ток I_{nm} . Следовательно, можно записать в соответствии со II законом Кирхгофа

$$U_k = 2U_m = E_k - I_{nm}R_k,$$

$$\text{где } I_{nm} = \frac{U_m}{R_n}.$$

Из этих двух соотношений получается выражение для U_m :

$$U_m = E_k \frac{R_n}{2R_n + R_k}. \quad (40)$$

В соответствии с уравнением для нагрузочной прямой (в- г) по переменному току можно записать (рис.10)

$$2I_m = \frac{2U_m}{R_k \parallel R_n}.$$

Подставляя сюда выражение (40), можно определить ток покоя каскада $I_{кп}=I_m$:

$$I_{кп} = I_m = \frac{E_k R_n}{2R_n + R_k} \frac{1}{R_k \parallel R_n} = E_k \frac{R_n + R_k}{(2R_n + R_k)R_k}. \quad (41)$$

тогда мощность нагрузки можно записать в виде

$$P_H = \frac{\left(\frac{U_m}{\sqrt{2}}\right)^2}{R_H} = \frac{E_K^2}{2} \frac{R_H}{(2R_H + R_K)^2}, \quad (42)$$

а мощность источника питания как

$$P_o = I_{кп} E_K = E_K^2 \frac{R_H + R_K}{(2R_H + R_K)R_K}. \quad (43)$$

Теперь нетрудно получить выражение для КПД:

$$\eta = \frac{P_H}{P_o} = \frac{R_H R_K}{2(2R_H + R_K)(R_H + R_K)}. \quad (44)$$

Из выражения (44) видно, что КПД равен нулю при R_H или R_K равных нулю, а также при $R_H \rightarrow \infty$ или $R_K \rightarrow \infty$. Следовательно, существует экстремальное значение КПД. Для его определения вычислим производную $d\eta/dR_H$ и приравняем ее нулю:

$$\frac{d\eta}{dR_H} = \frac{R_K [R_K^2 - 2R_H^2]}{2[(2R_H + R_K)(R_K + R_H)]^2} = 0,$$

откуда получаем условие

$$R_K^2 - 2R_H^2 = 0,$$

из которого следует, что

$$R_{\text{нопт}} = \frac{R_K}{\sqrt{2}}. \quad (45)$$

Подставив это оптимальное значение (R_H в выражение (44)), получим предельно возможное значение КПД каскада с RC -связью:

$$\eta_{\max} = \frac{\sqrt{2}}{2(2 + \sqrt{2})(1 + \sqrt{2})} = \frac{1}{4\sqrt{2} + 6} \cong \frac{1}{11,66} \cong 0,086.$$

Таким образом, максимальное значение КПД, который можно получить от каскада с RC -связью, составляет всего 8,6 %. Анализ каскада с учетом остаточного напряжения ΔU_K на усилительном элементе показывает, что соотношение (45) между R_K и R_H , соответствующее наибольшему КПД, остается практически тем же, но КПД падает с ростом остаточного напряжения.

