

П.К. ЛАНГЕ

**СХЕМОТЕХНИКА ТРАНЗИСТОРНЫХ
УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ**

Учебное пособие для курсового проектирования

**Самара
Самарский государственный технический университет
2011**



ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Информационно-измерительная техника»

П.К. ЛАНГЕ

СХЕМОТЕХНИКА ТРАНЗИСТОРНЫХ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ

Учебное пособие

Самара
Самарский государственный технический университет
2011

Печатается по решению редакционно-издательского совета СамГТУ

УДК 621.382.8.037.33.004.14

Л 22

Р е ц е н з е н т

Ланге П.К.

Л 22 Схемотехника транзисторных усилительных каскадов: Учеб. пособие. / *П.К. Ланге.* – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2011. – 77с.: ил.

Предназначено для курсового проектирования по дисциплине "Электроника и микропроцессорная техника".

Содержатся рекомендации по проектированию усилительных каскадов, выполненных на биполярных и полевых транзисторах. Приведена методика определения их основных параметров и построения частотных характеристик, а также варианты заданий на контрольные работы и курсовые проекты.

Учебное пособие предназначено для студентов специальности 200106 очной и заочной форм обучения и может быть использовано при изучении курсов, связанных с электроникой.

УДК 621.382.8.037.33.004.14

Л 22

© П.К. Ланге, 2011

© Самарский государственный
технический университет, 2011

Предисловие

Электроника проникает во все новые области науки и техники. Она применяется в измерительной технике, системах управления и регулирования технологических процессов. Одним из основных разделов электроники является анализ и синтез усилительных схем, предназначенных для линейного усиления аналоговых сигналов.

Несмотря на широкое использование в настоящее время в усилительных схемах операционных усилителей, в ряде случаев для усиления сигналов применяются и транзисторные схемы, зачастую являющиеся наиболее простыми и дешевыми. В связи с этим актуальной задачей является изучение схемотехники транзисторных усилительных каскадов, методов их проектирования и расчета основных параметров. Материал учебного пособия предназначен для решения этой задачи, с целью отработки навыков проектирования схем он содержит набор тренировочных заданий, которые могут быть использованы в качестве контрольных работ или заданий на курсовое проектирование.

Введение

Современные маломощные усилительные схемы выполняются на базе биполярных транзисторов, полевых транзисторов, а также операционных усилителей. Несмотря на достаточно большое число разновидностей транзисторных усилителей, базовыми являются схемы с общим эмиттером, общим коллектором и общей базой (при использовании биполярных транзисторов), а также схемы с общим истоком и общим стоком (при использовании полевых транзисторов). Расчет схем усилителей сводится к выбору базовой усилительной схемы, анализа ее режима на постоянном токе, а также определения ее основных параметров на переменном токе: коэффициента усиления по напряжению, входного и выходного сопротивлений. Построение частотных характеристик усилительного каскада в первую очередь сводится к определению нижней частоты полосы пропускания.

1. Схемотехника усилительных каскадов на базе биполярных транзисторов

1.1. Основы теории работы биполярного транзистора

Биполярные транзисторы делятся на две группы: прямой проводимости (типа *p-n-p*) и обратной проводимости (типа *n-p-n*) (рис. 1.1).

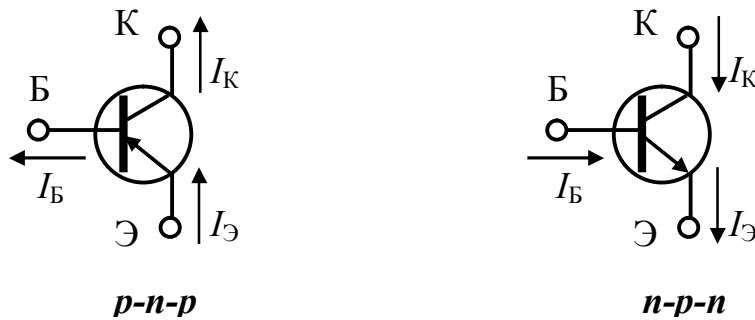


Рис. 1.1. Схематическое изображение транзисторов типов *p-n-p* и *n-p-n*

Как известно, биполярный транзистор имеет три вывода: эмиттер Э, коллектор К и базу Б.

Достаточно подробная эквивалентная схема [1,2] транзистора *p-n-p* изображена на рис. 1.2.

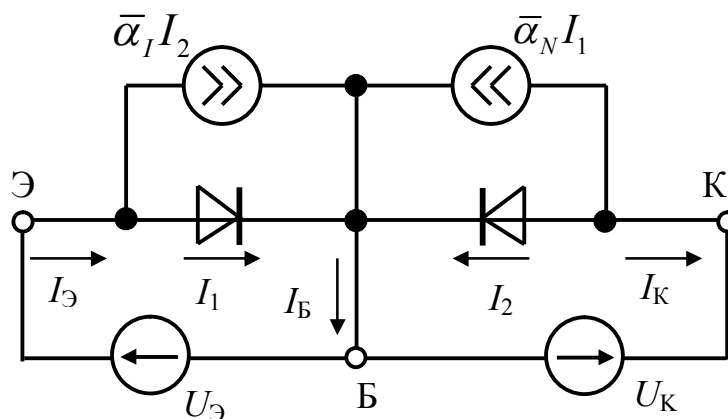


Рис. 1.2. Эквивалентная схема транзистора *p-n-p*

Транзистор характеризуется статическим прямым и инверсным коэффициентами передачи тока базы $\bar{\alpha}_N$ и $\bar{\alpha}_I$ соответственно. Для большинства современных маломощных транзисторов эти значения лежат в пределах $\bar{\alpha}_N = 0,95 \dots 0,99$, $\bar{\alpha}_I = 0,3 \dots 0,4$.

Как видно из схемы на рис. 1.2, к эмиттеру и коллектору транзистора приложены напряжения $U_{\text{Э}}$ и $U_{\text{К}}$ относительно его базы. В связи с этим такую схему включения транзистора называют **схемой с общей базой (ОБ)**. Соответственно существуют схемы включения с **общим эмиттером (ОЭ)**, а также с **общим коллектором (ОК)**.

Схему ОБ (см. рис. 1.2) можно описать системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= I_{\text{Э}} + \bar{\alpha}_I I_2; \\ I_2 &= \bar{\alpha}_N I_1 - I_{\text{К}}; \\ I_1 &= I_{\text{Э}0} \left(e^{U_{\text{Э}}/\varphi_{\Gamma}} - 1 \right); \\ I_2 &= I_{\text{К}0} \left(e^{U_{\text{К}}/\varphi_{\Gamma}} - 1 \right). \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

С учетом очевидного выражения

$$I_{\text{Э}} = I_{\text{К}} + I_{\text{Б}}, \quad (1.2)$$

из соотношений (1.1) и (1.2) можно определить уравнения Эберса-Молла [1]. В общем виде эти уравнения можно представить в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{Э}} &= \varphi_{\text{Э}}(U_{\text{Э}}, U_{\text{К}}); \\ I_{\text{К}} &= \varphi_{\text{К}}(U_{\text{Э}}, U_{\text{К}}); \\ I_{\text{Б}} &= \varphi_{\text{Б}}(U_{\text{Э}}, U_{\text{К}}). \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

Уравнения (1.3) нелинейны, непосредственное их использование трудоемко, и поэтому они сравнительно редко используются на практике.

В том случае, когда транзистор используется в линейной усилительной схеме, чаще всего применяются линеаризованные уравнения, описывающие характеристики транзистора с достаточной точностью.

Таким линеаризованным уравнениям соответствуют схемы замещения (эквивалентные схемы) транзистора.

Схема замещения транзистора при его включении с ОБ [2,7] представлена на рис. 1.3.

В соответствии с ее конфигурацией она получила название T-образной схемы замещения.

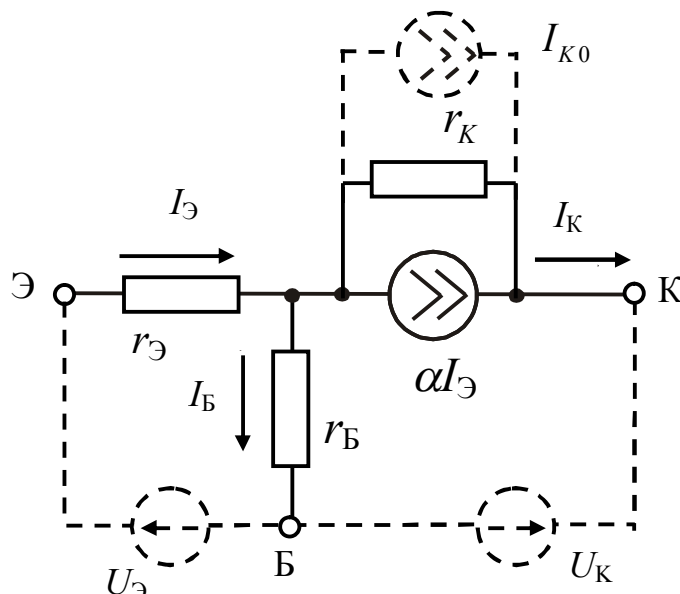


Рис. 1.3. Схема замещения транзистора при его включении с ОБ

В этой схеме $r_Э$, $r_Б$, $r_К$ – внутренние сопротивления эмиттера, базы и коллектора соответственно, α – коэффициент передачи тока эмиттера. В некоторых случаях учитывают обратный ток коллектора $I_{К0}$, который достаточно мал (для маломощных транзисторов этот ток составляет единицы или десятки нА).

Эта схема описывается соотношением

$$I_К = \alpha I_Э + \frac{U_К}{r_К}. \quad (1.4)$$

Схема замещения транзистора при его включении с ОЭ представлена на рис. 1.4. В этой схеме $r_К^*$ – сопротивление коллектора транзистора, β – коэффициент передачи (коэффициент усиления) тока базы, $I_{К0}^*$ – обратный ток коллектора.

Эти параметры связаны с аналогичными параметрами схемы ОБ (см. рис. 1.3) соотношениями

$$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}, \quad r_K^* = r_K (1-\alpha) = \frac{r_K}{1+\beta}, \quad I_{K0}^* = (1+\beta)I_{K0}. \quad (1.5)$$

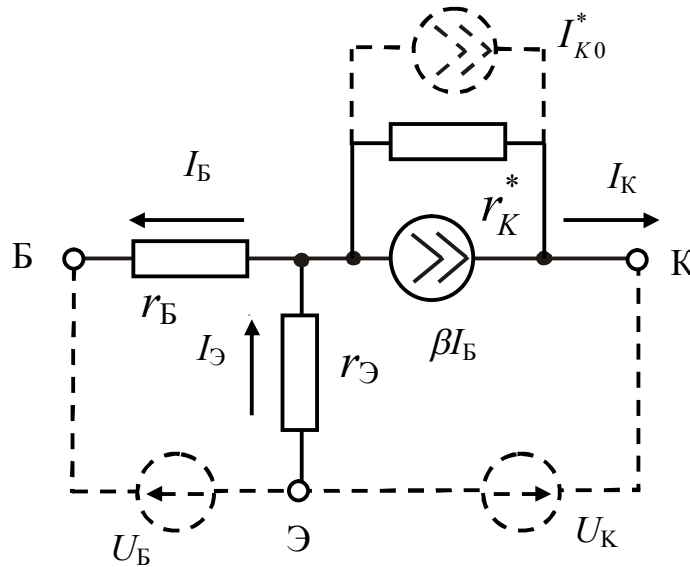


Рис. 1.4. Схема замещения транзистора при его включении с ОЭ

Уравнение, описывающее эту схему, при $I_{K0}^* \approx 0$ имеет вид

$$I_K = \beta I_B + \frac{U_K}{r_K^*}. \quad (1.6)$$

1.2. Транзисторный усилительный каскад с включением транзистора с общим эмиттером (ОЭ)

Анализ режима работы каскада на постоянном токе.

В общем случае схему транзисторного каскада можно представить на рис. 1.5. Поскольку в схеме использован транзистор типа *p-n-p*, для питания схемы используется отрицательное напряжение питания U_{II}^- . Для определения основных параметров усилительного каскада вначале необходимо проанализировать его режим на постоянном токе (определить рабочую точку).

Основными параметрами здесь являются постоянные составляющие напряжений коллектора, эмиттера и базы U_K^0 , $U_Э^0$, U_B^0 соответственно, а также токов I_K^0 , $I_Э^0$, I_B^0 .

Известно, что токи I_K и I_B коллектора и базы транзистора связаны коэффициентом усиления тока β в схеме с общим эмиттером (для маломощных транзисторов $\beta = 50 \dots 100$):

$$I_K = \beta I_B . \quad (1.7)$$

Поскольку ток коллектора во много раз больше тока базы, током базы в ряде случаев можно пренебречь.

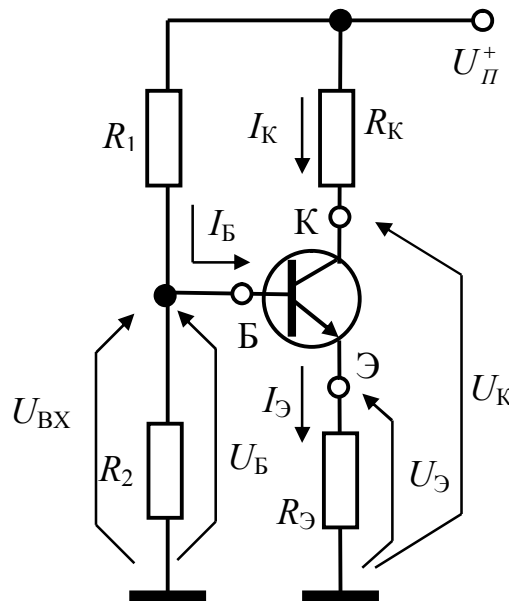


Рис. 1.5. Схема транзисторного каскада для анализа режима на постоянном токе

Тогда потенциал U_B^0 базы транзистора определяется делителем $R_1 R_2$, который подсоединен к источнику напряжения питания U_{Π}^- :

$$U_B^0 \approx U_{\Pi}^- \frac{R_2}{R_1 + R_2} . \quad (1.8)$$

Напряжение на эмиттерном переходе, если он смещен в прямом направлении, как это имеет место в рассматриваемом каскаде, равно примерно [2]

$$U_{БЭ}^0 \approx -0,7В . \quad (1.9)$$

Тогда постоянная составляющая напряжения на эмиттере транзистора равна

$$U_{Э}^0 \approx U_B^0 + 0,7В . \quad (1.10)$$

В этом случае ток эмиттера определяется законом Ома:

$$I_{\text{Э}}^0 = \frac{U_{\text{Э}}^0}{R_{\text{Э}}}, \quad (1.11)$$

а ток коллектора равен

$$I_{\text{К}}^0 = I_{\text{Э}}^0 - I_{\text{Б}}^0 \approx I_{\text{Э}}^0 = \frac{U_{\text{Э}}^0}{R_{\text{Э}}}, \quad (1.12)$$

и постоянная составляющая напряжения на коллекторе определяется выражением

$$U_{\text{К}}^0 = U_{\text{П}}^- + I_{\text{К}}^0 R_{\text{К}}. \quad (1.13)$$

Анализ режима работы каскада на постоянном токе при заземленном эмиттере.

В том случае, когда эмиттер транзистора (рис. 1.6) заземлен, то есть выполняется условие $R_{\text{Э}}=0$, применяется несколько иная методика анализа режима каскада на постоянном токе. Поскольку в рассматриваемой схеме использован транзистор типа *n-p-n*, в отличие от предыдущей схемы полярности всех напряжений и направления токов должны быть изменены на противоположные.

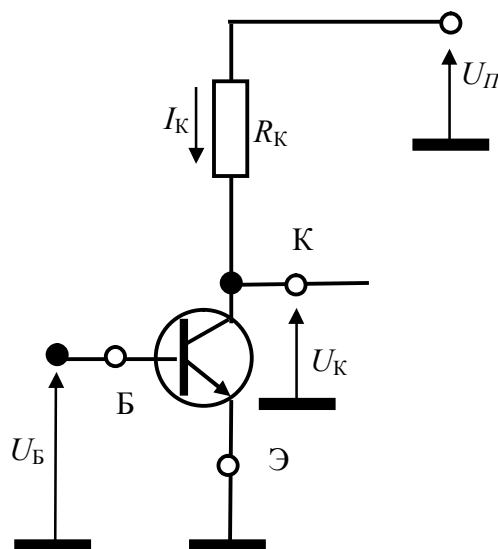


Рис. 1.6. Схема каскада с ОЭ при заземленном эмиттере ($R_{\text{Э}}=0$)

При этом целесообразно определить ток базы I_B^0 транзистора с учетом (1.9):

$$I_B^0 = \frac{U_{БЭ}^0 - U_{П}^-}{R_1} \approx \frac{-0,7B - U_{П}^-}{R_1}; \quad (1.14)$$

Ток коллектора для такой схемы определяется соотношением, аналогичным (1.7):

$$I_K^0 = \beta I_B^0. \quad (1.15)$$

Постоянная составляющая коллекторного напряжения при этом также определяется (1.13).

В большинстве случаев режим транзистора по постоянному току, определяемый резисторами схемы (см. рис. 1.5), выбирают таким образом, чтобы выполнялось следующее условие:

$$U_K^0 \approx \frac{U_{П}^-}{2}, \quad (1.16)$$

поскольку при этом обеспечиваются наименьшие искажения усиленного сигнала.

Анализ режима каскада по постоянному току позволяет определить внутреннее сопротивление эмиттера транзистора $r_{Э}$ [1,2]:

$$r_{Э} \approx \frac{\varphi_T}{I_K^0} \approx \frac{\varphi_T}{I_{Э}^0}, \quad (1.17)$$

где φ_T – температурный потенциал ($\varphi_T \approx 25$ мВ при температуре окружающей среды 20...25 °С).

Выбор рабочей точки транзисторного каскада.

Для выбора рабочей точки необходимо рассмотреть уравнения цепи, состоящей из последовательно соединенного транзистора и резистора R_K (см. рис. 1.6). Эти уравнения имеют вид

$$\left. \begin{aligned} U_K + I_K R_K &= U_{П}; \\ U_K &= f(I_K). \end{aligned} \right\}$$

Первое уравнение этой системы определяется законом Ома, а второе – коллекторной характеристикой транзистора. Графический метод решения системы уравнений состоит в нахождении точки пересечения графиков соответствующих функций, которая называется рабочей точкой A (рис. 1.7).

График первого уравнения называется нагрузочной характеристикой (нагрузочной линией).

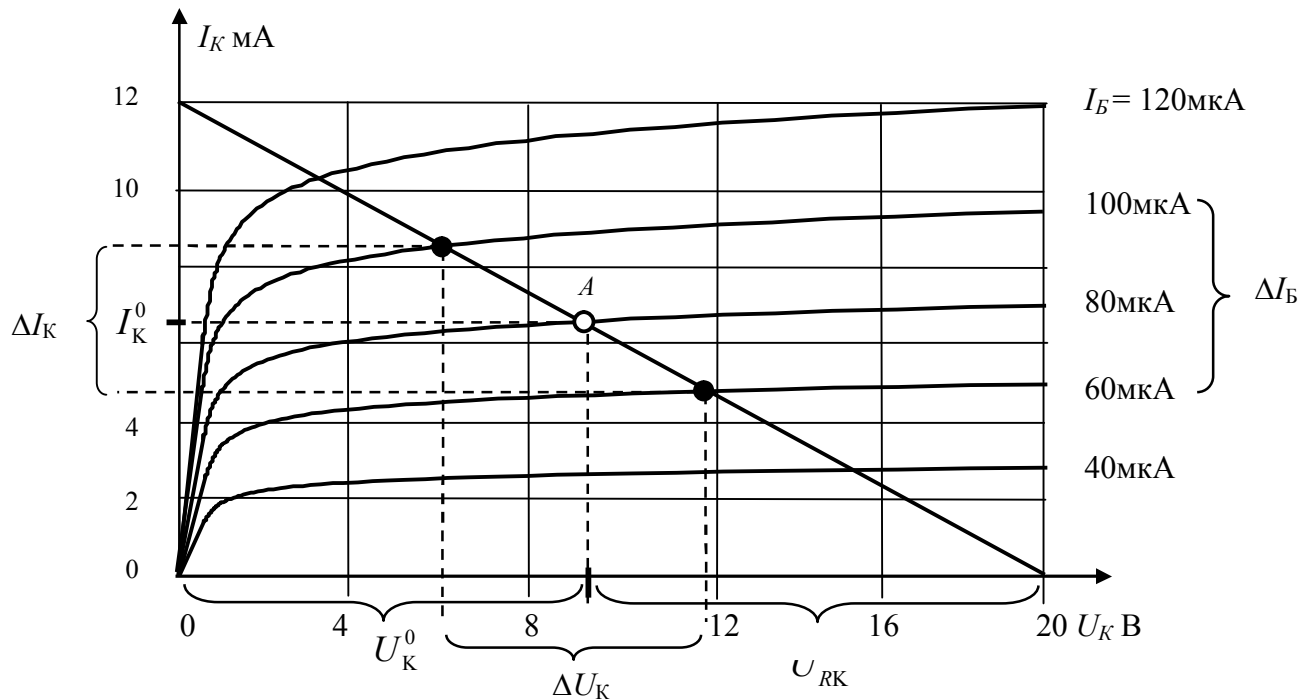


Рис.1.7. Изменения параметров транзисторного каскада при малом сигнале ΔI_B

Положение рабочей точки позволяет определить постоянное напряжение на транзисторе U_K^0 , а также падение напряжения U_{RK}^0 на резисторе R_K :

$$U_{RK}^0 = I_K^0 R_K .$$

Очевидно, что положение рабочей точки зависит от напряжения питания схемы $U_{П}$, а также от постоянного тока коллектора I_K^0 .

Указанные параметры выбираются таким образом, чтобы с целью обеспечения максимального линейного диапазона усиления сигнала рабочая точка находилась на середине нагрузочной характеристики (см. рис. 1.7), т.е. чтобы выполнялось условие (1.16).

Анализ режима работы каскада на переменном токе.

Транзисторный каскад в схеме с ОЭ (см. рис. 1.5) работает в качестве усилителя, если входной сигнал поступает во входную базовую цепь, а к коллекторной цепи подключается нагрузка R_H . Для разделения по постоянной составляющей сигнала (по постоянному току) входная и выходная цепи содержат разделительные конденсаторы C_1 и C_2 .

Схема такого каскада в общем случае изображена на рис. 1.8.

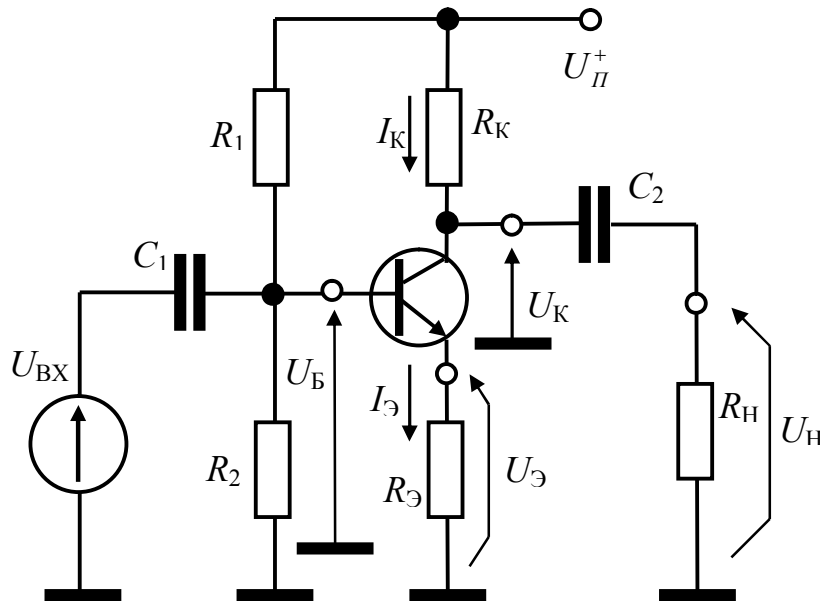


Рис. 1.8. Полная схема транзисторного усилительного каскада с включением транзистора с ОЭ

Рассмотрим усилительные свойства такого каскада по отношению к переменному гармоническому сигналу $U_{ВХ}$ частотой f_c .

В дальнейшем будем рассматривать переменный сигнал как приращение некоторого напряжения (сигнал ΔU_B как приращение напряжения U_B , сигнал ΔU_K как приращение напряжения U_K и т.д.). Если частота сигнала достаточно велика, то сопротивлением разделительных конденсаторов C_1 и C_2 можно пренебречь.

Кроме того, поскольку схема питается постоянным напряжением $U_{П}^+$, его приращение равно нулю, и при рассмотрении схемы (см. рис. 1.4) как усилителя переменного сигнала линию подачи питания $U_{П}^+$ можно заземлить. Тогда для приращений напряжений схема каскада (см. рис. 1.8) принимает вид [2,6], изображенный на рис. 1.9.

В этом случае с учетом схемы замещения транзистора с ОЭ (см. рис. 1.4) эквивалентная схема каскада (см. рис. 1.9) принимает вид, изображенный на рис. 1.10. Необходимо иметь в виду, что все параметры в эквивалентной схеме (I_B , I_K , U_K и т.д.) фактически представляют собой приращения (ΔI_B , ΔI_K , ΔU_K) соответствующих сигналов.

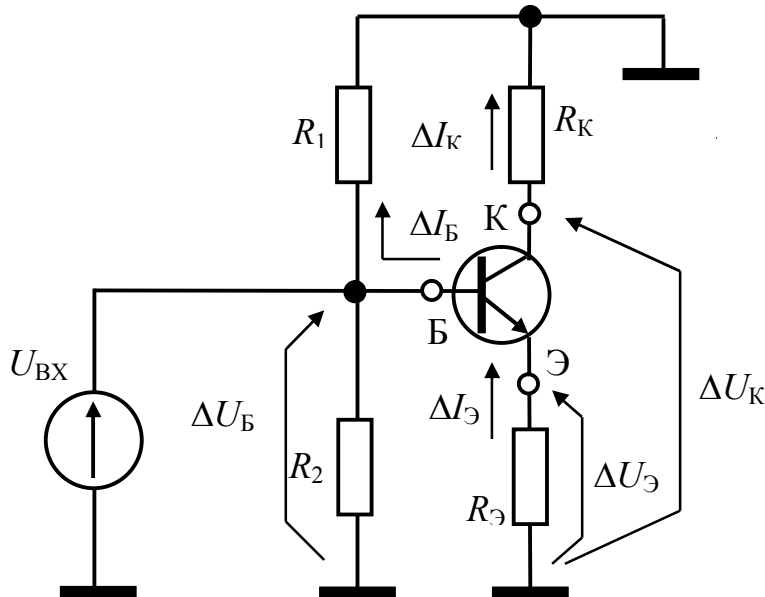


Рис. 1.9. Схема транзисторного усилительного каскада с ОЭ для приращений напряжений

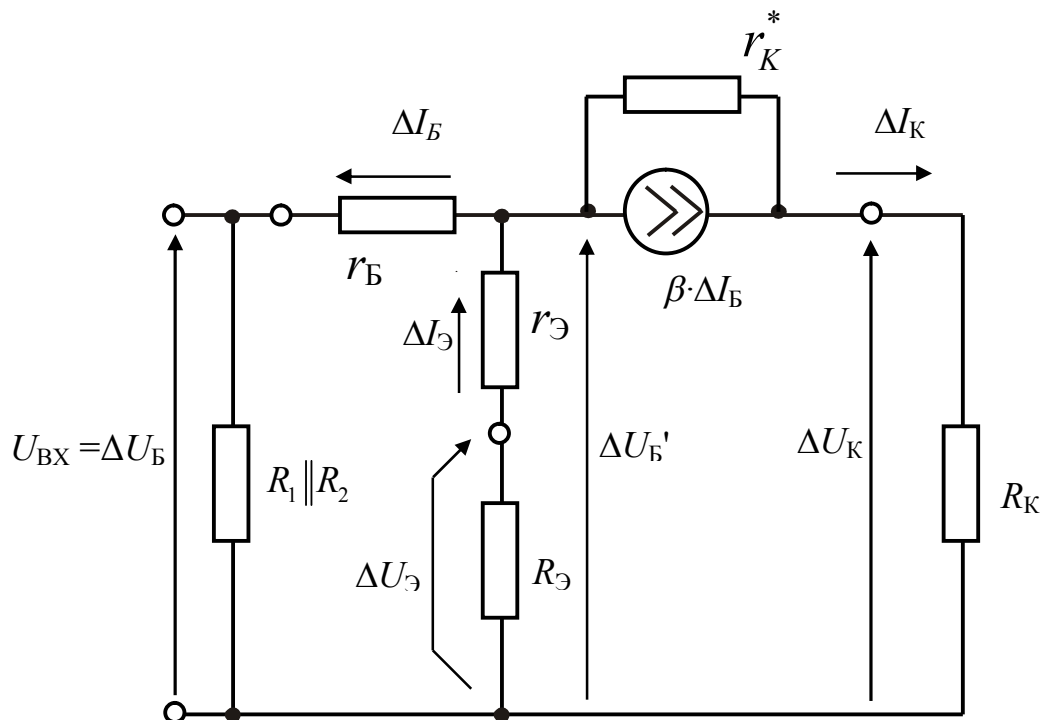


Рис. 1.10. Эквивалентная схема транзисторного усилительного каскада с ОЭ как усилителя переменного сигнала $U_{ВХ}$

Легко убедиться, что для этой схемы справедливы соотношения

$$\Delta I_{\text{К}} = \beta \cdot \Delta I_{\text{Б}}; \quad \Delta I_{\text{Э}} = \Delta I_{\text{К}} + \Delta I_{\text{Б}} = (\beta + 1)\Delta I_{\text{Б}}; \quad (1.18)$$

$$\Delta U_{\text{Б}}' = -(\beta + 1) \cdot \Delta I_{\text{Б}} \cdot (r_{\text{Э}} + R_{\text{Э}}); \quad (1.19)$$

$$\Delta U_{\text{К}} = \beta \cdot \Delta I_{\text{Б}} \cdot R_{\text{К}}; \quad (1.20)$$

$$U_{\text{ВХ}} = \Delta U_{\text{Б}} = -[\Delta I_{\text{Э}} \cdot (r_{\text{Э}} + R_{\text{Э}}) + \Delta I_{\text{Б}} r_{\text{Б}}] = \Delta I_{\text{Б}} [r_{\text{Б}} + (\beta + 1)(r_{\text{Э}} + R_{\text{Э}})]; \quad (1.21)$$

Отсюда можно определить коэффициент усиления каскада по напряжению (если выходной сигнал снимается с коллектора транзистора):

$$K_U = \frac{\Delta U_{\text{К}}}{\Delta U_{\text{Б}}} = -\frac{\beta R_{\text{К}}}{r_{\text{Б}} + (\beta + 1)(r_{\text{Э}} + R_{\text{Э}})}; \quad (1.22)$$

Для маломощных транзисторов можно принять допущения

$$r_{\text{Б}} \ll R_{\text{Э}}; \quad r_{\text{Б}} \ll R_{\text{Э}}; \quad \beta \gg 1. \quad (1.23)$$

В этом случае коэффициент усиления равен

$$K_U \approx -\frac{R_{\text{К}}}{R_{\text{Э}}}. \quad (1.24)$$

Отрицательный знак в (1.24) свидетельствует о том, что входной и выходной гармонические сигналы находятся в противофазе.

