

Тема 2.

Расчет усилительного каскада на биполярном транзисторе.

Задачей данного варианта курсовой работы является овладение методикой расчета усилительного каскада по схеме с общим эмиттером на биполярном транзисторе по постоянному и переменному току с учетом температурной стабилизации усилительного каскада. Принципы работы и схемы построения усилительных каскадов изложены в литературе [5], [6], а методика и порядок расчета приведены в [7]. Параметры заданного типа транзистора и бланк индивидуального задания (номер варианта) приведены соответственно в приложениях 2 и 3.

Требования к оформлению:

1. Пояснительная записка должна быть выполнена на листах формата А4, компьютерный набор: шрифт **Times New Roman**, 12, интервал – 1,5.
2. Бланк индивидуального задания необходимо поместить на первой странице пояснительной записки.
3. Схемы и графики должны быть выполнены в соответствии с ГОСТ и ЕСКД.

Литература.

1. Р. Кофлин, Ф. Дрискол. Операционные усилители и линейные интегральные схемы. Издательство «Мир», М., 1979.
2. Библиотека электронных компонентов. №5. Термисторы фирмы Siemens и Matsushita. Додека, 1999.
3. Б. И. Горошков, А. Б. Горошков. Электронная техника. М. «Академия», 2008 г.
4. И.И. Сидоров. Малогабаритные трансформаторы и дроссели.
5. Л.А. Пигарев. Конспект лекций по дисциплине «Электроника» при подготовке бакалавра по направлению 110800.62 – «Агроинженерия», (заочная форма обучения).
6. Ю.С. Забродин. Промышленная электроника. «Высшая школа», М., 1982.
7. Электроника. Методические указания по изучению дисциплины и задание для контрольной работы (студентам заочникам). М., 1985.

Параметры биполярных транзисторов и их входные и выходные характеристики
ГТ308Б

Транзистор сплавно-диффузионного типа, проводимость р-п-р.

Обратный ток коллектора при температуре T_0 °К $I_{K0} = 5$ мкА.

Постоянная времени цепи обратной связи на предельной высокой частоте $\tau_k = 400$ пс = $400 \cdot 10^{-12}$ с.

Емкость коллекторного перехода $C_k = 8$ пФ = $8 \cdot 10^{-12}$ Ф.

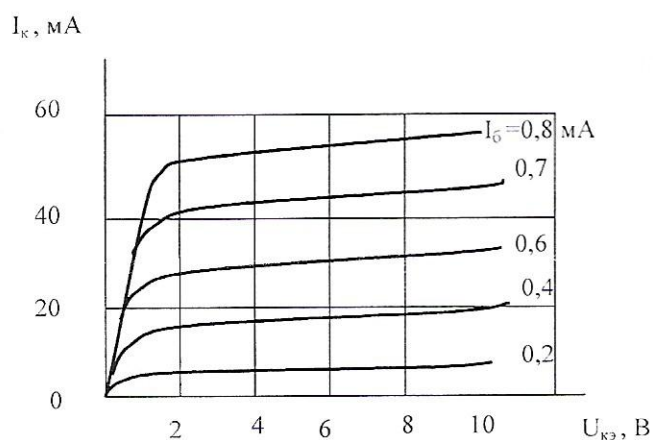
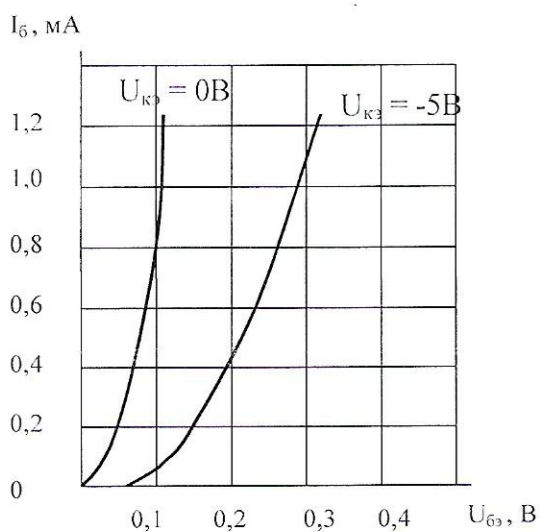
Предельный режим.

$U_{KЭ}$ – постоянное напряжение коллектор-эмиттер, В..... 15

I_K – постоянный ток коллектора, мА..... 50

P_K – постоянная мощность, рассеиваемая на коллекторе, мВт..... 150

$f_{hз}$ – предельная частота, МГц..... 20



КТ340Б

Транзистор кремниевый эпитаксиально-планарный, проводимость n - p - n.

Обратный ток коллектора при температуре T_0 °К $I_{к0} = 1$ мкА.

Постоянная времени цепи обратной связи на предельной высокой частоте $\tau_{к} = 60$ пс = $60 \cdot 10^{-12}$ с.

Емкость коллекторного перехода $C_{к} = 7$ пФ = $7 \cdot 10^{-12}$ Ф.

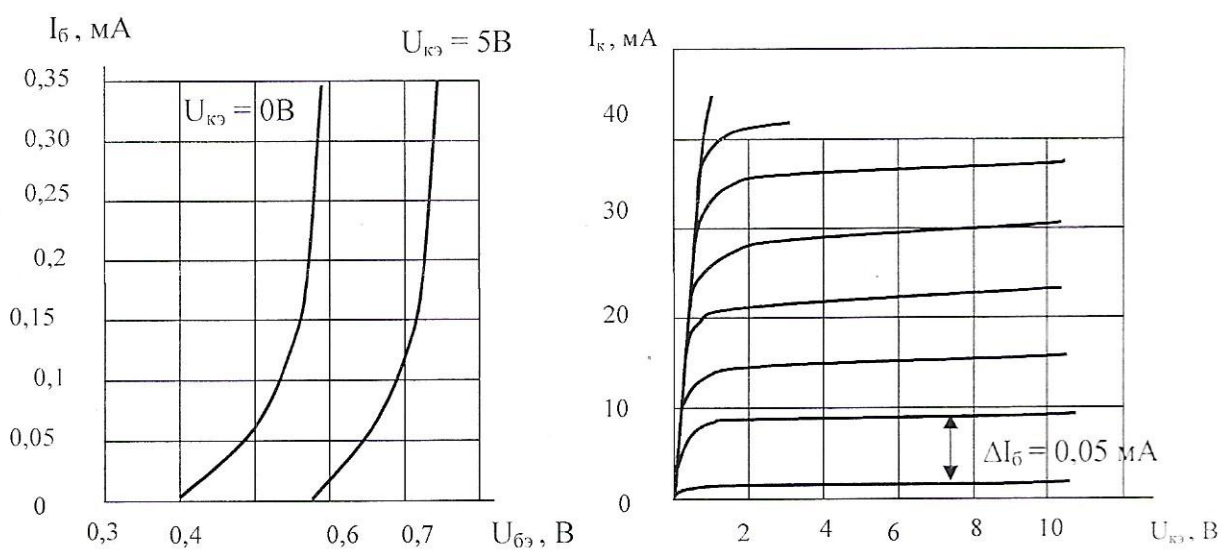
Предельный режим.