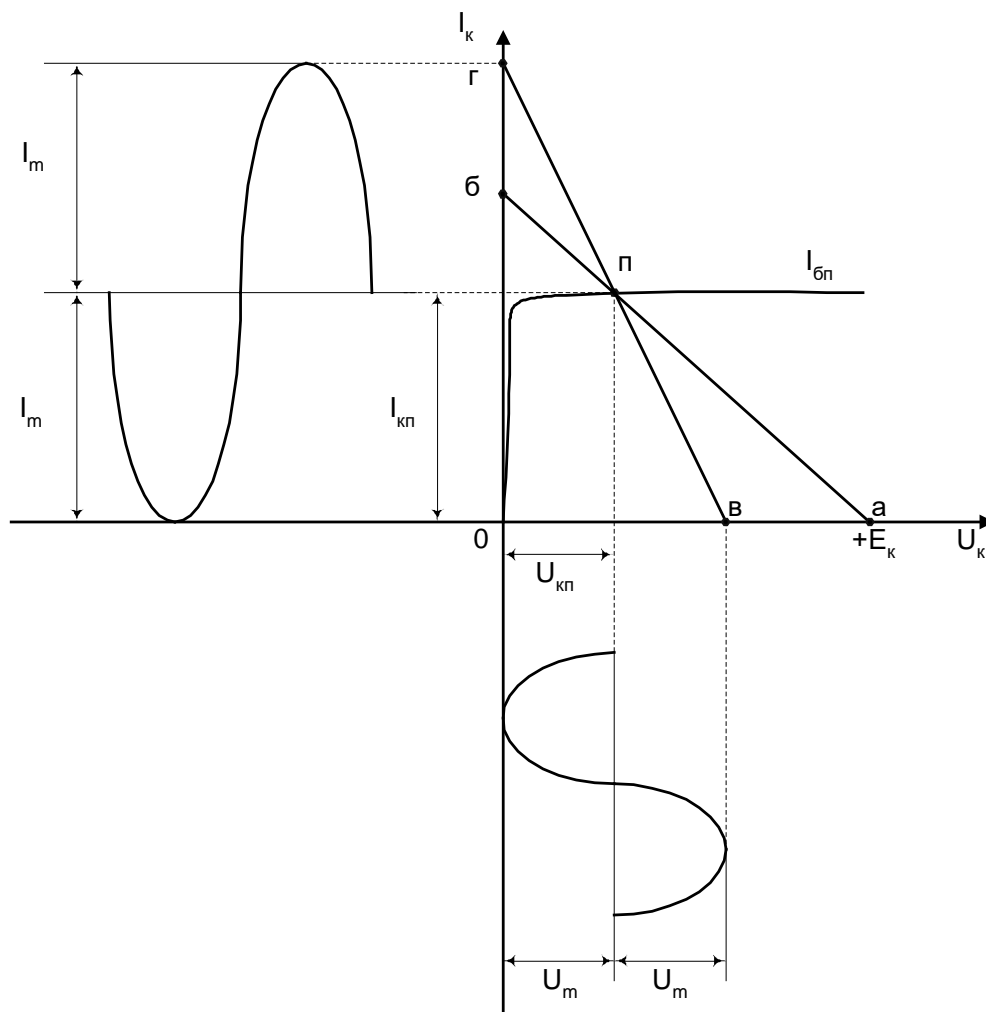


Рис.10 Графическое определение режима покоя каскада с RC- связью при полном использовании коллекторных характеристик транзистора по току и по напряжению

На практике с учетом энергии, потребляемой вспомогательными цепями удастся получить КПД порядка 5 - 7 %, а нередко и ниже. Столь малый КПД нежелателен для каскадов мощного усиления с мощностью даже в десятые доли Ватта.

Интересно, что если определять экстремальное значение КПД путем вычисления производной $d\eta/dR_k$ по коллекторному сопротивлению R_k , то получается то же соотношение (45). При максимальном КПД каскада от источника питания E_k потребляется мощность $P_o = P_n / \eta_{\max} = 11,66 P_n$, т.е. более чем в 10 раз превышающая мощность в нагрузке.

Определим теперь максимальное значение мощности, которую можно получить в нагрузке при заданном коллекторном сопротивлении R_k . Для этого вычислим производную выражения (42) по сопротивлению нагрузки R_n и приравняем ее нулю:

$$\frac{dP_n}{dR_n} = \frac{[R_k^2 - 4R_n^2]}{[2R_n + R_k]^4} = 0.$$

Из этого выражения следует соотношение $R_{n\max} = R_k/2$, при котором будет передаваться максимальная мощность в нагрузку (при заданном R_k).

Из того же выражения (42) следует, что при заданном сопротивлении нагрузки максимальная мощность будет передаваться при $R_k = 0$, т.е. для передачи максимальной мощности в нагрузку (если КПД не учитывается) следует уменьшать коллекторное сопротивление R_k до нуля. Из выражения (40) можно получить, что у ненагруженного каскада ($R_n \rightarrow \infty$) амплитуда напряжения на выходе U_m и напряжение покоя $U_{кп}$ равны $E_k/2$ (середине нагрузоч-

ной прямой по постоянному току). Выражения (40) - (44) позволяют, например, получить аналитическим путем для различных значений сопротивления нагрузки R_n все необходимые параметры режимов покоя и усиления каскада с RC -связью, работающего в классе А, а также его энергетические показатели, приведенные в табл.1.

