

ИНДИВИДУАЛЬНАЯ ПРАКТИЧЕСКАЯ РАБОТА №1

Методические указания к задаче №1 Расчет характеристик малосигнальных усилительных каскадов на биполярных транзисторах

Малосигнальные усилительные каскады (каскады предварительного усиления) предназначены для повышения амплитуды напряжения и тока входного сигнала до уровня, при котором обеспечивается работоспособность выходного каскада (усилителя мощности). Поэтому их основными параметрами являются коэффициенты усиления по напряжению и току, входное и выходное сопротивление, полоса пропускания, коэффициент частотных искажений, а основными характеристиками — амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) и фазочастотная характеристика (ФЧХ). Такие параметры, как выходная мощность и КПД, не являются первостепенными.

Коэффициент усиления или коэффициент передачи — отношение амплитудного или действующего значения выходного сигнала к амплитудному или действующему значению входного сигнала в установившемся режиме при гармоническом входном сигнале. Различают коэффициент усиления по напряжению $K_u = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$ и коэффициент

усиления по току $K_i = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}}$. Часто коэффициенты усиления выражают в

логарифмических единицах — децибелах (дБ): $K_u = 20 \lg \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$ и

$K_i = 20 \lg \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}}$. Удобно пользоваться логарифмическими единицами для

описания многокаскадного усилителя, коэффициент усиления которого равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов или сумме их логарифмических коэффициентов усиления.

Полоса пропускания (полоса усиливаемых частот) — диапазон частот от нижней граничной частоты f_n до верхней граничной частоты f_v , в пределах которой коэффициент усиления изменяется по определенному закону с заданной точностью $\Delta f = f_v - f_n$.

Входное сопротивление усилителя (полное $Z_{\text{ВХ}}$ или резистивное $R_{\text{ВХ}}$) представляет собой сопротивление между входными зажимами усилителя и определяется отношением входного напряжения к входному току $Z_{\text{ВХ}} = \dot{U}_{\text{ВХ}} / \dot{I}_{\text{ВХ}}$.

Выходное сопротивление (полное $Z_{\text{ВЫХ}}$ или резистивное $R_{\text{ВЫХ}}$) представляет собой сопротивление между выходными зажимами

усилителя и определяется как отношение выходного напряжения к выходному току $Z_{\text{вых}} = \dot{U}_{\text{вых}} / \dot{I}_{\text{вых}}$ при отключенной нагрузке.

Характер входного и выходного сопротивлений усилителя зависит от частоты усиливаемого сигнала. В полосе пропускания их можно считать чисто активными.

Коэффициент усиления в общем случае — комплексная величина, поскольку наличие реактивных элементов в принципиальной схеме усилителя и инерционных свойств активного элемента приводят к появлению фазового сдвига между выходным и входным сигналами. В полосе пропускания коэффициент передачи можно рассматривать как действительную величину.

Амплитудно-частотная характеристика определяет зависимость модуля коэффициента усиления от частоты гармонического сигнала на входе усилителя.

Фазочастотная характеристика — зависимость угла сдвига фазы между выходным и входным напряжениями от частоты.

Идеальный усилитель должен иметь бесконечно большую полосу пропускания, т.е. его коэффициент усиления должен оставаться одинаковым для всех частот.

Коэффициент частотных искажений численно равен отношению коэффициента усиления на средней частоте полосы пропускания к коэффициенту усиления на границах рабочего диапазона:

$$M_H(f) = \frac{K_0}{K_H(f)}; \quad M_H(f)[\text{дБ}] = 20 \lg \left(\frac{K_0}{K_H(f)} \right); \quad (7.1)$$

$$M_B(f) = \frac{K_0}{K_B(f)}; \quad M_B(f)[\text{дБ}] = 20 \lg \left(\frac{K_0}{K_B(f)} \right). \quad (7.2)$$

Таким образом, коэффициент частотных искажений характеризует степень отличия АЧХ реального усилителя от АЧХ идеального. Обычно, если к усилителю не предъявляют особых требований, то на граничных частотах полосы пропускания (f_H и f_B) коэффициент частотных искажений имеет значение 3 дБ ($\sqrt{2}$ раз). При вычислении M обычно в качестве K_0 принимают коэффициент усиления на частоте $f_0 = \sqrt{f_H f_B}$.

Для многокаскадного усилителя коэффициент частотных искажений определяется произведением коэффициентов частотных искажений отдельных каскадов

$$M(f) = M_1(f) \cdot M_2(f) \dots M_N(f), \quad (7.3)$$

выраженных в раз, или суммой

$$M(f)[\text{дБ}] = M_1(f)[\text{дБ}] + M_2(f)[\text{дБ}] + \dots + M_N(f)[\text{дБ}], \quad (7.4)$$

если они выражены в децибелах.

Анализ малосигнальных усилительных каскадов на БТ с различными схемами включения (ОЭ, ОБ, ОК) показывает существенное отличие их основных параметров и характеристик. Анализ таких усилителей обычно производят с использованием малосигнальных эквивалентных схем БТ согласно следующему алгоритму.

1. По принципиальной схеме усилительного каскада на основе малосигнальной эквивалентной схемы БТ для соответствующей схемы включения составляется эквивалентная схема усилителя для переменного сигнала. При этом полагают, что источник питания усилителя для переменного сигнала имеет сопротивление равное нулю, поскольку обычно параллельно выходу источника питания подключен конденсатор достаточно большой емкости.