$U_{кэ}$ – постоянное напряжение коллектор-эмиттер, В.....20

$I_{к}$ – постоянный ток коллектора, мА.....50

$P_{к}$ – постоянная мощность, рассеиваемая на коллекторе, мВт.....150

f_{h3} – предельная частота, МГц.....100



Приложение 2.3.

КТ315Г

Транзистор кремниевый планарно-эпитаксиальный, проводимость n -р- n.

Обратный ток коллектора при температуре T_0 °К $I_{к0} = 0,5$ мкА.

Постоянная времени цепи обратной связи на предельной высокой частоте $\tau_k = 500$ пс = $500 \cdot 10^{-12}$ с.

Емкость коллекторного перехода $C_k = 7$ пФ = $7 \cdot 10^{-12}$ Ф.

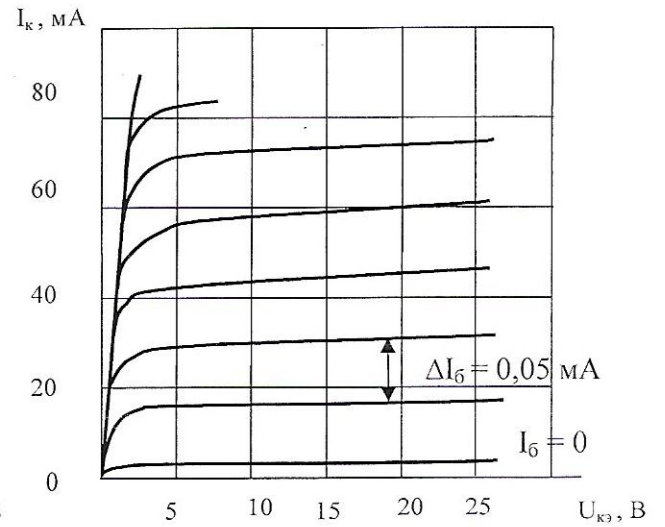
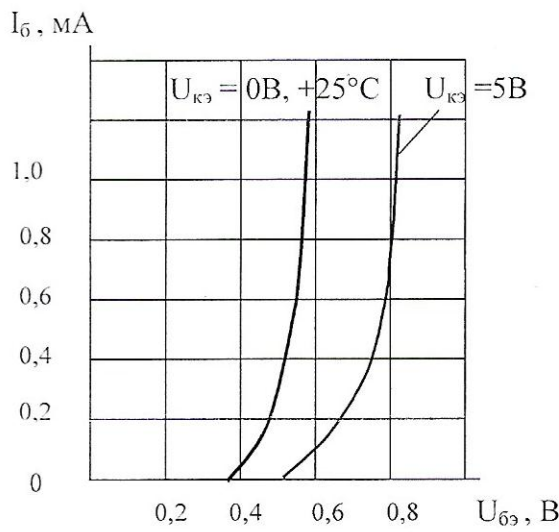
Предельный режим.

$U_{кэ}$ – постоянное напряжение коллектор-эмиттер, В.....35

I_k – постоянный ток коллектора, мА.....100

P_k – постоянная мощность, рассеиваемая на коллекторе, мВт.....150

$f_{нз}$ – предельная частота, МГц.....100



КТ361Б

Транзистор кремниевый планарно-эпитаксиальный, проводимость р-п-р.

Обратный ток коллектора при температуре T_0 °К $I_{к0} = 1$ мкА.

Постоянная времени цепи обратной связи на предельной высокой частоте $\tau_k = 500$ пс = $500 \cdot 10^{-12}$ с.

Емкость коллекторного перехода $C_k = 9$ пФ = $9 \cdot 10^{-12}$ Ф.

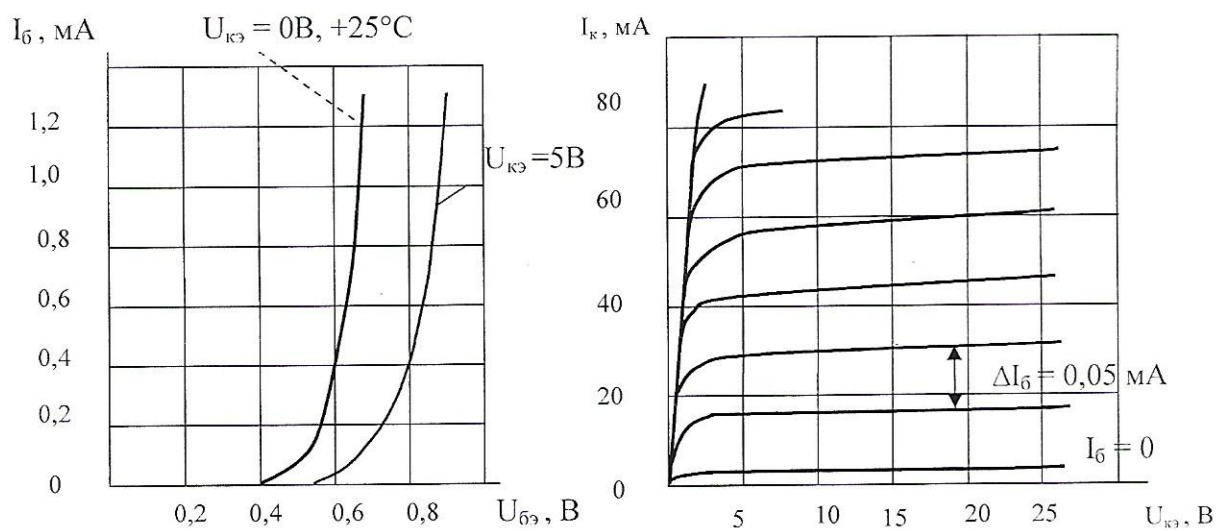
Предельный режим.