При расчете каскада могут решаться различные задачи - обеспечение минимальных нелинейных искажений при заданной мощности в нагрузке либо получение максимального КПД. В последнем случае необходимо реализовать оптимальное соотношение (45) между сопротивлением нагрузки R_n и сопротивлением коллекторной цепи R_k , а положение рабочей точки определить по выражению (40) с учетом (45) (см. табл. 1). Ввиду низкого КПД такой каскад с нагрузкой в цепи коллектора используется при небольшой мощности в нагрузке (до 10-15 мВт).

Замечание. Если положение рабочей точки (точки покоя) выбрано на середине заданной (значение коллекторного сопротивления R_k известно заранее) линии нагрузки по постоянному току, где $U_{кп}=E_k/2$ и $I_{кп}=E_k/(2R_k)$, то от источника питания схема потребляет мощность $P_o=I_{кп}E_k=E_k^2/2 R_k$ независимо как от наличия входного сигнала, так и от величины сопротивления нагрузки R_n . Тогда максимальной мощности в нагрузке $P_{нmax}^*$ будет соответствовать наибольшее значение КПД η_{max}^* при заданном положении рабочей точки на середине линии нагрузки по постоянному току, так как в этом случае $P_o=const$.

Амплитуда выходного неискаженного синусоидального напряжения не будет превышать $U_m = \frac{E_k}{2} \frac{R_n}{R_n + R_k}$. Это максимальное значение напряжения на нагрузке U_m получается,

когда ток через транзистор становится равным нулю, а U_m в этом случае определяется как

$$U_m = I_{кп}(R_k || R_n).$$

Действующее значение мощности в нагрузке при максимальной амплитуде U_m

$$P_n = \left(\frac{U_m}{\sqrt{2}} \right)^2 / R_n = \frac{E_k^2}{8} \frac{R_n}{(R_n + R_k)^2}.$$

Максимальная мощность в нагрузке будет достигаться при $R_n=R_k$:

$$P_{нmax}^* = E_k^2 / 32 R_k.$$

При этом одновременно будет обеспечено максимальное значение коэффициента усиления по мощности $K_{рmax}$ (при заданном R_k), так как выполняется условие $R_n=R_k$.

КПД схемы получим, используя приведенные выше результаты для $P_{нmax}^*$ и P_o :

$$\eta_{max}^* = P_{нmax}^* / P_o = 1/16 = 0,0625.$$

Таким образом, при выборе точки покоя каскада на середине линии нагрузки по постоянному току максимальный КПД схемы не превышает 6,25%, что меньше КПД при полном использовании транзистора по току и по напряжению ($\eta_{max}=8,6\%$).

В табл. 1 приведены также данные по величине максимальной мощности, рассеиваемой на коллекторе транзистора $P_{кmax}$ (в режиме покоя) и на коллекторном сопротивлении $R_{кmax}$ (при входном сигнале $U_{вхmax}$). Значение всех мощностей показаны в относительных единицах к величине E_k^2/R_k ; в квадратных скобках указаны либо точные значения мощностей относительно мощности нагрузки P_n при максимальном входном сигнале $U_{вхmax}$ (когда $P_n \neq 0$), либо точные относительные значения мощностей, а также других параметров и показателей работы каскада.

Таблица 1

Параметры и показатели работы кас- када	Условия работы каскада с RC- связью					
	Ре- жим ко- рот- кого за- мы- ка- ния	$P_{нmax}$ (при задан- ном R_k)	Максимальный КПД η_{max}	Максимальное усиление по мощности при заданном R_k K_{pmax}	Режим холостого хода	$P_{нmax}^*$ (при заданных R_k и $U_{кп}=E_k/2$)
R_H	0	$R_k/2$	$\frac{R_k}{\sqrt{2}}$	R_k	∞	R_k
$U_{кп}$	0	$E_k/4$	$\frac{E_k}{3,414} \left[\frac{E_k}{2 + \sqrt{2}} \right]$	$E_k/3$	$E_k/2$	$E_k/2$ (задано)
U_m	0	$E_k/4$	$\frac{E_k}{(2 + \sqrt{2})}$	$E_k/3$	$E_k/2$	$E_k/4$ ($U_m \neq U_{кп}$)
$I_{кп}/(E_k/R_k)$ [$I_m=I_{кп}$]	1	0,75	$0,707 \left[\frac{\sqrt{2}}{2} \right]$	0,67[2/3]	0,5	0,5
$P_H/(E_k^2/R_k)$ (при $U_{вх max}$)	0	0,0625 [1/16]	0,06066	0,0555[1/18]	0	0,031[1/32]
$P_o/(E_k^2/R_k)$	1	0,75 [12 P_H]	$0,707 \left[\frac{\sqrt{2}}{2} \right] [11,66 P_H]$	0,67[2/3] [12 P_H]	0,5	0,5 [16 P_H]
$P_{k max}/(E_k^2/R_k)$ (при $U_{вх}=0$)	0	0,1875 [3 P_H]	0,2071 [$\approx 3,414 P_H$]	0,222[2/9] [4 P_H]	0,125[1/8]	0,25 [8 P_H]
$P_{Rk max}/(E_k^2/R_k)$ (при $U_{вх max}$)	1	0,59375 [9,5 P_H]	0,5429 [8,95 P_H]	0,5 [9 P_H]	0,375[3/8]	0, 28125[9/32] [9 P_H]
$\eta, \%$	0	$8,33 \left[8 \frac{1}{3} \right]$	8,57865	$8,33 \left[8 \frac{1}{3} \right]$	0	6,25
K_p/K_{pmax}	0	0,888 [8/9]	0,97056	1	0	1