2. Производится преобразование эквивалентной схемы к виду, удобному для анализа. При преобразовании параллельных активных и реактивных сопротивлений можно пренебречь сопротивлениями, значения которых в 10...100 раз больше. При преобразовании последовательных сопротивлений можно пренебрегать сопротивлениями, значения которых в 10...100 раз меньше.

3. По эквивалентной схеме составляются уравнения для интересующих параметров. Анализ полученных уравнений позволяет определить зависимости параметров от частоты, температуры и т.д.

4. Часто для облегчения анализа эквивалентные схемы составляют отдельно для диапазона низких, средних и высоких частот.

Анализ усилительного каскада на БТ с ОЭ. Принципиальная схема усилителя на БТ с ОЭ с эмиттерной стабилизацией рабочей точки показана на рис. 7.1. Полная эквивалентная схема усилителя представлена на рис. 7.2, а упрощенные эквивалентные схемы для области средних (СЧ), низких (НЧ) и высоких (ВЧ) частот на рис. 7.3–7.5 соответственно. На рис. 7.2–7.5 сопротивление R_6 определяется сопротивлениями параллельно включенных резисторов R_1 и R_2 : $R_6 = R_1 || R_2 = R_1 \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$.

Обычно емкости конденсаторов C_1 , C_2 и C_3 (см. рис. 7.1) имеют большие значения (десятки–сотни микрофард), а емкости эквивалентной схемы БТ $C_{эп}$, C_k^* (см. рис. 7.2) — малые значения (десятки–сотни пикофард). Емкость нагрузки C_n , обычно это входная емкость транзистора следующего усилительного каскада, также имеет малое значение. Поэтому в эквивалентной схеме для области СЧ (см. рис. 7.3) отсутствуют реактивные элементы. Реактивные сопротивления емкостей C_1 и C_2 значительно меньше последовательно включенных с ними сопротивлений эквивалентной схемы. Реактивное сопротивление конденсатора C_3 оказывается много меньше сопротивления резисторов R_3

и r_3 , поэтому исчезают C_3 и R_3 . Реактивные сопротивления емкостей переходов $C_{3п}$, C_K^* и емкости нагрузки C_H оказываются много больше сопротивлений параллельно включенных с ними резисторов. Таким образом, в области СЧ коэффициент усиления по напряжению, входное и выходное сопротивления усилителя можно считать действительными величинами, не зависящими от частоты входного сигнала.