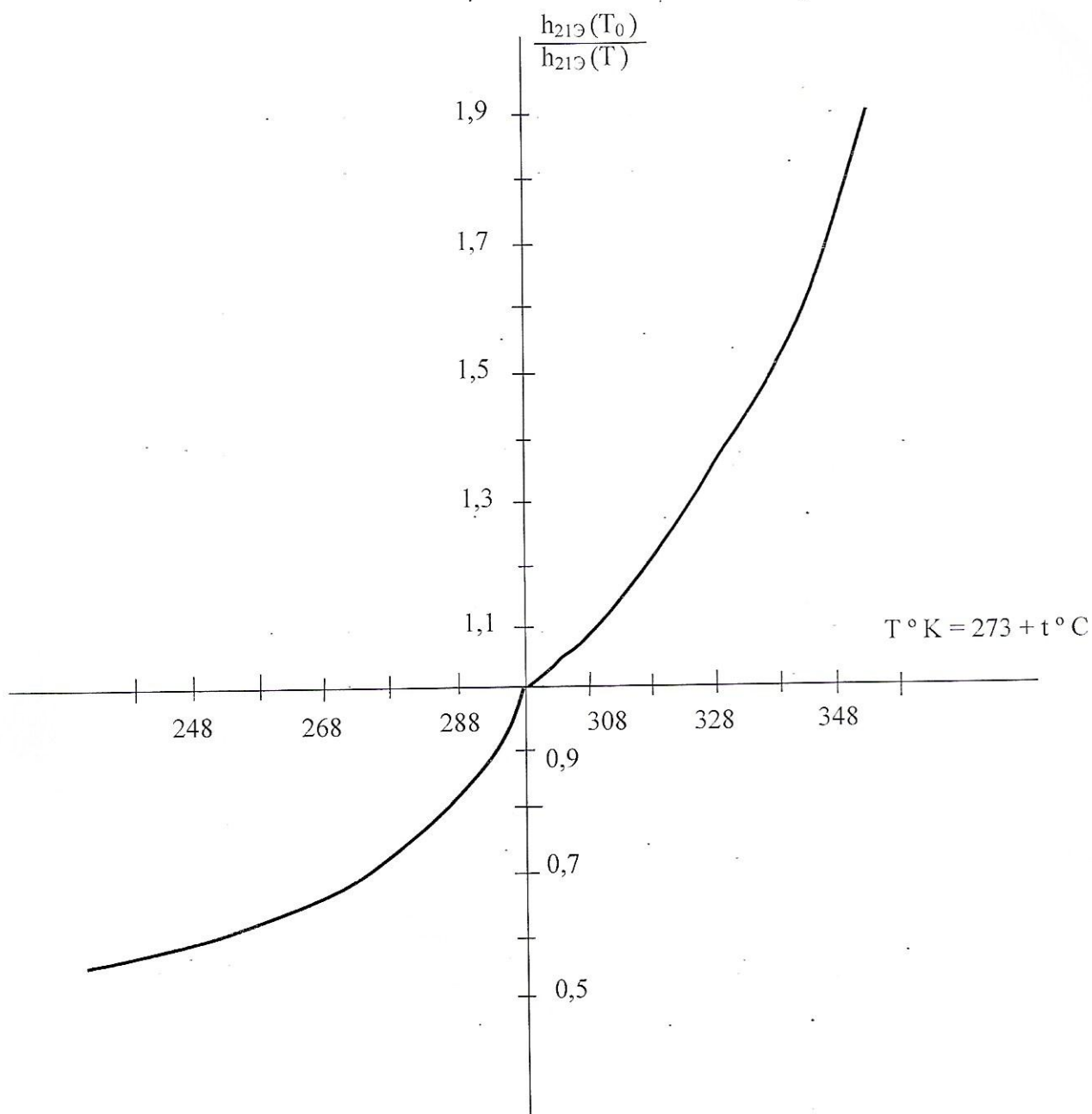
$U_{кэ}$ – постоянное напряжение коллектор-эмиттер, В.....25

I_k – постоянный ток коллектора, мА.....50

P_k – постоянная мощность, рассеиваемая на коллекторе, мВт.....150

$f_{h\beta}$ – предельная частота, МГц.....100





Нормализованная зависимость параметра h_{219} от температуры для транзисторов, приведенных в приложении 2.1 – 2.4

Поместить на первой странице пояснительной записки.

Задание по курсовой работе (тема 2) по дисциплине «Электроника»

студенту _____ курса Санкт-Петербургского государственного аграрного университета

_____ № _____
(фамилия, имя, отчество)

(шифр)

Провести расчет однокаскадного усилителя низкой частоты на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером (см. рис. 1 методических указаний).

Исходные данные для расчета:

тип транзистора _____;

амплитуда напряжения на входе каскада $U_{вхк} =$ _____ В;

сопротивление источника сигнала $R_{Г} =$ _____ кОм;

сопротивление нагрузки $R_{Н} =$ _____ кОм;

нижнее значение усиливаемой полосы частот $f_{Н} =$ _____ Гц;

допустимые частотные искажения $M_{Н} = M_{В} =$ _____;

минимальная рабочая температура $T^{\circ} K_{мин} =$ _____ $^{\circ}K$;

максимальная рабочая температура $T^{\circ} K_{мак} =$ _____ $^{\circ}K$;

напряжение источника питания $E_{К} =$ _____ В;

относительное отклонение тока коллектора $\Delta I_{К} / I_{К} =$ _____.

« _____ » _____ 2013г.

_____ (подпись выдавшего задание)

В связи с тем, что методические указания рассчитаны на 4 года каждый студент должен использовать только один лист индивидуального задания.

КОНТРОЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ЧЕТВЕРТОГО КУРСА

Содержание задания

Для усиительного каскада на транзисторе, включенном по схеме (рис. 1) с общим эмиттером, требуется определить:

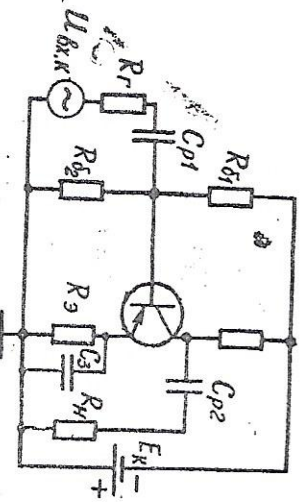


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема усиительного каскада по схеме с общим эмиттером.

1. Номиналы элементов R, C .
2. h — параметры в рабочей точке.
3. $R_{вхк}$ — входное сопротивление каскада.
4. $R_{выхк}$ — выходное сопротивление каскада.
5. $K_{ик}$ — коэффициент передачи (усиления) напряжения входного сигнала, приложенного ко входу транзистора.
6. $K_{ик}^1$ — коэффициент передачи (усиления) по напряжению сигнала, приложенного ко входу каскада.
7. $K_{ик}$ — коэффициент передачи (усиления) каскада по входному току сигнала через базу транзистора.
8. $K_{ик}^1$ — коэффициент передачи (усиления) по входному току каскада.
9. $K_{мк}$ — коэффициент передачи (усиления) по мощности сигнала на входе каскада.
10. $f_{в}$ — крайнее верхнее значение усиливаемой полосы частот.

14

11. $f_{ш}$ — предельная рабочая частота по шуму.
12. $K_{ш}$ — коэффициент шума на средних частотах. Исходными данными к расчету служат:

$I_{вхк}$ — амплитуда напряжения на входе каскада;
 R_i — сопротивление источника сигнала;
 $R_{и}$ — сопротивление нагрузки;
 f_k — крайнее нижнее значение усиливаемой полосы частот;

M_n, M_v — допустимые частотные искажения на нижней и верхней граничных частотах;
 $T^\circ K_{мин}, T^\circ K_{мак}$ — крайние значения рабочих температур;
 E_k — напряжение источника питания;
 $\frac{\Delta I_c}{I_c}$ — относительное отклонение тока коллектора;

Тип транзистора, его параметры, входные и выходные вольтамперные характеристики приведены в приложении.

