

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Институт Радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова

Курсовой проект по дисциплине
«Физические процессы в электронных цепях»

Студент: Жеребин В.Р.
Группа: ЭР-15-15

Преподаватель: Чеченя С.А.

Москва
2018

Содержание

Задание	3
Исходные данные	3
Предварительный расчет усилителя	4
Расчет усилителя на средних частотах	6
• Расчет выходного эмиттерного повторителя (ЭП1)	6
• Расчет каскада с резистивной обратной связью в цепи эмиттера (УК2)	10
• Расчет каскада с резистивной обратной связью в цепи эмиттера (УК3)	11
• Расчет каскада с резистивной обратной связью в цепи эмиттера (УК4)	12
• Расчет входного эмиттерного повторителя (ЭП5)	14
• Проверка суммарного коэффициента усилителя	15
Расчет цепи отрицательной обратной связи (ООС)	17
Расчет частотных характеристик усилительных каскадов.....	18
• Расчет выходного эмиттерного повторителя (ЭП1) на высоких частотах	19
• Расчет каскада с резистивной обратной связью в цепи эмиттера (УК2) на высоких частотах	20
• Расчет каскада с резистивной обратной связью в цепи эмиттера (УК3) на высоких частотах	21
• Расчет каскада с резистивной обратной связью в цепи эмиттера (УК4) на высоких частотах	22
• Расчет входного эмиттерного повторителя (ЭП5) на высоких частотах	23
• Расчет разделительных емкостей на входе и на выходе усилительного каскада	24
• АЧХ усилителя	25

Задание

Спроектировать широкополосный резистивный усилитель низкой частоты на биполярных транзисторах.

Исходные данные

Параметры устройства	Обозначение	Значение
Амплитуда напряжения генератора сигнала, мВ	U_g	4
Внутреннее сопротивление источника сигнала, кОм	R_g	6
Выходное напряжение усилителя, В	U_n	1,3
Выходное сопротивление усилителя, Ом	R_n	250
Напряжение питания коллектора, В	E_p	10
Минимальная частота полосы пропускания, Гц	f_{min}	100
Максимальная частота полосы пропускания, кГц	f_{max}	150

Задача: Рассчитать все элементы схемы, рассчитать полосу пропускания усилителя и коэффициент нелинейных искажений. Нарисовать полученную схему усилителя с номиналами всех выбранных полупроводниковых приборов и элементов.

Транзистор БТ КТ333В3, паспортные данные:

$\beta_{min}-\beta_{max}$	f_T [МГц]	C_K [пФ]	C_E [пФ]	$r_b C_K$ [пс]	$I_{КБ0}$ [мкА]	I_{KM} [мА]	$P_{РАС}$ [мВт]	Тип
70 – 280	450	3,5	4	300	0,4	20	15	n-p-n

$\beta_{min}-\beta_{max}$ – мин. и макс. значение статического коэффициента передачи тока;

f_T – граничная частота коэффициента передачи тока;

C_K – емкость коллекторного перехода;

C_E – емкость эмиттерного перехода;

$r_b C_K$ – постоянная времени цепи обратной связи;

$I_{КБ0}$ – обратный ток коллектора;

I_{KM} – предельно допустимый постоянный ток коллектора;

$P_{РАС}$ – максимально допустимая рассеиваемая мощность на коллекторе БТ.

$\beta = \sqrt{\beta_{min} \cdot \beta_{max}} = 140$ – среднее значение статического коэффициента передачи тока.

Предварительный расчет усилителя

В этом расчете коэффициенты усиления эмиттерных повторителей принимаются за единицу, а общий коэффициент усиления всего усилителя распределяют между каскадами.

Определим сквозной коэффициент усиления по напряжению, необходимый для реализации поставленной задачи:

$$K_{\text{скв}} = \frac{U_n}{U_g} = \frac{1.3}{4 \times 10^{-3}} = 325$$

Можно предположить, что на одном каскаде на БТ такое усиление реализовать невозможно, т.к. сопротивление нагрузки очень мало, а сопротивление генератора велико.