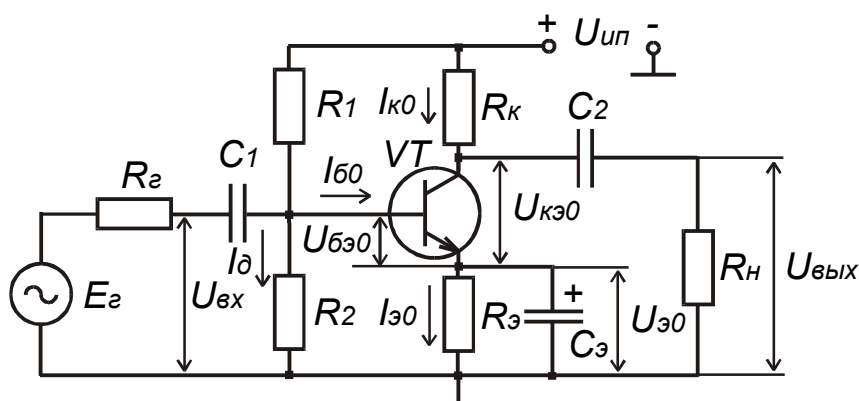


Рис. 7.1

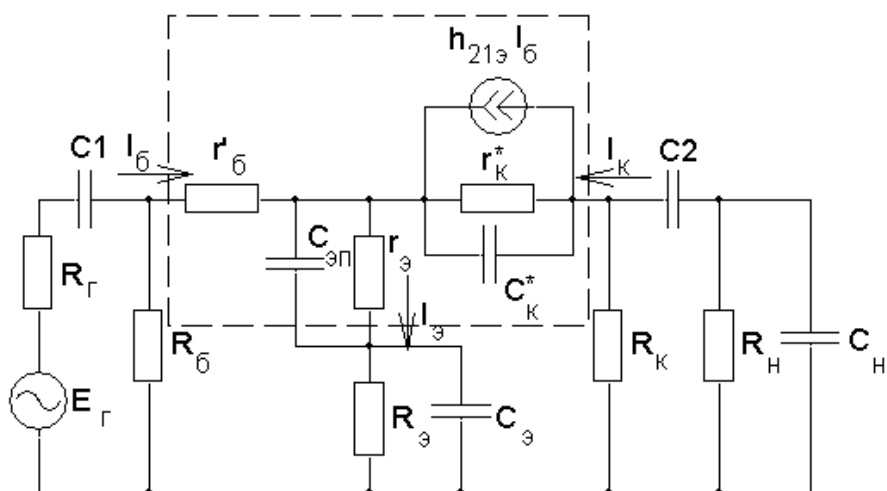


Рис. 7.2

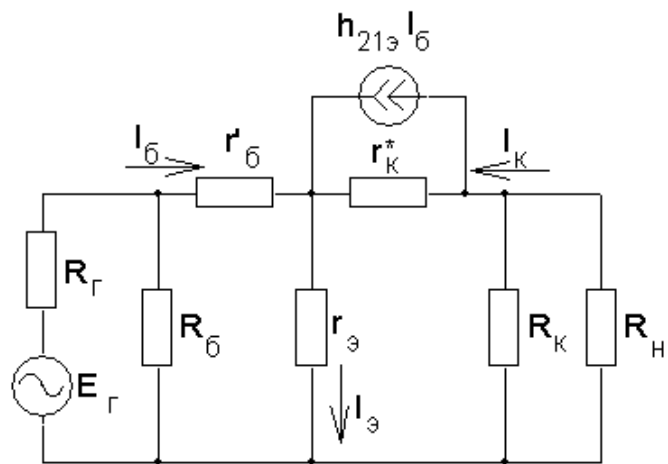


Рис. 7.3

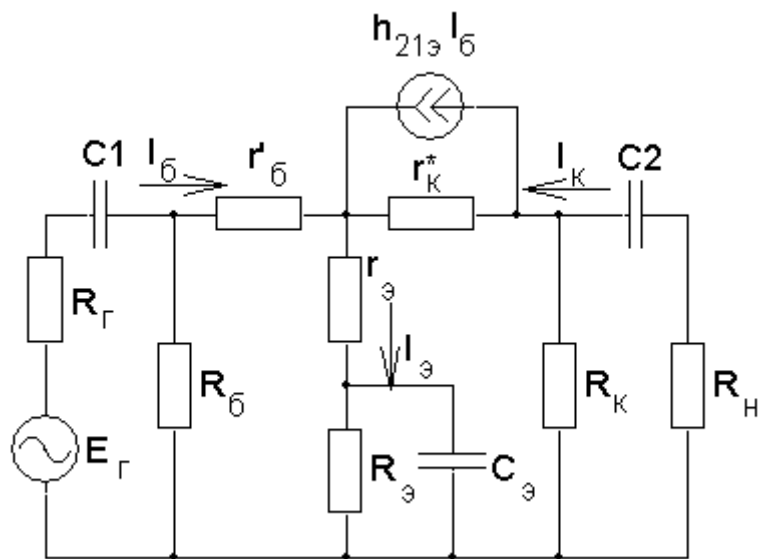


Рис. 7.4

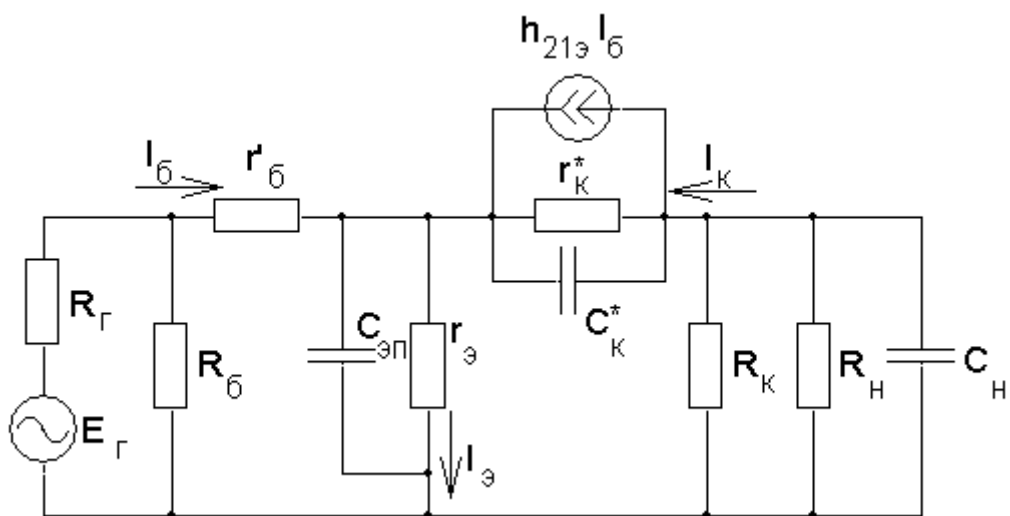


Рис. 7.5

Коэффициент усиления по току каскада на БТ с ОЭ определяется соответствующим дифференциальным параметром транзистора $h_{21э}$,

который в полосе пропускания усилителя можно считать постоянным и равным статическому коэффициенту усиления по току:

$$K_i = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}} = \frac{I_{\text{Н}}}{I_{\text{Б}}} = \frac{I_{\text{К}} R_{\text{К}}}{I_{\text{Б}}(R_{\text{К}} + R_{\text{Н}})} = \frac{h_{21Э} R_{\text{К}}}{R_{\text{К}} + R_{\text{Н}}} \approx \frac{h_{21Э} R_{\text{К}}}{R_{\text{К}} + R_{\text{Н}}}. \quad (7.5)$$

Для коэффициента усиления по напряжению можно записать

$$K_u = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = - \frac{h_{21Э} I_{\text{Б}}(R_{\text{К}} || R_{\text{Н}})}{I_{\text{Б}}(r'_{\text{Б}} + (h_{21Э} + 1)r_{\text{Э}})} = - \frac{h_{21Э}(R_{\text{К}} || R_{\text{Н}})}{r'_{\text{Б}} + (h_{21Э} + 1)r_{\text{Э}}} \approx - \frac{R_{\text{К}} || R_{\text{Н}}}{r_{\text{Э}}}, \quad (7.6)$$

поскольку $r'_{\text{Б}} \ll (h_{21Э} + 1)r_{\text{Э}}$. Знак минус говорит о том, что каскад с ОЭ инвертирует входной сигнал.