Методика расчета усиительного каскада на транзисторе

Одним из основных этапов расчета усиительного каскада является выбор исходного режима работы транзистора и его стабилизация. В режиме покоя усиительного каскада, когда нет сигнала, нужно правильно выбрать рабочую точку транзистора, т. е. значение тока покоя I_k и напряжение покоя U_k . Стабилизация положения рабочей точки является основным условием обеспечения нормальной работы каскада и его высоких качественных показателей. В отличие от электронной лампы, транзистор часто не может нормально работать в схемах со слабой стабилизацией режима. Режим работы транзистора выбирается по семейству входных каскада, требуемым к его КИД, нелинейным искажением и т. д. Рабочая точка выбирается с учетом того, чтобы значения напряжений и токов транзистора не превышали максимально допустимых напряжений на коллекторе $U_{кмак}$ и тока $I_{кмак}$, а также мощности рассеивания на коллекторе $P_{кмак}$.

В режиме усиления класса А выбор рабочей точки определяется величиной максимального выходного напряжения каскада.

В каскадах предварительного усиления, где амплитуда сигнала невелика, рабочую точку можно выбирать таким образом,

разом, чтобы получить желаемые величины параметров транзистора и всего усиления. После того, как рабочая точка выбрана, нужно обеспечить ее в реальной схеме с помощью источников питания, смещения и режимных резисторов. Такие расчеты можно выполнить аналитически. Поскольку наиболее распространенные имеют каскады, в которых транзистор работает по схеме с общим эмиттером, возьмем эквивалентную схему на рис. 2.

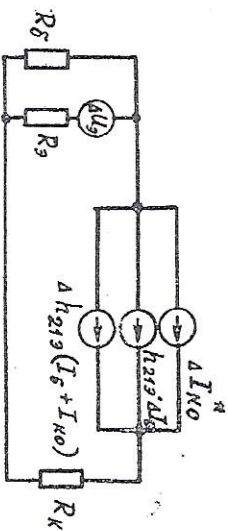


Рис. 2. Эквивалентная схема усилительного каскада для приращений.

С методической точки зрения и с точки зрения получения правдивых результатов, расчет усилительного каскада следует проводить с помощью аналитических формул в сочетании с графическими построениями на входных и выходных характеристиках транзистора. Расчет проводится в несколько этапов.

1. Расчет режима усилительного каскада по постоянному току. На этом этапе находят примерные значения сопротивлений резисторов и определяются значения $h_{эв}$ — параметров. Строится наружная прямая по постоянному току и выбирается рабочая точка.
2. Производится расчет элементов схемы, обеспечивающих стабильность рабочей точки.
3. Расчет режима усилительного каскада по переменному току. Строится нагрузочная прямая по переменному току. Определяется амплитуда по току и напряжению на входе и выходе каскада. Определяются параметры:

$$K_{ик}, K_{кк}, K_{вк}, R_{вкн}, R_{вкн}.$$

4. Рассчитывается частотная характеристика каскада. Определяются значения емкости конденсаторов схемы и верхней граничной частоты усиливаемой полосы $f_{в}$.

5. Рассчитывается коэффициент шума и предельная частота по шуму.

Пример расчета

Расчет однокаскадного усилителя по схеме, с ОЭ. Исходные данные для расчета:

$$U_{вк} = 0,5 \text{ В}; R_н = 1 \text{ кОм}; R_к = 0,1 \text{ кОм}; f_н = 100 \text{ Гц};$$

$$M_н = M_в = 0,7; T^{\circ}K_{мин} = 233^{\circ}K; T^{\circ}K_{макс} = 313^{\circ}K;$$

$E_к = 10 \text{ В}$; относительное изменение тока коллектора

$$\frac{\Delta I_к}{I_к} = 0,3. \text{ Тип транзистора — ГТ 308Б.}$$

1. Расчет режима по постоянному току

Определяем значение сопротивления резистора $R_к$. Обычно

$$\text{но } R_к \text{ находят из неравенства } K_к \geq 1 + \frac{R_н}{R_к},$$

где $K_к$ — коэффициент, учитывающий соотношение сопротивлений резистора $R_к$ и нагрузки $R_н$.

$K_к = (1,2 - 1,5)$ — для низкой нагрузки ($R_н \leq 1 \text{ кОм}$),
 $K_к = (1,5 - 5,0)$ — для высокой нагрузки ($R_н > 1 \text{ кОм}$).
 Из исходных данных $R_н = 0,1 \text{ кОм}$, поэтому можно взять значение $R_к = 0,2 \text{ кОм}$.

Определяем значение сопротивления резистора.

$$R_с \text{ определяем из условия } R_с = (0,1 - 0,5) R_к.$$

Чем больше значение $R_с$, тем глубже отрицательная обратная связь по постоянному току и, следовательно, термостабильность схемы будет лучше. Учитывая, что относительное отклонение тока коллектора должно быть сравнительно небольшим в заданном диапазоне температур $\pm 40^{\circ}K$, возьмем $R_с = 0,5 R_к = 0,1 \text{ кОм}$.

На выходных характеристиках рисунка 3 по двум точкам строим нагрузочную прямую:

$$1\text{-я точка — } I_к = 0; U_{кэ} = E_к = 10 \text{ В}$$

$$2\text{-я точка — } I_к = \frac{E_к}{R_к + R_н} U_{кэ} = 0; I_к = \frac{10}{0,1 + 0,2} = 33 \text{ мА.}$$

Для режима класса А рабочую точку необходимо выбирать так, чтобы крайние отклонения рабочей точки не заходили в область отсечки или в область нелинейной части