Входное сопротивление каскада (без учета сопротивления делителя $R_1 R_2$) определяется из (1.21):

$$R_{\text{ВХ.Б}} = \frac{\Delta U_{\text{Б}}}{\Delta I_{\text{ВХ}}} = \frac{\Delta U_{\text{Б}}}{\Delta I_{\text{Б}}} = [r_{\text{Б}} + (\beta + 1)(r_{\text{Э}} + R_{\text{Э}})]; \quad (1.25)$$

С учетом (1.23) это сопротивление равно

$$R_{\text{ВХ.Б}} \approx \beta R_{\text{Э}}; \quad (1.26)$$

Тогда входное сопротивление каскада с учетом делителя $R_1 R_2$ (рис. 1.10):

$$R_{\text{ВХ}} = R_1 \parallel R_2 \parallel \beta R_{\text{Э}}. \quad (1.27)$$

Из этого выражения видно, что сопротивление в цепи эмиттера можно пересчитать во входную цепь, умножив его на коэффициент β .

Выходное сопротивление каскада можно определить непосредственно из рассмотрения его эквивалентной схемы (см. рис. 1.10):

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{\Delta U_{\text{К}}}{\Delta I_{\text{К}}} = R_{\text{К}} \parallel r_{\text{К}}^*.$$

На практике обычно выполняется условие $r_{\text{К}}^* \gg R_{\text{К}}$, поэтому выходное сопротивление можно принять равным

$$R_{\text{ВЫХ}} \approx R_{\text{К}}. \quad (1.28)$$

С целью увеличения коэффициента усиления сопротивление $R_{\text{Э}}$ в цепи эмиттера шунтируют [6] конденсатором $C_{\text{Э}}$ (рис. 1.11).

В этом случае в цепь эмиттера включена цепочка $R_{\text{Э}}C_{\text{Э}}$, активное сопротивление которой на частоте сигнала f_c :

$$R_{\text{ЭКВ}} = R_{\text{Э}} \parallel \frac{1}{\omega_c C_{\text{Э}}},$$

где $\omega_c = 2\pi f_c$.

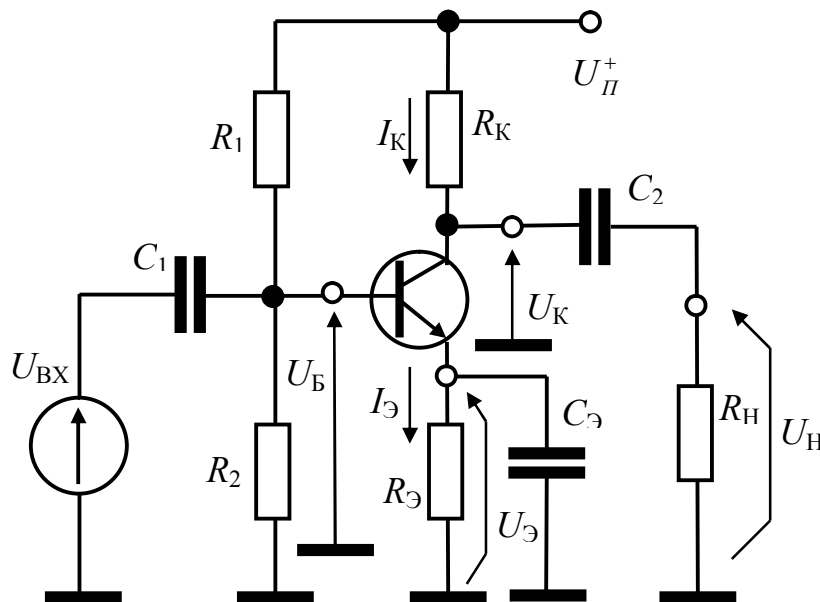


Рис. 1.11. Схема транзисторного каскада с ОЭ и конденсатором $C_{\text{Э}}$ в эмиттерной цепи

Обычно конденсатор $C_{\text{Э}}$ выбирают достаточно большой величины, чтобы на частоте сигнала f_c выполнялось следующее условие:

$$\frac{1}{\omega C_{\text{Э}}} < r_{\text{Э}} . \quad (1.29)$$

В этом случае можно полагать сопротивление $R_{\text{Э}}$ эмиттерной цепи также равным нулю, и выражение для коэффициента усиления каскада (1.22) примет вид

$$K_U = \frac{\Delta U_{\text{К}}}{\Delta U_{\text{Б}}} = -\frac{\beta R_{\text{К}}}{r_{\text{Б}} + (\beta + 1)r_{\text{Э}}} \approx -\frac{\beta R_{\text{К}}}{(\beta + 1)r_{\text{Э}}} \approx -\frac{R_{\text{К}}}{r_{\text{Э}}}, \quad (1.30)$$

где сопротивление эмиттера $r_{\text{Э}}$ определяется по выражению (1.23).

Входное сопротивление каскада при заземленном эмиттере определяется из (1.25)-(1.27):

$$R_{\text{ВХ}} = R_1 \parallel R_2 \parallel \beta r_{\text{Э}} . \quad (1.31)$$

Выходное сопротивление каскада определяется из (1.28) так же, как и выходное сопротивление предыдущей схемы.

1.3. Транзисторный усилительный каскад с включением транзистора с общей базой (ОБ)

Простейшая схема каскада с ОБ [2,8] изображена на рис. 1.12.

В связи с тем, что база транзистора заземлена, эта схема получила название "схема с общей базой".

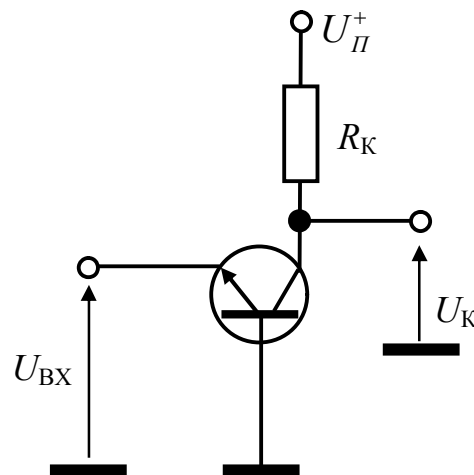


Рис. 1.12. Простейшая схема транзисторного каскада с ОБ

При использовании схемы замещения транзистора (см. рис. 1.3) можно определить эквивалентную схему каскада для малого сигнала (рис. 1.13).

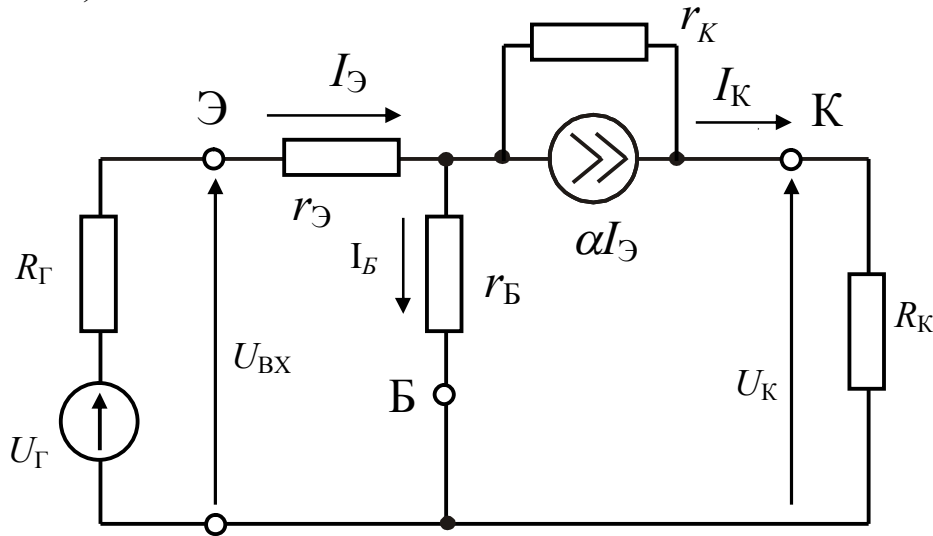


Рис. 1.13. Эквивалентная схема транзисторного каскада с ОБ для малого сигнала

В этой схеме учитывается внутреннее сопротивление R_G источника сигнала U_G .

Поскольку ток базы транзистора равен

$$I_B = I_Э - I_К = I_Э (1 - \alpha),$$

то входное сопротивление каскада определяется выражением

$$R_{ВХ} = \frac{U_{ВХ}}{I_Э} = \frac{I_Э r_Э + (1 - \alpha) I_Э r_Б}{I_Э} = r_Э + (1 - \alpha) r_Б \approx r_Э; \quad (1.32)$$

Коэффициент усиления каскада равен

$$K = \frac{U_К}{U_{ВХ}} = \frac{-I_К R_К}{- [I_Э r_Э + I_Э (1 - \alpha) r_Б]} = \frac{\alpha R_К}{r_Э + (1 - \alpha) r_Б} \approx \frac{\alpha R_К}{r_Э}; \quad (1.33)$$

Если коэффициент усиления определять относительно напряжения генератора сигнала R_G , то формула для его определения принимает вид

$$K = \frac{\alpha R_К}{R_{ВХ} + R_G}, \quad (1.34)$$

где $R_{ВХ}$ определяется (1.32).

Выходное сопротивление каскада с ОБ:

$$R_{\text{ВЫХ}} = R_K \parallel r_K. \quad (1.35)$$

Один из практических вариантов схемы каскада с ОБ изображен на рис. 1.14.

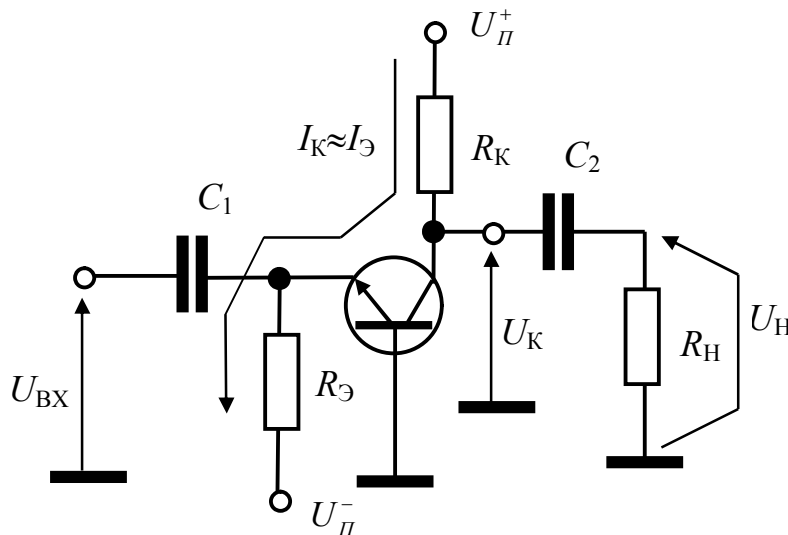


Рис. 1.14. Вариант практической схемы каскада с ОБ

Анализ режима работы каскада на постоянном токе.

Для определения основных параметров усилительного каскада вначале необходимо проанализировать его режим на постоянном токе (определить рабочую точку).

Анализ режима на постоянном токе каскада с ОБ производится так же, как и анализ режима каскада с ОЭ (см. предыдущий раздел).

Схема каскада с ОБ (см. рис. 1.14) для постоянного тока представлена на рис. 1.15.

В этой схеме токи коллектора и эмиттера определяются выражением

$$I_K^0 \approx I_{Э}^0 = \frac{U_{RЭ}^0}{R_{Э}} = \frac{U_{ЭБ}^0 - U_{П}^{-}}{R_{Э}} \approx \frac{-0,7B - U_{П}^{-}}{R_{Э}}. \quad (1.36)$$

Отсюда напряжение на коллекторе транзистора:

$$U_K^0 = U_{П}^{+} - I_K^0 R_K. \quad (1.37)$$

Это напряжение должно удовлетворять (1.16), то есть составлять половину напряжения питания так же, как и в схеме каскада с ОЭ.

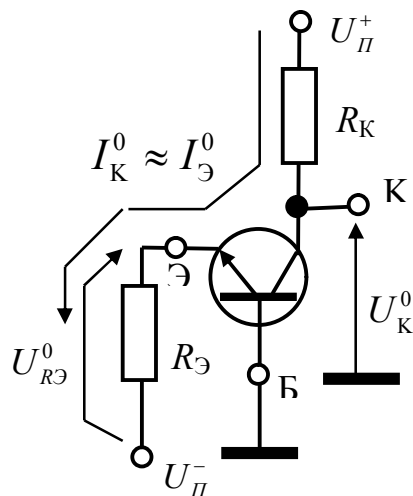


Рис. 1.15. Схема каскада с ОБ на постоянном токе

По сравнению с каскадом с ОЭ каскад с ОБ имеет более низкое входное сопротивление и положительный коэффициент усиления по напряжению, то есть входное и выходное напряжения находятся в фазе.

1.4. Транзисторный усилительный каскад с включением транзистора с общим коллектором (ОК)

Простейшая схема каскада с ОК [2] изображена на рис. 1.16.

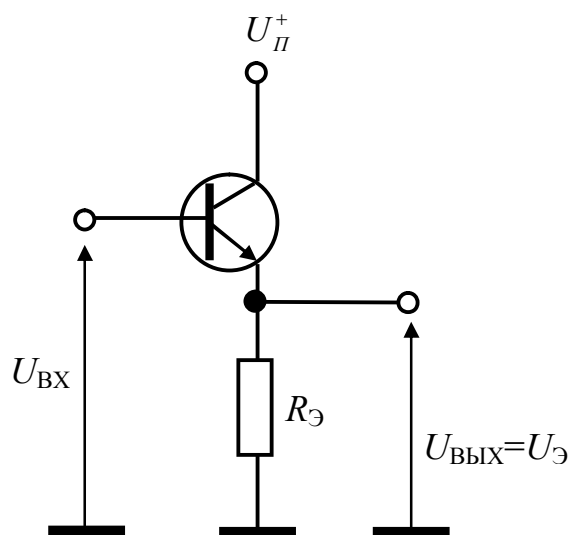


Рис. 1.16. Простейшая схема транзисторного каскада с ОК

При рассмотрении этой схемы для малого сигнала (его приращений) вывод питания U_{Π}^{+} можно заземлить, как это сделано при анали-

зе схемы с ОЭ (рис. 1.9). Тогда схема каскада с ОК принимает вид, представленный на рис. 1.17.

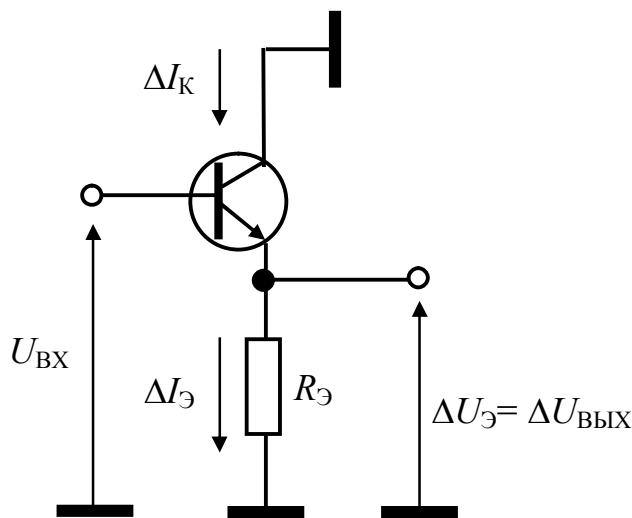


Рис. 1.17. Схема транзисторного усилительного каскада с ОК для приращений напряжений

Из рассмотрения этой схемы видно, что коллектор транзистора заземлен, в связи с этим схема и получила название "схема с общим коллектором".

При использовании схемы замещения транзистора (см. рис. 1.3) можно определить эквивалентную схему каскада с ОК для малого сигнала (рис. 1.18).

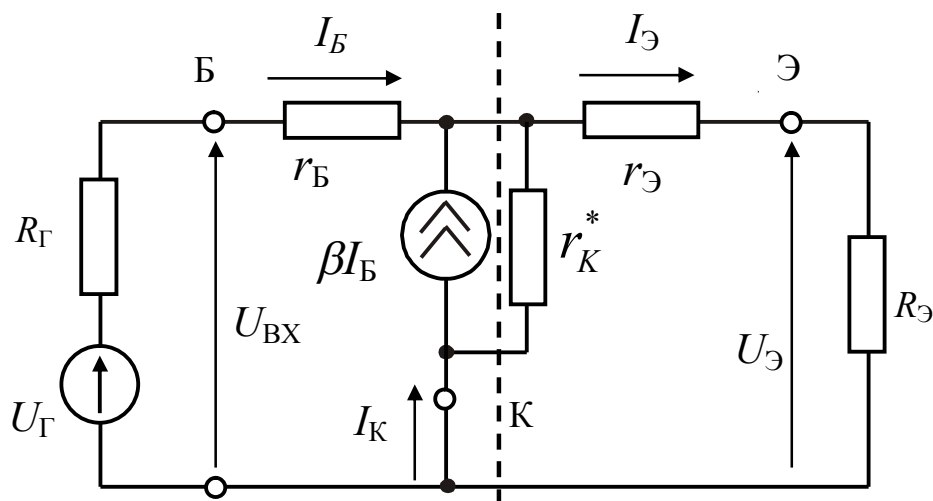


Рис. 1.18. Эквивалентная схема транзисторного каскада с ОК для малого сигнала

Сопротивление коллектора $r_{К}^*$ транзистора достаточно велико, и поэтому им можно пренебречь.

Тогда основное уравнение для такой схемы имеет вид

$$U_{\text{ВХ}} = I_{\text{Б}}r_{\text{Б}} + I_{\text{Э}}(r_{\text{Э}} + R_{\text{Э}}) = I_{\text{Б}}r_{\text{Б}} + I_{\text{Б}}(\beta + 1)(r_{\text{Э}} + R_{\text{Э}}); \quad (1.38)$$

Отсюда определяется коэффициент усиления каскада по напряжению:

$$K_{\text{Э}} = \frac{U_{\text{Э}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{R_{\text{Э}}I_{\text{Б}}(\beta + 1)}{I_{\text{Б}}r_{\text{Б}} + I_{\text{Б}}(\beta + 1)(r_{\text{Э}} + R_{\text{Э}})} \approx \frac{R_{\text{Э}}(\beta + 1)}{r_{\text{Б}} + R_{\text{Э}}(\beta + 1)}. \quad (1.39)$$

Непосредственно из (1.39) видно, что коэффициент усиления каскада несколько меньше единицы и положителен, то есть выходное напряжение примерно соответствует по амплитуде и фазе входному напряжению. В связи с этим каскад с ОК также называется **эмиттерным повторителем** [2,6].

Входное сопротивление $R_{\text{ВХ.Б}}$ каскада с ОК со стороны базы (см. рис. 1.17) определяется из (1.38):

$$R_{\text{ВХБ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{I_{\text{ВХ}}} = r_{\text{Б}} + (\beta + 1)(r_{\text{Э}} + R_{\text{Э}}) \approx r_{\text{Б}} + \beta R_{\text{Э}} \approx \beta R_{\text{Э}}. \quad (1.40)$$

Для определения выходного сопротивления каскада необходимо рассмотреть часть эквивалентной схемы (см. рис. 1.19) левее пунктирной линии (рис. 1.19).

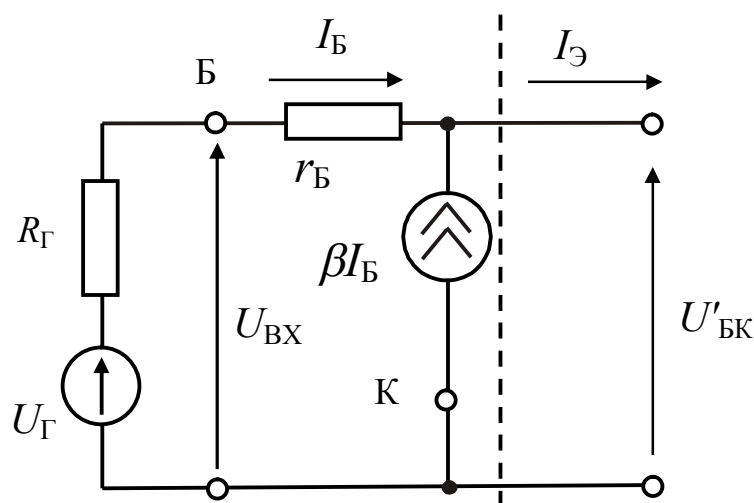


Рис. 1.19. Левая часть эквивалентной схемы каскада с ОК

Для этой схемы справедливо соотношение

$$U'_{\text{БК}} = U_{\Gamma} + I_{\text{Б}} (r_{\text{Б}} + R_{\Gamma}) = U_{\Gamma} + \frac{I_{\text{Э}}}{(\beta + 1)} (r_{\text{Б}} + R_{\Gamma}) .$$

Это соотношение позволяет определить выходное сопротивление левой части (см. рис. 1.19) эквивалентной схемы каскада с ОК:

$$R_{\text{ВЫХ}}^{\text{БК}} = \frac{dU'_{\text{БК}}}{dI_{\text{Э}}} = \frac{r_{\text{Б}} + R_{\Gamma}}{(\beta + 1)} .$$

Преобразованная эквивалентная схема каскада с ОК (см. рис. 1.18) с учетом последнего соотношения изображена на рис. 1.20.

Общее выходное сопротивление каскада с ОК, как это видно из преобразованной схемы (см. рис. 1.20), определяется выражением

$$R_{\text{ВЫХ}} = R_{\text{Э}} \left\| \left(r_{\text{Э}} + r_{\text{К}}^* \left\| \frac{r_{\text{Б}} + R_{\Gamma}}{\beta + 1} \right. \right) \approx r_{\text{Э}} + \frac{r_{\text{Б}} + R_{\Gamma}}{\beta + 1} . \quad (1.41)$$

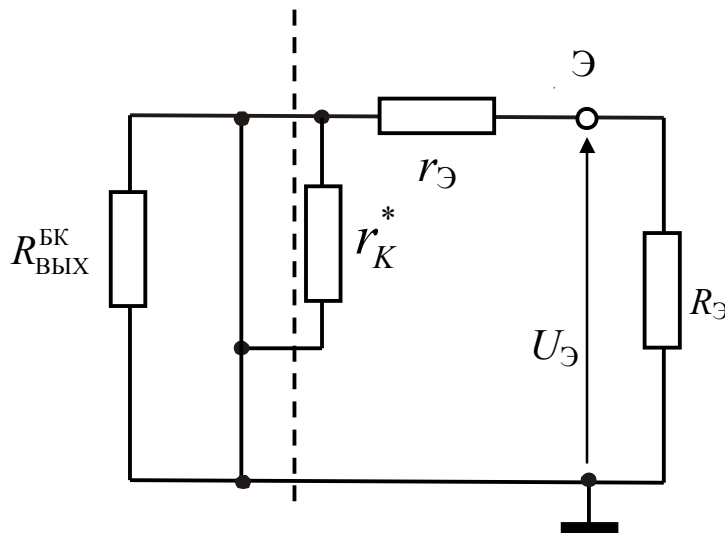


Рис. 1.20. Преобразованная схема каскада с ОК

Выходное сопротивление каскада с ОК довольно мало и является самым малым из всех рассмотренных каскадов, что является основным его преимуществом.

Типовая схема каскада с ОК приведена на рис. 1.21.

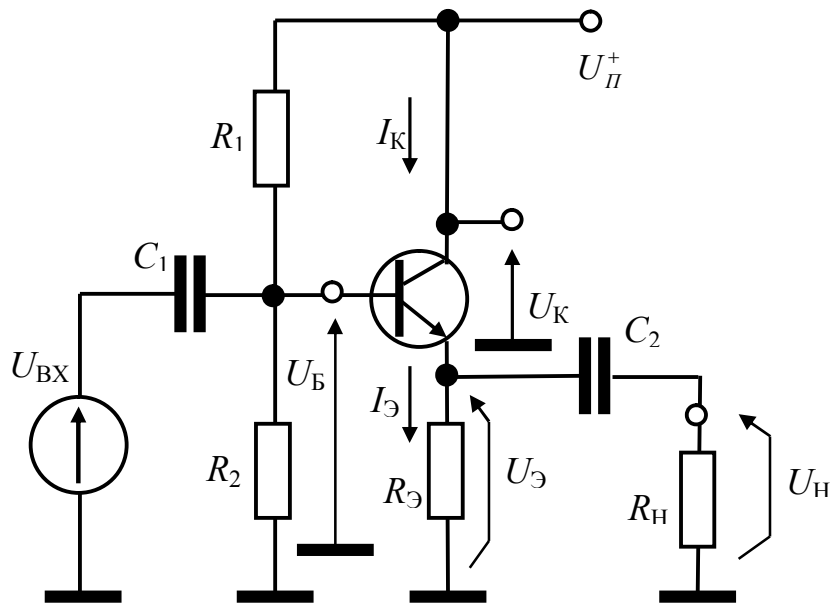


Рис. 1.21. Практическая схема каскада с ОК

Анализ режима на постоянном токе каскада с ОК производится так же, как и анализ режима каскада с ОЭ.

1.5. Частотные характеристики транзисторных усилительных каскадов

Эквивалентная схема транзисторного усилительного каскада для частот сигнала, на которых емкостное сопротивление разделительных конденсаторов сравнимо с его входным и выходным сопротивлениями (независимо от включения транзистора в схему с ОЭ, ОБ, ОК) представлена на рис. 1.22. Частоты, лежащие в таком диапазоне, обычно называют средними частотами.

В этой эквивалентной схеме C_1 , C_2 – разделительные конденсаторы в схеме усилителя, (см. рис. 1.11, рис. 1.14, рис. 1.21), $R_{ВХ}$, $R_{ВЫХ}$ – соответственно его входное и выходное сопротивления, $R_{Г}$ – внутреннее сопротивление генератора (источника) сигнала.

Внутренняя ЭДС выходного сигнала определяется коэффициентом K_U усиления усилителя по напряжению:

$$E_{ВЫХ} = K_U \cdot U_{ВХ}.$$

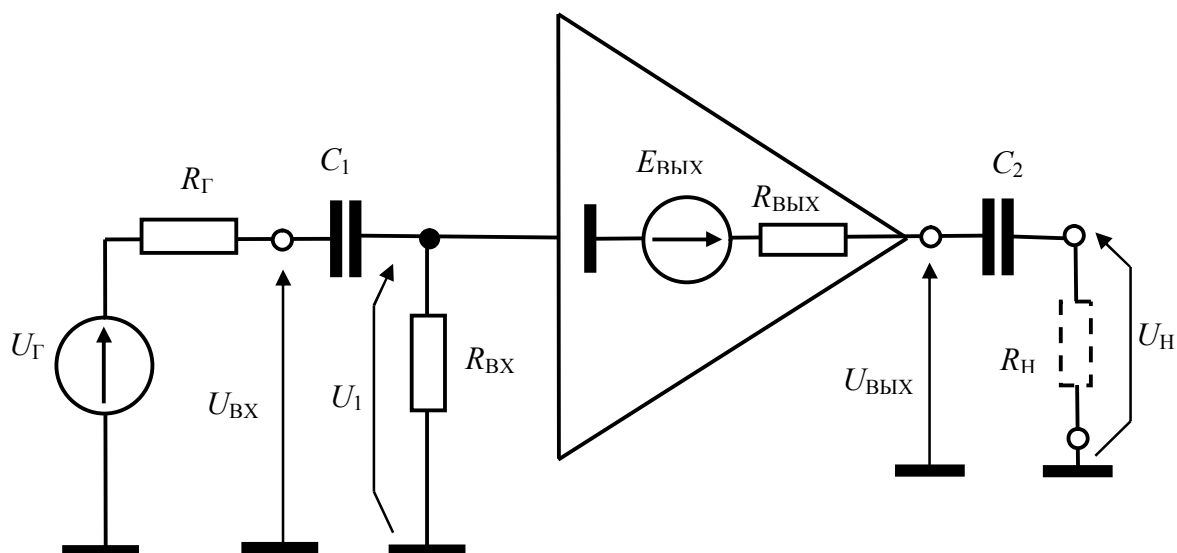


Рис. 1.22. Эквивалентная схема каскада для области средних частот

Если емкостное сопротивление конденсатора C_2 , а также сопротивление нагрузки R_H достаточно велики (что часто выполняется на практике):

$$\frac{1}{2\pi f_c C_2} + R_H \gg R_{\text{ВЫХ}}, \quad (1.42)$$

то выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ равно выходной ЭДС $E_{\text{ВЫХ}}$:

$$U_{\text{ВЫХ}} = E_{\text{ВЫХ}}.$$

Аналогичный вывод может быть сделан и по отношению ко входной цепи $R_G C_1 R_{\text{ВХ}}$.

При выполнении $\frac{1}{2\pi f_c C_1} + R_G \ll R_{\text{ВХ}}$ напряжение U_1 на входе усилителя равно напряжению (ЭДС) генератора (источника) сигнала U_G : $U_{\text{ВХ}} = U_G$.

Эквивалентной схеме (см. рис. 1.22) соответствует структурная схема, изображенная на рис. 1.23.

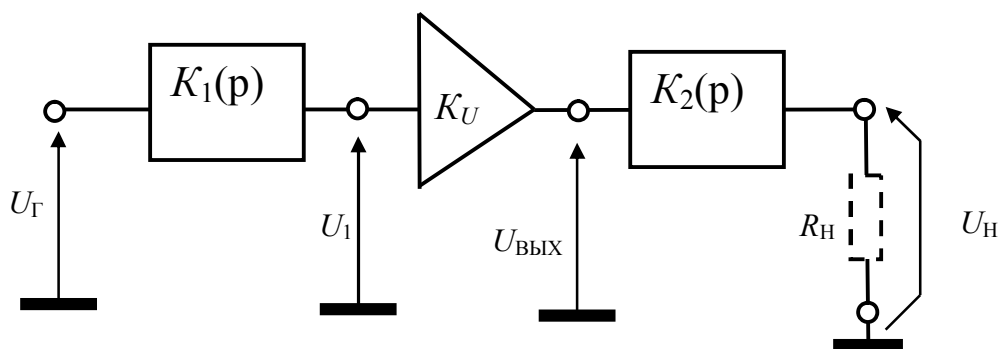


Рис. 1.23. Структурная схема каскада для области средних частот

Электрическая цепь линейного звена характеризуется передаточной функцией

$$K(p) = \frac{U_{\text{вых}}(p)}{U_{\text{вх}}(p)}, \quad (1.43)$$

где $U_{\text{вых}}(p)$, $U_{\text{вх}}(p)$ – изображения Лапласа входного и выходного напряжений.

При анализе конкретной электрической цепи используются выражения для операторного сопротивления конденсатора [4]

$$R_C = 1/Cp.$$

Например, цепь с передаточной функцией K_1 представляет собой делитель напряжения, одно плечо которого состоит из резистора $R_{\text{ВХ}}$, а второе плечо – из комплексного сопротивления $R_{\Gamma}C_1$, операторное сопротивление которого равно

$$z = \frac{1}{C_1p} + R_{\Gamma} = \frac{R_{\Gamma}C_1p + 1}{C_1p}.$$

Следовательно, **передаточная функция** этого делителя определяется выражением

$$K_1(p) = \frac{R_{\text{ВХ}}}{R_{\text{ВХ}} + z} = \frac{R_{\text{ВХ}}}{R_{\text{ВХ}} + \frac{R_{\Gamma}C_1p + 1}{C_1p}} = \frac{R_{\text{ВХ}}C_1p}{C_1(R_{\Gamma} + R_{\text{ВХ}})p + 1} = \frac{R_{\text{ВХ}}}{R_{\Gamma} + R_{\text{ВХ}}} \frac{C_1(R_{\Gamma} + R_{\text{ВХ}})p}{C_1(R_{\Gamma} + R_{\text{ВХ}})p + 1}$$

или

$$K_1(p) = K_{01} \frac{\tau_1 p}{\tau_1 p + 1}, \quad (1.44)$$

где $K_{01} = \frac{R_{\text{ВХ}}}{R_{\Gamma} + R_{\text{ВХ}}}$; $\tau_1 = C_1(R_{\Gamma} + R_{\text{ВХ}})$.