При отсутствии конденсатора $C_{\text{Э}}$ коэффициент усиления по напряжению уменьшается

$$K_u = - \frac{h_{21Э}(R_{\text{К}} || R_{\text{Н}})}{r'_{\text{Б}} + (h_{21Э} + 1)(r_{\text{Э}} + R_{\text{Э}})} \approx - \frac{R_{\text{К}} || R_{\text{Н}}}{r_{\text{Э}} + R_{\text{Э}}} \approx - \frac{R_{\text{К}} || R_{\text{Н}}}{R_{\text{Э}}}, \quad (7.7)$$

поскольку в усилителе возникает местная отрицательная обратная связь по переменному току обусловленная резистором $R_{\text{Э}}$.

Наличие конечного значения внутреннего сопротивления источника сигнала $R_{\text{Г}}$ приводит к потерям коэффициента усиления по напряжению, что отражается таким параметром, как **сквозной коэффициент усиления**:

$$K_{\text{у скв}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{E_{\text{Г}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{E_{\text{Г}}} \frac{U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = K_u \frac{U_{\text{ВХ}}}{E_{\text{Г}}} = K_u \frac{R_{\text{ВХ}}}{R_{\text{Г}} + R_{\text{ВХ}}}, \quad (7.8)$$

который всегда меньше, чем K_u , поскольку реально на вход усилителя попадает сигнал $U_{\text{ВХ}} < E_{\text{Г}}$. Чтобы не было потерь в коэффициенте усиления по напряжению, малосигнальный усилитель должен быть **согласован по напряжению** с источником сигнала, т.е. входное сопротивление усилителя должно быть значительно больше внутреннего сопротивления источника сигнала.

Входное сопротивление каскада определяется выражением

$$R_{\text{ВХ}} = R_{\text{Б}} || r_{\text{ВХ Т}}, \quad (7.9)$$

где входное сопротивление транзистора

$$r_{\text{ВХ Т}} = h_{11Э} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{I_{\text{ВХ}}} = \frac{I_{\text{Б}} r'_{\text{Б}} + (h_{21Э} + 1) I_{\text{Б}} r_{\text{Э}}}{I_{\text{Б}}} = r'_{\text{Б}} + (h_{21Э} + 1) r_{\text{Э}}. \quad (7.10)$$

При отсутствии конденсатора $C_{\text{Э}}$ входное сопротивление транзистора увеличивается, поскольку в эквивалентной схеме (см. рис. 7.3) последовательно с дифференциальным сопротивлением эмиттерного перехода $r_{\text{Э}}$ будет включен резистор $R_{\text{Э}}$:

$$r_{\text{ВХ Т}} = r'_{\text{Б}} + (h_{21Э} + 1)(r_{\text{Э}} + R_{\text{Э}}). \quad (7.11)$$

Выходное сопротивление каскада определяется сопротивлением резистора в коллекторной цепи транзистора

$$R_{\text{вых}} = R_K \parallel (r_K^* + r_3) \approx R_K, \text{ т.к. } r_K^* \gg R_K. \quad (7.12)$$

С уменьшением частоты входного сигнала реактивные сопротивления емкостей увеличиваются. В эквивалентной схеме каскада для области НЧ (см. рис. 7.4) необходимо учитывать емкости C_1 , C_2 и C_3 , поскольку на НЧ их реактивные сопротивления становятся соизмеримыми с сопротивлениями последовательно или параллельно включенных резисторов. Емкости переходов транзистора $C_{эп}$, C_K^* и нагрузки C_H ввиду их малости не оказывают влияние на работу усилителя на НЧ. Необходимо отметить, что C_1 вместе с R_r и входным сопротивлением каскада образует фильтр высоких частот (ФВЧ). Аналогичный фильтр образован на выходе каскада элементами C_2 , R_K , R_H . Влияние цепочки R_3 , C_3 на АЧХ каскада аналогично ФВЧ. При уменьшении частоты сигнала коэффициент передачи этих фильтров уменьшается, что приводит к уменьшению коэффициента усиления всего каскада. Граничные частоты фильтров, т.е. значения частоты сигнала на которых коэффициенты передачи уменьшаются в $\sqrt{2}$ раз, определяются выражениями

$$f_{H1} = \frac{1}{2\pi C_1 (R_r + R_{\text{вх}})}, \quad (7.13)$$

$$f_{H2} = \frac{1}{2\pi C_2 (R_{\text{вых}} + R_H)}, \quad (7.14)$$

$$f_{H3} = \frac{1}{2\pi C_3 (R_3 + (R_r \parallel R_6 + r_6') / (h_{21Э} + 1))}, \quad (7.15)$$

а значения коэффициентов частотных искажений, обусловленных фильтрами, на частоте f в области НЧ вычисляются согласно выражению

$$M_{HN}(f) = \sqrt{1 + \left(\frac{f_{HN}}{f} \right)^2}, \quad N=1, 2, 3. \quad (7.16)$$