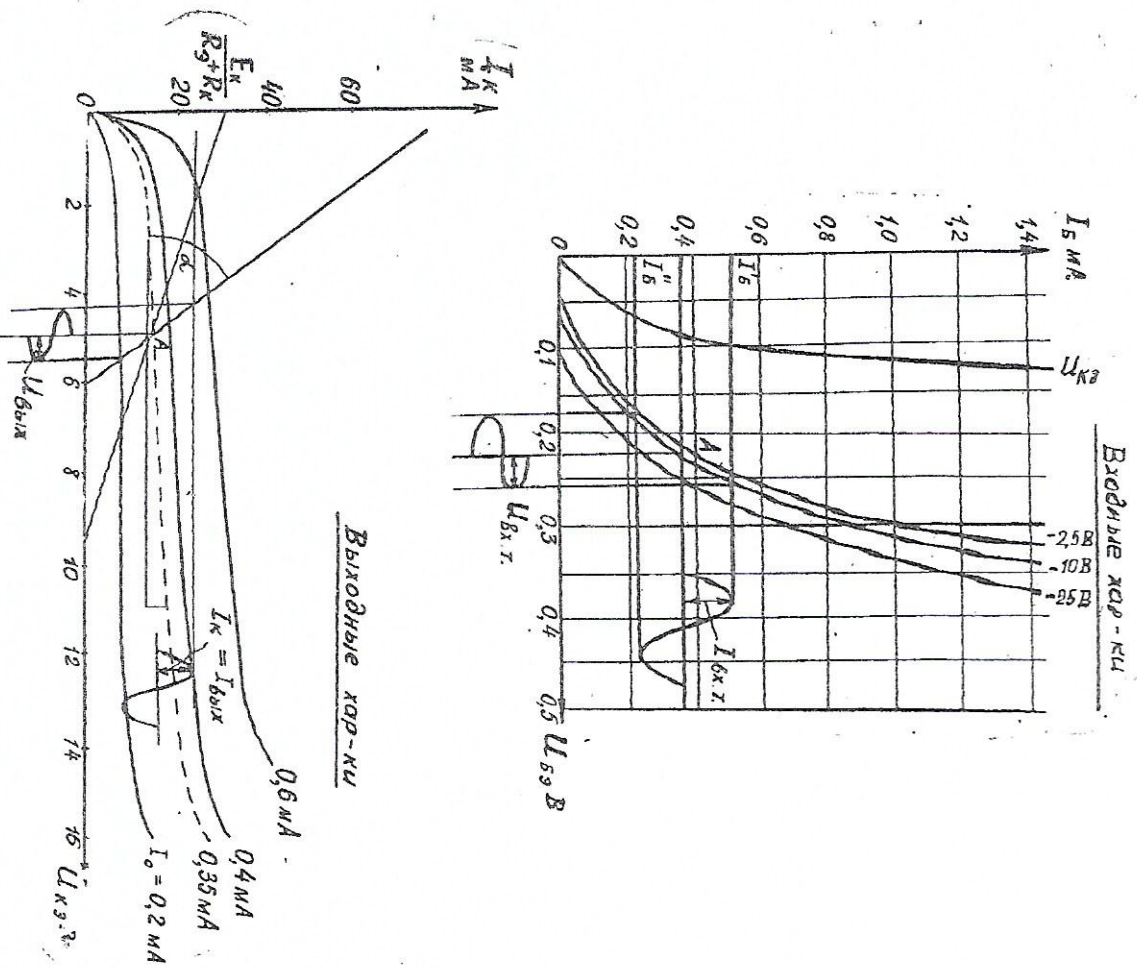


Рис. 3. Входные и выходные характеристики транзистора.

вольт-амперной характеристики. Поэтому выбираем положение рабочей точки посередине нагрузочной прямой. Для точки покоя А получим:

$$U_{кэ} = 5 \text{ В}; I_c = 15 \text{ мА.}$$

Определим мощность рассеивания на коллекторе транзистора $P_{кэ}$:

$$P_{кэ} = U_{кэ} \cdot I_c = 5 \cdot 15 \cdot 10^{-3} = 75 \cdot 10^{-3} \text{ Вт.}$$

Следовательно, по мощности рассеивания на коллекторе режим допустим.

Определим ток базы в рабочей точке:

$$I_b = 300 \text{ мкА} \text{ — из выходных характеристик.}$$

Имея значение $U_{кэ} = 5 \text{ В}$ и $I_b = 300 \text{ мкА}$, найдем рабочую точку на входных характеристиках. В области рабочей точки с помощью характеристических треугольников по выходным и входным характеристикам определяются значения $h_{э}$ параметров (см. рис. 3).

На рисунке 3 недостающие характеристики пунктирными кривыми наносятся от руки. Значения токов базы и напряжений на коллекторе недостающих выходных и входных характеристик задаются усредненными по соседним сверху вниз, слева и справа характеристикам. В результате имеем значения $h_{э}$ — параметров в рабочей точке при включении транзистора по схеме с ОЭ:

$$h_{11э} = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta I_b} = \frac{0,018}{0,095} \approx 0,2 \text{ кОм}$$

$h_{12э}$ — коэффициент обратной связи по напряжению транзистора

$$h_{12э} = \frac{\Delta U_{бэ}}{\Delta U_{кэ}} = \frac{0,018}{22,5} = 0,8 \cdot 10^{-3}$$

$h_{22э}$ — выходная проводимость транзистора

$$h_{22э} = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{кэ}} = \frac{3,5}{8} = 0,43 \text{ мСм}$$

$h_{21э}$ — коэффициент передачи тока транзистора

$$h_{21э} = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} = \frac{3,5}{0,05} = 70.$$

Определение параметров Т-образной эквивалентной схемы (рис. 4) произведем через таблицу перевода приложения 2 по имеющимся h_2 — параметрам:

r_k — сопротивление коллекторного перехода;

r_2 — сопротивление эмиттерного перехода;

r_6 — сопротивление базы; для дрейфового транзистора

$r_6 = r_6'$ т. е. равно распределенному сопротивлению базы.

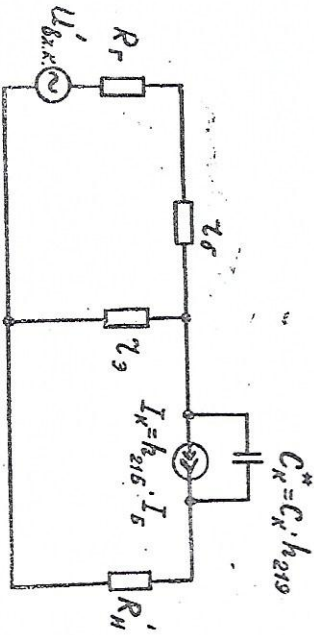


Рис. 4. Эквивалентная схема усилительного каскада на высоких частотах.

Из таблицы приложения имеем формулы:

$$r_k = \frac{h_{212} + 1}{h_{222}} = \frac{70 + 1}{0,43 \cdot 10^{-3}} = 0,18 \cdot 10^6 \text{ Ом}$$

$$r_2 = \frac{h_{122}}{h_{222}} = \frac{0,8 \cdot 10^{-3}}{0,43 \cdot 10^{-3}} = 2,0 \text{ Ом}$$

$$r_6 = r_6' = h_{112} \frac{h_{122} (1 + h_{222})}{h_{222}} = 200 \frac{0,8 \cdot 10^{-3} \cdot 71}{0,43 \cdot 10^{-3}} = 60 \text{ Ом.}$$

Сопротивление r_6 можно определить для типового режима по имеющимся значениям емкости коллекторного перехода C_k и постоянной времени цепи обратной связи $\tau_k = C_k \cdot r_6$. По справочным данным имеем $\tau_k = 400$ пс $C_k = 8$ пФ. Подставив эти значения в формулу для r_6 , получим:

$$r_6 = \frac{\tau_k}{C_k} = \frac{400}{8} = 50 \text{ Ом.}$$

В обоих случаях значения r_6 мало отличаются друг от друга, что подтверждает практическую достоверность полученных значений h_2 — параметров.