Аналогичным образом определяется передаточная функция $K_2(p)$:

$$K_2(p) = \frac{U_{\text{Н}}}{E_{\text{ВЫХ}}} = K_{02} \frac{\tau_2 p}{\tau_2 p + 1}, \quad (1.45)$$

где $K_2(p) = \frac{R_H}{R_H + R_{ВЫХ}}$, $\tau_2 = C_2(R_H + R_{ВЫХ})$.

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) $A(\omega)$ звена определяет изменение амплитуды сигнала $U_{вых}$ при изменении частоты входного гармонического сигнала

$$U_{ex} = U_m \sin \omega t,$$

а фазочастотная характеристика (ФЧХ) $\varphi(\omega)$ определяет изменение сдвига выходного сигнала по фазе.

Выражения для АЧХ и ФЧХ звена K_1 можно определить при подстановке в выражение для передаточной функции $K_1(p)$ параметра $p = j\omega$:

$$K_1(j\omega) = K_1(p) \Big|_{p=j\omega}. \quad (1.46)$$

Показательная форма функции $K_1(j\omega)$ определяет выражения для характеристик $A_1(\omega)$ и $\varphi_1(\omega)$:

$$K_1(j\omega) = A_1(\omega) e^{j\varphi_1(\omega)}. \quad (1.47)$$

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) $L_1(\omega)$ определяется выражением

$$L_1(\omega) = 20 \lg A_1(\omega) \quad (1.48)$$

и выражается в децибелах (дБ).

На практике обычно используются графики функций $L_1(f)$ и $\varphi_1(f)$ от частоты сигнала, выраженной в герцах. Как известно, частота f связана с круговой частотой ω соотношением

$$\omega = 2\pi f. \quad (1.49)$$

Графики этих функций, как правило, откладываются в логарифмическом масштабе [5].

Подставляя в передаточную функцию (1.44) выражение (1.46), определяем **комплексную частотную характеристику**:

$$K_1(j\omega) = K_{01} \frac{j\omega\tau_1}{j\omega\tau_1 + 1} = K_{01} \frac{j\omega\tau_1(1 - j\omega\tau_1)}{1 + \omega^2\tau_1^2} = K_{01} \frac{\omega\tau_1}{1 + \omega^2\tau_1^2} (\omega\tau_1 + j). \quad (1.50)$$

Модуль и аргумент этой функции называются **амплитудно-частотной (АЧХ) и фазочастотной (ФЧХ) характеристиками** [5] исследуемой цепи.

Они определяются соответственно следующими выражениями:

$$A_1(\omega) = K_{01} \frac{\omega\tau_1}{1 + \omega^2\tau_1^2} \sqrt{1 + \omega^2\tau_1^2} = K_{01} \frac{\omega\tau_1}{\sqrt{1 + \omega^2\tau_1^2}} ;$$

$$\varphi_1(\omega) = \operatorname{arctg}\left(\frac{1}{\omega\tau_1}\right).$$

При подстановке соотношения (1.49) в эти выражения эти характеристики определяются в функции от частоты f :

$$A_1(f) = K_{01} \frac{f/f_{c1}}{\sqrt{1 + \left(f/f_{c1}\right)^2}}, \quad (1.51)$$

$$\varphi_1(f) = \operatorname{arctg}\left(f_{c1}/f\right), \quad (1.52)$$

где $f_{c1} = 1/2\pi\tau_1$ (1.53)

- частота, определяемая параметрами исследуемой схемы (**частота сопряжения**).

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика (ЛАЧХ) L_1 звена с передаточной функцией (1.44) определяется выражением

$$L_1(f) = 20 \lg K_1 + 20 \lg f/f_{c1} - 20 \lg \sqrt{1 + \left(f/f_{c1}\right)^2}, \quad (1.54)$$

График этой характеристики имеет вид, представленный на рис. 1.24.

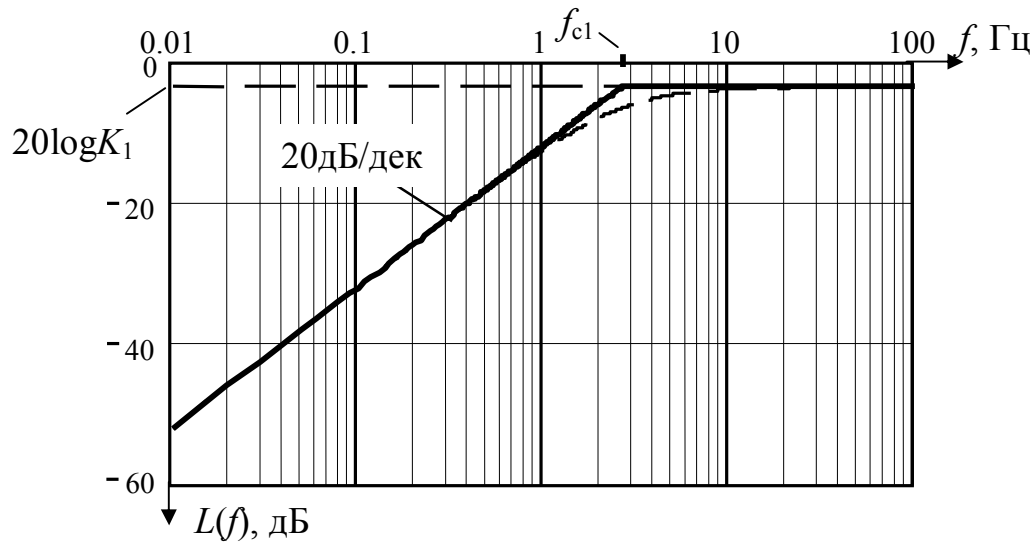


Рис. 1.24. График ЛАЧХ звена $K_1(p)$ структурной схемы усилителя

Аналогичный вид имеет и график ЛАЧХ звена $K_2(p)$ структурной схемы (рис. 1.25). Здесь частота сопряжения f_{c2} равна $f_{c2} = \frac{1}{2\pi\tau_2}$.

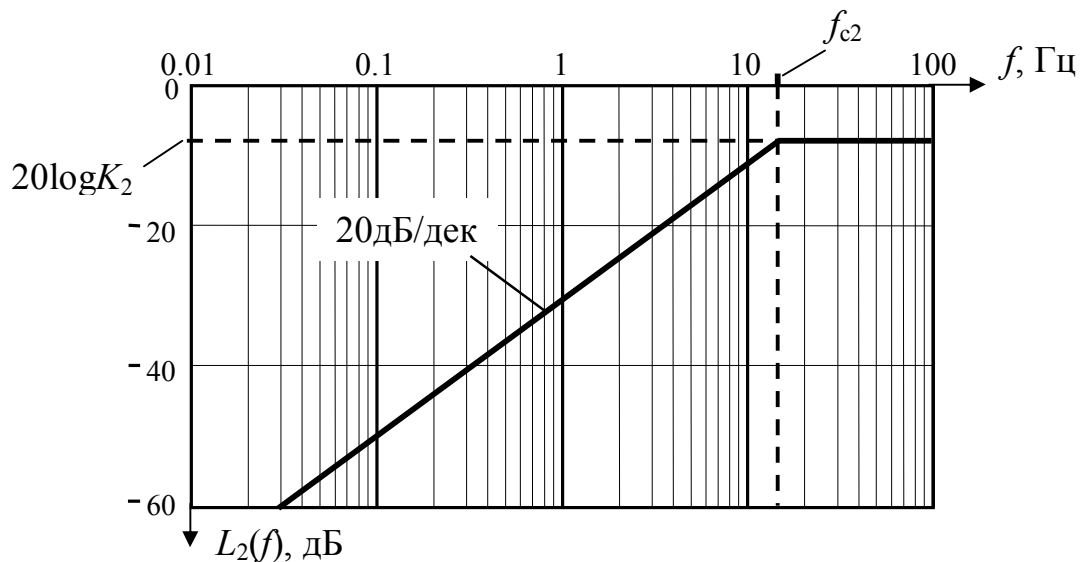


Рис. 1.25. График ЛАЧХ звена $K_2(p)$ структурной схемы усилителя

Передаточная функция усилительного каскада (см. рис. 1.23) определяется выражением

$$K(p) = \frac{U_H(p)}{U_{\Gamma}(p)} = \frac{U_1(p)}{U_{\Gamma}(p)} \cdot \frac{U_{\text{ВЫХ}}(p)}{U_1(p)} \cdot \frac{U_H(p)}{U_{\text{ВЫХ}}(p)} = K_1(p) \cdot K_U \cdot K_2(p),$$

где $K_1(p), K_2(p), \dots$ – передаточные функции (1.44) и (1.45) звеньев, составляющих электрическую цепь, K_U – коэффициент усиления идеального безынерционного усилительного каскада.

Частотная характеристика этой цепи определяется выражением [4, 5]

$$\begin{aligned} K(j\omega) &= K_1(j\omega) \cdot K_U \cdot K_2(j\omega) = \\ &= A_1(\omega) e^{j\varphi_1(\omega)} \cdot K_U \cdot A_2(\omega) e^{j\varphi_2(\omega)}, \end{aligned}$$

где $A_i(\omega)$ – амплитудно-частотная характеристика i -того звена электрической цепи; $\varphi_i(\omega)$ – его фазочастотная характеристика.

Таким образом, общая амплитудно-частотная характеристика электрической цепи определяется выражением

$$A(\omega) = A_1(\omega) \cdot K_U \cdot A_2(\omega), \quad (1.55)$$

а фазочастотная характеристика – выражением

$$\varphi(\omega) = \varphi_1(\omega) + \varphi_2(\omega). \quad (1.56)$$

Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика электрической цепи равна

$$\begin{aligned} L(\omega) &= 20 \lg A(\omega) = 20 \lg A_1(\omega) + 20 \lg K_U + 20 \lg A_2(\omega) = \\ &= L_1(\omega) + 20 \lg K_U + L_2(\omega). \end{aligned} \quad (1.57)$$

Из выражений (1.56) и (1.57) видно, что график ФЧХ электрической цепи равен сумме графиков ФЧХ, а график ЛАЧХ – сумме графиков ЛАЧХ составляющих ее звеньев.

График результирующей ЛАЧХ каскада (рис. 1.26.) определяется простым сложением графиков, показанных на рис. 1.24 и рис. 1.25, с учетом коэффициента усиления каскада $L_3 = 20 \lg K_U$:

$$L_{\Sigma}(f) = L_1(f) + 20 \lg K_U + L_2(f). \quad (1.58)$$

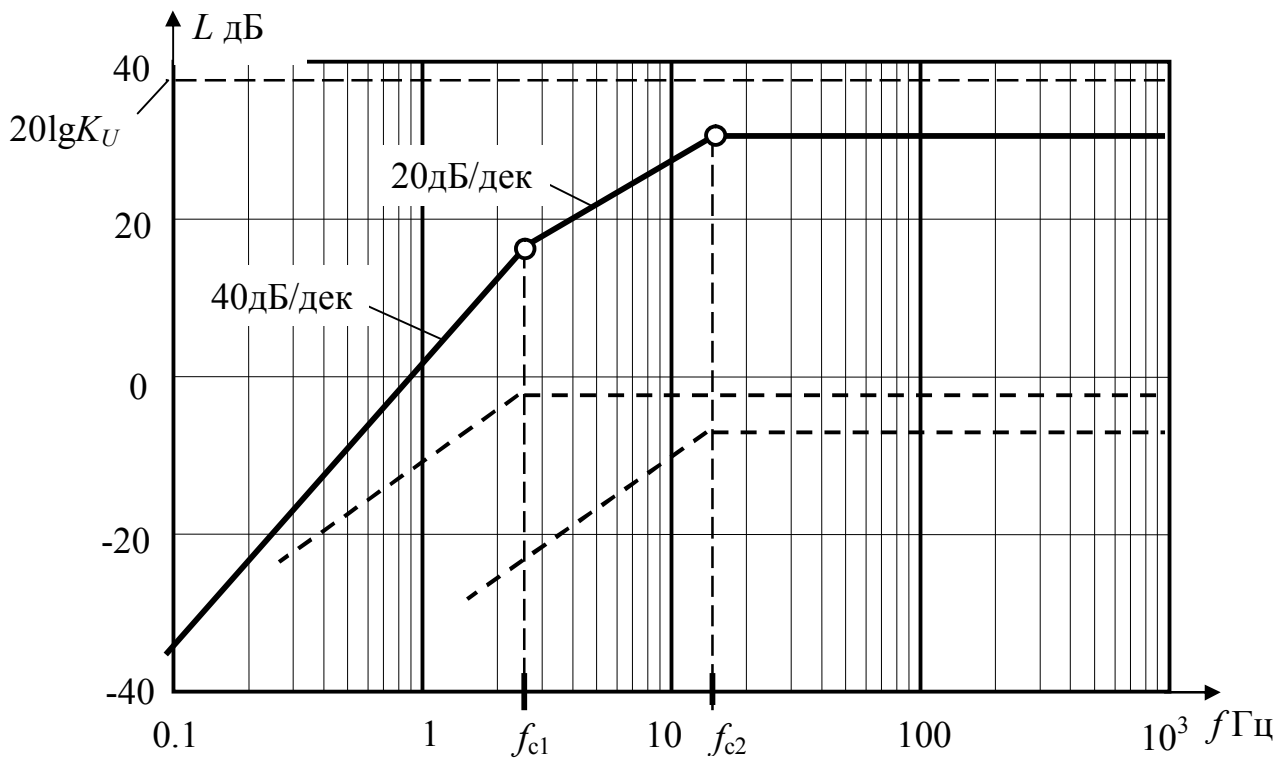


Рис. 1.26. График результирующей ЛАЧХ каскада

1.6. Пример расчета усилительного каскада

Необходимо рассчитать усилительный каскад на транзисторе, имеющий следующие характеристики:

Напряжение питания $U_{\Pi} = +15\text{В}$;
 Коэффициент усиления по напряжению $K_U = -20$;
 Выходное сопротивление $\leq 5\text{кОм}$;
 Входное сопротивление $\geq 10\text{кОм}$;
 Диапазон частот усиливаемого сигнала $50\text{Гц} \dots 100\text{кГц}$;
 Сопротивление нагрузки 50кОм .

Поскольку напряжение питания каскада положительно, в его схеме необходимо использовать транзистор типа *n-p-n*, например КТ3102А.

Схема каскада приведена на рис. 1.27.

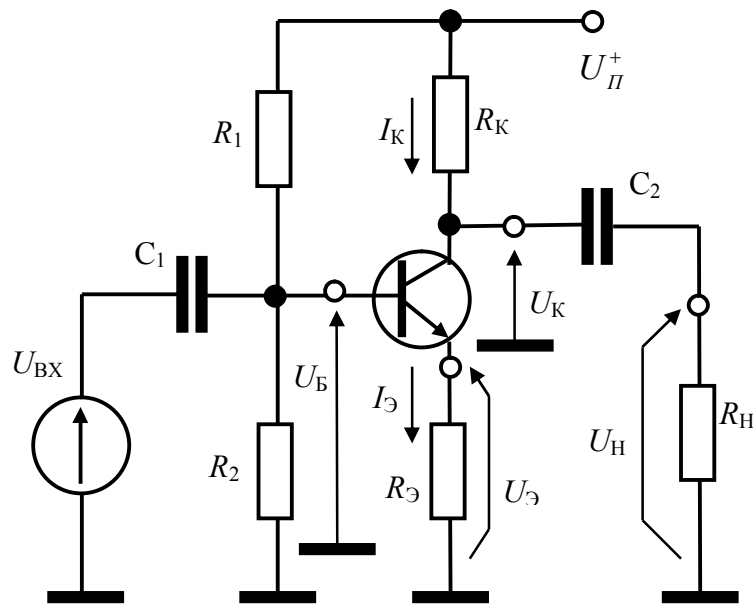


Рис. 1.27. Схема усилительного каскада

1.6.1. В связи с тем, что выходное сопротивление каскада определяется (1.28), а коэффициент усиления определяется (1.24), выбираем $R_К=5$ кОм,

$$R_Э = -\frac{R_К}{K_U} = 250 \text{ Ом.}$$

1.6.2. Входное сопротивление каскада со стороны базы определяется (1.26):

$$R_{ВХ.Б} \approx \beta R_Э \approx h_{21Э} R_Э \approx 40 \text{ кОм.}$$

Поскольку входное сопротивление определяется (1.27) и по заданию должно быть не менее 10 кОм, выбираем сопротивление делителя $R_1 R_2$:

$$R_{12} = R_1 \parallel R_2 \geq \frac{R_{ВХ} R_{ВХБ}}{R_{ВХБ} - R_{ВХ}} \geq 13,5 \text{ кОм.} \quad (1.59)$$

1.6.3. Постоянное напряжение на коллекторе транзистора рекомендуется выбирать в соответствии с (1.16):

$$U_К^0 \approx \frac{U_{П}}{2} = 7,5 \text{ В.}$$

1.6.4. Токи коллектора (и эмиттера) транзистора определяются в соответствии с законом Ома выражением

$$I_K^0 \approx I_Э^0 = \frac{U_{\Pi} - U_K^0}{R_K} = 1,5 \text{ мА}.$$

1.6.5. Постоянное напряжение на эмиттере транзистора определяется с помощью (1.11):

$$U_Э^0 = I_Э^0 R_Э = 0,375 \text{ В}.$$

Постоянное напряжение на базе транзистора определяется (1.10):

$$U_B^0 = U_Э^0 + 0,7 \text{ В} \approx 1,0 \text{ В}.$$

1.6.6. Сопротивления резисторов R_1 и R_2 определяются исходя из (1.8) и (1.58). Проще всего эту задачу решить итерационным путем, выбрав эти сопротивления равными

$$R_1 = 110 \text{ кОм}, R_2 = 17 \text{ кОм}.$$

1.6.7. Емкости конденсаторов C_1 и C_2 выбираются исходя из (1.53):

$$\tau_1 = \tau_2 = \frac{1}{2\pi \cdot f_C},$$

$$\text{где } \tau_1 = C_1 (R_{Г} + R_{ВХ}) \approx C_1 R_{ВХ}, \quad \tau_2 = C_2 (R_{ВЫХ} + R_{Н}),$$

а частота сопряжения f_C должна быть меньше нижней границы частотного диапазона сигнала, то есть 50 Гц.

Таким образом, емкости этих конденсаторов:

$$C_1 \geq \frac{1}{2\pi R_{ВХ} \cdot 50 \text{ Гц}} = 0,32 \text{ мкФ},$$

$$C_2 \geq \frac{1}{2\pi (R_{ВЫХ} + R_{Н}) \cdot 50 \text{ Гц}} = 57 \text{ нФ}.$$

Выбираем значения емкостей $C_1 = 0,4 \text{ мкФ}$, $C_2 = 0,1 \text{ мкФ}$.

1.6.8. Верхняя частота диапазона сигнала должна быть ниже граничной частоты $f_{ГР}$ усиления транзистора, что в данном случае выполняется с большим запасом.

1.6.9. После определения значений сопротивлений резисторов и емкостей конденсаторов выполняется уточненный расчет каскада по

постоянному току в соответствии с методикой, содержащейся в разделе 1.2, и строятся частотные характеристики в соответствии с методикой, содержащейся в разделе 1.5.

1.7. Характеристики биполярных транзисторов

Характеристики биполярных транзисторов, которые могут быть использованы в проектируемом усилительном каскаде, приведены в следующей таблице [3].

Характеристики транзисторов

| Марка | Тип | $U_{КБ}$, В | $U_{ЭБ}$, В | $I_{К\text{ max}}$, мА | $P_{к\text{ max}}$, мВт | $h_{21Э}$ | $f_{ГР}$, МГц |
|----------------|--------------|-----------------|-----------------|----------------------------|-----------------------------|-----------|-------------------|
| КТ3102А | <i>n-p-n</i> | 50 | 50 | 100 | 250 | 100...200 | 150 |
| КТ3107А | <i>p-n-p</i> | 50 | 45 | 100 | 300 | 70...140 | 200 |

Здесь:

$U_{КБ}$ – максимально допустимое напряжение коллектор-база;

$U_{КЭ}$ – максимально допустимое напряжение коллектор-эмиттер;

$I_{к\text{ max}}$ – максимально допустимый постоянный ток коллектора;

$P_{к\text{ max}}$ – максимально допустимая постоянная рассеиваемая мощность коллектора без теплоотвода;

$h_{21Э}$ – статический коэффициент передачи тока биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером;

$f_{ГР}$ – граничная частота коэффициента передачи тока в схеме с общим эмиттером.

1.8. Варианты схем усилителей на базе биполярных транзисторов для заданий на проектирование

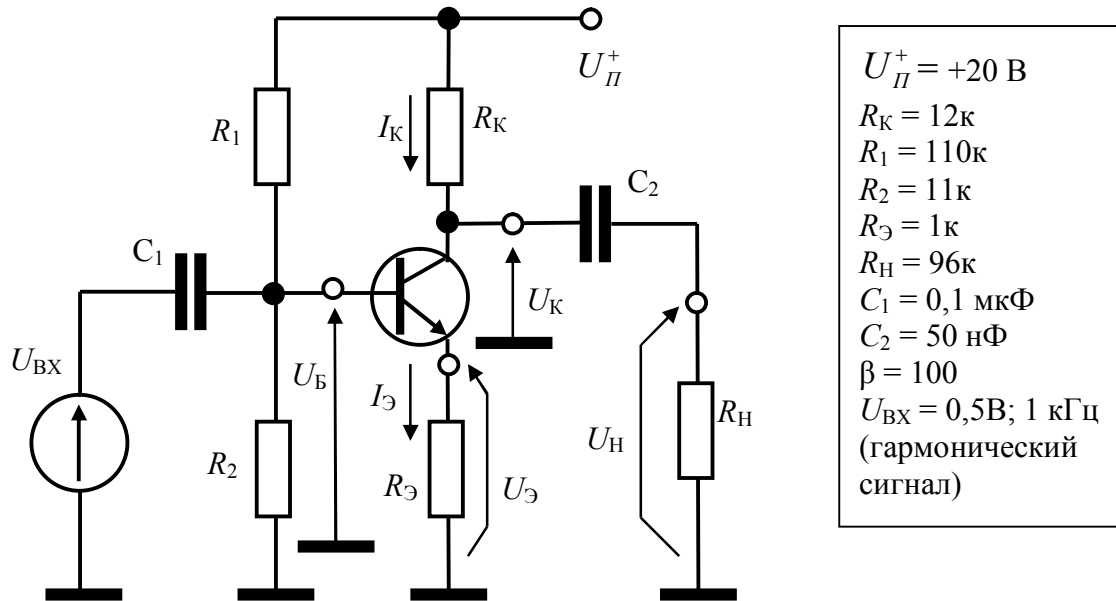


Рис. 1.28. Задание 1

1. Определить параметры на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_{Э}^0, I_{К}^0, U_{Э}^0, U_{Б}^0, U_{К}^0$.
2. Определить коэффициент усиления K_U , входное $R_{ВХ}$ и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления.
3. Построить диаграммы сигналов $U_{Б}, U_{Э}, U_{К}, U_{Н}$.
4. Построить ЛАЧХ каскада.

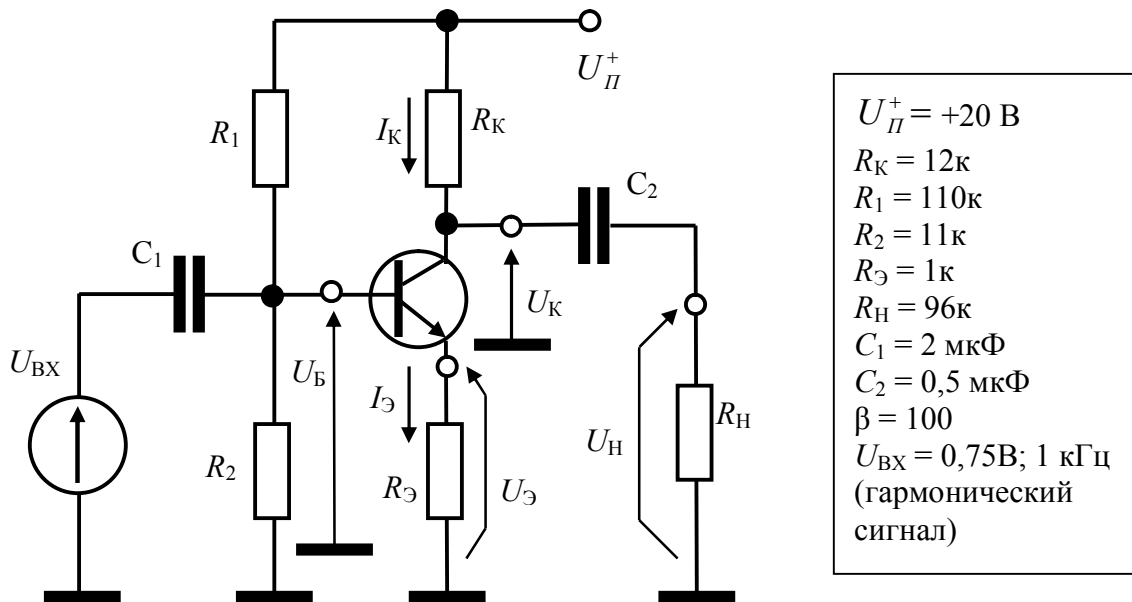
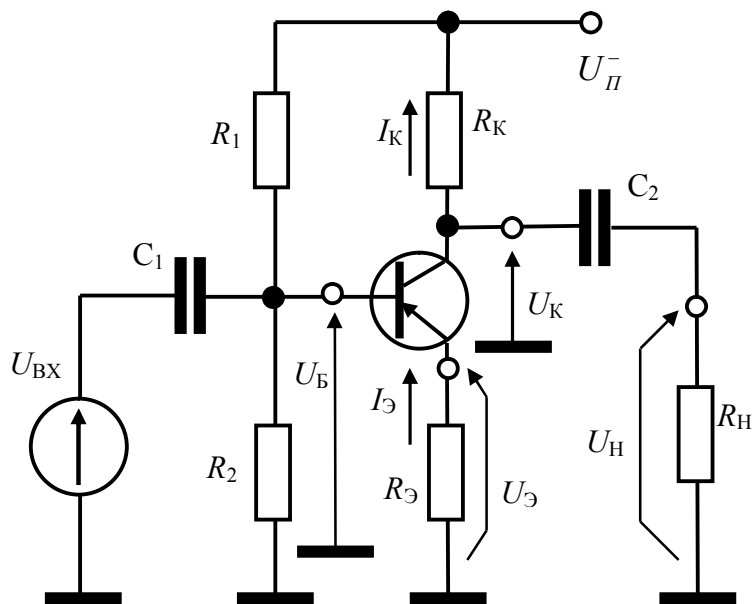


Рис. 1.29. Задание 2

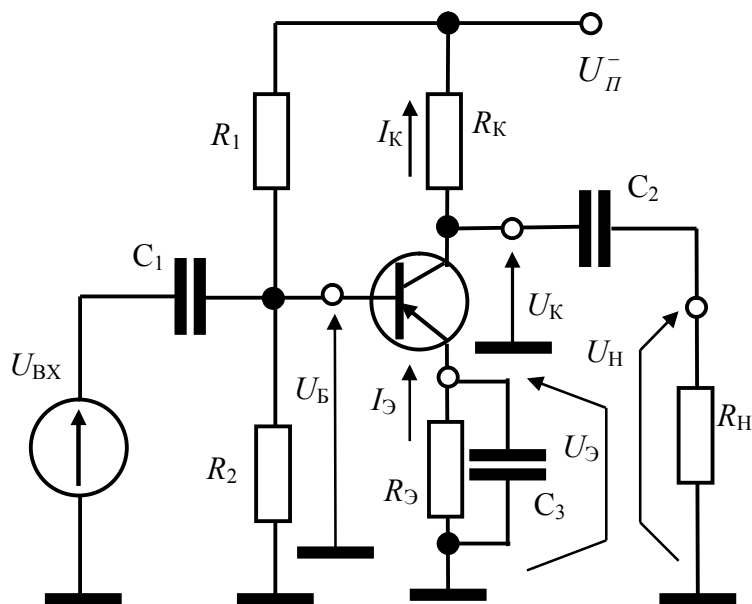
1. Определить параметры на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_{Э}^0, I_{К}^0, U_{Э}^0, U_{Б}^0, U_{К}^0$.
2. Определить коэффициент усиления по напряжению K_U , входное $R_{ВХ}$ и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления.
3. Построить диаграммы сигналов $U_{Б}, U_{Э}, U_{К}, U_{Н}$.
4. Построить ЛАЧХ каскада.



$U_{II}^+ = -20 \text{ В}$
 $R_K = 7 \text{ к}$
 $R_1 = 110 \text{ к}$
 $R_2 = 11 \text{ к}$
 $R_E = 1 \text{ к}$
 $R_H = 86 \text{ к}$
 $C_1 = 2 \text{ мкФ}$
 $C_2 = 0,5 \text{ мкФ}$
 $\beta = 100$
 $U_{BX} = 0,75 \text{ В}; 1 \text{ кГц}$
 (гармонический сигнал)

Рис. 1.30. Задание 3

1. Определить параметры на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_E^0, I_K^0, U_E^0, U_B^0, U_K^0$.
2. Определить коэффициент усиления по напряжению K_U , входное $R_{ВХ}$ и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления.
3. Построить диаграммы сигналов U_B, U_E, U_K, U_H .
4. Построить ЛАЧХ каскада.



$U_{II}^+ = -15 \text{ В}$
 $R_K = 7 \text{ к}$
 $R_1 = 110 \text{ к}$
 $R_2 = 11 \text{ к}$
 $R_E = 0,8 \text{ к}$
 $R_H = 86 \text{ к}$
 $C_1 = 2 \text{ мкФ}$
 $C_2 = 0,5 \text{ мкФ}$
 $C_3 = 5 \text{ мкФ}$
 $\beta = 100$
 $U_{BX} = 0,5 \text{ В}; 5 \text{ кГц}$
 (гармонический сигнал)

Рис. 1.31. Задание 4

1. Определить параметры на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_E^0, I_K^0, U_E^0, U_B^0, U_K^0$.
2. Определить коэффициент усиления по напряжению K_U , входное $R_{ВХ}$ и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления.
3. Построить диаграммы сигналов U_B, U_E, U_K, U_H .
4. Построить ЛАЧХ каскада.