2.8. АМПЛИТУДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КАСКАДА

Амплитудная характеристика отражает зависимость амплитуды выходного напряжения каскада $U_{выхм}$ от изменения амплитуды напряжения на входе $E_{гм}$. По этой характеристике судят о возможных пределах изменения входного и выходного сигналов усилительного каскада. Ее снимают при синусоидальном входном сигнале для области средних частот.

Типичный вид амплитудной характеристики показан на рис. 11. Участок 1 - 3 соответствует пропорциональной зависимости $U_{выхм}$, от $E_{гм}$, которые связаны между собой коэффициентом усиления каскада на средних частотах $K_{уо}$. Амплитудная характеристика не проходит через начало координат ввиду наличия на выходе напряжения собственных помех и шумов усилительного каскада. Участок ниже точки 1 амплитудной характеристики не ис-

пользуется, так как здесь полезный сигнал трудно отличить от напряжения помех и шумов. По величине $U_{\min}/K_{\text{до}}$ оценивают уровень минимальных напряжений входного сигнала (чувствительность) каскада.

При достижении некоторого значения входного сигнала $E_{\text{гн}}$, соответствующего точке 3, пропорциональность зависимости $U_{\text{выхт}}$ от $E_{\text{гн}}$ нарушается. Причиной является ограничение максимального напряжения одной или обеих полуволн выходного сигнала на неизменном уровне. Ограничение связано с нарушением требуемой связи параметров режима покоя каскада с амплитудными значениями его переменных составляющих напряжения и тока (см. формулы (3) и (4*)). Ограничение напряжения одной из полуволн обуславливается перемещением рабочей точки характеристики каскада вдоль линии нагрузки по переменному току в область начальных участков коллекторных характеристик (см. точку "г" на рис. 3), а другой полуволны - перемещением рабочей точки в область отсечки коллекторного тока (см. точку "в" на рис. 3).

Для получения наибольшей амплитуды выходного напряжения необходимо, чтобы точка покоя каскада размещалась по середине его линии нагрузки по переменному току. При этом ограничение по амплитуде будет устанавливаться одновременно для обеих полуволн выходного напряжения. При невыполнении указанного условия режим ограничения амплитуды наступит вначале лишь для одной из полуволн и граничной точке 4 линейно нарастающего участка амплитудной характеристики (рис. 11) будет соответствовать меньшая величина U_{\max} .