Критерием для выбора остальных величин является обеспечение соответствующей стабильности рабочей точки. Как известно, специфической особенностью транзистора является сильная зависимость его параметров от температуры и режима работы. Всякое смещение рабочей точки, характеризующееся приращенными ΔI_{k0} и $\Delta U_{k0} = \Delta I_{k0} \cdot R_k$, вызывает изменение дифференциальных параметров транзистора. Если смещение точки A обусловлено изменением температуры, получается так называемая косвенная зависимость параметров от температуры. Большие смещения ΔI_{k0} и U_{k0} могут привести к существенным нелинейным искажениям и даже к частичной или полной отсечке сигнала.

На рабочий ток транзистора, а значит, на стабильность рабочей точки влияют следующие основные причины: тепловой ток I_{k0} , напряжение на эмиттерном переходе и интегральный коэффициент передачи тока β . Все они зависят от температуры и режима работы транзистора.

Рассмотрим полное приращение коллекторного тока в зависимости от изменения режимных параметров

$$\Delta I_k = \Delta I_0 \cdot \beta + (1 + \beta) \cdot \Delta I_{k0} + \Delta \beta (I_{k0} + I_0).$$

Подставим в данное выражение приращение тока базы ΔI_0 . Изменение тока базы обусловлено изменением напряжения и отвлечения приращения тока коллектора в цепь базы.

$$\Delta I_0 = \frac{\Delta U_{s6}}{R_{s6}} \frac{R_2}{R_{s6}} \cdot \Delta I_k,$$

где R_{s6} сопротивление цепи между эмиттером и базой.

Обозначим $\gamma_6 = \frac{R_2}{R_2 + R_6}$ коэффициент токораспределе-

ния, показывающий какая часть коллекторного тока ответвляется в цепь базы. Подставим выражение для ΔI_0 в уравнение ΔI_k и режим его относительно. Получим:

$$\Delta I_k = \frac{\beta}{1 + \beta \gamma_6} \left[\frac{\Delta I_{k0}}{\alpha} - \frac{\Delta U_{s6}}{R_{s6}} + (I_0 + I_{k0}) \cdot \frac{\Delta \beta}{\beta} \right],$$

где β — коэффициент усиления транзистора в схеме с ОЭ;

α — коэффициент усиления транзистора в схеме с ОБ.

$$\alpha = \frac{h_{21э}}{1 + h_{21э}} = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

Учитывая, что $I_0 + I_{к0} = \frac{I_s}{(1 + \beta)}$,

полное приращение можно записать в виде:

$$\Delta I_k = \frac{\beta}{1 + \beta \gamma_6} \left(\Delta I_{к0} - \frac{\Delta U_{s6}}{R_{s6}} + \frac{I_s}{1 + \beta} \frac{\Delta U_{s6}}{\beta} \right)$$

Величина, вынесенная за скобки, носит название коэффициента неустойчивости и обозначается буквой S .

$$S = \frac{\beta}{1 + \beta \gamma_6}$$

Как видно из выражения, S в общем случае не зависит от температуры и режима работы транзистора, а определяется соотношением величин режимных резисторов R_s и R_6 , так как

$$\gamma_6 = \frac{R_s}{R_s + R_6}$$

При изменении γ_6 от 0 ($R_6 = \infty$, $R_s \neq \infty$) до 1 ($R_s = \infty$, $R_6 \neq \infty$), коэффициент неустойчивости S изменяется в пределах

$$S_{\min} = \alpha; \quad S_{\max} = \beta.$$

Следовательно, для получения максимальной стабильности нужно стремиться к выполнению условия $\gamma_6 \approx 1$ или вытекающего из него неравенства

$$R_s \gg R_6.$$

Однако выполнение этого неравенства далеко не всегда возможно и целесообразно.

До сих пор мы использовали приращения $\Delta I_{к0}$, ΔU_{s6} , ΔV , не оговаривая, какими причинами они обусловлены. На практике, с достаточной степенью точности можно принять следующие допущения — $\Delta I_{к0}$ и ΔU_{s6} , которые зависят только от температуры и определяются зависимостями

$$\Delta I_{к0} = I_{к0}^0 \frac{T - T_0}{T_0} - I_{к0}^0$$

для германиевых транзисторов, и $\Delta I_{к0} = I_{к0}^0 \frac{T - T_0}{T_0} = I_{к0}^0$ для кремниевых транзисторов.

$I_{к0}^0$ — это обратный ток коллекторного перехода при температуре T_0 К.

Например, если в германиевом транзисторе $I_{к0}^0 = 2$ мкА при $T_0 = 293$ К, то при температуре $T = 333$ К (60°C).

333-293

$$\Delta I_{к0} = 2 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 32 \cdot 10^{-6} = 30 \text{ мкА.}$$

Изменение напряжения на эмиттерно-базовом переходе определяется выражением

$$\Delta U_{s6} = \gamma_1 \cdot \Delta T,$$

где γ_1 — коэффициент температурного смещения напряжения базы. В общем случае γ_1 зависит от температуры и исходного смещения на базе, но для упрощения расчетов считают, что коэффициент температурного смещения напряжения от температуры не зависит и пользуются его средним значением, равным $\gamma_1 = -2,3$ мВ/град.

При этом изменение напряжения I_{s6} линейно зависит от изменения температуры. Интегральный коэффициент усиления β также зависит от температуры. Графики зависимости β от температуры приведены в приложении.

Исходя из допустимого отклонения тока коллектора и учитывая, что в выражении для ΔI_k входят значения R_s , R_6 , можно задать одну из этих величин и определить другую. Например, задаваясь значением R_6 , найдем значение R_s , полагая $\Delta I_k < \Delta I_{к доп}$.

$$R_s > \frac{\alpha (\Delta I_{к доп} R_6 - \Delta U_{s6})}{\Delta I_{к доп} - \left(\Delta I_{к0} + \frac{I_s \Delta V}{1 + \beta} \right)} - R_6.$$

В этом случае, если задается значением R_s , R_6 найдем из выражения:

$$R_6 < \frac{\beta \cdot (\Delta I_{к доп} R_s + \Delta U_{s6})}{(1 + \beta) [\Delta I_{к0} + \frac{I_s \Delta V}{1 + \beta}] - \Delta I_{к доп}} - R_s.$$

Определение приращения напряжения на эмиттерном переходе

$$\Delta U_{s6} = e \cdot \Delta T = -2,3 \cdot 80 = -184 \text{ мВ.}$$

Определение приращения обратного тока коллектора в диапазоне температур (по Кельвину):

$$\Delta I_{k0} = I_{k0}(T_0, K) \cdot \left(2 \frac{T_0 K - T_0^0 K}{T_0^0 K - T_0^0 K} + 2 \frac{T_0^0 K - T_0^0 K}{T_0^0 K - T_0^0 K} - 1 \right)$$

$$\Delta I_{k0} = 5 \cdot \left(2 \frac{313-298}{10} + 2 \frac{298-298}{10} - 1 \right) = 5(2,83 + 5,5 \cdot 10^{-3} - 1) = 14,1 \text{ мкА.}$$

Определение приращения коэффициента усиления по току. В диапазоне температур произведем из графика приращения.