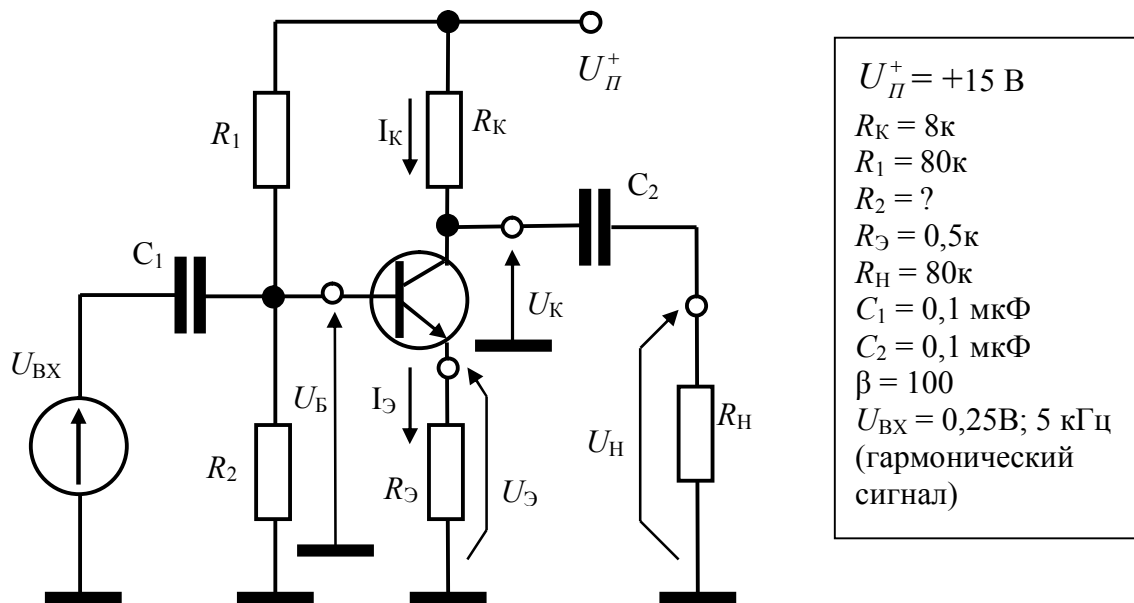


Рис. 1.32. Задание 5

1. Определить величину R_2 , обеспечивающую в состоянии покоя $U_K^0 = 7,5 \text{ В}$.
2. Определить параметры на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_{Э}^0, I_K^0, U_{Э}^0, U_B^0$.
3. Определить коэффициент усиления по напряжению K_U , входное $R_{ВХ}$ и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления.
4. Построить диаграммы сигналов $U_B, U_{Э}, U_K, U_H$.
5. Построить ЛАЧХ каскада.

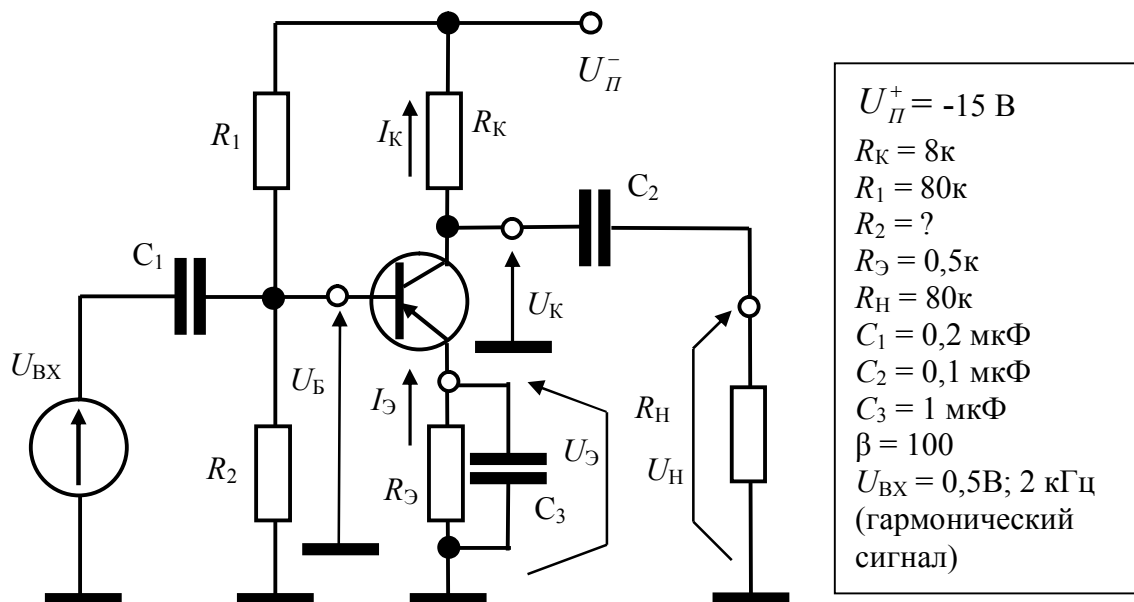


Рис. 1.33. Задание 6

1. Определить величину R_2 , обеспечивающую в состоянии покоя $U_K^0 = -7,5 \text{ В}$.
2. Определить параметры на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_{Э}^0, I_K^0, U_{Э}^0, U_B^0$.
3. Определить коэффициент усиления по напряжению K_U , входное $R_{ВХ}$ и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления.
4. Построить диаграммы сигналов $U_B, U_{Э}, U_K, U_H$.
5. Построить ЛАЧХ каскада.

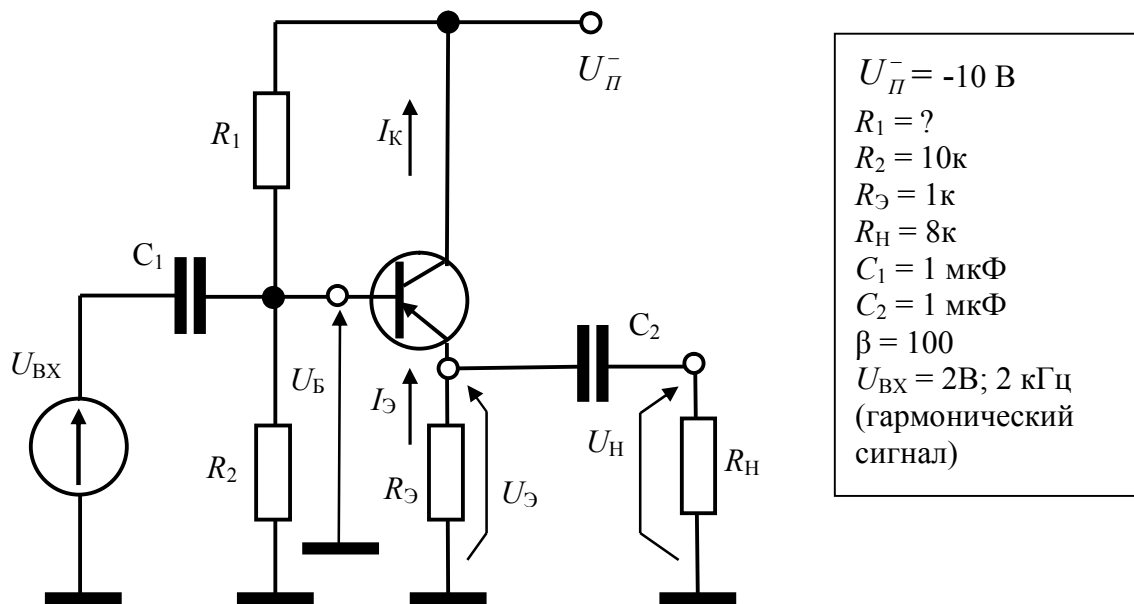


Рис. 1.34. Задание 7

1. Определить величину R_1 , обеспечивающую в состоянии покоя $U_3^0 = -5 \text{ В}$.
2. Определить параметры на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_3^0, I_K^0, U_3^0, U_B^0$.
3. Определить коэффициент усиления по напряжению K_U , входное $R_{ВХ}$ и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления.
4. Построить диаграммы сигналов U_B, U_3, U_H .
5. Построить ЛАЧХ каскада.

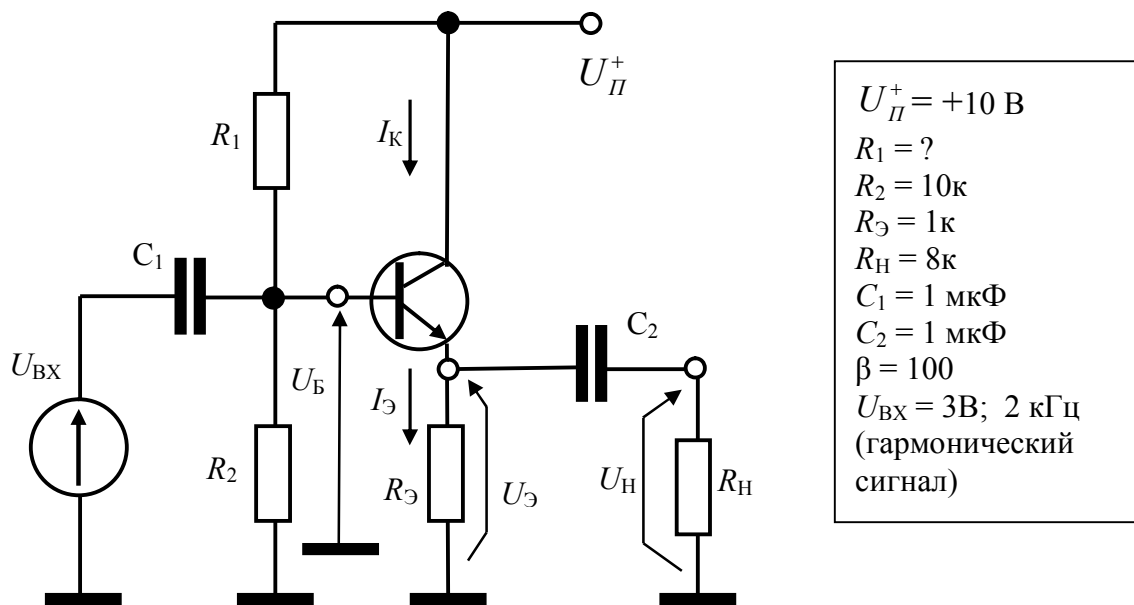


Рис. 1.35. Задание 8

1. Определить величину R_1 , обеспечивающую в состоянии покоя $U_3^0 = -5 \text{ В}$.
2. Определить параметры на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_3^0, I_K^0, U_3^0, U_B^0$.
3. Определить коэффициент усиления по напряжению K_U , входное $R_{ВХ}$ и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления.
4. Построить диаграммы сигналов U_B, U_3, U_H .
5. Построить ЛАЧХ каскада.

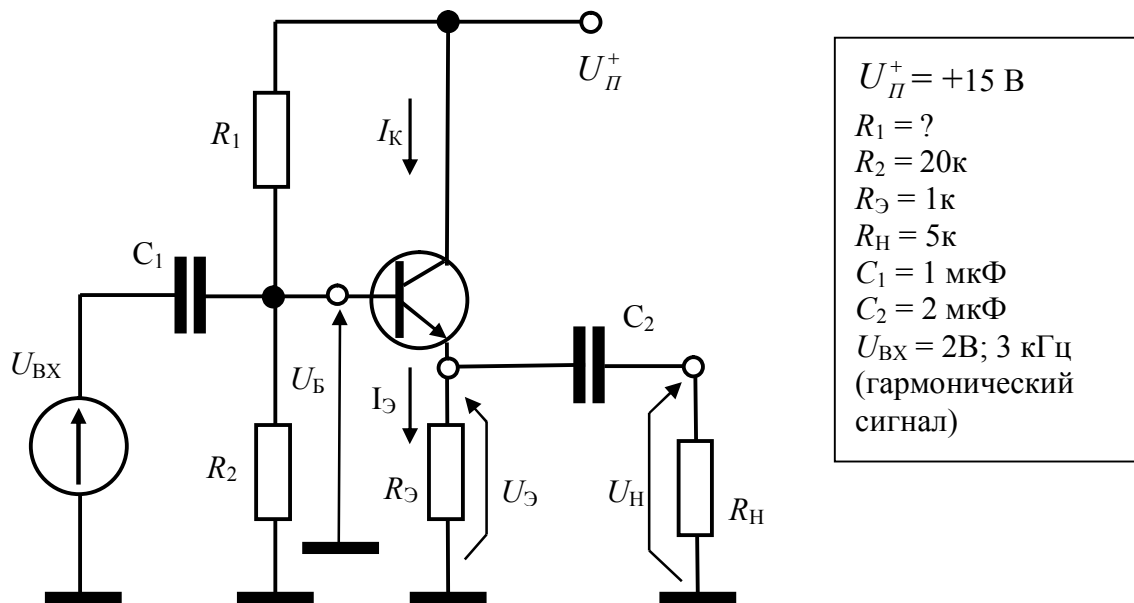


Рис. 1.36. Задание 9

1. Определить величину R_1 , обеспечивающую в состоянии покоя $U_{\text{Э}}^0 = +7,5 \text{ В}$.
2. Определить параметры на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_{\text{Э}}^0, I_{\text{К}}^0, U_{\text{Э}}^0, U_{\text{Б}}^0$.
3. Определить коэффициент усиления по напряжению K_U , входное $R_{\text{ВХ}}$ и выходное $R_{\text{ВЫХ}}$ сопротивления.
4. Построить диаграммы сигналов $U_{\text{Б}}, U_{\text{Э}}, U_{\text{Н}}$.
5. Построить ЛАЧХ каскада.

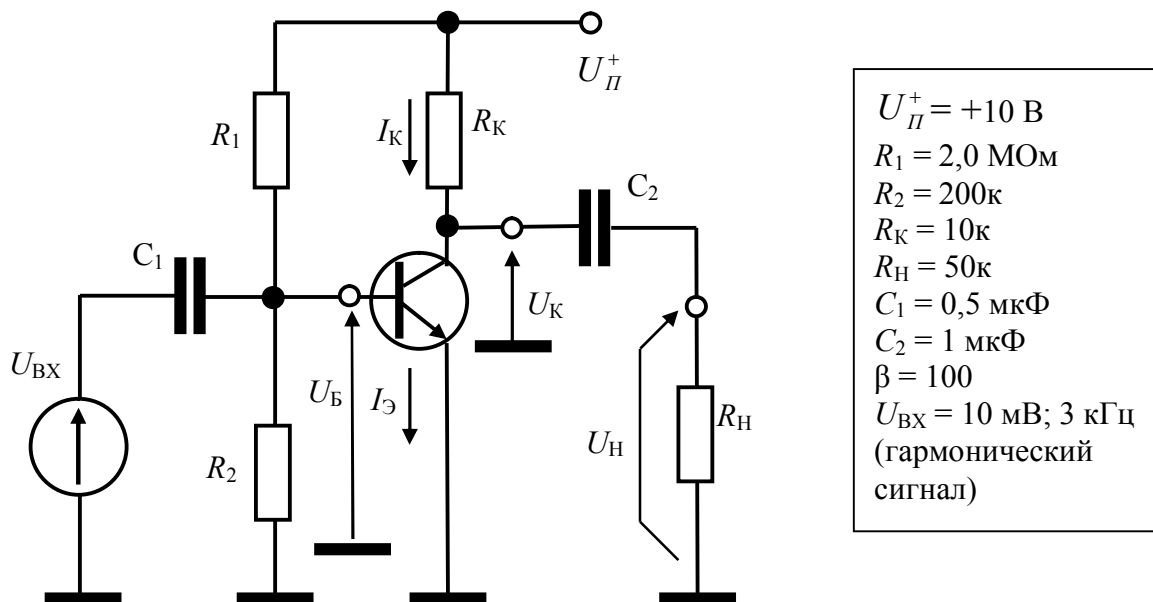
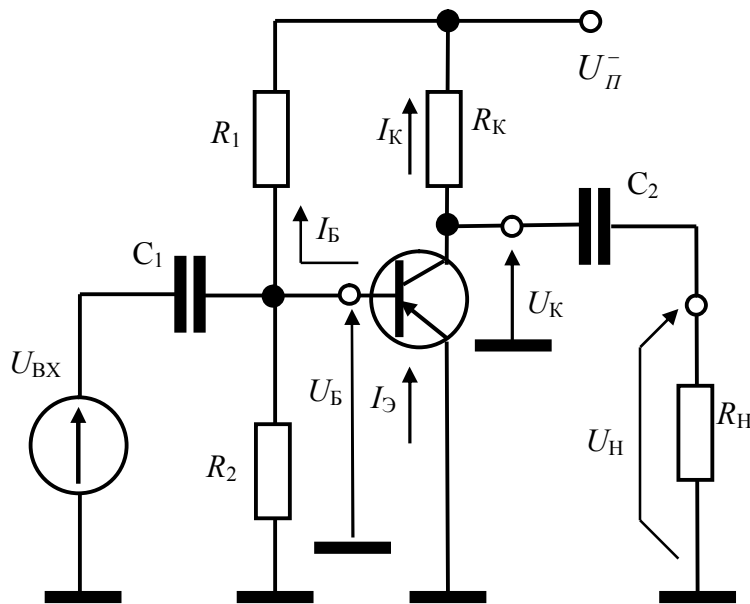


Рис. 1.37. Задание 10

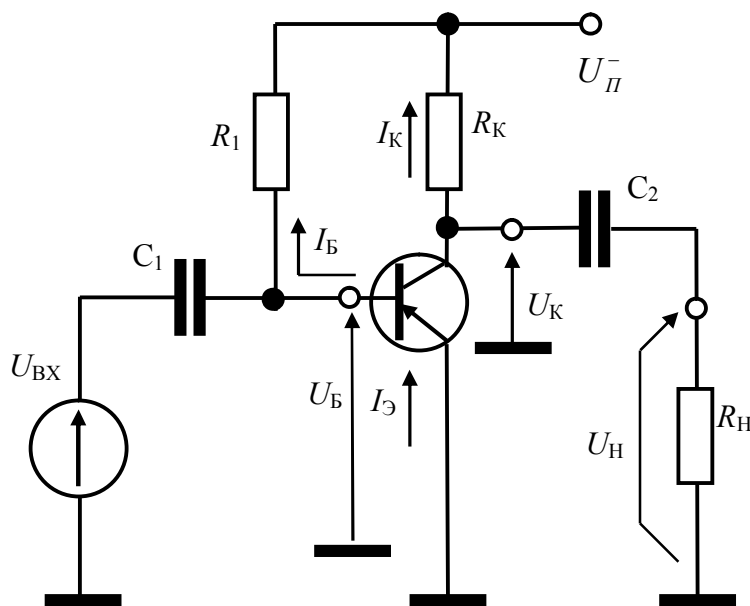
1. Определить параметры на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_{\text{Э}}^0, I_{\text{К}}^0, U_{\text{К}}^0, U_{\text{Б}}^0$.
2. Определить коэффициент усиления по напряжению K_U , входное $R_{\text{ВХ}}$ и выходное $R_{\text{ВЫХ}}$ сопротивления.
3. Построить диаграммы сигналов $U_{\text{Б}}, U_{\text{К}}, U_{\text{Н}}$.
4. Построить ЛАЧХ каскада.



$U_{II}^- = -10 \text{ В}$
 $R_1 = 2,0 \text{ МОм}$
 $R_2 = 200 \text{ к}$
 $R_K = 10 \text{ к}$
 $R_H = 50 \text{ к}$
 $C_1 = 0,5 \text{ мкФ}$
 $C_2 = 1 \text{ мкФ}$
 $\beta = 100$
 $U_{ВХ} = 10 \text{ мВ}; 3 \text{ кГц}$
 (гармонический сигнал)

Рис. 1.38. Задание 11

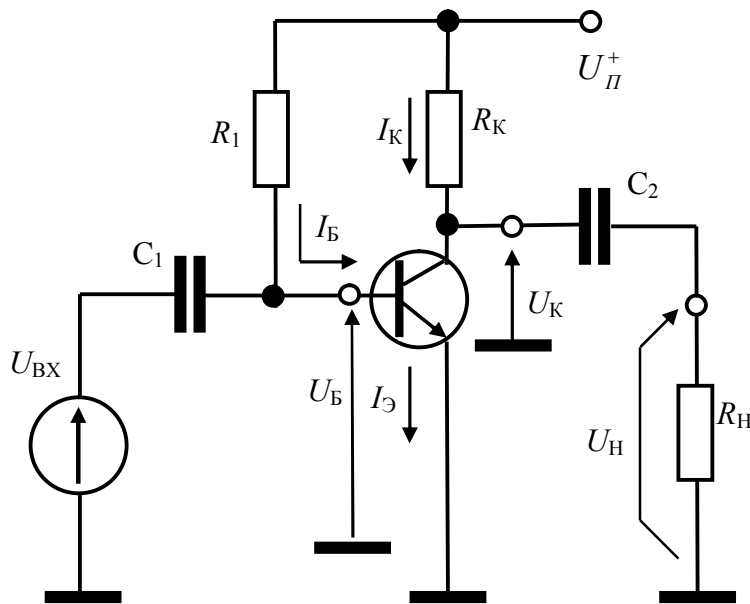
1. Определить параметры на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_E^0, I_K^0, U_K^0, U_B^0$.
2. Определить коэффициент усиления по напряжению K_U , входное $R_{ВХ}$ и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления.
3. Построить диаграммы сигналов U_B, U_K, U_H .
4. Построить ЛАЧХ каскада.



$U_{II}^- = -10 \text{ В}$
 $R_1 = 2,0 \text{ МОм}$
 $R_K = 10 \text{ к}$
 $R_H = 50 \text{ к}$
 $C_1 = 0,1 \text{ мкФ}$
 $C_2 = 0,5 \text{ мкФ}$
 $\beta = 100$
 $U_{ВХ} = 10 \text{ мВ}; 3 \text{ кГц}$
 (гармонический сигнал)

Рис. 1.39. Задание 12

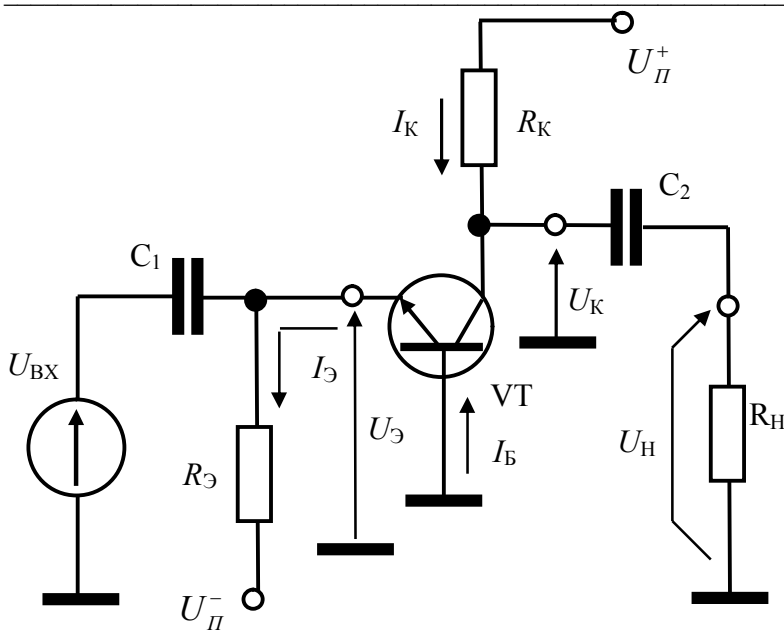
1. Определить параметры на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_E^0, I_K^0, U_K^0, U_B^0$.
2. Определить коэффициент усиления по напряжению K_U , входное $R_{ВХ}$ и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления.
3. Построить диаграммы сигналов U_B, U_K, U_H .
4. Построить ЛАЧХ каскада.



$U_{\pi}^+ = +10 \text{ В}$
 $R_1 = 2,0 \text{ МОм}$
 $R_K = 10 \text{ к}$
 $R_H = 50 \text{ к}$
 $C_1 = 0,1 \text{ мкФ}$
 $C_2 = 0,5 \text{ мкФ}$
 $\beta = 100$
 $U_{ВХ} = 20 \text{ мВ}; 3 \text{ кГц}$
 (гармонический сигнал)

Рис. 1.40. Задание 13

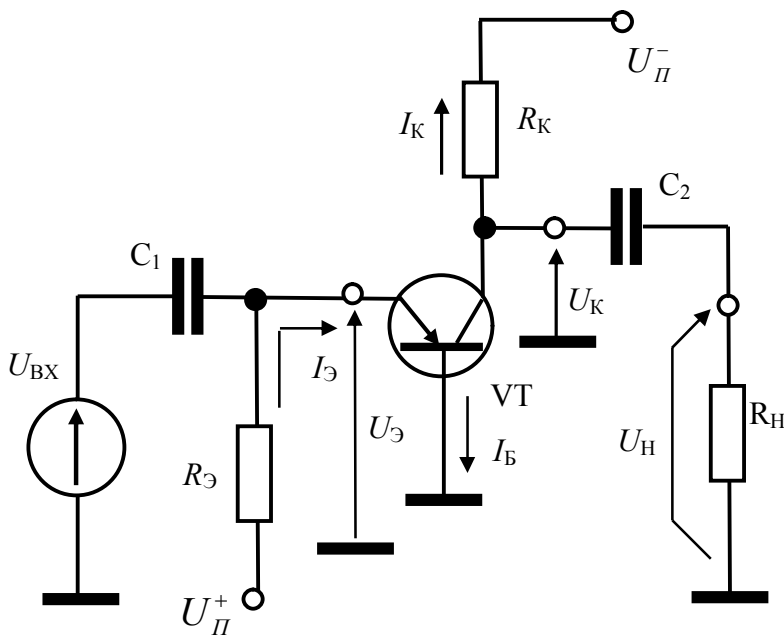
1. Определить параметры на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_{\mathcal{E}}^0, I_K^0, U_K^0, U_B^0$.
2. Определить коэффициент усиления по напряжению K_U , входное $R_{ВХ}$ и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления.
3. Построить диаграммы сигналов U_B, U_K, U_H .
4. Построить ЛАЧХ каскада.



$U_{\pi}^+ = +10 \text{ В}$
 $U_{\pi}^- = -10 \text{ В}$
 $R_{\mathcal{E}} = ?$
 $R_K = 5 \text{ к}$
 $R_H = 50 \text{ к}$
 $C_1 = 10 \text{ мкФ}$
 $C_2 = 0,5 \text{ мкФ}$
 $\beta = 100$
 $U_{ВХ} = 30 \text{ мВ}; 10 \text{ кГц}$
 (гармонический сигнал)

Рис. 1.41. Задание 14

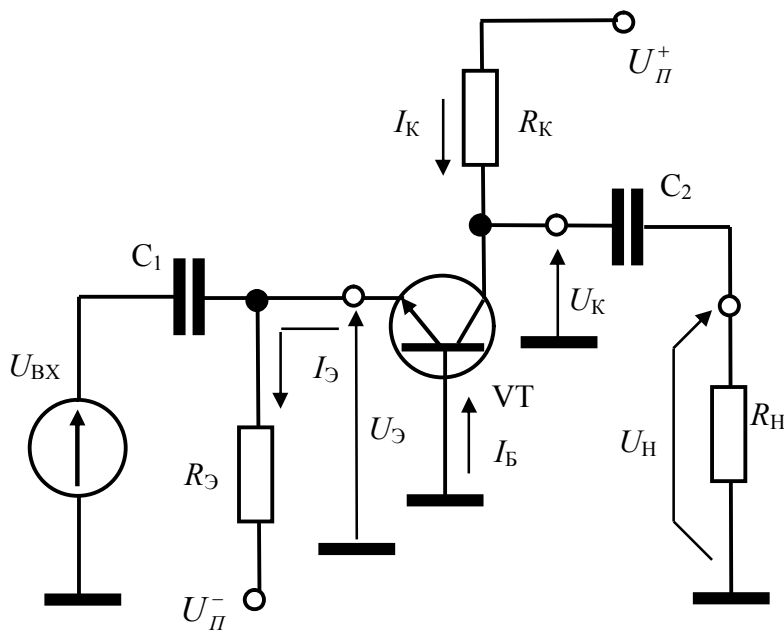
1. Определить величину $R_{\mathcal{E}}$, обеспечивающую напряжение U_K в состоянии покоя $U_K^0 = +5 \text{ В}$.
2. Определить параметры схемы на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_{\mathcal{E}}^0, I_K^0, U_{\mathcal{E}}^0, U_K^0$.
3. Определить коэффициент усиления по напряжению K_U , входное $R_{ВХ}$ и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления.
4. Построить диаграммы сигналов $U_{\mathcal{E}}, U_K, U_H$.
5. Построить ЛАЧХ каскада.



$U_{\Pi}^+ = +10 \text{ В}$
 $U_{\Pi}^- = -10 \text{ В}$
 $R_{\text{Э}} = ?$
 $R_{\text{К}} = 3 \text{ к}$
 $R_{\text{Н}} = 50 \text{ к}$
 $C_1 = 10 \text{ мкФ}$
 $C_2 = 0,5 \text{ мкФ}$
 $\beta = 100$
 $U_{\text{ВХ}} = 10 \text{ мВ}; 10 \text{ кГц}$
 (гармонический сигнал)

Рис. 1.42. Задание 15

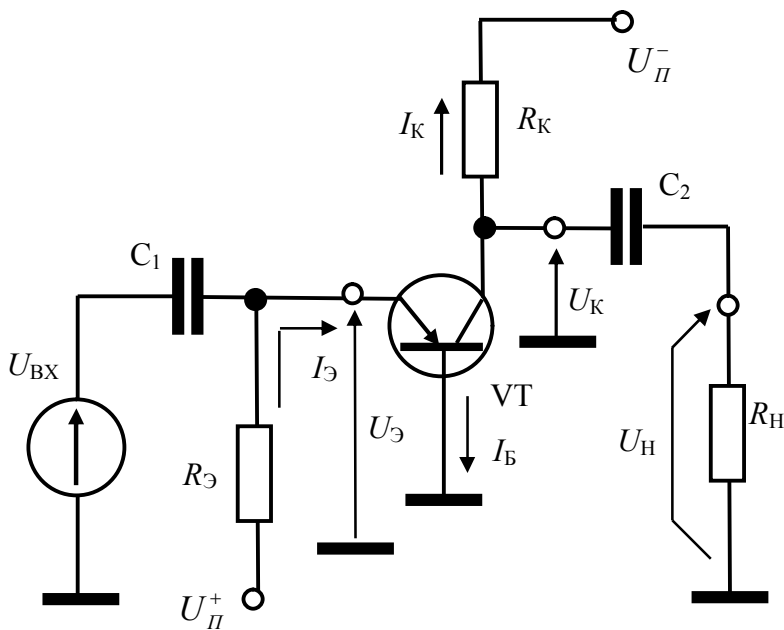
1. Определить величину $R_{\text{Э}}$, обеспечивающую напряжение $U_{\text{К}}$ в состоянии покоя $U_{\text{К}}^0 = -5 \text{ В}$.
2. Определить параметры схемы на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_{\text{Э}}^0, I_{\text{К}}^0, U_{\text{Э}}^0, U_{\text{К}}^0$.
3. Определить коэффициент усиления по напряжению K_U , входное $R_{\text{ВХ}}$ и выходное $R_{\text{ВЫХ}}$ сопротивления.
4. Построить диаграммы сигналов $U_{\text{Э}}, U_{\text{К}}, U_{\text{Н}}$.
5. Построить ЛАЧХ каскада.