Общее значение коэффициента частотных искажений усилительного каскада на некоторой частоте f в области НЧ определяется согласно (7.3) или (7.4) в зависимости от размерности. Нижняя граничная частота полосы пропускания усилителя f_H будет больше максимальной из f_{H1} , f_{H2} , f_{H3} :

$$f_H \geq \max(f_{H1}, f_{H2}, f_{H3}). \quad (7.17)$$

При увеличении частоты входного сигнала реактивные сопротивления емкостей уменьшаются. В эквивалентной схеме каскада для области ВЧ (см. рис. 7.5) учитываются емкости переходов

транзистора $C_{\text{эп}}$, $C_{\text{к}}^*$ и нагрузки $C_{\text{н}}$, поскольку на ВЧ их реактивные сопротивления становятся соизмеримыми с сопротивлениями последовательно или параллельно включенных резисторов. Разделительные конденсаторы C_1 , C_2 и шунтирующий конденсатор C_3 на ВЧ, как и в области средних частот, имеют близкое к нулю реактивное сопротивление и не оказывают влияние на работу усилителя.

Конденсатор $C_{\text{к}}^*$ может быть пересчитан во входную цепь транзистора, при этом он оказывается включенным параллельно конденсатору $C_{\text{эп}}$ и его эквивалентная емкость увеличивается в $K_{\text{у}} + 1$ раз, поскольку заряд $C_{\text{к}}^*$ происходит напряжением $U_{\text{вх}}(K_{\text{у}} + 1)$

$$C_{\text{к экв}}^* = (K_{\text{у}} + 1)C_{\text{к}}^*. \quad (7.18)$$

Такое увеличение емкости обратной связи в схеме с ОЭ называется эффектом Миллера, по фамилии ученого, который осуществил такой пересчет емкости во входную цепь. С ростом частоты входного сигнала в области ВЧ происходит уменьшение коэффициента усиления по напряжению. Конденсатор $C_{\text{эп}}$ и пересчитанный во входную цепь $C_{\text{к экв}}^*$ образуют вместе с внутренним сопротивлением источника сигнала $R_{\text{Г}}$ и входным сопротивлением транзистора $R_{\text{вх}}$ фильтр низких частот (ФНЧ). Еще один ФНЧ образован выходным сопротивлением каскада $R_{\text{вых}}$, сопротивлением нагрузки $R_{\text{н}}$ и конденсатором нагрузки $C_{\text{н}}$. Кроме того, на форму АЧХ в области ВЧ влияет комплексный характер коэффициента передачи по току $h_{21э}$ и уменьшение его модуля с ростом частоты. С учетом вышесказанного для верхней граничной частоты полосы пропускания усилителя $f_{\text{в}}$ можно записать

$$f_{\text{в}} \leq \min(f_{\text{в1}}, f_{\text{в2}}, f_{\text{в3}}), \quad (7.19)$$

$$\text{где } f_{\text{в1}} = \frac{1}{2\pi(R_{\text{Г}} \parallel R_{\text{вх}})(C_{\text{эп}} + C_{\text{к экв}}^*)}; \quad (7.20)$$

$$f_{\text{в2}} = \frac{1}{2\pi(R_{\text{н}} \parallel R_{\text{вых}})C_{\text{н}}}; \quad (7.21)$$

$$f_{\text{в3}} = f_{h_{21э}}. \quad (7.22)$$

Значения коэффициентов частотных искажений, обусловленных наличием рассмотренных фильтров нижних частот, на некоторой частоте f в области ВЧ вычисляются согласно выражению

$$M_{\text{вN}}(f) = \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{\text{вN}}}\right)^2}, \quad N=1, 2, 3. \quad (7.23)$$

Каскад на БТ с ОЭ характеризуется следующими типовыми значениями параметров: коэффициент усиления по току — десятки–сотни раз; коэффициент усиления по напряжению — десятки–сотни раз (единицы–десятки раз при отсутствии конденсатора C_3); входное сопротивление — десятые доли–единицы килоом (единицы–десятки килоом при отсутствии конденсатора C_3); выходное сопротивление — десятые доли–единицы килоом.

Анализ усилительного каскада на БТ с ОБ. Принципиальная схема усилителя на БТ с ОБ с эмиттерной стабилизацией рабочей точки показана на рис. 7.6, а полная эквивалентная схема усилителя представлена на рис. 7.7. Проведя анализ данной схемы для области средних частот, НЧ и ВЧ согласно приведенному выше алгоритму, можно получить выражения для основных параметров усилителя на БТ с ОБ, которые приведены в табл. 7.1.

Анализ выражений (см. табл. 7.1) показывает, что параметры усилителя на БТ с ОБ существенно отличаются от параметров каскада на БТ с ОЭ: фаза сигнала на выходе совпадает с фазой сигнала на входе; коэффициент усиления по току — меньше единицы; коэффициент усиления по напряжению — десятки–сотни раз; входное сопротивление — десятки–сотни ом; выходное сопротивление — десятые доли–единицы килоом.