При минимальной температуре

$$\frac{h_{21s}(T_1)}{h_{21s}(T_0)} = 0,55; h_{21s}(T_1) = h_{21s}(T_0) \cdot 0,55 = 70 \cdot 0,55 = 38,5.$$

При максимальной температуре

$$h_{21s}(T_2) = h_{21s}(T_0) \cdot 1,2 = 70 \cdot 1,2 = 84$$

$$\Delta h_{21s} = 84 - 38,5 = 46,5.$$

Определим значение сопротивления резистора R_6 , исходя из допустимого отклонения тока коллектора

$$R_6 \ll \frac{70(4,5 \cdot 0,1 - 0,184)}{71 \left(0,014 + \frac{15,46,5}{71^2} \right)} = 0,1 = 1,78 \text{ КОМ}$$

$$R_6 = 1,8 \text{ КОМ.}$$

Определим значения сопротивлений резисторов R_{61} и R_{62}

$$R_{61} = \frac{E_x \cdot R_6}{I_s \cdot R_s} = \frac{10 \cdot 1,8}{15 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1} = 12 \text{ КОМ}$$

$$I_s = I_k + I_6 = 15 \text{ МА}$$

$$R_{62} = \frac{1}{\frac{1}{R_6} - \frac{1}{R_{61}}} = \frac{1}{\frac{1}{1,8} - \frac{1}{12}} = 2,1 \text{ КОМ.}$$

II. Расчет режима усилительного каскада по переменному току

В основу расчета положим эквивалентную схему каскада для области средних частот.

24

1. Графический вариант расчета. Построим нагрузочную прямую по переменному току. Согласно эквивалентной схеме сопротивлением нагрузки усилительного каскада является эквивалентное сопротивление R'_n , равное:

$$R'_n = R_k \parallel R_n = \frac{R_k \cdot R_n}{R_k + R_n} = \frac{0,2 \cdot 0,1}{0,3} = 70 \text{ Ом.}$$

На рисунке 3 через точку покоя А проводим нагрузочную прямую под углом α

$$\alpha = \arctg \frac{1}{R'_n \cdot K_m} = \arctg \frac{1}{0,07 \cdot 10} = 54^\circ.$$

В знаменателе под знаком \arctg коэффициент, равный $K_m = 10$, вводится для уравнивания масштабов осей I_k и $U_{кэ}$

$$K_m = \frac{m I_k}{m U_{кэ}} = 10.$$

Определим входное сопротивление каскада $R_{вхк}$

$$R_{вхк} = R_6 \parallel R_{вхг} = \frac{R_6 \cdot R_{вхг}}{R_6 + R_{вхг}}$$

где $R_{вхг}$ — входное сопротивление транзистора

$$R_{вхг} = h_{11s} = 0,2 \text{ КОМ.}$$

Определим амплитуду входного тока, поступающего в усилительный каскад $I_{вхк}$:

$$I_{вхк} = \frac{U_{вхк}}{R_2 + R_{вхк}}; I_{вхк} = \frac{0,5}{1 + 0,125} = 4,4 \cdot 10^{-1} \text{ МА.}$$

Определим амплитуду напряжения сигнала на входе транзистора

$$U_{вхг} = I_{вхк} \cdot R_{вхк} = 0,44 \cdot 180 = 79 \text{ мВ.}$$

На входных характеристиках рисунка 3 отложим размах переменного напряжения $U_{вхг}$ относительно точки покоя. По крайним изменениям $U_{вхг}$ на входной характеристике для $U_k = 5 \text{ В}$ определим амплитудное значение входного тока транзистора:

$$I_{вхг} = 0,2 \text{ МА.}$$

25

Крайние значения тока базы определим на выходных характеристиках.

По ним определим амплитуду сигнала на нагрузке, т. е. на выходе каскада $U_{\text{вых}k} = 3 \text{ В}$.

Определим выходное сопротивление транзистора $R_{\text{вых}T}$

$$R_{\text{вых}T} = \frac{1}{h_{21s}} = \frac{1}{4,3 \cdot 10^{-3}} = 2,32 \text{ КОМ.}$$

Определим выходное сопротивление каскада

$$R_{\text{вых}k} = R_k \parallel R_{\text{вых}T} = \frac{R_k \cdot R_{\text{вых}T}}{R_k + R_{\text{вых}T}} = 0,18 \text{ КОМ.}$$

Определим коэффициент усиления $K_{\text{ук}}$

$$K_{\text{ук}} = \frac{U_{\text{вых}k}}{U_{\text{вх}T}} = \frac{3}{0,079} = 38$$

Определим коэффициент передачи $K'_{\text{ук}}$

$$K'_{\text{ук}} = \frac{U_{\text{вых}k}}{U_{\text{вх}k}} = \frac{3}{0,5} = 6.$$

Определим коэффициент усиления $K'_{\text{гк}}$

$$K'_{\text{гк}} = \frac{I_{\text{вых}T}}{I_{\text{вх}T}} = \frac{6}{0,14} = 42,9.$$

Определим коэффициент усиления $K'_{\text{гк}}$

$$K'_{\text{гк}} = \frac{I_{\text{вых}T}}{I_{\text{вх}k}} = \frac{6}{0,44} = 14.$$

Определим коэффициент усиления по мощности

$$K_{\text{рн}} = K'_{\text{гк}} \cdot K'_{\text{гк}} = 38 \cdot 42,9 = 1630.$$

2. Аналитический вариант расчета.

$$R_{\text{вх}T} = r_6 + r_s (h_{21s} + 1) = 60 + 2 \cdot 71 = 0,2 \text{ КОМ.}$$

$\gamma_2 = \frac{R_6}{R_6 + R_{\text{вх}T}}$ — коэффициент токораспределения между входным сопротивлением транзистора и эквивалентным сопротивлением цепи базы R_6 .

$$\gamma_1 = \frac{1,8}{2} = 0,9$$

$$\gamma_2 = \frac{R_k \parallel R_{\text{вх}T}}{R_k + R_k \parallel R_{\text{вх}T}} = 0,43$$

γ_2 — коэффициент токораспределения между нагрузкой и выходным сопротивлением транзистора

$$K'_{\text{гк}} = h_{21s} \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 = 70 \cdot 0,9 \cdot 0,43 = 24$$

$$K_{\text{ук}} = h_{21s} \cdot \frac{R'_n}{R_{\text{вх}T}} = 70 \cdot \frac{0,067}{R_{\text{вх}T}} = 23.$$

Сравнительная оценка значений параметров, полученных разными вариантами расчета, позволяет заключить, что инструментальная погрешность расчета графическим путем сравнительно невелика, около 27%.

Рассмотрим влияние емкости связи на коэффициент усиления по напряжению.

Положим сначала $S2 = S3 = \infty$ и выясним роль $S1$.