$U_{\Pi}^+ = +10 \text{ В}$
 $U_{\Pi}^- = -5 \text{ В}$
 $R_{\text{Э}} = 4 \text{ к}$
 $R_{\text{К}} = 5 \text{ к}$
 $R_{\text{Н}} = 50 \text{ к}$
 $C_1 = 5 \text{ мкФ}$
 $C_2 = 0,5 \text{ мкФ}$
 $\beta = 100$
 $U_{\text{ВХ}} = 30 \text{ мВ}; 10 \text{ кГц}$
 (гармонический сигнал)

Рис. 1.43. Задание 16

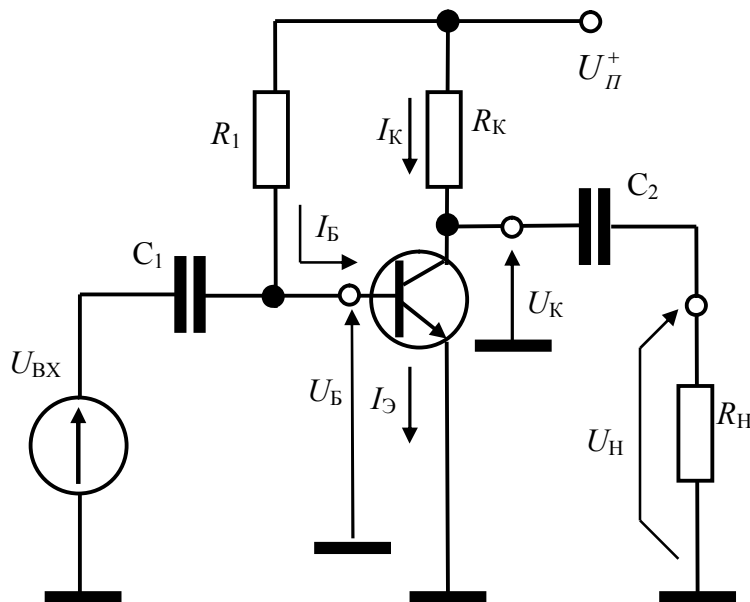
1. Определить коэффициент усиления по напряжению K_U , входное $R_{\text{ВХ}}$ и выходное $R_{\text{ВЫХ}}$ сопротивления.
2. Определить параметры схемы на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_{\text{Э}}^0, I_{\text{К}}^0, U_{\text{Э}}^0, U_{\text{К}}^0$.
3. Построить диаграммы сигналов $U_{\text{Э}}, U_{\text{К}}, U_{\text{Н}}$.
4. Построить ЛАЧХ каскада.



$U_{П}^+ = +5 \text{ В}$
 $U_{П}^- = -10 \text{ В}$
 $R_E = 4 \text{ к}$
 $R_K = 5 \text{ к}$
 $R_H = 50 \text{ к}$
 $C_1 = 5 \text{ мкФ}$
 $C_2 = 0,5 \text{ мкФ}$
 $\beta = 100$
 $U_{ВХ} = 30 \text{ мВ}; 10 \text{ кГц}$
 (гармонический сигнал)

Рис. 1.44. Задание 17

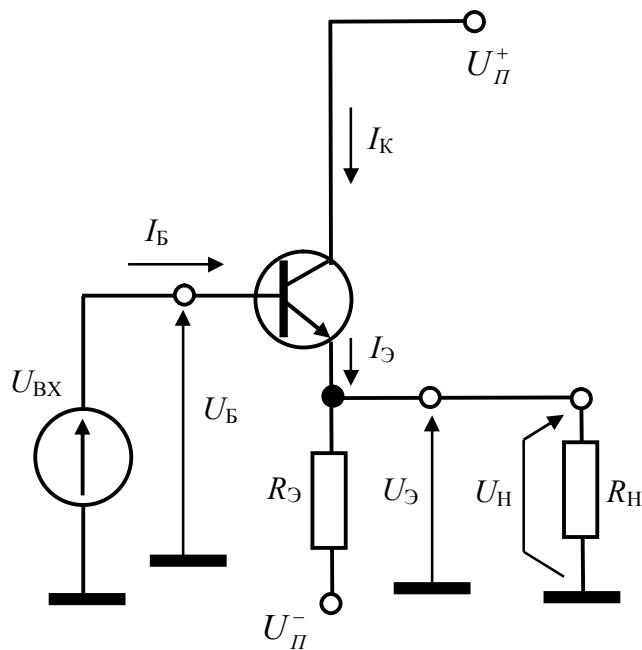
1. Определить величину R_E , обеспечивающую напряжение U_K в состоянии покоя $U_K^0 = -5 \text{ В}$.
2. Определить параметры схемы на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_E^0, I_K^0, U_E^0, U_K^0$.
3. Определить коэффициент усиления по напряжению K_U , входное $R_{ВХ}$ и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления.
4. Построить диаграммы сигналов U_E, U_K, U_H .
5. Построить ЛАЧХ каскада.



$U_{П}^+ = +15 \text{ В}$
 $R_1 = ?$
 $R_K = 10 \text{ к}$
 $R_H = 50 \text{ к}$
 $C_1 = 0,1 \text{ мкФ}$
 $C_2 = 0,5 \text{ мкФ}$
 $\beta = 100$
 $U_{ВХ} = 20 \text{ мВ}; 3 \text{ кГц}$
 (гармонический сигнал)

Рис. 1.45. Задание 18

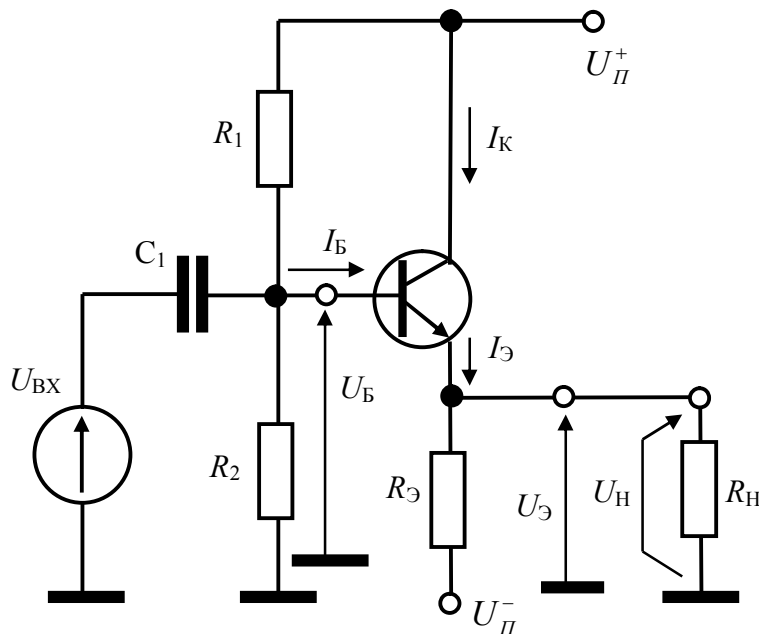
1. Определить величину R_1 , обеспечивающую напряжение U_K в состоянии покоя $U_K^0 = +7,5 \text{ В}$.
2. Определить параметры на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_E^0, I_K^0, U_K^0, U_B^0$.
3. Определить коэффициент усиления по напряжению K_U , входное $R_{ВХ}$ и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления.
4. Построить диаграммы сигналов U_B, U_K, U_H .
5. Построить ЛАЧХ каскада.



$U_{П}^+ = +10 \text{ В}$
 $U_{П}^- = -10 \text{ В}$
 $R_3 = ?$
 $R_H = 8 \text{ к}$
 $\beta = 100$
 $U_{ВХ} = 8 \text{ В}; 2 \text{ кГц}$
 (гармонический сигнал)

Рис. 1.46. Задание 19

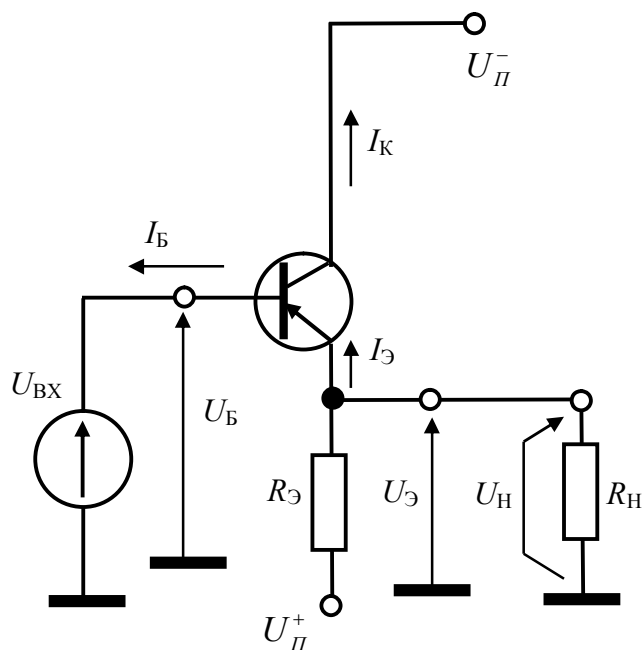
1. Определить величину R_3 , обеспечивающую в состоянии покоя $U_3^0 = -0,6 \text{ В}$.
2. Определить параметры на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_3^0, I_K^0, U_3^0, U_B^0$.
3. Определить коэффициент усиления по напряжению K_U , входное $R_{ВХ}$ и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления.
4. Построить диаграммы сигналов U_B, U_3 .
5. Построить ЛАЧХ каскада.



$U_{П}^+ = +10 \text{ В}$
 $U_{П}^- = -10 \text{ В}$
 $R_1 = 50 \text{ к}$
 $R_2 = 50 \text{ к}$
 $R_3 = 2 \text{ к}$
 $R_H = 2 \text{ к}$
 $C_1 = 2 \text{ мкФ}$
 $\beta = 100$
 $U_{ВХ} = 8 \text{ В}; 100 \text{ Гц}$
 (гармонический сигнал)

Рис. 1.47. Задание 20

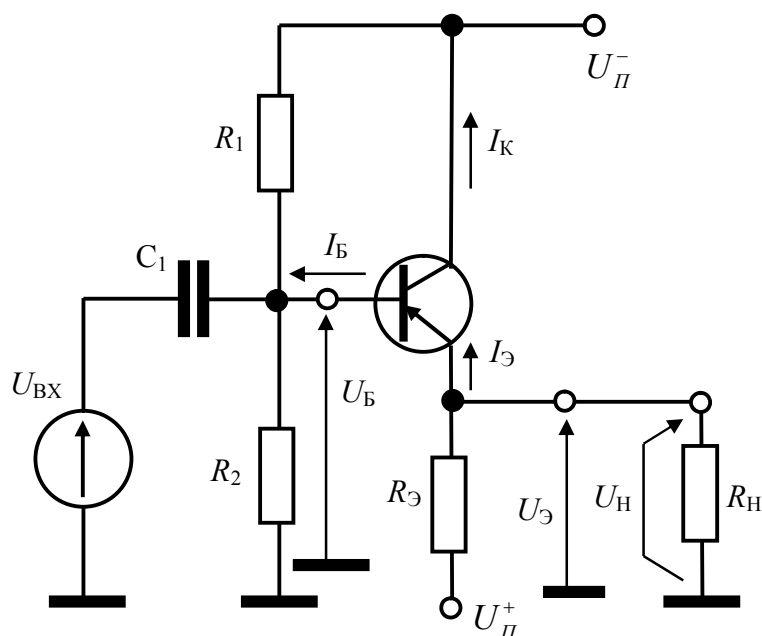
1. Определить параметры на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_3^0, I_K^0, U_3^0, U_B^0$.
2. Определить коэффициент усиления по напряжению K_U , входное $R_{ВХ}$ и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления.
3. Построить диаграммы сигналов U_B, U_3 .
4. Построить ЛАЧХ каскада.



$U_{\Pi}^+ = +10 \text{ В}$
 $U_{\Pi}^- = -10 \text{ В}$
 $R_E = ?$
 $R_H = 8 \text{ к}$
 $\beta = 100$
 $U_{\text{ВХ}} = 8 \text{ В}; 2 \text{ кГц}$
 (гармонический сигнал)

Рис. 1.48. Задание 21

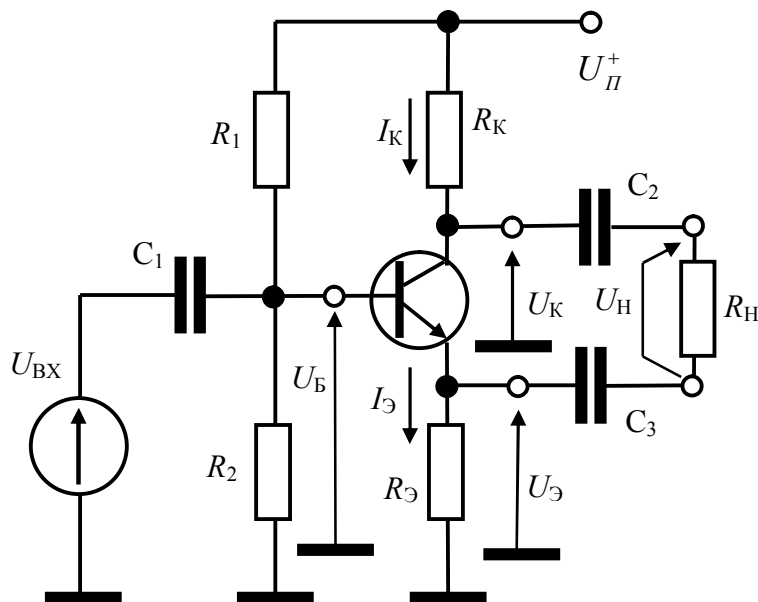
1. Определить величину R_E , обеспечивающую в состоянии покоя $U_E^0 = +0,6 \text{ В}$.
2. Определить параметры на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_E^0, I_C^0, U_E^0, U_B^0$.
3. Определить коэффициент усиления по напряжению K_U , входное $R_{\text{ВХ}}$ и выходное $R_{\text{ВЫХ}}$ сопротивления.
4. Построить диаграммы сигналов U_B, U_E .
5. Построить ЛАЧХ каскада.



$U_{\Pi}^+ = +10 \text{ В}$
 $U_{\Pi}^- = -10 \text{ В}$
 $R_1 = 50 \text{ к}$
 $R_2 = 50 \text{ к}$
 $R_E = 2 \text{ к}$
 $R_H = 2 \text{ к}$
 $C_1 = 2 \text{ мкФ}$
 $\beta = 100$
 $U_{\text{ВХ}} = 8 \text{ В}; 100 \text{ Гц}$
 (гармонический сигнал)

Рис. 1.49. Задание 22

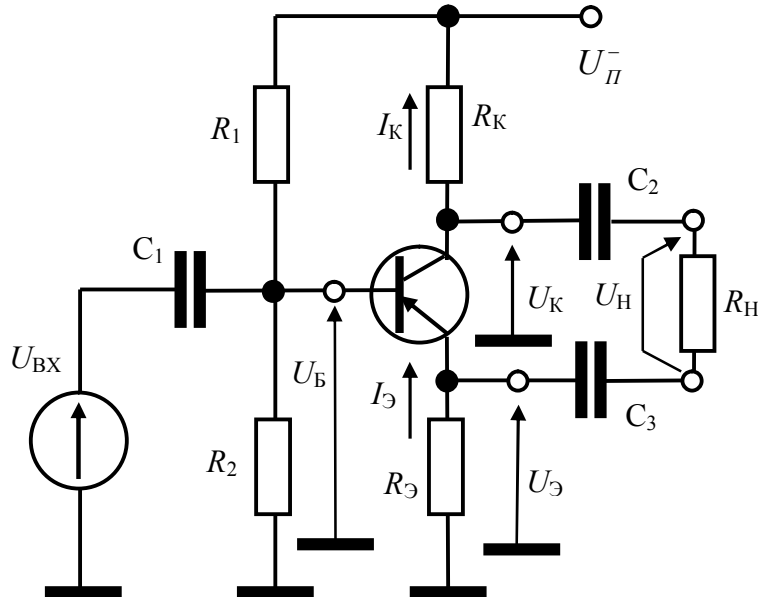
1. Определить параметры на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_E^0, I_C^0, U_E^0, U_B^0$.
2. Определить коэффициент усиления по напряжению K_U , входное $R_{\text{ВХ}}$ и выходное $R_{\text{ВЫХ}}$ сопротивления.
3. Построить диаграммы сигналов U_B, U_E .
4. Построить ЛАЧХ каскада.



$U_{\Pi}^+ = +24 \text{ В}$
 $R_K = 8 \text{ к}$
 $R_1 = 110 \text{ к}$
 $R_2 = 62 \text{ к}$
 $R_{\text{Э}} = 8 \text{ к}$
 $R_{\text{Н}} = 96 \text{ к}$
 $C_1 = 0,1 \text{ мкФ}$
 $C_2 = C_3 = 50 \text{ нФ}$
 $\beta = 100$
 $U_{\text{ВХ}} = 1 \text{ В}; 1 \text{ кГц}$
 (гармонический сигнал)

Рис. 1.50. Задание 23

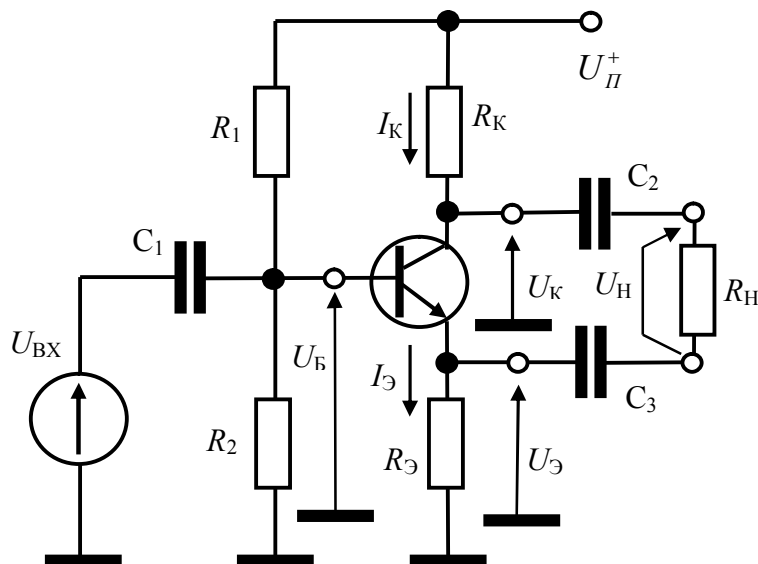
1. Определить параметры на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_{\text{Э}}^0, I_{\text{К}}^0, U_{\text{Э}}^0, U_{\text{Б}}^0, U_{\text{К}}^0$.
2. Определить коэффициент усиления по напряжению $K_U = \frac{U_{\text{Н}}}{U_{\text{ВХ}}}$, входное $R_{\text{ВХ}}$ и выходное $R_{\text{ВЫХ}}$ сопротивления.
3. Построить диаграммы сигналов $U_{\text{Б}}, U_{\text{Э}}, U_{\text{К}}, U_{\text{Н}}$.
4. Построить ЛАЧХ каскада.



$U_{\Pi}^- = -24 \text{ В}$
 $R_K = 8 \text{ к}$
 $R_1 = 110 \text{ к}$
 $R_2 = 62 \text{ к}$
 $R_{\text{Э}} = 8 \text{ к}$
 $R_{\text{Н}} = 96 \text{ к}$
 $C_1 = 0,1 \text{ мкФ}$
 $C_2 = C_3 = 50 \text{ нФ}$
 $\beta = 100$
 $U_{\text{ВХ}} = 1 \text{ В}; 1 \text{ кГц}$
 (гармонический сигнал)

Рис. 1.60. Задание 24

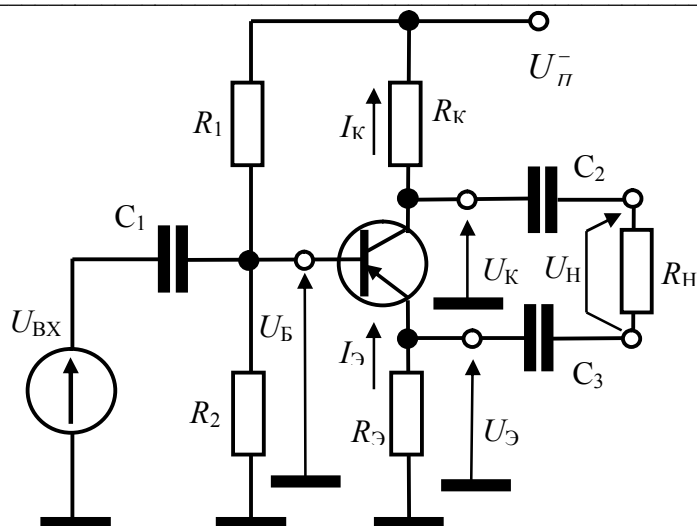
1. Определить параметры на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_{\text{Э}}^0, I_{\text{К}}^0, U_{\text{Э}}^0, U_{\text{Б}}^0, U_{\text{К}}^0$.
2. Определить коэффициент усиления по напряжению $K_U = \frac{U_{\text{Н}}}{U_{\text{ВХ}}}$, входное $R_{\text{ВХ}}$ и выходное $R_{\text{ВЫХ}}$ сопротивления.
3. Построить диаграммы сигналов $U_{\text{Б}}, U_{\text{Э}}, U_{\text{К}}, U_{\text{Н}}$.
4. Построить ЛАЧХ каскада.



$U_{\pi}^+ = +30 \text{ В}$
 $R_K = 8 \text{ к}$
 $R_1 = 110 \text{ к}$
 $R_2 = ?$
 $R_{\text{Э}} = 8 \text{ к}$
 $R_H = 96 \text{ к}$
 $C_1 = 0,1 \text{ мкФ}$
 $C_2 = C_3 = 50 \text{ нФ}$
 $\beta = 100$
 $U_{\text{ВХ}} = 1 \text{ В}; 1 \text{ кГц}$
 (гармонический сигнал)

Рис. 1.61. Задание 25

1. Определить величину R_2 , обеспечивающего напряжения в схеме $U_{\text{Э}}^0 = 10 \text{ В}$; $U_{\text{К}}^0 = 20 \text{ В}$.
2. Определить параметры на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_{\text{Э}}^0, I_{\text{К}}^0, U_{\text{Э}}^0, U_{\text{Б}}^0, U_{\text{К}}^0$.
3. Определить коэффициент усиления по напряжению $K_U = \frac{U_H}{U_{\text{ВХ}}}$, входное $R_{\text{ВХ}}$ и выходное $R_{\text{ВЫХ}}$ сопротивления.
4. Построить диаграммы сигналов $U_{\text{Б}}, U_{\text{Э}}, U_{\text{К}}, U_{\text{H}}$.
5. Построить ЛАЧХ каскада.



$U_{\pi}^- = -30 \text{ В}$
 $R_K = 8 \text{ к}$
 $R_1 = ?$
 $R_2 = 62 \text{ к}$
 $R_{\text{Э}} = 8 \text{ к}$
 $R_H = 96 \text{ к}$
 $C_1 = 0,1 \text{ мкФ}$
 $C_2 = C_3 = 50 \text{ нФ}$
 $\beta = 100$
 $U_{\text{ВХ}} = 1 \text{ В}; 1 \text{ кГц}$
 (гармонический сигнал)

Рис. 1.62. Задание 26

1. Определить величину R_1 , обеспечивающего напряжения в схеме в состоянии покоя $U_{\text{Э}}^0 = -10 \text{ В}$; $U_{\text{К}}^0 = -20 \text{ В}$.
2. Определить параметры на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_{\text{Э}}^0, I_{\text{К}}^0, U_{\text{Э}}^0, U_{\text{Б}}^0, U_{\text{К}}^0$.
3. Определить коэффициент усиления по напряжению $K_U = \frac{U_H}{U_{\text{ВХ}}}$, входное $R_{\text{ВХ}}$ и выходное $R_{\text{ВЫХ}}$ сопротивления.
4. Построить диаграммы сигналов $U_{\text{Б}}, U_{\text{Э}}, U_{\text{К}}, U_{\text{H}}$.
5. Построить ЛАЧХ каскада.

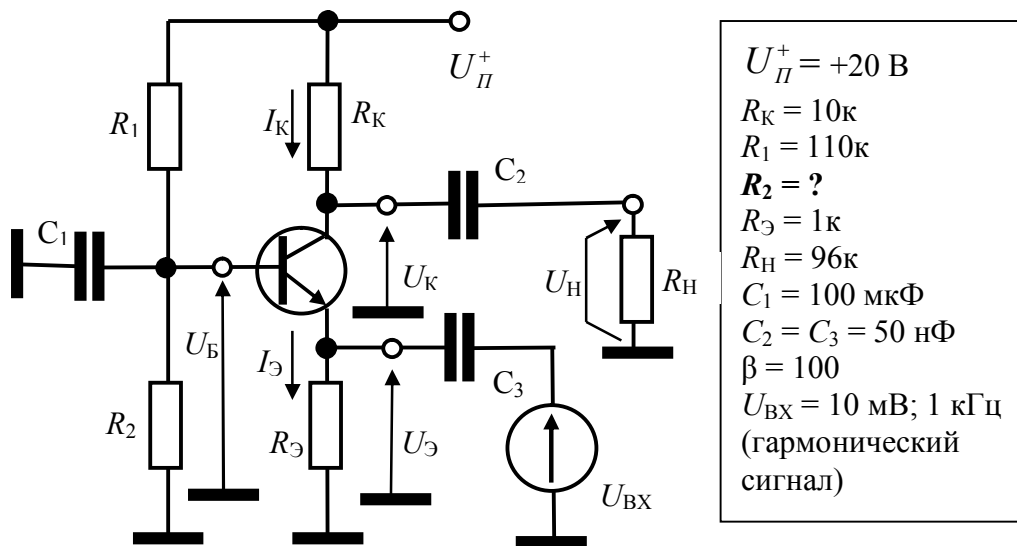


Рис. 1.63. Задание 27

1. Определить R_2 , обеспечивающего напряжения в схеме $U_{Э}^0 = 1 \text{ В}$; $U_K^0 = 10 \text{ В}$.
2. Определить параметры на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_{Э}^0, I_K^0, U_{Э}^0, U_B^0, U_K^0$.
3. Определить коэффициент $K_U = \frac{U_H}{U_{ВХ}}$, входное $R_{ВХ}$ и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления.
4. Построить диаграммы сигналов $U_B, U_{Э}, U_K, U_H$.
5. Построить ЛАЧХ каскада.

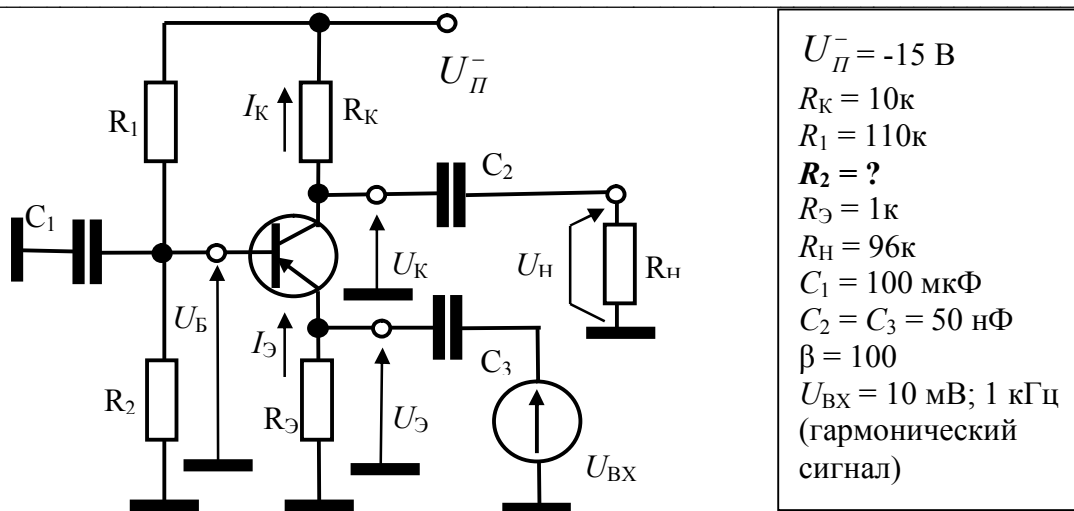
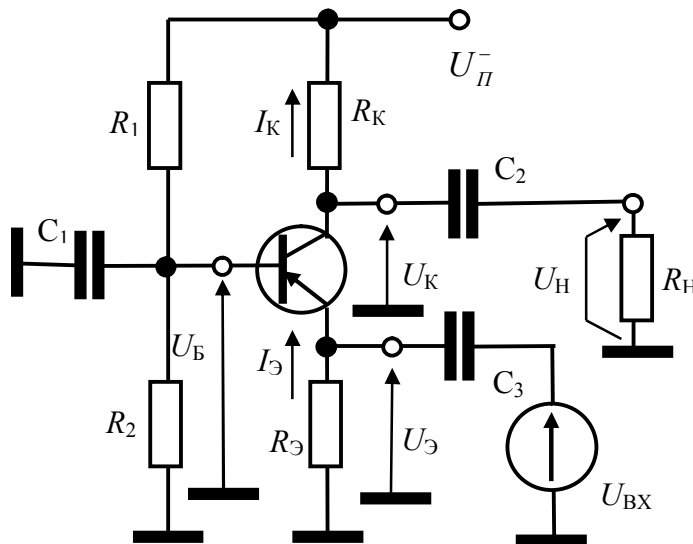


Рис. 1.64. Задание 28

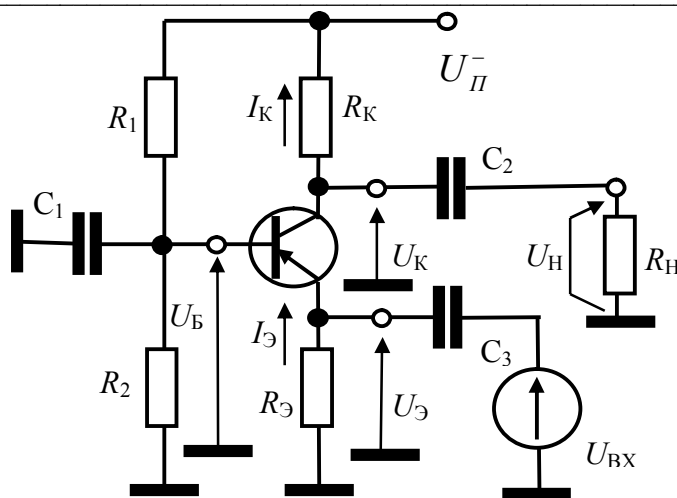
1. Определить величину R_2 , обеспечивающего напряжения в схеме в состоянии покоя $U_{Э}^0 = -1 \text{ В}$; $U_K^0 = -7,5 \text{ В}$.
2. Определить коэффициент усиления по напряжению $K_U = \frac{U_H}{U_{ВХ}}$, входное $R_{ВХ}$ и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления.
3. Определить параметры на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_{Э}^0, I_K^0, U_{Э}^0, U_B^0, U_K^0$.
4. Построить диаграммы сигналов $U_B, U_{Э}, U_K, U_H$.
5. Построить ЛАЧХ каскада.



$U_{II}^- = -15 \text{ В}$
 $R_K = 10 \text{ к}$
 $R_1 = 110 \text{ к}$
 $R_2 = 10 \text{ к}$
 $R_E = 1 \text{ к}$
 $R_H = 96 \text{ к}$
 $C_1 = 100 \text{ мкФ}$
 $C_2 = C_3 = 50 \text{ нФ}$
 $\beta = 100$
 $U_{ВХ} = 10 \text{ мВ}; 1 \text{ кГц}$
 (гармонический сигнал)

Рис. 1.65. Задание 29

1. Определить параметры на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_E^0, I_K^0, U_E^0, U_B^0, U_K^0$.
2. Определить коэффициент усиления по напряжению $K_U = \frac{U_H}{U_{ВХ}}$, входное $R_{ВХ}$ и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления.
3. Построить диаграммы сигналов U_B, U_E, U_K, U_H .
4. Построить ЛАЧХ каскада.