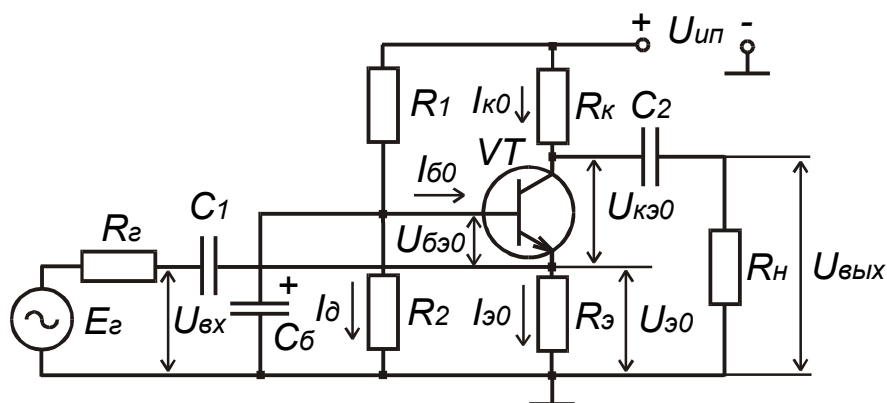


Рис. 7.6

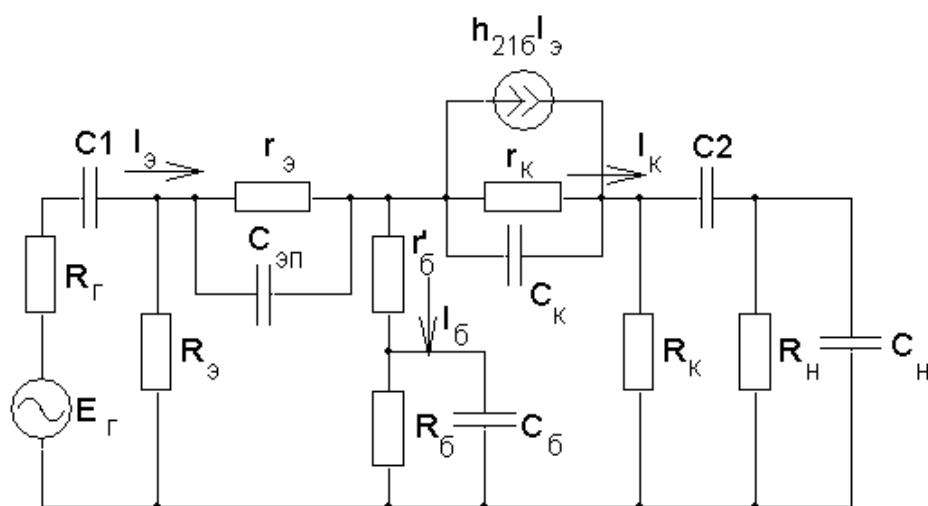


Рис. 7.7

В данной схеме влияние эффекта Миллера не столь значительно влияет на АЧХ в области ВЧ, поскольку на вход пересчитывается емкость коллекторного перехода:

$$C_{к экв} = (K_u + 1)C_k. \quad (7.24)$$

Значение предельной частоты транзистора в схеме с ОБ $f_{h21б}$ много больше, чем в схеме с ОЭ $f_{h21э}$, поэтому **каскад на БТ с ОБ оказывается наиболее высокочастотным.**

Анализ усилительного каскада на БТ с ОК (эмиттерный повторитель). Принципиальная схема усилителя на БТ с ОК с эмиттерной стабилизацией рабочей точки показана на рис. 7.8, а полная эквивалентная схема усилителя представлена на рис. 7.9. Анализ данной схемы для области средних частот, НЧ и ВЧ согласно приведенному выше алгоритму позволил получить выражения для основных параметров эмиттерного повторителя (ЭП), которые приведены в табл. 7.1.

Своим названием эмиттерный повторитель обязан следующему свойству — напряжение на его выходе практически повторяет входное напряжение, т.е. коэффициент усиления по напряжению незначительно ниже единицы, а фаза выходного сигнала в полосе пропускания равна фазе входного сигнала. Другой отличительной особенностью данного каскада является высокое входное сопротивление и низкое выходное. Поэтому основное назначение ЭП — согласование по напряжению источника сигнала, имеющего высокое внутреннее сопротивление, с низкоомной нагрузкой. При включении ЭП между источником сигнала и нагрузкой не происходит значительного снижения коэффициента усиления по напряжению, поскольку его входное сопротивление достаточно велико. Анализ выражений (см. табл. 7.1) показывает, что параметры ЭП отличаются от параметров каскадов на БТ с ОЭ и ОБ: фаза сигнала на выходе совпадает с фазой сигнала на входе; коэффициент усиления по току — десятки–сотни раз; коэффициент усиления по напряжению — меньше единицы; входное сопротивление — десятки–сотни килоом; выходное сопротивление — единицы–десятки ом.