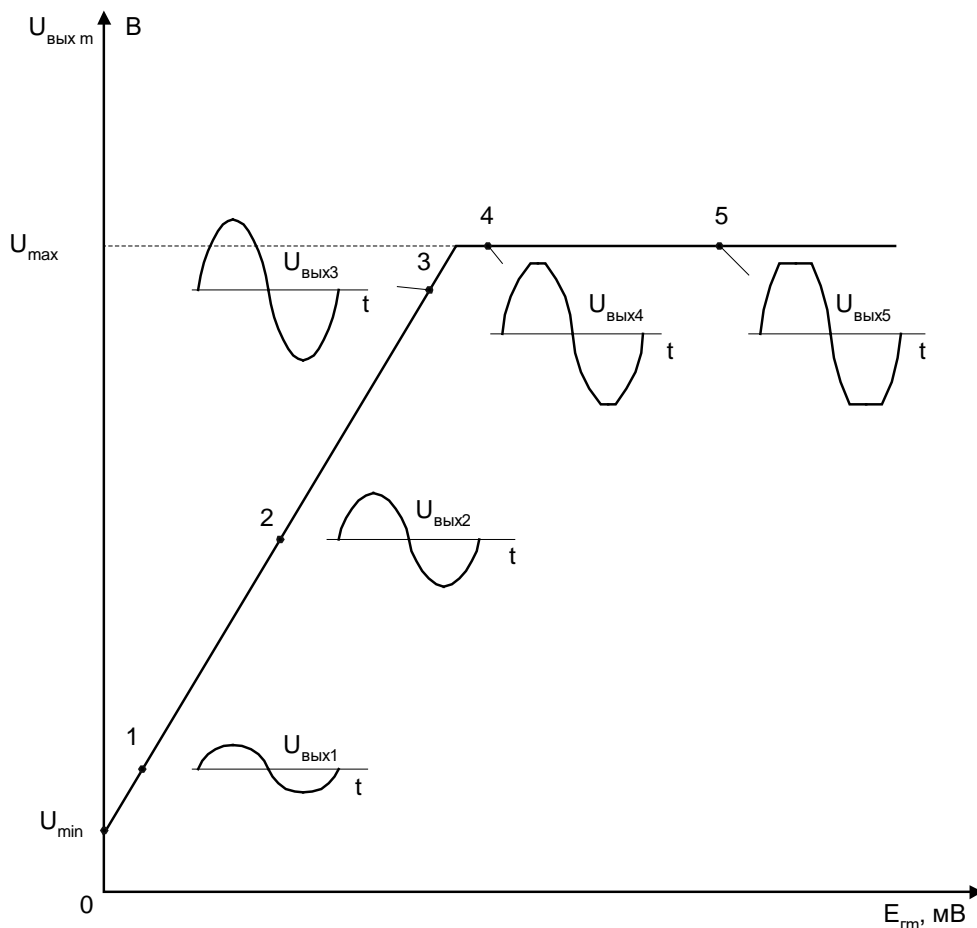


Рис.11. Амплитудная характеристика усилительного каскада

Отношение амплитуды максимально допустимого выходного напряжения U_{\max} к минимально допустимому U_{\min} называется динамическим диапазоном усиления каскада $D = U_{\max}/U_{\min}$.

Кроме искажений формы кривой выходного напряжения, связанных с ограничением максимального напряжения одной или обеих полуволн выходного сигнала на неизменном

уровне, в усилительных каскадах возникают искажения ввиду неизбежной нелинейности входных и выходных вольт - амперных характеристик транзисторов. Такие искажения называют нелинейными. С увеличением амплитуды входного сигнала нелинейность вольт-амперных характеристик транзисторов проявляется сильнее. Поэтому с ростом амплитуды входного напряжения нелинейные искажения возрастают и становятся максимальными с наступлением ограничения полуволн выходного сигнала.

Нелинейные искажения оценивают для синусоидального входного напряжения исходя из состава высших гармонических составляющих в кривой выходного напряжения, появление которых вызвано отличием формы $U_{\text{вых}}$ от синусоиды. Мерой оценки служит коэффициент нелинейных искажений (коэффициент гармоник), указываемый в процентах:

$$K_r = \frac{\sqrt{P_2 + P_3 + P_4 + \dots}}{\sqrt{P_1}} 100\% = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots}}{U_1} 100\%,$$

где P_2, P_3, P_4, \dots - мощности, выделяемые в нагрузке под воздействием 2-й, 3-й, 4-й, ... гармонических составляющих напряжения (U_2, U_3, U_4); P_1 - мощность в нагрузке, обусловленная основной гармонической составляющей напряжения (U_1).