$U_{II}^- = -20 \text{ В}$
 $R_K = 10 \text{ к}$
 $R_1 = 110 \text{ к}$
 $R_2 = 10 \text{ к}$
 $R_E = 1 \text{ к}$
 $R_H = 96 \text{ к}$
 $C_1 = 100 \text{ мкФ}$
 $C_2 = C_3 = 50 \text{ нФ}$
 $\beta = 100$
 $U_{ВХ} = 10 \text{ мВ}; 1 \text{ кГц}$
 (гармонический сигнал)

Рис. 1.66. Задание 30

1. Определить коэффициент усиления по напряжению $K_U = \frac{U_H}{U_{ВХ}}$, входное $R_{ВХ}$ и выходное $R_{ВЫХ}$ сопротивления.
2. Определить параметры на постоянном токе (в состоянии покоя) $I_E^0, I_K^0, U_E^0, U_B^0, U_K^0$.
3. Построить диаграммы сигналов U_B, U_E, U_K, U_H .
4. Построить ЛАЧХ каскада.

1.9. Вопросы для тестирования при самопроверке

1. Что такое коэффициент усиления по напряжению?
2. Что такое входное сопротивление усилителя?
3. Что такое выходное сопротивление усилителя?
4. Какое напряжение питания требует исследуемый усилительный каскад?
5. Какова частота сигнала, подаваемого на исследуемый каскад?
6. Чем определяется выходное сопротивление усилителя?
7. Чем определяется входное сопротивление усилителя при отключенном $C_{\text{Э}}$?
8. Что произойдет, если частота входного сигнала не будет соответствовать частотной характеристике усилителя?
9. Какое включение транзистора применено в исследуемом усилителе?
10. Как изменится входное сопротивление усилителя при уменьшении вдвое усиливаемого сигнала в пределах линейного диапазона?
11. Как изменится выходное сопротивление усилителя при увеличении вдвое усиливаемого сигнала в пределах линейного диапазона?
12. Как изменится коэффициент усиления усилителя при увеличении вдвое усиливаемого сигнала в пределах линейного диапазона усилителя?
13. Что изменится при превышении сигнала линейного диапазона усилителя?
14. Какого типа транзистор использован в исследуемом каскаде?

2. СХЕМОТЕХНИКА УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ НА БАЗЕ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

2.1. Конструкции полевых транзисторов.

Полевые транзисторы управляются электрическим полем, а не током, как биполярные транзисторы. Этот факт и определил их название. Кроме того, в отличие от биполярных транзисторов, ток через которые определяется движением носителей зарядов обоих знаков – электронов и дырок, ток в полевых транзисторах обусловлен движением носителей заряда одного знака. В связи с этим полевые транзисторы называют также *униполярными*. Полевые транзисторы были разработаны в 1952г.

В полевых транзисторах используется зависимость ширины d обратносмещенного полупроводникового перехода от приложенного к нему напряжения U_0 (рис. 2.1).

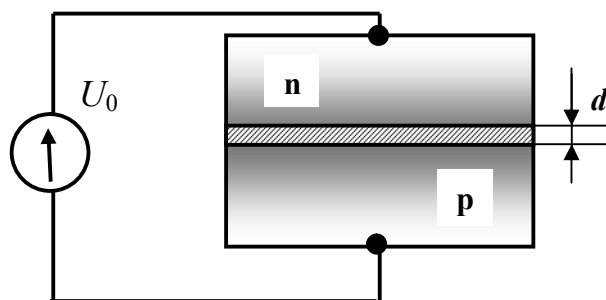


Рис. 2.1. Схема обратносмещенного р-п перехода.

Поскольку при таком включении переход можно рассматривать как конденсатор, при увеличении U_0 его ширина d увеличивается, а барьерная емкость уменьшается.

Различают шесть различных типов полевых транзисторов (field effect transistor, - FET). Полевые транзисторы делятся на две группы – транзисторы с управляющим р-п переходом и транзисторы с управляющим затвором (МОП транзисторы) [1,2].

Классификация транзисторов с управляющим р-п переходом и их условные обозначения в электрических схемах представлена на рис. 2.2.

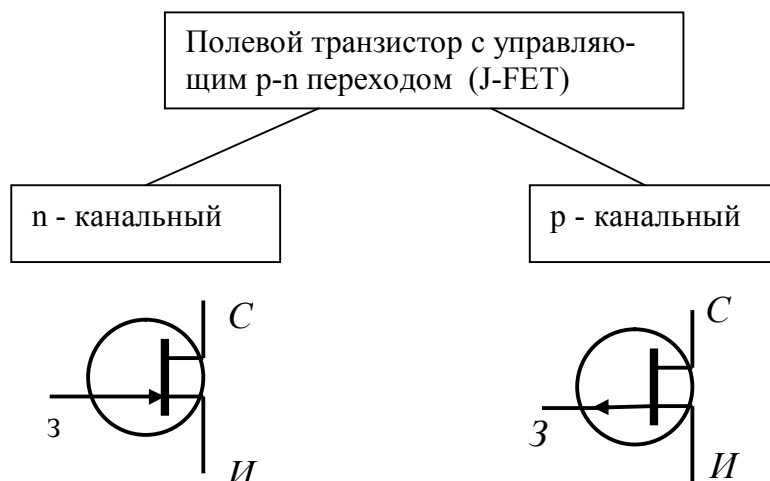


Рис. 2.2. Классификация транзисторов с управляющим р-п переходом и их условные обозначения в электрических схемах.

Конструкция транзистора с р-п переходом изображена на рис. 2.3

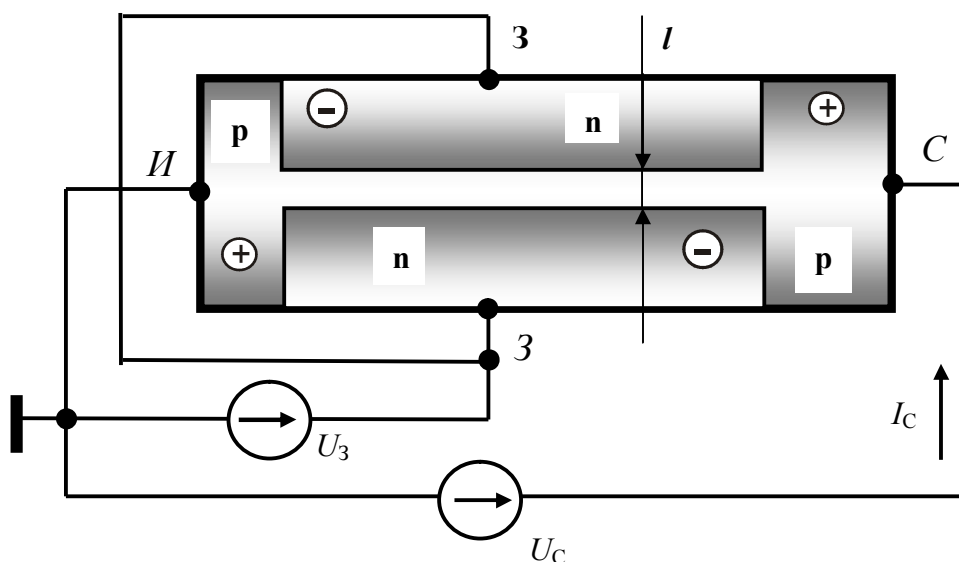


Рис. 2.3. Конструкция транзистора с р-п переходом.

Управляющим электродом транзистора является **затвор 3**. Он позволяет управлять величиной сопротивления между **стоком С** и **источком И**. Управляющим напряжением является напряжение исток - затвор U_3 . При увеличении напряжения U_3 , подаваемого на затвор 3 транзистора, ширина р-п переходов увеличивается, а ширина d канала соответственно уменьшается. При этом ток I_C стока, протекающий между истоком И и стоком С, также уменьшается. При определенной

величине напряжения U_3 , называемом напряжением отсечки, канал полностью перекрывается, и ток I_C становится равным нулю.

Большинство полевых транзисторов являются симметричными, то есть их свойства не изменяются, если электроды С и И поменять местами. В транзисторах с управляющим переходом затвор отделен от канала n-р или р-п переходом. При правильной полярности напряжения U_3 диод, образуемый переходом затвор - канал, запирается и изолирует затвор от канала; при противоположной полярности он отпирается. Реальные токи затворов полевых транзисторов с управляющим переходом лежат в пределах 1пА...1нА, входные сопротивления составляют $10^{10} \dots 10^{13}$ Ом.

Классификация МОП транзисторов [1,2] и их соответствующие обозначения в электрических схемах представлены на рис. 2.4.

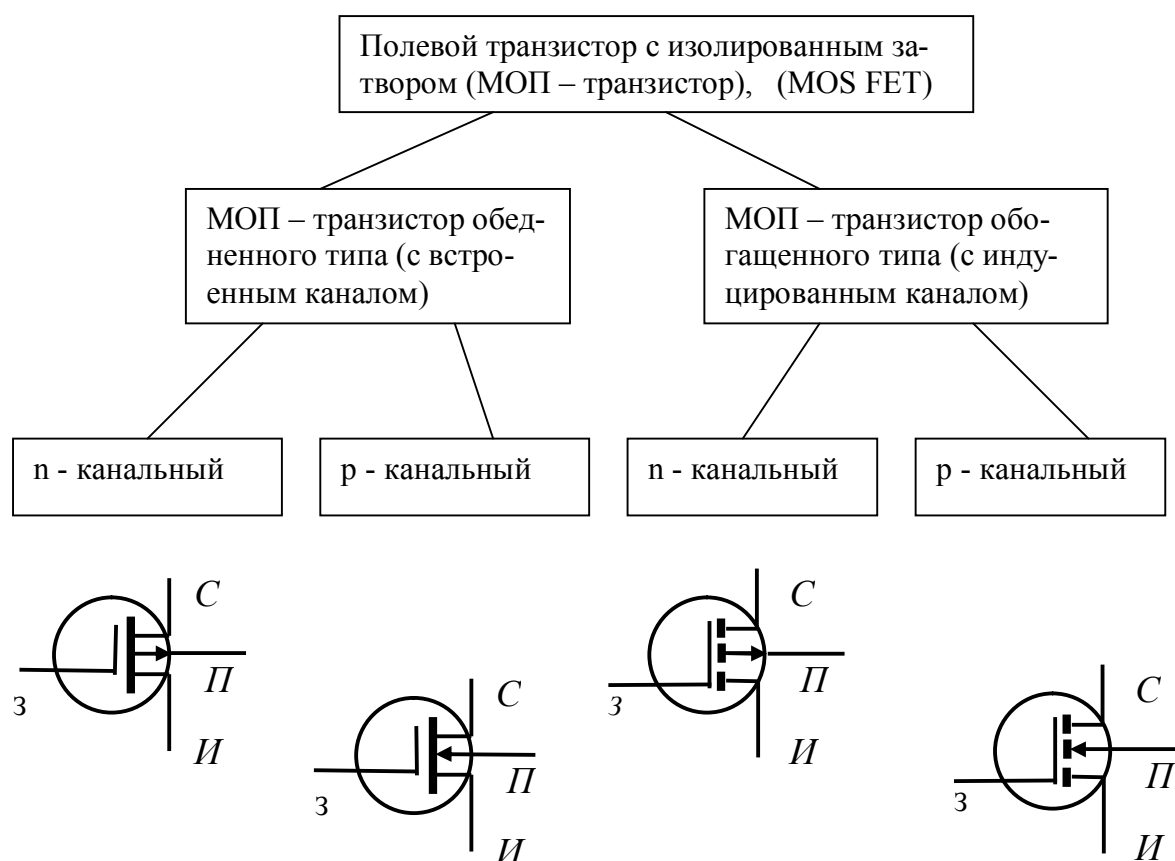


Рис. 2.4. Классификация МОП транзисторов и их условные обозначения в электрических схемах.

Конструкция МОП транзистора с встроенным каналом изображена на рис. 2.5.

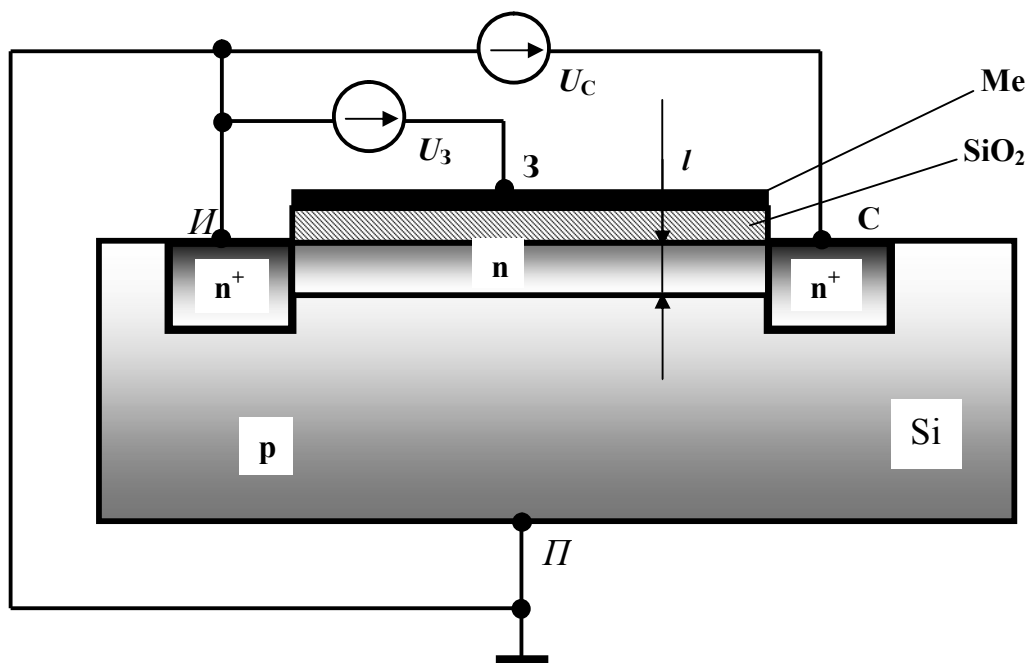


Рис. 2.5. Конструкция транзистора МОП типа "металл – окисел – полупроводник"

В этой конструкции металлический затвор 3 изолирован от остальной конструкции слоем двуоксида кремния SiO_2 , представляющим собой диэлектрик. Механизм его работы аналогичен механизму работы конструкции вышеописанного транзистора с p-n переходом. На подложку II транзистора подается потенциал U_{II} (в данном случае равный нулю), обеспечивающий запертое состояние полупроводникового перехода "канал – подложка".

Более простую конструкцию имеет МОП транзистор с индуцированным каналом (рис. 2.6).

В этой конструкции при увеличении напряжения U_3 на затворе 3 в полупроводнике под затвором образуется так называемый инверсионный слой, свойства которого близки к свойствам n – полупроводника, то есть между областями истока и стока образуется проводящий канал.

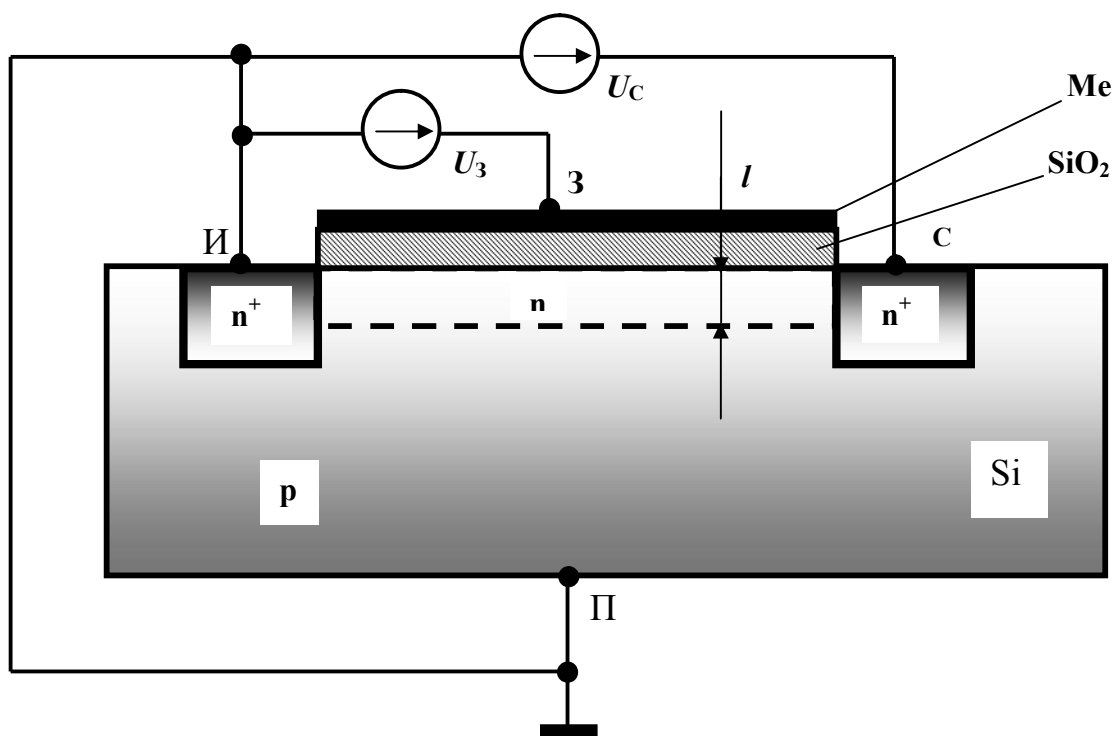


Рис. 2.6. Конструкция МОП транзистора с индуцированным каналом

При таком исполнении транзистора ток через затвор не будет протекать при любой полярности напряжения на затворе. Реальные токи затворов МОП-транзисторов в среднем меньше 1пА. Входные сопротивления МОП-транзисторов составляют $10^{13} \dots 10^{15}$ Ом [2,6]. Аналогично делению биполярных транзисторов на р-п-р и п-р-п транзисторы полевые транзисторы делятся на р - каналные и п - каналные. У п - каналных полевых транзисторов ток канала становится тем меньше, чем сильнее падает потенциал затвора.

У полевых транзисторов р - каналных наблюдается обратное явление. Замена п - каналных транзисторов на р - каналные возможна, если поменять знак напряжения питания, а также соответственно изменить полярность включения используемых в схеме диодов и электролитических конденсаторов.

Через полевые транзисторы с управляющим переходом при напряжении $U_3=0$ протекает небольшой ток стока. Такие транзисторы называют **нормально открытыми**. Аналогичные свойства имеют МОП - транзисторы "обедненного типа". Наоборот, МОП - транзисторы "обогащенного типа" запираются при величинах U_3 , близких к ну-

лю. Их называют **нормально закрытыми**. Ток стока протекает через n -канальные МОП-транзисторы обогащенного типа тогда, когда U_3 превышает некоторое положительное значение. Существуют также МОП-транзисторы, промежуточные между транзисторами обедненного и обогащенного типа, в том числе и такие, через которые при $U_3 = 0$ протекает некоторый средний ток канала.

У полевых транзисторов n -канальных к выводу истока необходимо приложить более отрицательный потенциал, чем к выводу стока. В симметричном n -канальном транзисторе любой из выводов канала, к которому подведен более низкий потенциал, может служить в качестве вывода истока.

В МОП-транзисторах часто изготавливают четвертый вывод от так называемой подложки. Этот электрод, как и затвор, также может выполнять управляющие функции, но он отделен от канала только p - n переходом. Управляющие свойства подложки обычно не используют, а ее вывод соединяют с выводом истока.

2.2. Характеристики полевых транзисторов и параметры малых сигналов

На рис. 2.7 представлена типичная входная характеристика n -канального полевого транзистора с управляющим p - n переходом в области малых сигналов. Напряжение на затворе, при котором ток стока I_C принимает минимальное значение, называется **пороговым напряжением** U_0 .

При величинах напряжений U_3 больших U_0 , передаточная характеристика транзистора, представленная на рис. 2.7, описывается уравнением [1,2]

$$I_C = I_S \left(1 - \frac{U_3}{U_0} \right)^2, \quad (2.1)$$

где I_S – ток стока (ток насыщения) при $U_3 = 0$.

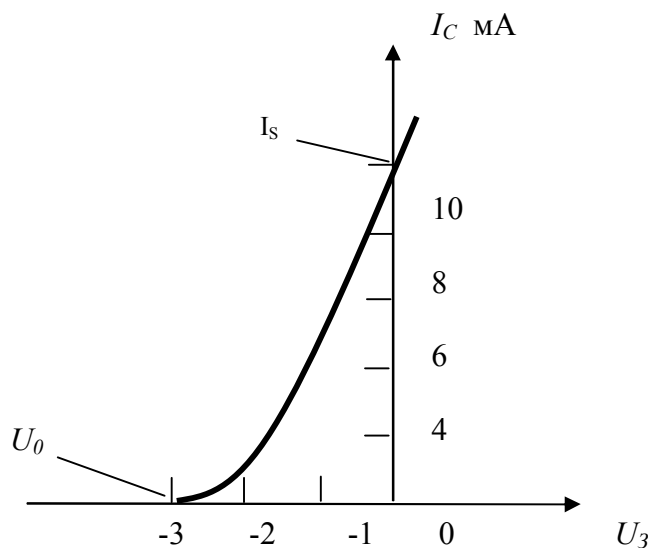


Рис. 2.7. Передаточная характеристика n-канального полевого транзистора с управляющим p-n переходом.

На практике эта величина тока для полевого транзистора с управляющим p-n переходом является предельной, так как положительных напряжений затвор - исток стараются избегать, чтобы не потерять преимуществ, обеспечиваемых малым током затвора.

Из выражения (1) следует, что ток стока при $U_3 = U_0$ должен равняться нулю. Фактически это равенство выполняется лишь приближенно. Кроме передаточной характеристики, важное значение имеют **выходные**, или стоковые характеристики полевых транзисторов. Типичная выходная характеристика n – канального полевого транзистора с управляющим p-n переходом изображена на рис. 2.8. Можно заметить, что качественно эти характеристики подобны характеристикам биполярного транзистора. При этом сток соответствует коллектору, исток - эмиттеру, а затвор - базе биполярного транзистора. Характеристики полевого транзистора отличаются от соответствующих характеристик n-p-n транзистора рабочим диапазоном напряжения затвор - исток.

Выражение (2.1) можно использовать также и для описания передаточных характеристик МОП - транзисторов, как нормально открытых, так и нормально закрытых, если учесть знаки величин U_3 и U_0 .

I_C мА

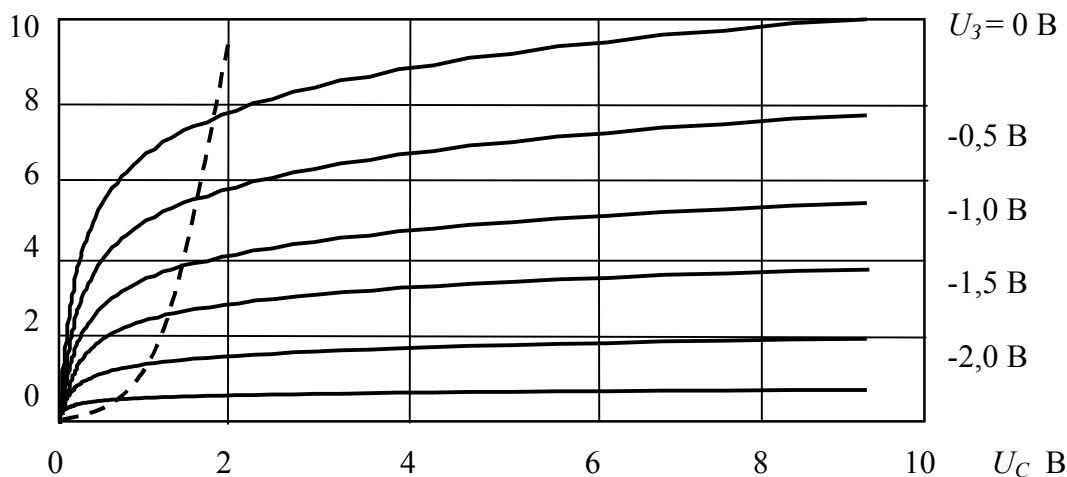


Рис. 2.8. Семейство выходных (стоковых) характеристик n – канального полевого транзистора с управляющим p - n переходом.

Для нормально закрытых МОП - транзисторов в качестве величины I_S используется ток стока при $U_3 = 2U_0$. Смысл этого становится ясным при сравнении передаточных характеристик МОП - транзисторов обедненного и обогащенного типов на рис. 2.9а и рис. 2.9б. Напряжение затвор - исток для МОП - транзисторов может повышаться до величины напряжения пробоя оксидного слоя, составляющего около 50 В, поэтому ток стока таких транзисторов может значительно превышать величину I_S .

По передаточной характеристике транзистора может быть определен такой его параметр, как крутизна

$$S = \left. \frac{\partial I_C}{\partial U_3} \right|_{U_C = \text{const}}$$

Дифференцированием выражения (2.1) можно определить крутизну как

$$S = \frac{2I_S}{U_0^2}(U_3 - U_0) = \frac{2}{|U_0|} \sqrt{I_C \cdot I_S} \quad (2.2)$$

Особый интерес представляет значение крутизны при $I_S = I_C$, обозначаемое через S_S . Для полевых транзисторов с управляющим p - n переходом это значение крутизны является максимальным.

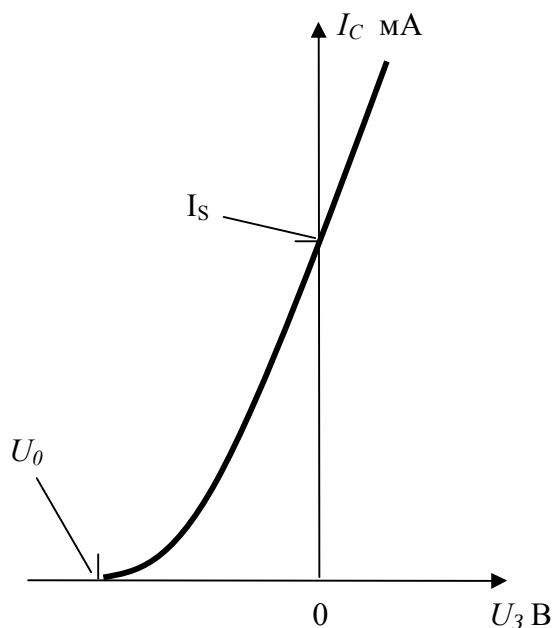


Рис. 2.9а. Входная характеристика МОП транзистора обедненного типа

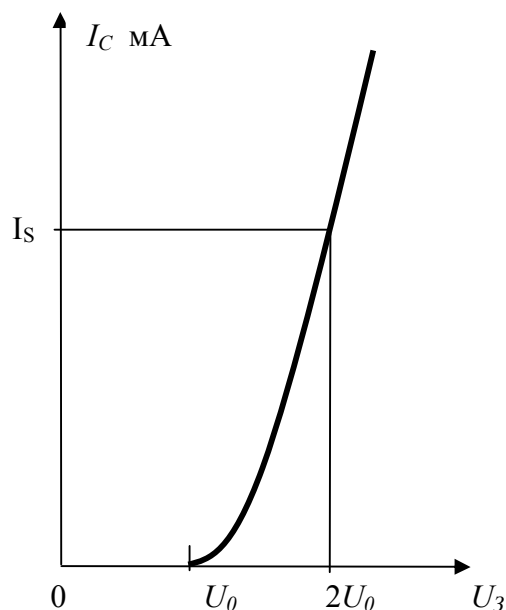


Рис. 2.9б. Входная характеристика МОП транзистора обогащенного типа

Из выражения (2.2) находим

$$S_s = \frac{2I_s}{|U_0|} \quad (2.3)$$

Теперь по легко определяемым опытным путем параметрам S_s и I_s можно просто определить напряжение отсечки. Типовые значения параметров маломощного полевого транзистора составляют

$$I_s = 1 \dots 50 \text{ мА}, \quad |U_0| = 0,5 \dots 5 \text{ В}, \quad S_s = 2 \dots 20 \text{ мА/В}.$$

Необходимо отметить, что при равных токах стока полевого и коллектора биполярного транзисторов крутизна полевого транзистора существенно ниже, чем биполярного. Выходные характеристики полевого транзистора, представленные на рис. 2.8, имеют сходный вид как для нормально открытых, так и для нормально закрытых полевых транзисторов.

При малых значениях U_c ток I_c возрастает приблизительно пропорционально U_c . Полевой транзистор в этой области параметров

эквивалентен омическому сопротивлению, величина которого может управляться напряжением U_3 .

При напряжениях $U_{СП}$ ниже точек перегиба выходных характеристик, определяемых соотношением

$$U_{СП} = U_3 - U_0, \quad (2.5)$$

семейство выходных характеристик описывается выражением [1,2]

$$I_C = \frac{I_S}{U_0^2} [2(U_3 - U_0)U_C - U_C^2]. \quad (2.6)$$

Эта зона семейства выходных характеристик называется начальной зоной.

Зона семейства выходных характеристик, находящаяся за точками перегиба, называется зоной сжатия. В этой зоне ток стока зависит только от напряжения затвор – исток U_3 и очень незначительно от напряжения сток – исток U_C , что соответствует выражению (2.1).

Незначительная зависимость тока I_C от напряжения U_C на этом участке характеризуется дифференциальным выходным сопротивлением

$$r_C = \left. \frac{\partial U_C}{\partial I_C} \right|_{U_3 = const}$$

Реальные значения выходного сопротивления r_C достигают нескольких сотен кОм.

Эквивалентная схема полевого транзистора для этого режима (на пологих участках его выходных характеристик) изображена на рис. 2.10.

Как и у биполярных транзисторов, дифференциальное выходное сопротивление снижается при увеличении тока стока I_C , причем приблизительно обратно пропорционально величине $\sqrt{I_C}$.

Предельные электрические параметры полевых транзисторов – примерно такие же, как и у биполярных транзисторов. Среди них, однако, отсутствует такой параметр, как напряжение вторичного пробоя (или пробоя второго рода).

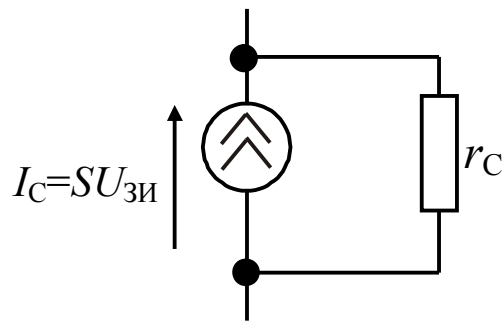


Рис. 2.10. Эквивалентная схема полевого транзистора на пологих участках его выходных характеристик

Это дает некоторые преимущества мощным полевым транзисторам по сравнению с мощными биполярными транзисторами.

Особое внимание необходимо обращать на предельно допустимое напряжение на затворе МОП-транзисторов, лежащее в пределах 50В...100В. При превышении этого напряжения может произойти пробой оксидного слоя затвора, и транзистор будет необратимо поврежден. Такие перенапряжения легко могут возникнуть вследствие высокого входного сопротивления и малой входной емкости транзистора, составляющей несколько пикофарад. Особенно опасны статические заряды, которые могут привести к пробоему транзистора даже при касании его рукой. Поэтому при пайке МОП-транзисторов следует заземлять паяльник, прибор и самого монтажника.