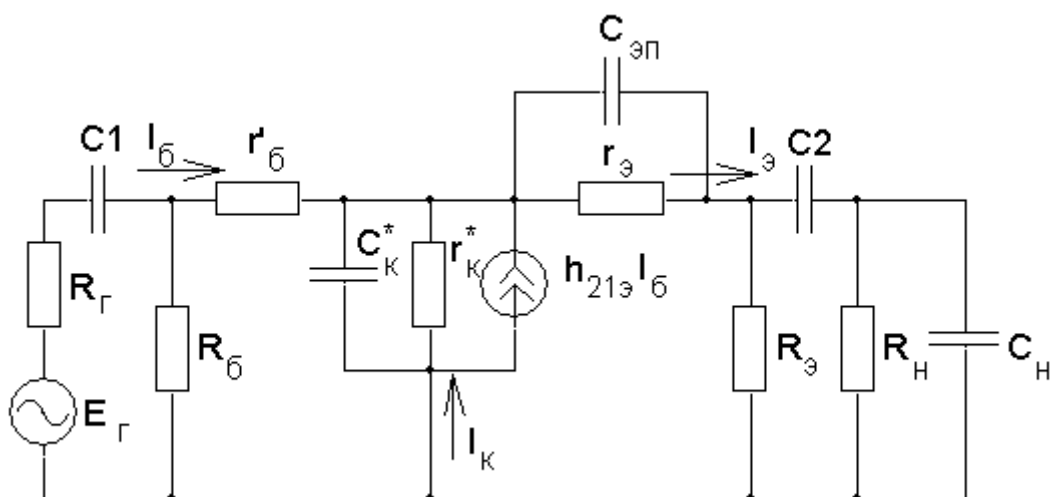


Рис. 7.9

Таблица 7.1

Расчетные соотношения для основных параметров усилительного каскада на БТ, включенного по схеме с ОБ и ОК

Параметр	Схема с ОБ	Схема с ОК
$r_{\text{вх Т}}$	$h_{11\text{Б}} = r_{\text{э}} + (1 - h_{21\text{Б}})r_{\text{б}}$	$r'_{\text{б}} + (r_{\text{э}} + R_{\text{э}} \parallel R_{\text{Н}})(h_{21\text{Э}} + 1)$
$R_{\text{вх}}$	$R_{\text{э}} \parallel r_{\text{вх Т}}$	$R_{\text{б}} \parallel r_{\text{вх Т}}$
$R_{\text{вых}}$	$R_{\text{к}}$	$R_{\text{э}} \parallel \left(r_{\text{э}} + \frac{r'_{\text{б}} + R_{\text{Г}} \parallel R_{\text{б}}}{1 + h_{21\text{Э}}} \right)$
K_i	$\frac{h_{21\text{Б}} R_{\text{к}}}{R_{\text{к}} + R_{\text{Н}}}$	$\frac{(1 + h_{21\text{Э}}) R_{\text{э}}}{R_{\text{э}} + R_{\text{Н}}}$
K_u	$h_{21\text{Б}} \frac{R_{\text{к}} \parallel R_{\text{Н}}}{R_{\text{э}} \parallel r_{\text{вх Т}}}$	$\frac{(1 + h_{21\text{Э}})(R_{\text{э}} \parallel R_{\text{Н}})}{R_{\text{вх}}}$
$f_{\text{Н}}$	$\frac{1}{2\pi C1(R_{\text{Г}} + R_{\text{вх}})}$ $\frac{1}{2\pi C2(R_{\text{вых}} + R_{\text{Н}})}$ $\frac{1}{C_{\text{б}} R_{\text{б}}}$	$\frac{1}{2\pi C1(R_{\text{Г}} + R_{\text{вх}})}$ $\frac{1}{2\pi C2(R_{\text{вых}} + R_{\text{Н}})}$
$f_{\text{В}}$	$\frac{1}{2\pi(R_{\text{Г}} \parallel R_{\text{вх}})(C_{\text{ЭП}} + C_{\text{к экв}})}$ $\frac{1}{2\pi(R_{\text{Н}} \parallel R_{\text{вых}})C_{\text{Н}}}$ $f_{h21\text{б}}$	$\frac{1}{2\pi(R_{\text{Г}} \parallel R_{\text{вх}})C_{\text{к}}^*}$ $\frac{1}{2\pi(R_{\text{Г}} \parallel R_{\text{вх}})C_{\text{э}}}$ $\frac{1}{2\pi(R_{\text{Н}} \parallel R_{\text{вых}})C_{\text{Н}}}$ $f_{h21\text{э}}$

Порядок расчета малосигнального усилителя на БТ, включенного по схеме с ОЭ или ОБ, с эмиттерной стабилизацией рабочей точки. Обычно исходными данными при расчета малосигнальных усилителей является напряжение коллектор-эмиттер $U_{\text{кэ0}}$

и ток коллектора $I_{к0}$ в рабочей точке. В справочниках обычно приводятся значения параметров БТ (коэффициенты усиления по току, емкости переходов, частотные параметры, коэффициент шума) для рекомендуемого режима работы по постоянному току, при котором проводилось измерение этих параметров.

1. Для обеспечения стабилизации рабочей точки падение напряжения на резисторе $R_э$ (потенциал эмиттера) можно выбрать из условия

$$U_{э0} = I_{э0}R_э = 0,2U_{кэ0}, \quad (7.25)$$

а напряжение питания $U_{ип}$ выбирается согласно выражению

$$U_{ип} = 2U_{кэ0} + U_{э0} = I_{к0}R_к + U_{кэ0} + U_{э0} \quad (7.26)$$

для обеспечения максимального значения амплитуды неискаженного выходного сигнала.

2. Сопротивления резисторов $R_э$ и $R_к$ находим по выражениям

$$R_к = (U_{ип} - U_{кэ0} - U_{э0})/I_{к0}; \quad (7.27)$$

$$R_э = U_{э0}/I_{э0} \approx U_{э0}/I_{к0}, \text{ т.к. можно принять } I_{э0} \approx I_{к0}. \quad (7.28)$$

3. Находим ток базы

$$I_{б0} = I_{к0}/h_{21э} \quad (7.29)$$

и потенциал базы транзистора

$$U_{б0} = U_{бэ0} + U_{э0}, \quad (7.30)$$

где напряжение база — эмиттер в рабочей точке для кремниевого транзистора можно принять $U_{бэ0} = 0,6 \text{ В}$.