Для количественного анализа следует, очевидно, добавить к R_r сопротивление конденсатора $\frac{1}{\omega \cdot C1}$,

тогда

$$K_u(\omega) = K_{\text{во}} \cdot \frac{j\omega C1 \cdot (R_r + R_{\text{вх}k})}{1 + j\omega C1 \cdot (R_r + R_{\text{вх}k})}$$

После несложных преобразований

$$K_u(\omega) = K_{\text{во}} \cdot \frac{j\omega T_{н1}}{1 + j\omega T_{н1}}$$

где

$$T_{н1} = C1 \cdot (R_r + R_{\text{вх}k});$$

$K_{\text{во}}$ — коэффициент усиления по напряжению в области средних частот.

Для количественного анализа влияния блокирующей емкости $S9$ также используется выражение для K_u в области средних частот, в котором к сопротивлению r_s (входящему в $R_{\text{вх}}$) добавлено сопротивление конденсатора $S3$. В этом случае выражение K_u будет иметь вид:

$$K_u(j\omega) = K_{\text{во}} \cdot \frac{j\omega T_{н3}}{1 + j\omega T_{н3}}$$

где $T_{н3} = C3 \cdot r_s$.

Аналогично рассуждая о влиянии С2 на общее сопротивление нагрузки, получим

$$K_u(i\omega) = K_u^0 \cdot \frac{j\omega\tau_{нт}}{1+j\omega\tau_{нт}}$$

где $\tau_{нт} = C2 \cdot (R_k + R_n)$.

Коэффициент частотных искажений определяется как отношение

$$M_n = \frac{K_{шт}}{K_{н0}}$$

где $K_{шт}$ — коэффициент усиления по напряжению на частоте, равной ω_n . Для обеспечения заданной величины коэффициента частотных искажений необходимо, чтобы

$$K_{шт} \geq M_n \cdot K_{н0}$$

Влияние каждой из емкостей можно учесть из выражения

$$M_n = M_{н1} \cdot M_{нт} \cdot M_{н3}$$

Задав распределение уровня искажений каждой емкостью, можно найти их значение из необходимой величины постоянной времени при нижней граничной частоте f_n .

$$\tau \gg \frac{1}{\omega_n} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_n^2} - 1}$$

Например, для С2

$$\tau_{нт} \gg \frac{1}{2\pi f_n} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_{нт}^2} - 1}$$

$$\text{т. к. } \tau_{нт} = (R_k + R_n) \cdot C2,$$

то

$$C2 \gg \frac{1}{2\pi f_n (R_k + R_n)} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_{нт}^2} - 1}$$

III. Расчет верхнего значения частоты укладываемой полосы

В основу расчета положим эквивалентную схему для высоких частот. Определим постоянную времени нарастания

28

коллекторного тока транзистора с ОЭ на высоких частотах $\tau_{ос}$:

$$\tau_{ос} = \tau_k + h_{21э} \cdot R'_n \cdot C_{к2}$$

где τ_k — постоянная времени цепи обратной связи на предельной частоте; для транзистора ГТ 308 $\tau_k = 400$ пс

R'_n — эквивалентное сопротивление нагрузки.

Подставив известные значения для $\tau_{ос}$, получим:

$$\tau_{ос} = 400 \cdot 10^{-12} + 70 \cdot 67 \cdot 8 \cdot 10^{-12} = 3,8 \cdot 10^{-8} \text{ с.}$$

Определим коэффициент отрицательной обратной связи, определяющей величину тока коллектора, отвечающего в базовую цепь γ_c :

$$\gamma_c = \frac{r_b}{r_b + r_c + R'_2}; R'_2 = R_2 \parallel R_6 = \frac{R_2 \cdot R_6}{R_2 + R_6} = \frac{1 \cdot 1,8}{2,8} = 0,64 \text{ КОМ}$$

$$\gamma_c = \frac{2}{2 + 60 + 640} = 3 \cdot 10^{-3}$$

Определим верхнюю предельную частоту f_B

$$\omega_B = \frac{1 + h_{21э} \cdot \gamma_c}{\tau_{ос}} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_B^2} - 1} = \frac{1 + 70 \cdot 3 \cdot 10^{-3}}{3,8 \cdot 10^{-8}} \cdot \sqrt{1,4^2 - 1} = 19 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{\text{с}}$$

$$f_B = \frac{\omega_B}{2\pi} = \frac{19 \cdot 10^5}{6,28} \approx 3 \text{ МГц.}$$

IV. Расчет шумовых параметров.

Определим коэффициент шума на средних частотах при нормальной температуре:

$$K_{шт} = 1 + \frac{r_b}{R'_2} + \frac{1}{2 \cdot \eta_c} \cdot \frac{(R_2 + 2\sigma)^2 \cdot (1 - h_{21э}) \cdot I_b}{R_2}$$

$$K_{шт} = 1 + \frac{60}{640} + \frac{1}{2 \cdot 0,026} \cdot \frac{(640 + 60)^2 (1 - 0,98) \cdot 15 \cdot 10^{-3}}{640} = 5,49.$$

Значения не берем

тип транзистора	Амплитудная на напряжение на входе каскада $U_{вх} В$	сопротивление источника сигнала $R_r, кОм;$	сопротивление нагрузки $R_n, кОм$	нижние значения усиливательной емкости полосы частот $f_n, Гц$	допустимые частоты искажений $M_n = Мв$	минимальная рабочая температура $T^{\circ} K_{мин}, ^{\circ}К$	максимальная рабочая температура $T^{\circ} K_{макс}, ^{\circ}К$	напряжение источника питания $E_k, В$	относительное отклонение тока коллектора I_k / I_k	
2	КТ308Б	0,3	1	0,3	200	0,8	243	313	12	0,3
4	КТ340Б	0,2	1,2	0,2	300	0,7	253	303	15	0,25
6	КТ315Т	0,25	1,3	0,2	400	0,8	243	313	12	0,3
8	КТ361Б	0,4	1,1	0,15	500	0,7	253	303	15	0,25
10	ЛТ308Б	0,3	1,2	0,2	300	0,7	243	313	12	0,3
12	КТ340Б	0,2	1,3	0,2	200	0,8	253	303	15	0,25
14	КТ315Т	0,25	1,1	0,2	500	0,7	243	313	12	0,3
16	КТ361Б	0,4	1	0,15	400	0,7	253	303	15	0,25
18	ЛТ308Б	0,4	1,1	0,15	300	0,8	243	313	12	0,3
20	КТ340Б	0,25	1	0,2	400	0,8	253	303	15	0,25
22	КТ315Т	0,26	1,2	0,18	200	0,7	243	313	12	0,3
24	КТ361Б	0,3	1,3	0,22	400	0,8	253	303	15	0,25
26	КТ340Б	0,24	1	0,2	300	0,8	253	303	15	0,25
28	КТ315Т	0,3	1,3	0,18	200	0,7	243	313	12	0,3
30	КТ361Б	0,3	1,2	0,15	400	0,8	253	303	15	0,25
32	КТ340Б	0,3	1,2	0,15	300	0,8	253	303	12	0,25