Для защиты МОП-транзисторов между затвором и подложкой иногда включают стабилитроны. При этом значительно уменьшается входное сопротивление, которое становится соизмеримым с входным сопротивлением полевых транзисторов с управляющим р-п переходом.

По аналогии с биполярными транзисторами в зависимости от того, какой электрод подключается к точке постоянного потенциала, различают три схемы включения: с общим истоком, с общим стоком и общим затвором.

2.3. Схема с общим истоком

Схема с общим истоком (рис. 2.11) соответствует схеме с общим эмиттером для биполярного транзистора [1]. Различие состоит в том,

что полупроводниковый переход канал-затвор включен в запирающем направлении. Входной ток при этом практически равен нулю, а входное сопротивление очень велико.

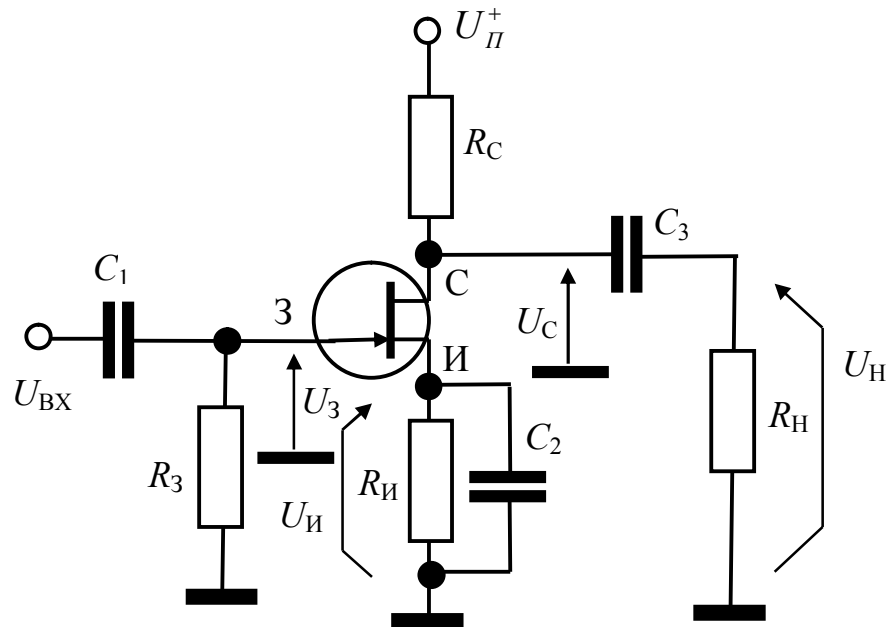


Рис. 2.11. Схема усилителя с общим истоком.

Для расчета следует задать ток стока.

Из выражения (2.1) можно определить напряжение U_3 , соответствующее этому току:

$$U_3 = U_0 \left(1 - \sqrt{\frac{I_C}{I_S}} \right) \quad (2.7)$$

Отсюда определяется сопротивление в цепи стока:

$$R_{И} = \frac{|U_3|}{I_C} = \frac{U_0 \left(1 - \sqrt{\frac{I_C}{I_S}} \right)}{I_C} \quad (2.8)$$

Например, при токе насыщения $I_S = 10\text{мА}$, напряжении отсечки $U_0 = -3\text{В}$, рабочем токе стока $I_C = 3\text{мА}$, из (2.7) определяется $U_3 = -1,36\text{В}$, отсюда сопротивление резистора $R_{И}$ равно

$$R_{И} = \frac{1,36\text{В}}{3\text{мА}} \approx 450\text{ Ом}.$$

Напряжение стока должно быть больше напряжения перегиба выходных характеристик транзистора

$$U_{СП} = U_3 - U_0$$

Отсюда определяется напряжение стока в состоянии покоя

$$U_C^0 > U_{И} + U_{СП} + |\Delta U_{СМАХ}|$$

где $\Delta U_{СМАХ}$ - амплитуда переменного сигнала на стоке (рис. 2.12).

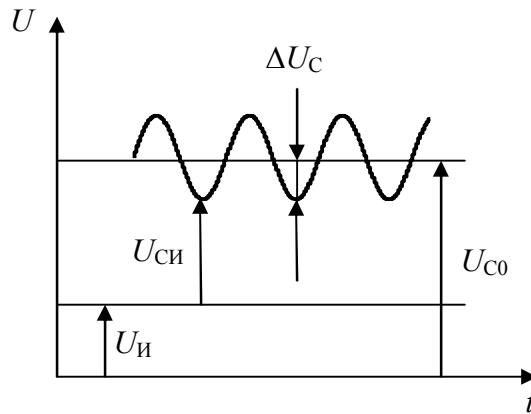


Рис. 2.12. Диаграммы сигналов в схеме усилителя с общим истоком

Из (2.5) и (2.6) с учетом $U_{И} = -U_3$ следует

$$U_C^0 > |U_0| + |\Delta U_{СМАХ}|$$

Например, при амплитуде напряжения на стоке $\Delta U_{СМАХ} = \pm 2\text{В}$ определяем

$$U_C^0 > 2\text{В} + 3\text{В} = 5\text{В};$$

Выбираем $U_C^0 = 7\text{В}$. Задавись напряжением питания $U_{П}^+ = 15\text{В}$, определяем сопротивление резистора R_C :

$$R_C = \frac{15\text{В} - 7\text{В}}{3\text{мА}} = 2,7\text{кОм}$$

Крутизна входной характеристики в рабочей точке определяется (2.2):

$$S = \frac{2}{|U_0|} \sqrt{I_C \cdot I_S}$$

Коэффициент усиления каскада в рабочем диапазоне частот равен

$$K \approx -S \cdot R_C \approx -10.$$

Выбор величины R_3 в значительной мере произволен. Верхняя ее граница определяется исходя из того, что падение напряжения на R_3 , обусловленная током утечки затвора, должна быть мало по сравнению с напряжением на затворе $U_{зи}$. Обычно эта величина составляет несколько МОм.

Входное и выходное сопротивления каскада определяются выражениями

$$R_{ВХ} \approx R_3 ; R_{ВЫХ} = R_C \parallel r_C \approx R_C \quad (2.9)$$

2.4. Схема с общим стоком

Схема с общим стоком (истоковый повторитель) обладает значительно большим входным сопротивлением, чем схема с общим истоком [2]. В большинстве случаев, однако, это не имеет особого значения, поскольку оно достаточно велико и для схем с общим истоком. Преимуществом такой схемы является то, что она существенно уменьшает входную емкость каскада. В отличие от эмиттерного повторителя, выходное сопротивление истокового повторителя не зависит от внутреннего сопротивления источника сигнала. Базовая схема истокового повторителя изображена на рис. 2.13.

Эквивалентная схема истокового повторителя с учетом эквивалентной схемы транзистора (рис. 2.10) приведена на рис. 2.14.

Входное сопротивление $R_{ВХ}$ истокового повторителя определяется сопротивлением запертого полупроводникового перехода "затвор – канал" транзистора, которое для большинства полевых транзисторов очень велико.

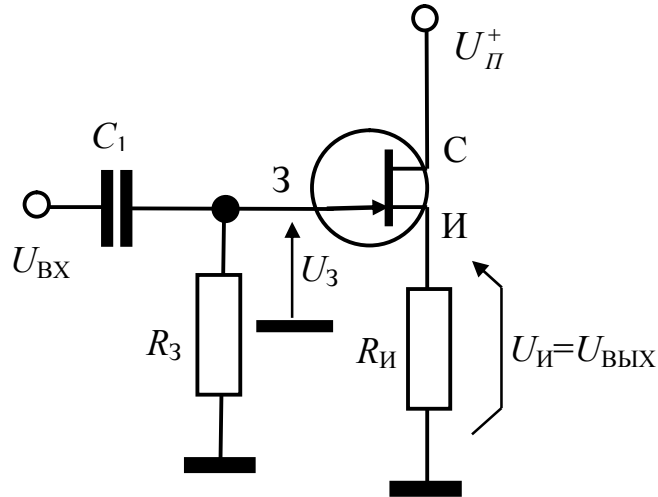


Рис. 2.13. Базовая схема истокового повторителя

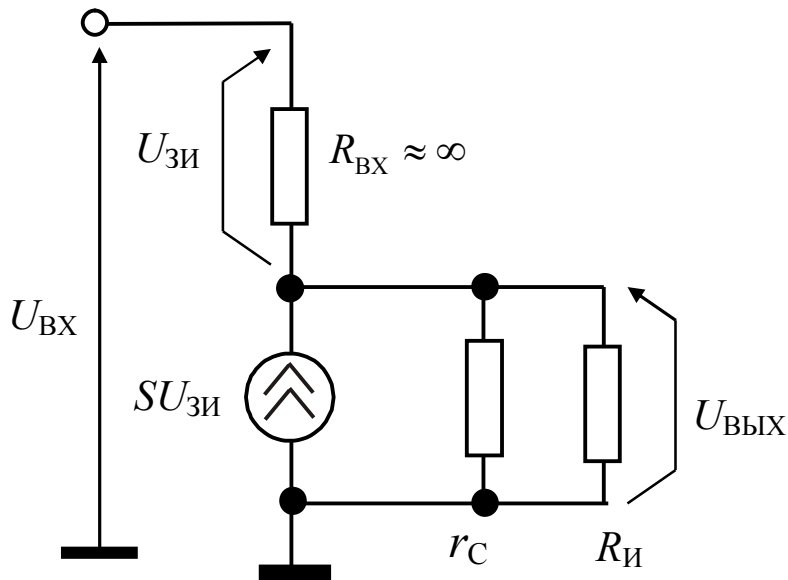


Рис. 2.14. Эквивалентная схема истокового повторителя

Из рассмотрения этой схемы можно определить выходное напряжение усилителя:

$$U_{\text{ВЫХ}} = S U_{\text{ЗИ}} (R_{\text{И}} \parallel r_C) = S (U_{\text{ВХ}} - U_{\text{ВЫХ}}) \cdot (R_{\text{И}} \parallel r_C),$$

откуда окончательно получаем

$$U_{\text{ВЫХ}} [1 + S \cdot (R_{\text{И}} \parallel r_C)] = U_{\text{ВХ}} \cdot S (R_{\text{И}} \parallel r_C).$$

Следовательно, коэффициент усиления каскада равен

$$K_U = \frac{S \cdot (R_{\text{И}} \parallel r_C)}{1 + (R_{\text{И}} \parallel r_C)} \approx \frac{S R_{\text{И}}}{1 + S R_{\text{И}}} \quad (2.10)$$

Отсюда видно, что коэффициент усиления истокового повторителя близок к единице, но меньше ее.

Определим выходное сопротивление истокового повторителя.

При изменении тока транзистора на ΔI_C выходное напряжение изменится на $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$, при отсутствии входного сигнала (то есть при его нулевом значении) имеем

$$\Delta U_{\text{ВХ}} = \Delta U_{\text{ВЫХ}} + \Delta U_{\text{ЗИ}} = 0.$$

Таким образом, при $\Delta U_{\text{ВЫХ}} = -\Delta U_{\text{ЗИ}}$, получаем

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = \Delta I_C R_{\text{И}} - \Delta U_{\text{ВЫХ}} \cdot SR_{\text{И}},$$

откуда определяется выходное сопротивление схемы:

$$R_{\text{ВЫХ}} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta I_C} = \frac{R_{\text{И}}}{1 + SR_{\text{И}}} = \frac{R_{\text{И}} / S}{R_{\text{И}} + 1/S} = R_{\text{И}} \parallel \left(\frac{1}{S} \right) \quad (2.11)$$

Типовые значения коэффициента усиления и выходного сопротивления истокового повторителя можно проиллюстрировать числовым примером. При крутизне характеристики транзистора $S=5$ мА/В и сопротивлении в цепи истока $R_{\text{И}} = 1$ кОм из выражений (2.10) и (2.11) получаем

$$K_U \approx 0,8 ; \quad R_{\text{ВЫХ}} \approx 170 \text{ Ом}$$

Практическая схема истокового повторителя может отличаться от схемы, изображенной рис. 2.13. Одна из практических схем [2] приведена на рис. 2.15. В этой схеме потенциал затвора определяется делителем $R_1 R_2$, который также определяет входное сопротивление усилителя:

$$R_{\text{ВХ}} = R_1 \parallel R_2 ,$$

а нагрузка $R_{\text{Н}}$ подключена через разделительный конденсатор C_2 .

Нижняя граница частотной полосы пропускания каскада определяется постоянными времени

$$\tau_1 = C_1 R_{\text{ВХ}} , \quad \tau_2 = C_2 (R_{\text{ВЫХ}} + R_{\text{Н}}) .$$

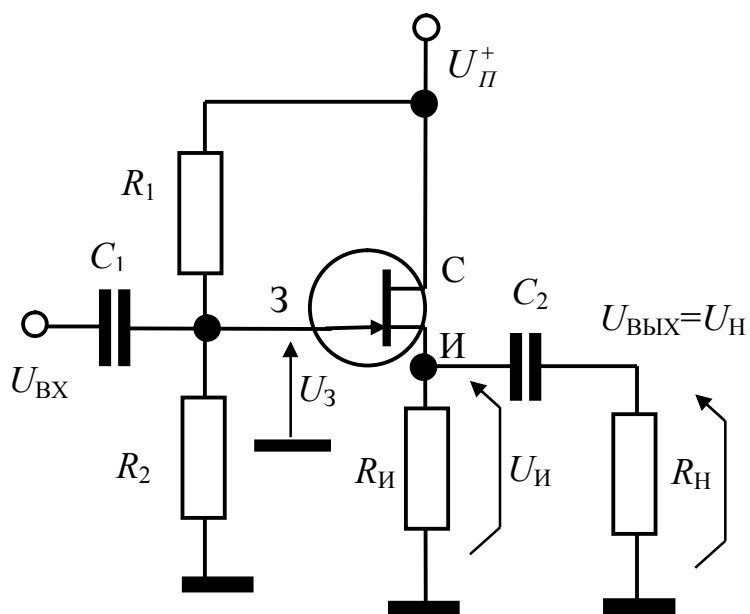


Рис. 2.15. Практическая схема истокового повторителя

Частотные характеристики усилительных каскадов на полевых транзисторах определяются аналогично частотным характеристикам каскадов на биполярных транзисторах [4,5], рассмотренных в разделе 1.5.

Варианты схем усилителей на базе полевых транзисторов для заданий на проектирование

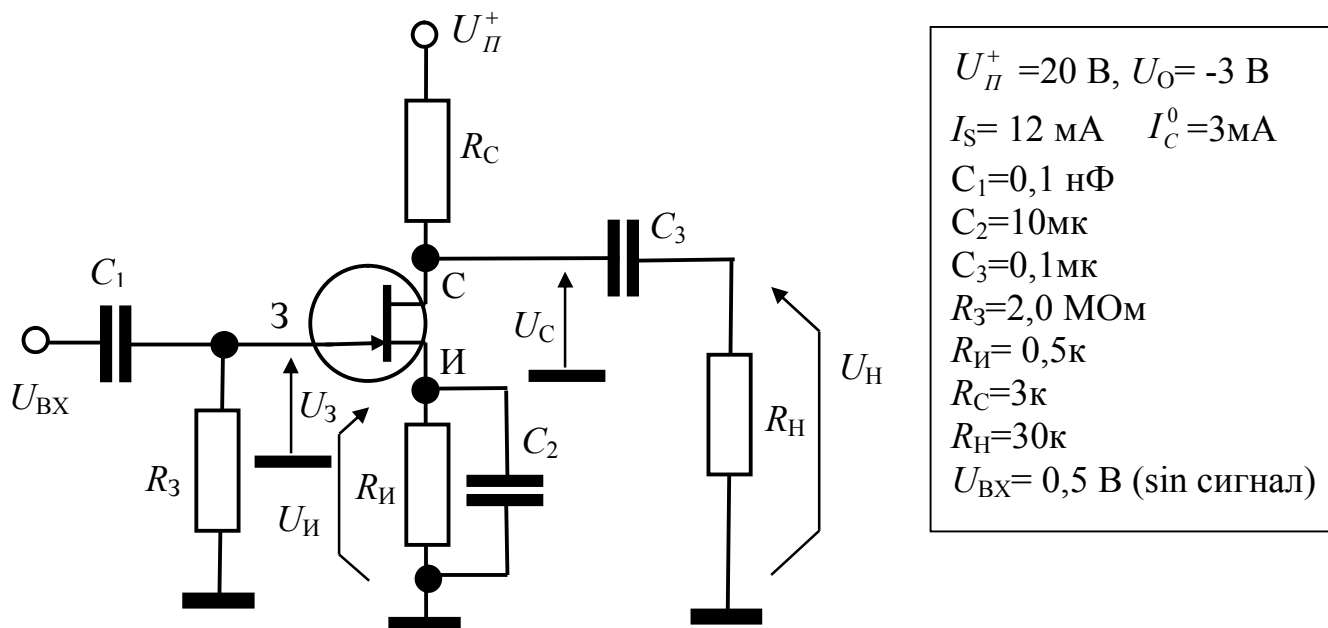


Рис. 2.16. Задание 01. Усилительный каскад на полевом транзисторе. Определить $K_U, R_{\text{ВХ}}, R_{\text{ВЫХ}}, U_{\text{И}}^0, U_3^0, U_{\text{С}}^0$. Построить диаграммы сигналов, построить ЛАЧХ.

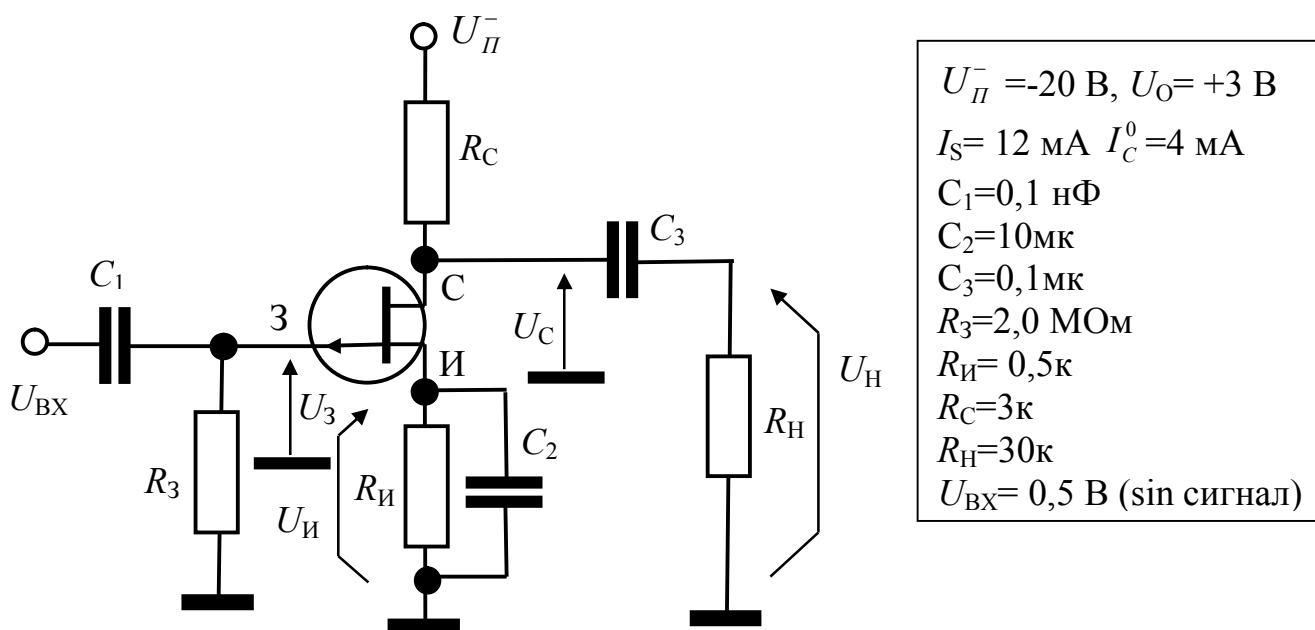
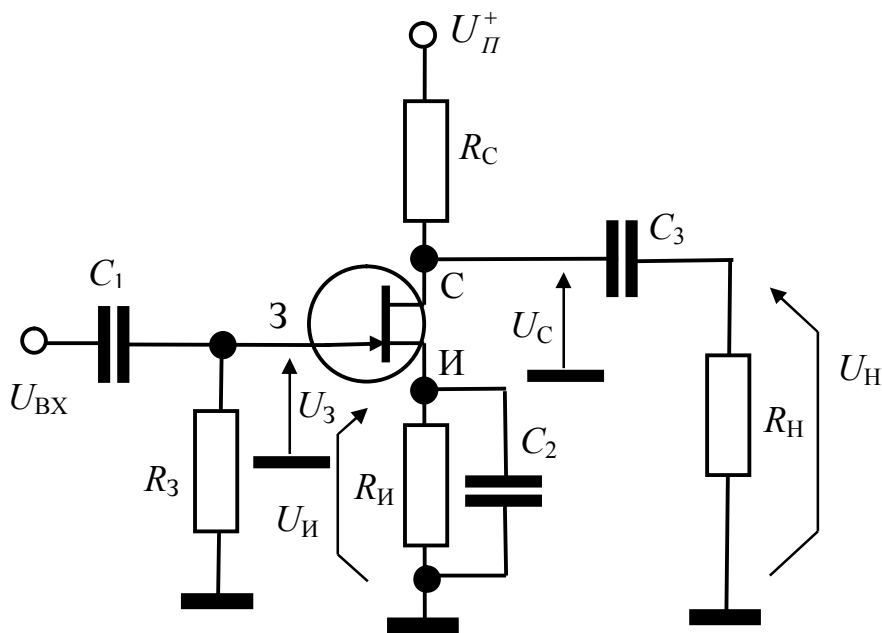
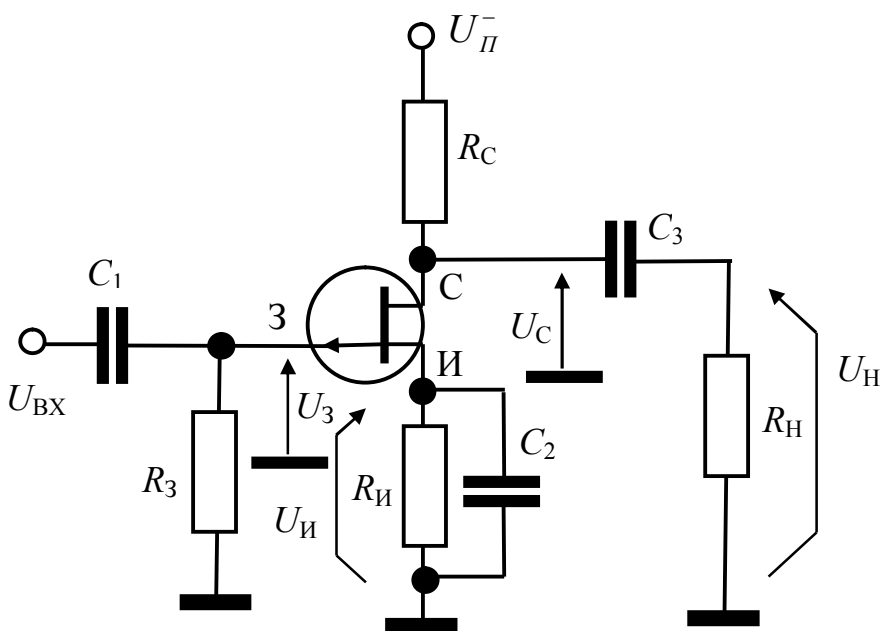


Рис. 2.17. Задание 02. Усилительный каскад на полевом транзисторе. Определить $K_U, R_{\text{ВХ}}, R_{\text{ВЫХ}}, U_{\text{И}}^0, U_3^0, U_{\text{С}}^0$. Построить диаграммы сигналов, построить ЛАЧХ.



$U_{\Pi}^+ = 15 \text{ В}, U_0 = -4 \text{ В}$
 $I_S = 12 \text{ мА} \quad I_C^0 = 3 \text{ мА}$
 $C_1 = 0,2 \text{ нФ}$
 $C_2 = 15 \text{ мк}$
 $C_3 = 0,1 \text{ мк}$
 $R_3 = 1,0 \text{ МОм}$
 $R_{\text{И}} = 0,4 \text{ к}$
 $R_C = 2,7 \text{ к}$
 $R_{\text{Н}} = 40 \text{ к}$
 $U_{\text{ВХ}} = 0,5 \text{ В (sin сигнал)}$

Рис. 2.18. Задание 03. Усилительный каскад на полевом транзисторе. Определить $K_U, R_{\text{ВХ}}, R_{\text{ВЫХ}}, U_{\text{И}}^0, U_3^0, U_C^0$. Построить диаграммы сигналов, построить ЛАЧХ.



$U_{\Pi}^- = -15 \text{ В}, U_0 = +4 \text{ В}$
 $I_S = 12 \text{ мА} \quad I_C^0 = 3 \text{ мА}$
 $C_1 = 0,2 \text{ нФ}$
 $C_2 = 15 \text{ мк}$
 $C_3 = 0,1 \text{ мк}$
 $R_3 = 1,0 \text{ МОм}$
 $R_{\text{И}} = 0,4 \text{ к}$
 $R_C = 2,7 \text{ к}$
 $R_{\text{Н}} = 40 \text{ к}$
 $U_{\text{ВХ}} = 0,5 \text{ В (sin сигнал)}$

Рис. 2.19. Задание 04. Усилительный каскад на полевом транзисторе. Определить $K_U, R_{\text{ВХ}}, R_{\text{ВЫХ}}, U_{\text{И}}^0, U_3^0, U_C^0$. Построить диаграммы сигналов, построить ЛАЧХ.

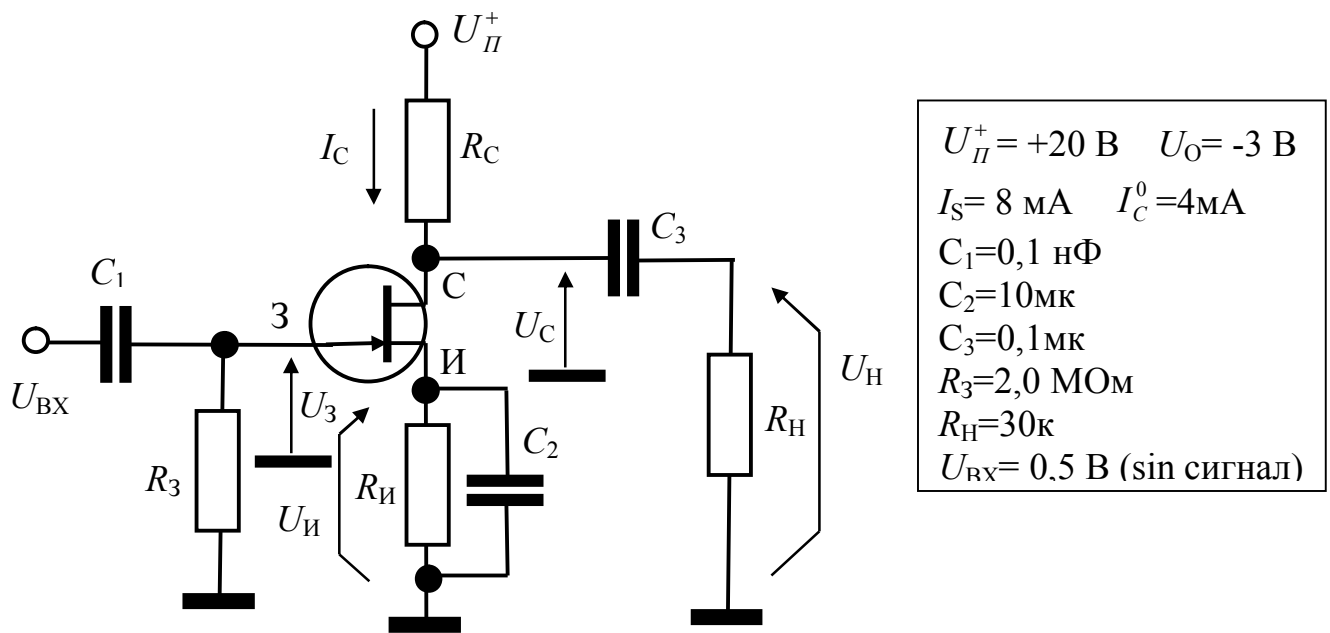


Рис. 2.20. Задание 05. Усилительный каскад на полевом транзисторе. Определить K_U , $R_{\text{И}}$, R_C , $R_{\text{ВХ}}$, $R_{\text{ВЫХ}}$, $U_{\text{И}}^0$, U_3^0 , для $I_C^0 = 4 \text{ мА}$, $U_C^0 = +10 \text{ В}$. Построить диаграммы сигналов, построить ЛАЧХ.

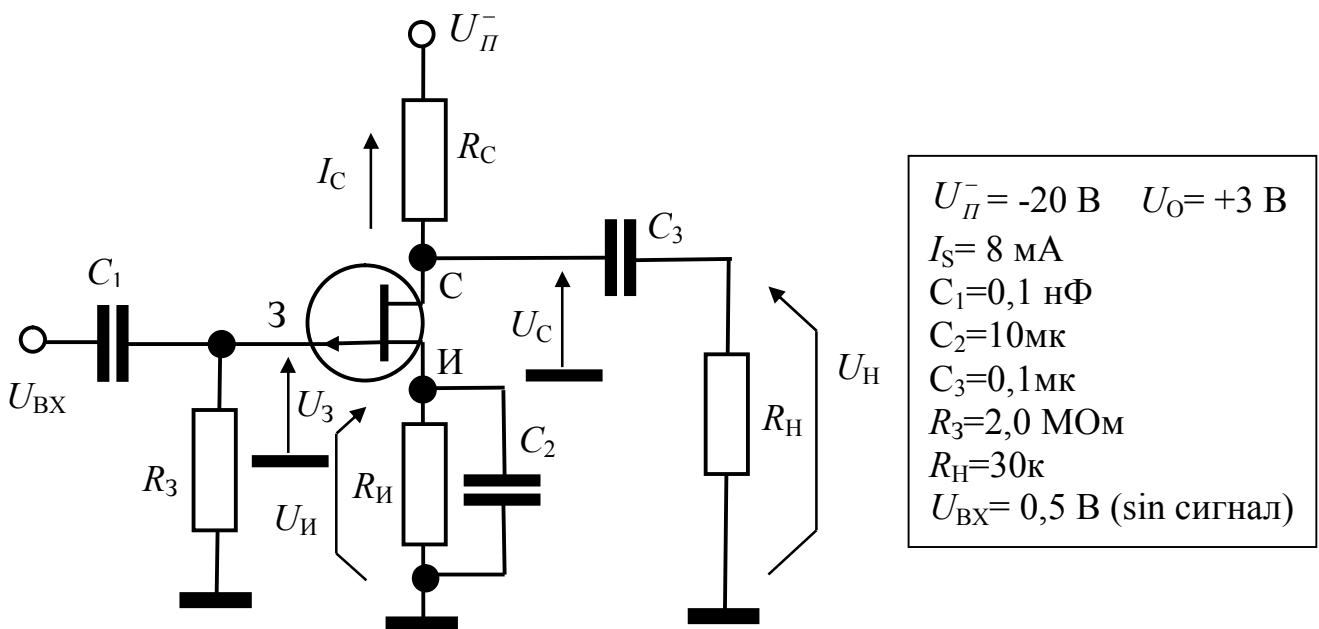


Рис. 2.21. Задание 06. Усилительный каскад на полевом транзисторе. Определить K_U , $R_{\text{И}}$, R_C , $R_{\text{ВХ}}$, $R_{\text{ВЫХ}}$, $U_{\text{И}}^0$, U_3^0 для $I_C^0 = 4 \text{ мА}$, $U_C^0 = +10 \text{ В}$. Построить диаграммы сигналов, построить ЛАЧХ.