4. Для обеспечения работоспособности схемы стабилизации задаемся током делителя напряжения, образованного резисторами $R1$ и $R2$, в десять раз больше тока базы:

$$I_д = 10 \cdot I_{б0}. \quad (7.31)$$

5. Находим сопротивления $R1$ и $R2$:

$$R1 = (U_{ип} - U_{б0})/(I_д + I_{б0}); \quad (7.32)$$

$$R2 = U_{б0}/I_д. \quad (7.33)$$

6. Емкости конденсаторов находим из условий

$$C1 > \frac{10}{2\pi f_H (R_г + R_{вх})}; \quad (7.34)$$

$$C2 > \frac{10}{2\pi f_H (R_{вых} + R_н)}; \quad (7.35)$$

$$C_э > \frac{10}{2\pi f_H R_э}; \quad (7.36)$$

$$C_б > \frac{10}{2\pi f_H R_б}, \quad (7.37)$$

при выполнении которых значение коэффициента усиления по напряжению на нижней граничной частоте f_H уменьшается не более чем в $\sqrt{2}$ раз.

Порядок расчета эмиттерного повторителя. Обычно исходными данными являются напряжение источника сигнала E_G , его внутреннее сопротивление R_G , сопротивление нагрузки R_H и напряжение источника питания $U_{ип}$.

1. Вычисляем максимально возможное значение амплитуды тока нагрузки, соответствующее идеальному согласованию, когда $U_{вых} = E_G$:

$$I_H = \frac{U_{вых}}{R_H}. \quad (7.38)$$

2. Выбираем рабочую точку БТ:

$$I_{э0} \approx 1,3 \cdot I_H; \quad (7.39)$$

$$U_{кэ0} = U_{э0} = I_{э0} R_э = U_{ип} / 2. \quad (7.40)$$

Если $I_H < 2 \text{ мА}$, то необходимо задаться током покоя эмиттера $I_{э0} = 2 \text{ мА}$. Можно считать, что $I_{к0} \approx I_{э0}$.

3. Расчет элементов принципиальной схемы ЭП проводим согласно выражениям (7.28)–(7.35).

Порядок выполнения задания

1. В зависимости от варианта задания выполнить инженерный расчет усилительного каскада на БТ с ОЭ (ОБ, ОК) (см. рис. 7.1, 7.6, 7.8), который должен обеспечить усиление в полосе частот от $f_H = 20 \text{ Гц}$ до $f_B = 20 \text{ кГц}$. Исходные данные для расчета приведены в табл. 7.2, 7.3, 7.4. Параметры транзисторов приведены в прил. 2. Результаты расчета требуемого режима покоя и значения элементов принципиальной схемы усилителя свести в таблицы.

2. По результатам расчета элементов принципиальной схемы усилителя провести расчет основных параметров усилительного каскада. Для каскада на БТ с ОЭ расчет проводить согласно выражениям (7.5)–(7.23), для каскадов на БТ с ОБ и ОК — согласно выражениям в табл. 7.1 и (7.16), (7.17), (7.19), (7.23). Вычислить общее значение коэффициента частотных искажений на нижней граничной частоте f_H , указанной в исходных данных, согласно (7.3). Аналогично вычислить общее значение коэффициента частотных искажений на верхней граничной частоте f_B , определенной согласно (7.19). Результаты расчетов свести в таблицу.

Таблица 7.2

Исходные данные для расчета каскада с ОЭ

№ варианта	Тип БТ	$U_{кэ0}$, В	I_K , мА	E_G , мВ	R_G , Ом	R_H , кОм	C_H , нФ
---------------	--------	------------------	---------------	---------------	---------------	----------------	---------------

01	КТ 315Г	5	5	1	100	5	0,1
02	КТ 337Б	6	6	5	200	2	0,2
03	КТ 342А	8	8	2	50	4	0,05
04	КТ 347А	5	4	10	150	6	0,3
05	КТ 349Б	9	3	3	200	10	0,1
06	КТ 358Б	10	5	4	300	8	0,15
07	КТ 361Б	6	9	7	100	5	0,05
08	КТ 3102А	9	8	0,5	50	4	0,1
09	КТ 3107А	12	7	5	200	5	0,2
10	КТ 3117А	10	4	6	300	10	0,25

Таблица 7.3

Исходные данные для расчета каскада с ОБ

№ варианта	Тип БТ	$U_{кЭ0},$ В	$I_{к},$ мА	$E_{Г},$ мВ	$R_{Г},$ кОм	$R_{н},$ кОм	$C_{н},$ нФ
01	КТ 315Г	5	5	1	1	5	0,1
02	КТ 337Б	6	6	5	2	2	0,2
03	КТ 342А	8	8	2	5	4	0,05
04	КТ 347А	5	4	10	1,5	6	0,3
05	КТ 349Б	9	3	3	2	10	0,1
06	КТ 358Б	10	5	4	3	8	0,15
07	КТ 361Б	6	9	7	1	5	0,05
08	КТ 3102А	9	8	0,5	5	4	0,1
09	КТ 3107А	12	7	5	2	5	0,2
10	КТ 3117А	10	4	6	3	10	0,25