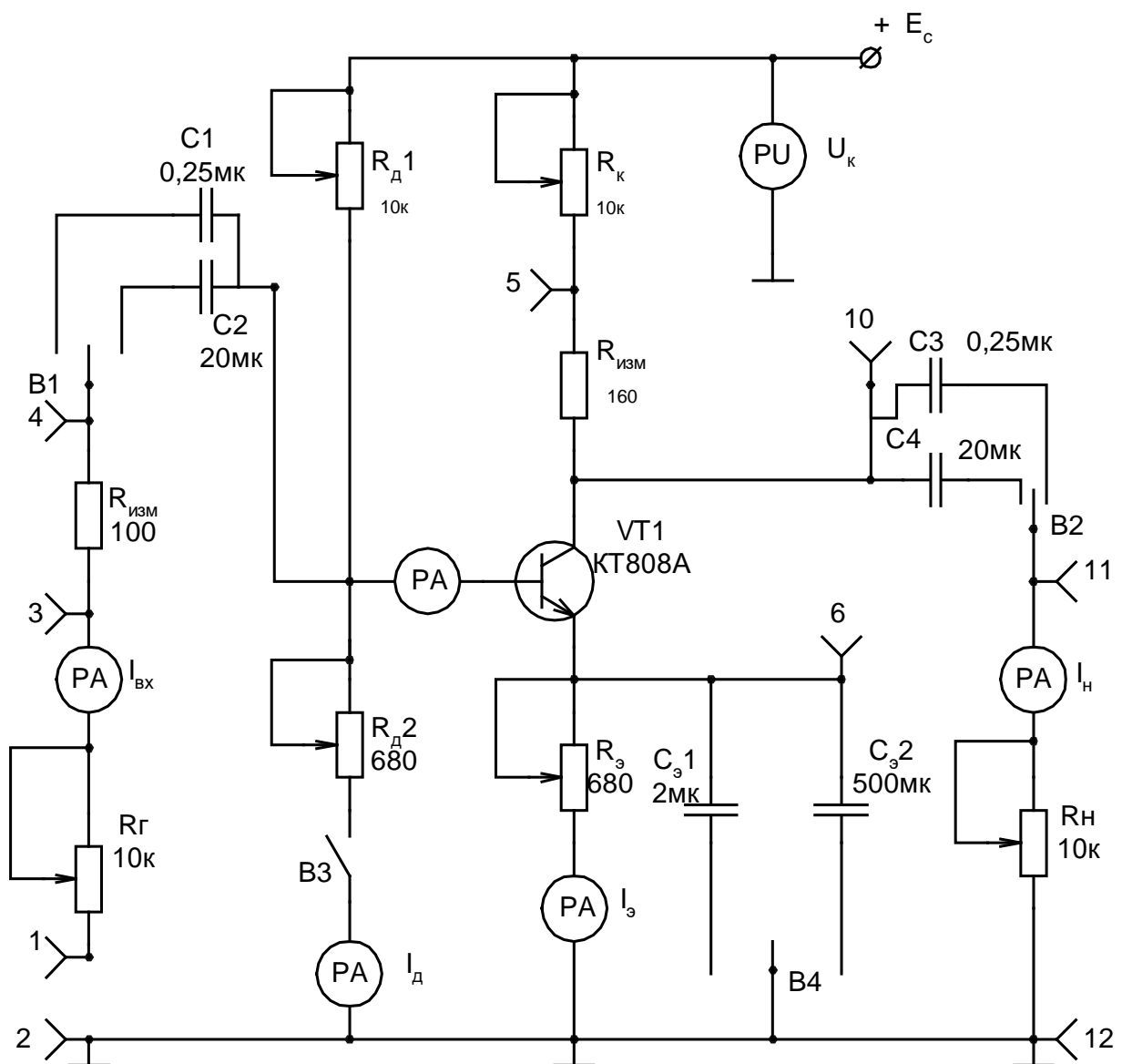


Рис. 12. Схема исследуемого каскада

3. ОБЪЕКТЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Стенд полупроводниковых и одиночных каскадов усиления типа ЭС4А.

2. Генератор сигналов специальной формы Г6-26.
3. Электронный осциллограф: С1-67 (С1-68).

4. ПОДГОТОВКА К РАБОТЕ

Ознакомиться с основными параметрами и характеристиками усилительных каскадов, а также со схемой исследуемого каскада (рис.12). Изучить назначение и расположение органов управления, измерительных приборов и коммутационные гнезда на передней панели стенда. Подключить осциллограф и генератор к стенду.

5. ПРОГРАММА РАБОТЫ

Перед началом работы все выключатели и переключатели на стенде установить в начальное положение (выключено);

- вертикальные выключатели - вниз, горизонтальные - влево;
- переключатели в среднее (нейтральное) положение. На фальшпанели стенда устанавливается сменная панель № 1.