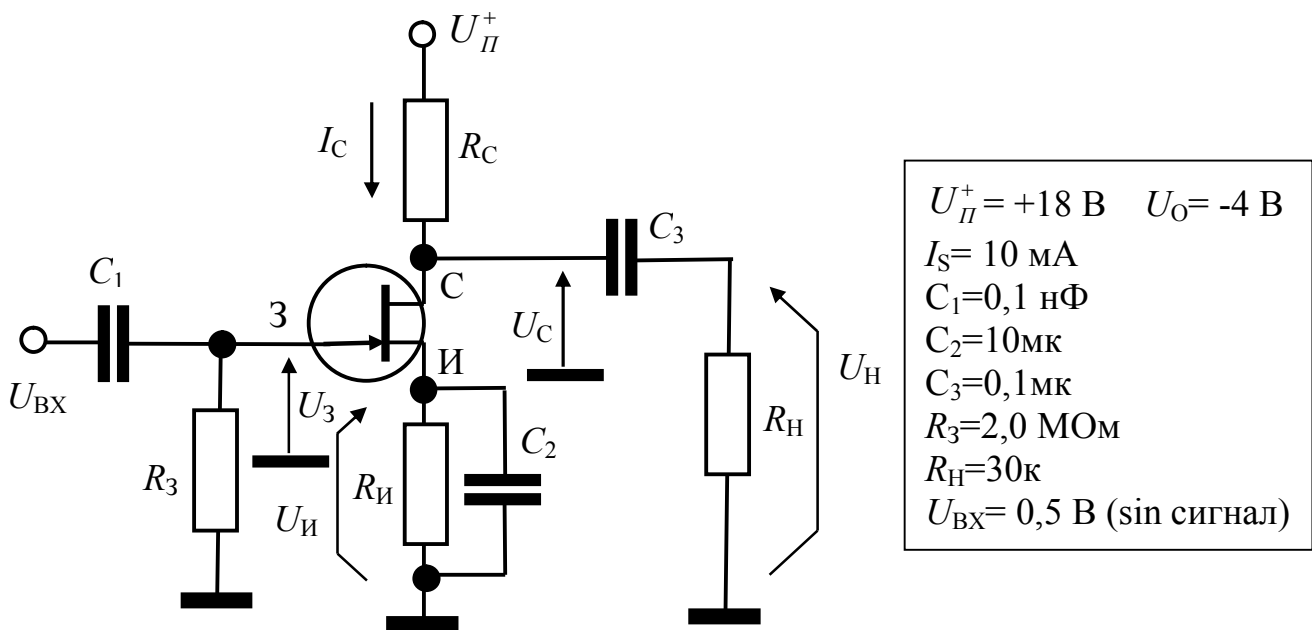


Рис. 2.22. Задание 07. Усилительный каскад на полевом транзисторе. Определить K_U , $R_{И}$, R_C , $R_{ВХ}$, $R_{ВЫХ}$, $U_{И}^0$, U_3^0 , для $I_C^0 = 5 \text{ мА}$, $U_C^0 = +8 \text{ В}$. Построить диаграммы сигналов, построить ЛАЧХ

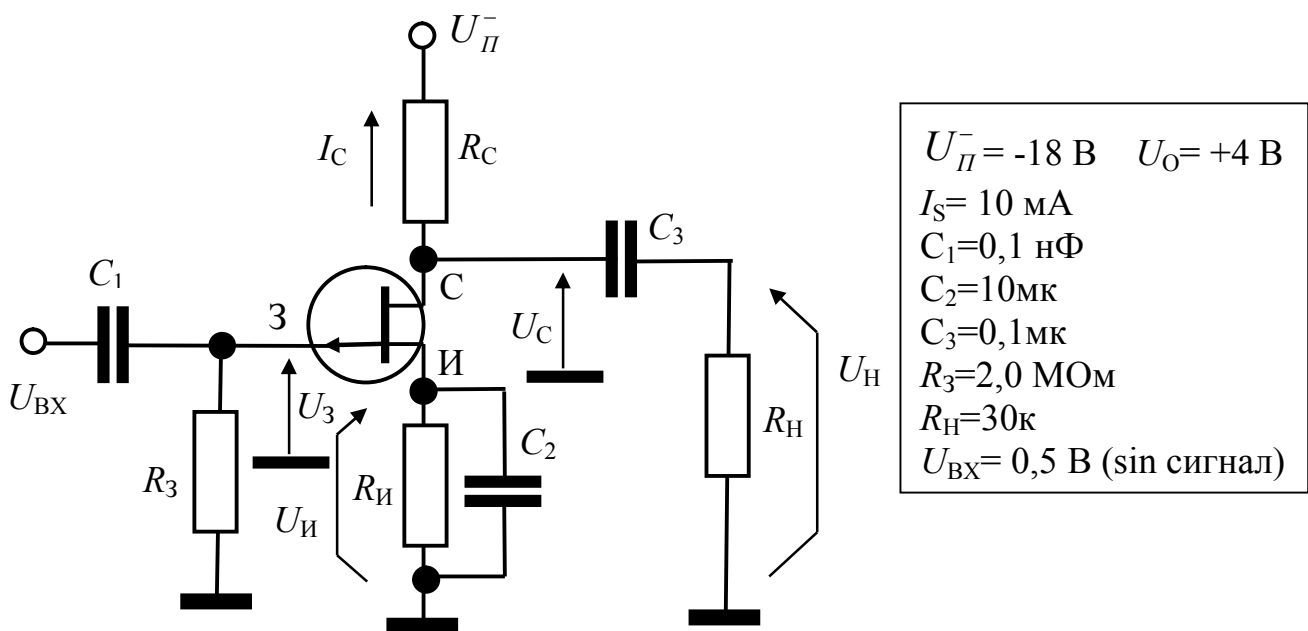
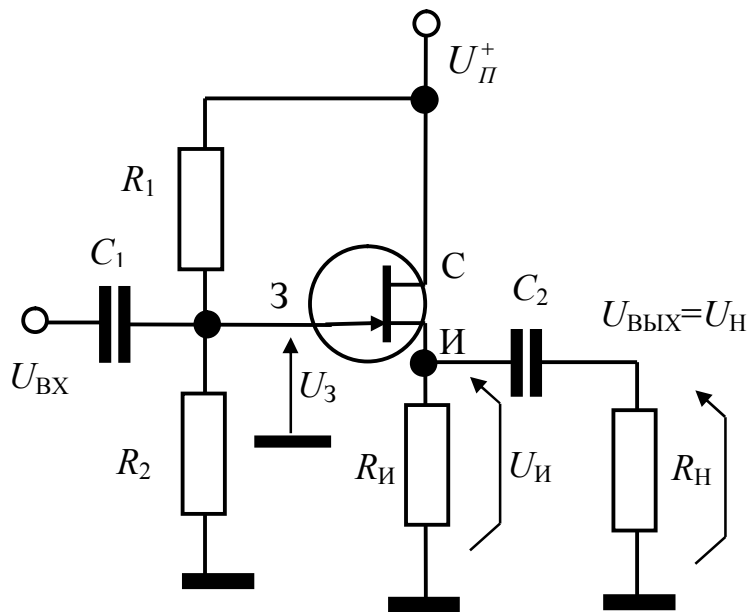
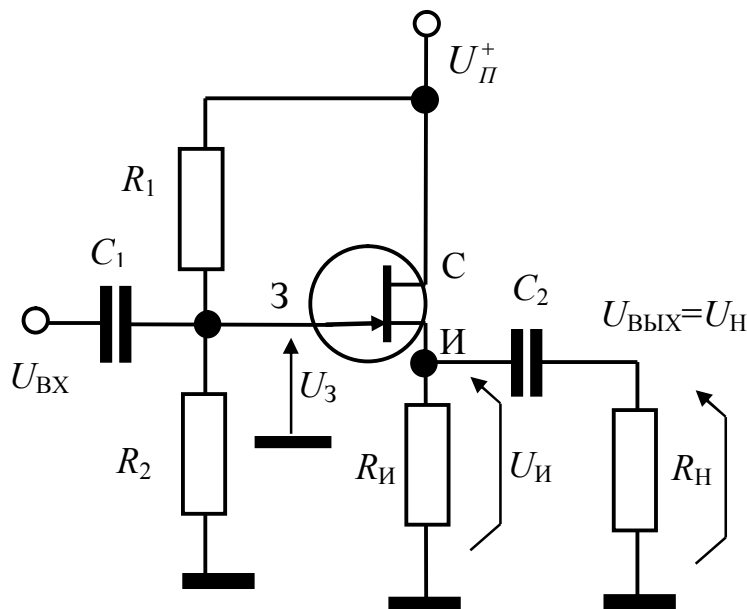


Рис. 2.23. Задание 08. Усилительный каскад на полевом транзисторе. Определить K_U , $R_{И}$, R_C , $R_{ВХ}$, $R_{ВЫХ}$, $U_{И}^0$, U_3^0 для $I_C^0 = 5 \text{ мА}$, $U_C^0 = +8 \text{ В}$. Построить диаграммы сигналов, построить ЛАЧХ



$U_{П}^+ = +20 \text{ В}$ $U_0 = -3 \text{ В}$
 $I_S = 8 \text{ мА}$ $I_C^0 = 4 \text{ мА}$
 $C_1 = 0,1 \text{ нФ}$
 $C_2 = 10 \text{ мкФ}$
 $R_1 = 2,0 \text{ МОм}$
 $R_2 = 2,0 \text{ МОм}$
 $R_H = 40 \text{ к}$
 $U_{ВХ} = 5 \text{ В (sin сигнал)}$

Рис. 2.24. Задание 09. Усилительный каскад на полевом транзисторе. Определить K_U , $R_{ВХ}$, $R_{ВЫХ}$, $U_{И}^0$, U_3^0 . Построить диаграммы сигналов, построить ЛАЧХ



$U_{П}^+ = +15 \text{ В}$ $U_0 = -4 \text{ В}$
 $I_S = 10 \text{ мА}$ $I_C^0 = 4 \text{ мА}$
 $C_1 = 0,1 \text{ нФ}$
 $C_2 = 10 \text{ мкФ}$
 $R_1 = 2,0 \text{ МОм}$
 $R_2 = 2,0 \text{ МОм}$
 $R_H = 40 \text{ к}$
 $U_{ВХ} = 2 \text{ В (sin сигнал)}$

Рис. 2.25. Задание 10. Усилительный каскад на полевом транзисторе. Определить K_U , $R_{ВХ}$, $R_{ВЫХ}$, $U_{И}^0$, U_3^0 . Построить диаграммы сигналов, построить ЛАЧХ

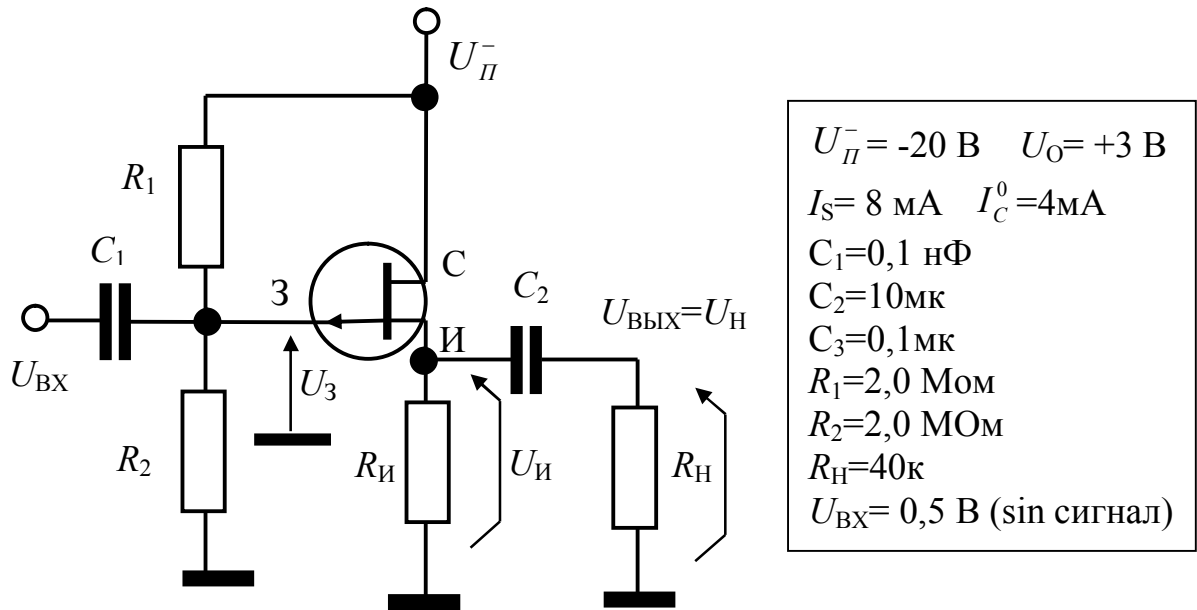


Рис. 2.26. Задание 11. Усилительный каскад на полевом транзисторе. Определить K_U , $R_{\text{ВХ}}$, $R_{\text{ВЫХ}}$, U_{Π}^0 , U_3^0 . Построить диаграммы сигналов, построить ЛАЧХ.

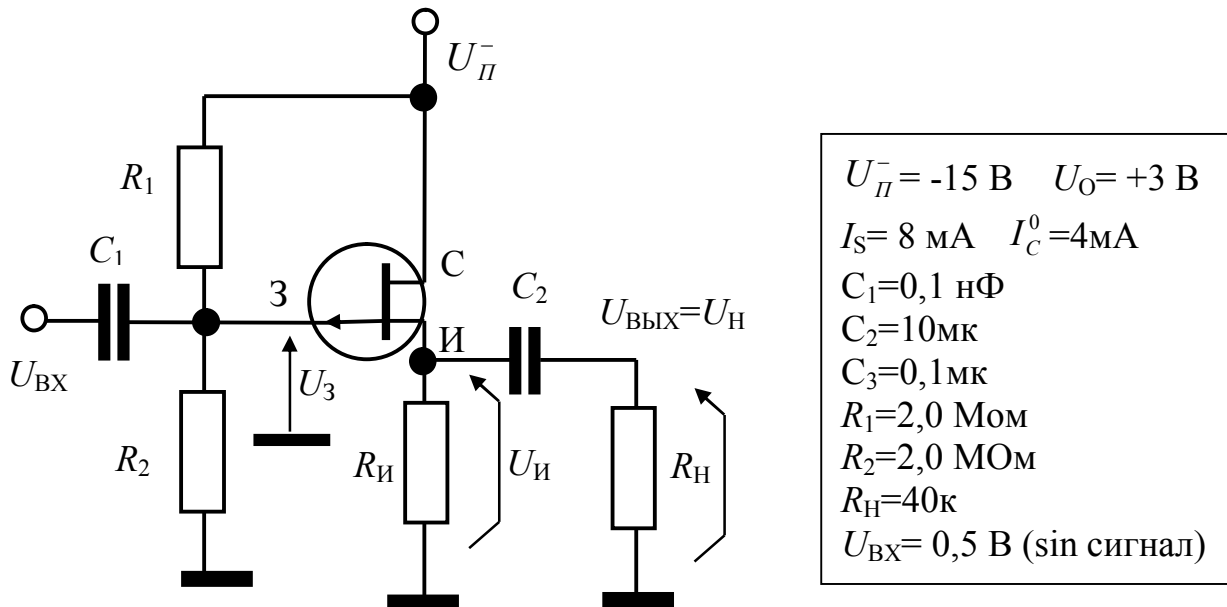


Рис. 2.27. Задание 12. Усилительный каскад на полевом транзисторе. Определить K_U , $R_{\text{ВХ}}$, $R_{\text{ВЫХ}}$, U_{Π}^0 , U_3^0 . Построить диаграммы сигналов, построить ЛАЧХ

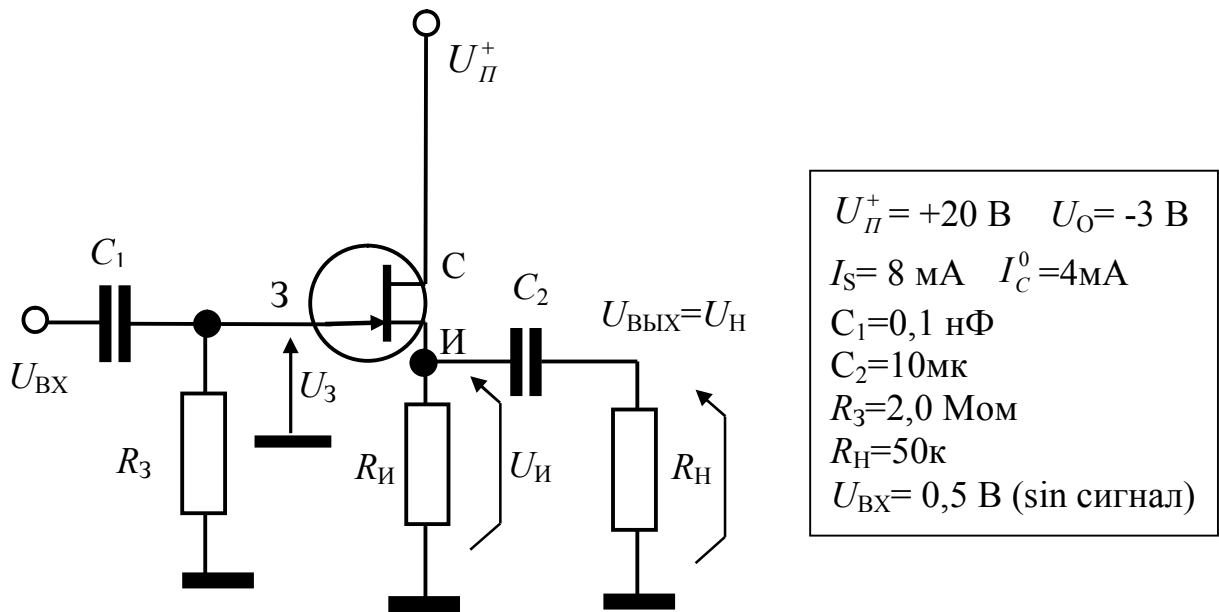


Рис. 2.28. Задание 13. Усилительный каскад на полевом транзисторе. Определить K_U , $R_{ВХ}$, $R_{ВЫХ}$, $U_{И}^0$, U_3^0 . Построить диаграммы сигналов, построить ЛАЧХ.

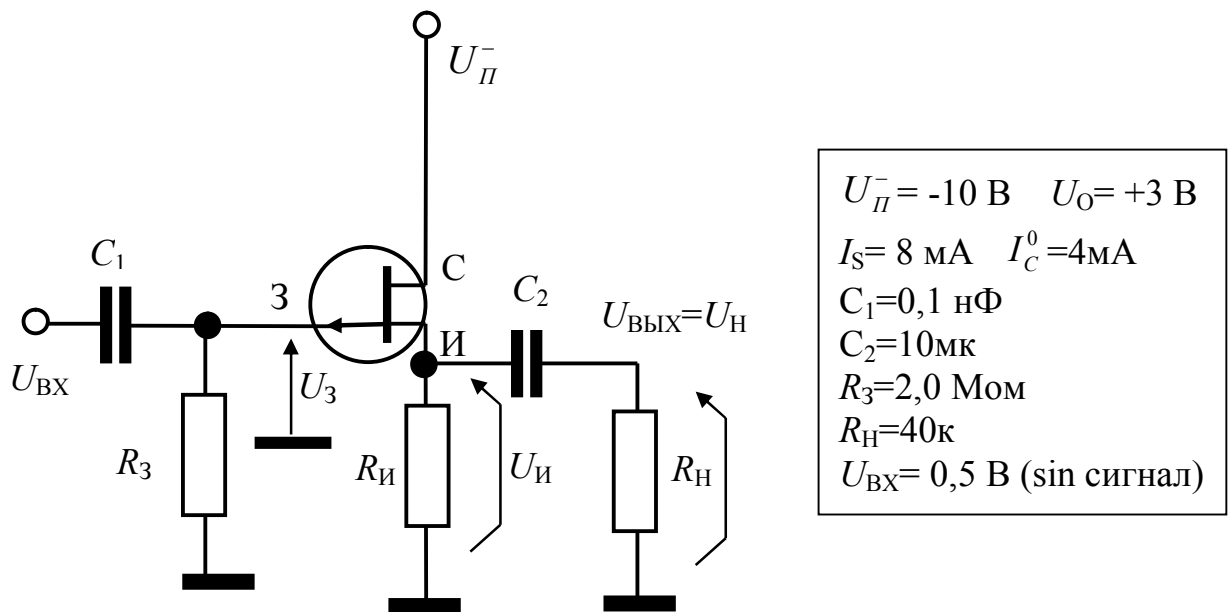
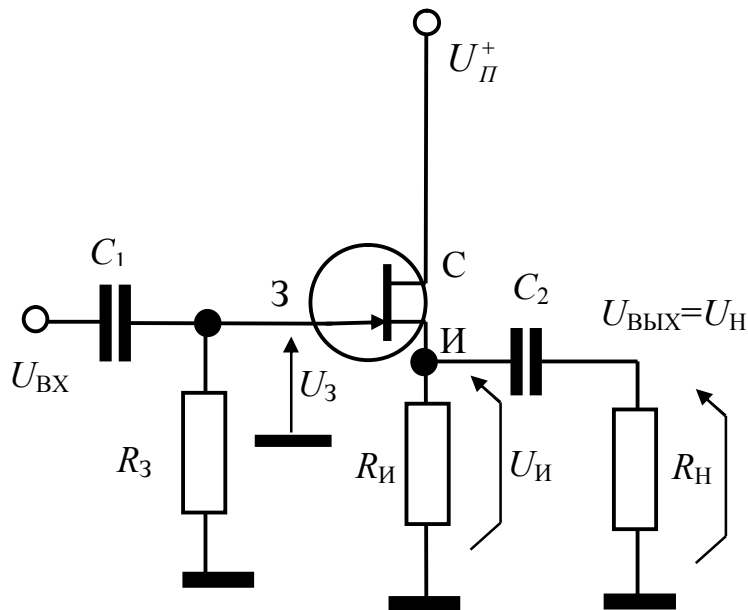
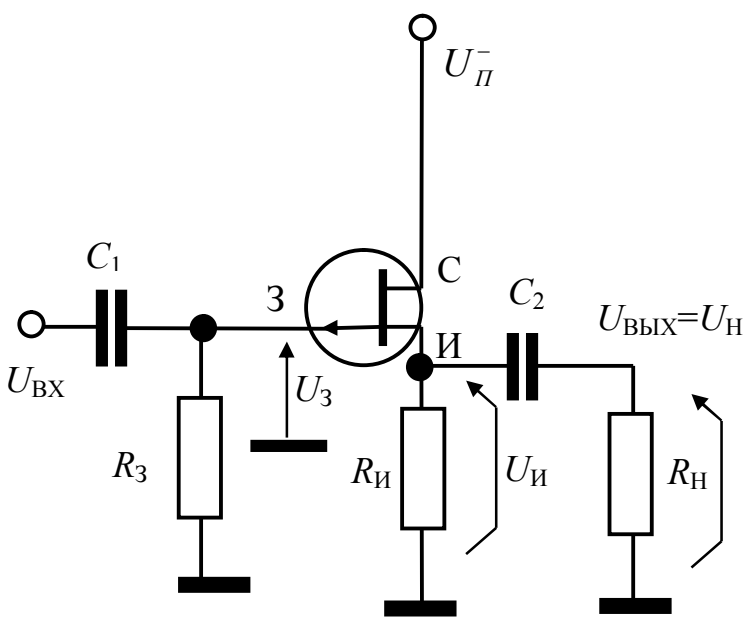


Рис. 2.29. Задание 14. Усилительный каскад на полевом транзисторе. Определить K_U , $R_{ВХ}$, $R_{ВЫХ}$, $U_{И}^0$, U_3^0 . Построить диаграммы сигналов, построить ЛАЧХ



$U_{II}^+ = +15 \text{ В}$ $U_0 = -3 \text{ В}$
 $I_S = 10 \text{ мА}$ $I_C^0 = 5 \text{ мА}$
 $C_1 = 0,1 \text{ нФ}$
 $C_2 = 10 \text{ мк}$
 $R_3 = 2,0 \text{ Мом}$
 $R_H = 10 \text{ к}$
 $U_{ВХ} = 0,5 \text{ В (sin сигнал)}$

Рис. 2.30. Задание 15. Усилительный каскад на полевом транзисторе. Определить K_U , $R_{ВХ}$, $R_{ВЫХ}$, U_{II}^0 , U_3^0 . Построить диаграммы сигналов, построить ЛАЧХ.



$U_{II}^- = -15 \text{ В}$ $U_0 = +3 \text{ В}$
 $I_S = 8 \text{ мА}$ $I_C^0 = 4 \text{ мА}$
 $C_1 = 0,1 \text{ нФ}$
 $C_2 = 10 \text{ мк}$
 $R_3 = 2,0 \text{ Мом}$
 $R_H = 20 \text{ к}$
 $U_{ВХ} = 0,5 \text{ В (sin сигнал)}$

Рис. 2.31. Задание 16. Усилительный каскад на полевом транзисторе. Определить K_U , $R_{ВХ}$, $R_{ВЫХ}$, U_{II}^0 , U_3^0 . Построить диаграммы сигналов, построить ЛАЧХ.

2.6. Вопросы для тестирования при самопроверке

1. Чем отличается конструкция полевого транзистора от конструкции биполярного транзистора?
2. Чем отличается конструкция полевого транзистора с р-n переходом от конструкции транзистора с изолированным затвором?
3. Чем отличается конструкция полевого МОП транзистора с индуцированным каналом от конструкции полевого транзистора с встроенным каналом?
4. Каковы основные преимущества усилительных каскадов на базе полевого транзистора по сравнению с усилительными каскадами на базе биполярного транзистора?
5. Что такое коэффициент усиления по напряжению?
6. Что такое входное сопротивление усилителя?
7. Что такое выходное сопротивление усилителя?
8. Чем определяется выходное сопротивление усилителя?
9. Что произойдет, если частота входного сигнала не будет соответствовать частотной характеристике усилителя?
10. Какое включение транзистора применено в исследуемом усилителе?
11. Как изменится входное сопротивление усилителя при уменьшении вдвое усиливаемого сигнала в пределах линейного диапазона?
12. Как изменится выходное сопротивление усилителя при увеличении вдвое усиливаемого сигнала в пределах линейного диапазона?
13. Как изменится коэффициент усиления усилителя при увеличении вдвое усиливаемого сигнала в пределах линейного диапазона усилителя?
14. Что изменится при превышении сигнала линейного диапазона усилителя?
15. Какого типа транзистор использован в исследуемом каскаде?

Заключение

Схемотехника усилительных каскадов определена на примерах наиболее распространенных схем усиления на базе биполярных транзисторов с общим эмиттером, общей базой, общим коллектором, а также на базе полевых транзисторов с общим истоком и общим стоком. Используемые в пособии методы достаточно просты и позволяют определить параметры схем с точностью, достаточной для инженерной практики. Эти методы могут быть использованы для анализа режимов и определения основных параметров вариантов контрольных заданий, приведенных отдельно для каскадов на биполярных транзисторах, и каскадов на полевых транзисторах. Используемые в пособии расчетные соотношения не требуют значительных вычислительных ресурсов для их реализации, в большинстве случаев является достаточным использование простого калькулятора, и в отдельных случаях – распространенного компьютерного математического редактора типа Mathcad. Выполнение контрольных работ и/или курсового проектирования на базе приведенных в пособии контрольных заданий позволит углубить знания студентов в области электроники и будет способствовать закреплению практических навыков в схемотехническом проектировании усилительных каскадов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Валенко В.С. Полупроводниковые приборы и основы схемотехники электронных устройств. – М.: Додэка – 21, 2001. – 366 с.
2. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники. Изд-во 2-е. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2000. – 488 с.
3. Справочник по полупроводниковым диодам и транзисторам / Под ред. Н.Н. Горюнова. – М.: Энергия, 1970. – 744 с.
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учебник. Изд. 11-е. – М.: УИЦ «Гардарики», 2006. – 701 с.
5. Ланге П.К., Васильчук А.В. Анализ характеристик простейших цепей: Учеб. пособие к самостоятельной работе и практическим занятиям; ч.1. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2007. – 71 с.
6. Гусев В.Г. Электроника и микропроцессорная техника: Учеб./ В.Г.Гусев, Ю.М.Гусев.- 3-е изд., перераб. и доп.- М.: Высш.шк., 2005.- 790 с.
7. Джонс М. Электроника - практический курс: Пер.с англ..- 2-е изд.,испр..- М.: Техносфера, 2006.- 510 с.
8. Опадчий Ю.Ф. Аналоговая и цифровая электроника: Полн.курс: Учеб./ Ю.Ф.Опадчий, О.П.Глудкин, А.И.Гуров. - М.: Горячая линия -Телеком, 2005.- 768 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| Предисловие..... | 3 |
| Введение..... | 3 |
| 1. Схемотехника усилительных каскадов на базе биполярного транзистора..... | 4 |
| 1.1. Основы теории работы транзистора..... | 4 |
| 1.2. Транзисторный усилительный каскад с включением транзистора с общим эмиттером (ОЭ)..... | 7 |
| 1.3. Транзисторный усилительный каскад с включением транзистора с общей базой (ОБ)..... | 16 |
| 1.4. Транзисторный усилительный каскад с включением транзистора с общим коллектором (ОК)..... | 19 |
| 1.5. Частотные характеристики транзисторных усилительных каскадов..... | 23 |
| 1.6. Пример расчета усилительного каскада..... | 30 |
| 1.7. Характеристики биполярных транзисторов..... | 33 |
| 1.8. Варианты схем усилителей на базе биполярных транзисторов для заданий на проектирование..... | 34 |
| 1.9. Вопросы для самотестирования при проверке..... | 49 |
| 2. Схемотехника усилительных каскадов на базе полевого транзистора..... | 50 |
| 2.1. Конструкции полевых транзисторов..... | 50 |
| 2.2. Характеристики полевых транзисторов и параметры малого сигнала..... | 55 |
| 2.3. Усилительный каскад с включением транзистора с общим истоком..... | 61 |
| 2.4. Усилительный каскад с включением транзистора с общим стоком..... | 63 |
| 2.5. Варианты схем усилителей на базе полевых транзисторов для заданий на проектирование..... | 67 |
| 2.6. Вопросы для самотестирования при проверке..... | 75 |
| Заключение..... | 76 |
| Библиографический список..... | 77 |

Проектирование транзисторных усилительных каскадов

Составитель: *ЛАНГЕ Петр Константинович*

Редактор *Ю.А. Петропольская*

Верстка *И.О. Миняева*

Выпускающий редактор *Н.В. Беганова*

Подписано в печать.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная.

Усл. п. л.. Уч.-изд. л..

Тираж 50 экз. Рег. №.

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Самарский государственный технический университет»
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Главный корпус

Отпечатано в типографии
Самарского государственного технического университета
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. Корпус №8