1. Настройку статического режима (режима покоя) транзистора рекомендуется проводить в следующем порядке:

а) ручки " $R_{д1}$ ", " $R_{д2}$ ", " R_3 ", " R_k ", " R_n ", установить в среднее положение, установить сопротивление генератора входного сигнала $R_r = 1$ кОм (ручка " R_r ", - в левом крайнем положении);

б) переключатель " $E_c - E_k$ " установить в положение " E_k " и ручкой " E_k, E_c " выставить (только по осциллографу) напряжение питания E_k каскада на уровне $E_k = 16$ В. Для проверки и измерения напряжения E_k с помощью осциллографа следует подключаться к гнезду "5", а ручку " R_k " при этом установить в левое крайнее положение ($R_k = 0$). По окончании измерений вернуть ручку " R_k " в прежнее среднее положение;

в) тумблер "ВЗ" переключить вверх для подключения базового делителя - резистора $R_{д2}$;

г) вращением ручки $R_{д1}$ установить режим работы, при котором напряжение $U_{кз}$ транзистора равно $E_k/2$ (класс А). Если ручка " $R_{д1}$ " оказывается в крайнем положении, то следует изменить значение $R_{д2}$ и вновь установить режим. Напряжение измеряется осциллографом (гнезда "10" и "6").

В дальнейшем при всяких исследованиях каскада поддерживать на исходном уровне все параметры схемы, кроме единственного варьируемого. Занести эти исходные параметры в табл. 2 и в отчет. По указанию преподавателя часть параметров каскада может быть изменена. При этом следует учитывать, что крайнему левому положению ручек " R_r " и " R_n " соответствуют значения $R = 1$ кОм, среднему положению - $R = 5$ кОм и крайнему правому положению $R = 10$ кОм. Если выход генератора сигналов подключать к гнездам "3" или "4", то это будет соответствовать значениям сопротивления генератора входного сигнала $R_r=0,1$ кОм или $R_r=0$.

Таблица 2

Исходные параметры схемы каскада											
Сопротивления, кОм						Напряжения, В				Емкости, мкФ	
R_r^*	$R_{д1}^*$	$R_{д2}^*$	R_3^*	R_k^*	R_n^*						

тудные характеристики, определить коэффициенты усиления каскада по напряжению при подключенной и отключенной нагрузке.

Таблица 5

$U_{вхmax}$, мВ										Нагрузка
$U_{выхmax}$, В										R_n^* (см. табл.2)
(гнездо "10")										$R_n \rightarrow \infty$

Результаты следует объяснить и сделать выводы.

3. Исследование зависимости коэффициента усиления K_u по напряжению каскада от параметров элементов схемы:

а) подать от генератора входной сигнал с амплитудой $U_{вхmax}$, при которой амплитуда выходного сигнала $U_{выхmax}$, будет не более (0,1 - 0,2) $U_{выхmax}$, где $U_{выхmax}$ - максимальная амплитуда выходного неискаженного сигнала;

б) определить зависимость коэффициента усиления K_u от сопротивления R_k коллекторной цепи транзистора. Результаты занести в табл. 6, объяснить их и сделать выводы. По окончании опытов установить прежнее значение R_k в соответствии с табл. 2.

Затем последовательно повторить исследования по аналогичной схеме для следующих параметров элементов схемы каскада: $R_n = 1, 5, 10$ кОм и $R_g = 0, 0,1, 1, 2$ и 10 кОм, а также при включении и отключении эмиттерной емкости C_3 : $C_3 = 0, 2$ и 500 мкФ. Результаты занести в табл. 7 - 9, объяснить их и сделать выводы;

Таблица 6

При отключенной нагрузке ($R_n \rightarrow \infty$)					R_n^* (см. табл.2)
R_k , кОм	1	2	5	R_k^* (см. табл.2)	R_n^* (см. табл.2)
$U_{вхmax}$, мВ					
$U_{выхmax}$, В (гнездо "10")					
K_u					

в) зарисовать в масштабе осциллограммы входного сигнала, напряжений на выходе, на коллекторе и эмиттере транзистора (и других сигналов по указанию преподавателя) синфазно относительно входного сигнала. Для удобства следует настроить уровень запуска осциллографа (от генератора) таким образом, чтобы осциллограмма выходного сигнала генератора начиналась с фазы $\varphi=0$. При снятии осциллограмм гармонических сигналов обратить внимание на их фазу, амплитуду и постоянную составляющую. Результаты занести в табл. 10, объяснить их и сделать выводы.

Таблица 7

R_n , кОм	1 (кр.лев.)	5	10(кр.прав.)	$R_n \rightarrow \infty$ ("B2"-средн.)	R_n^* (см. табл.2)
$U_{вхmax}$, мВ					
$U_{выхmax}$, В (гнездо "10")					

K_u					
-------	--	--	--	--	--

Таблица 8

$R_{г}, \text{кОм}$	0 (гн."4")	0,1 (гн."3")	1 (кр.прав.)	5	10(кр.прав.)	R_n^* (см. табл.2)
$U_{вхmax}, \text{мВ}$						
$U_{выхmax}, \text{В}$						
K_u						

Таблица 9

$C_{э}, \text{мкФ}$	0 (откл.)	2	500
$U_{вхmax}, \text{мВ}$			
$U_{выхmax}, \text{В}$			
K_u			

Таблица 10

Осциллограммы и их параметры	$U_{вх}$	$U_{вых}$ (U_n)	U_k	$U_{э}$	$U_{ср2}$	" i_6 "	" i_k "	" i_n "
$U_m, \text{В}$ -переменная составляющая								
$U_o, \text{В}$ -постоянная составляющая								
$\varphi, \text{град}$								

6. УКАЗАНИЯ ПО СОСТАВЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать цель работы, принципиальную схему исследуемого каскада, выполненную в соответствии с требованиями ГОСТов, таблицы с экспериментальными и расчетными результатами, основные расчетные соотношения, графики полученных характеристик и осциллограммы, построенные и зарисованные в масштабе. Характеристики и осциллограммы одного типа строятся для сравнения на одном графике.

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Укажите на схеме усилительного каскада его главную цепь.
2. Укажите назначение всех элементов схемы каскада.
3. Почему каскад носит название схемы "с общим эмиттером"?
4. Как осуществляется температурная стабилизация режима покоя каскада?
5. В чем заключается принцип действия каскада?

6. Как проводятся линии нагрузки каскада по постоянному току и переменному току?
7. По какой линии перемещается рабочая точка при подаче входного сигнала и при изменениях температуры?
8. Как следует выбирать параметры режима покоя транзистора?
9. Каким образом выбирают напряжение питания каскада?
10. Как выбираются сопротивления делителя и цепи эмиттера?
11. Какие параметры необходимо найти для выбора транзистора?
12. Каким образом получают схему замещения каскада по переменному току?
13. Как определяются показатели каскада (коэффициенты усиления, входное и выходное сопротивления) через параметры элементов схемы?
14. Каким образом в усилительном каскаде ОЭ осуществляется поворот по фазе на 180° выходного напряжения относительно входного?
15. Чему равно максимально возможное значение КПД каскада ОЭ и каким получается КПД на практике?
16. Какие условия необходимо выполнить, чтобы получить в нагрузке максимальную мощность, если задано коллекторное сопротивление?
17. При каких условиях каскад работает с максимальным КПД?
18. Что такое амплитудная характеристика усилительного каскада? Нарисуйте типичный вид амплитудной характеристики.
19. При каких условиях получается наибольшая амплитуда выходного напряжения?
20. Что называют динамическим диапазоном усиления?
21. Какие причины вызывают искажения формы кривой выходного напряжения каскада?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Забродин Р.С. Промышленная электроника: Учебник для вузов. - Ъ.: Высшая школа, 1982. - 496 с.
2. Гусев В.Г., Гусев ^.М. Электроника: Учеб. пособие для вузов. - М.: Высшая школа, 1982. - 495 с.
3. Захаров В.К., Лыпарь Ю.И. Электронные устройства автоматики и телемеханики: Учебник для вузов. - Л.: Энергоатомиздат, 1984. - 432 с.
4. Захаров В. К. Электронные элементы автоматики: Учебник для вузов. - Л.: Энергия, 1975. - 336 с.
5. Цыкин Г. С. Широкополосные каскады мощного усиления// Радиотехника, 1968. - 15. -Т. 23. -С. 92-103.