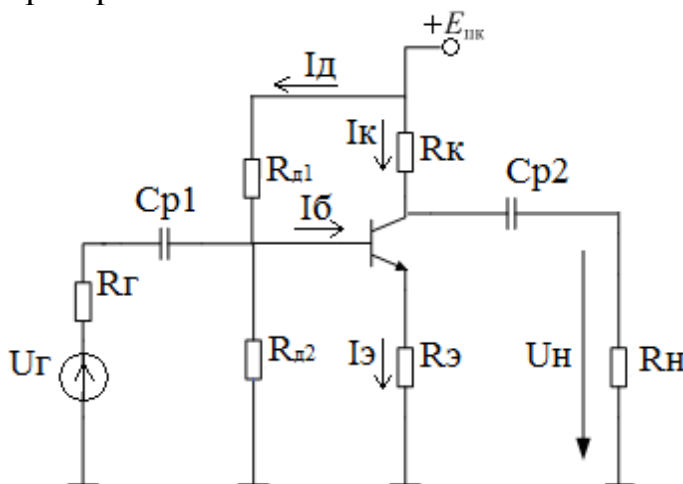


Рис.1. Схема усилителя на одном каскаде.

Оценочный расчет коэффициента усиления при реализации всего усилителя на одном каскаде:

$$K_U = - \frac{\beta \cdot R_n}{r_{\delta} + r_{\beta} + R_g}$$

Если взять в этом расчете $\beta = 140$, $r_{\delta} = 200$ Ом, $r_{\beta} = 250$ Ом, то $K_U = 5.4$, что значительно меньше $K_{\text{скв}}$ всего усилителя.

По этой причине мы будем использовать структурную схему усилителя (Рис.2), состоящую из 3 усилительных каскадов и 4 эмиттерных повторителей.

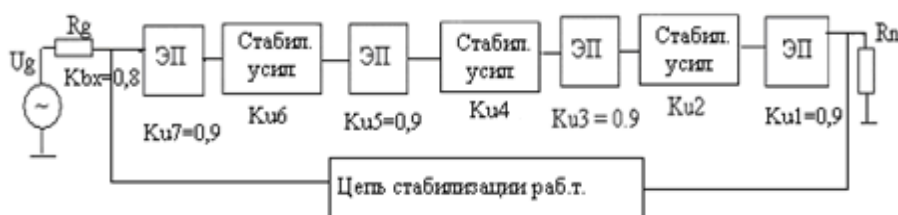


Рис.2. Структурная схема многокаскадного усилителя низкой частоты.

Для предварительного расчета коэффициентов усиления предположим, что структурная схема усилителя изображена на рис.2, тогда

$$K_{\text{CKB}} = K_{\text{BX}} \cdot K_{u7} \cdot K_{u6} \cdot K_{u5} \cdot K_{u4} \cdot K_{u3} \cdot K_{u2} \cdot K_{u1} = 325$$

Если $K_{\text{BX}} = 0.8$, а $K_{u7} = K_{u5} = K_{u3} = K_{u1} = 0.9$, тогда получим:

$$K_{\text{CKB}} = 0.8 \cdot 0.9^4 \cdot K_{u6} \cdot K_{u4} \cdot K_{u2} = 325$$

Для минимизации нелинейных искажений, выберем следующее соотношение коэффициентов усиления:

$$K_{u6} = 2 \cdot K_{u4} = 4 \cdot K_{u2}$$

В результате получаем:

$$K_{\text{CKB}} = 0.8 \cdot 0.9^4 \cdot 8 \cdot K_{u2}^3 = 325$$

$$K_{u2} = \sqrt[3]{\frac{K_{\text{CKB}}}{K_{\text{BX}} \cdot K_{u7} \cdot K_{u5} \cdot K_{u3} \cdot K_{u1}}} = \sqrt[3]{\frac{325}{0.8 \cdot 0.9^4 \cdot 8}} = 4.262$$

Для рассмотренного примера получаем:

$$K_{u2} = -4.262$$

$$K_{u4} = -8.523$$

$$K_{u6} = -17.047$$

Расчет усилителя на средних частотах.

Расчет выходного эмиттерного повторителя (ЭП1).

Проведём расчёт ЭП1 по переменному току, при этом будем использовать простой ЭП.

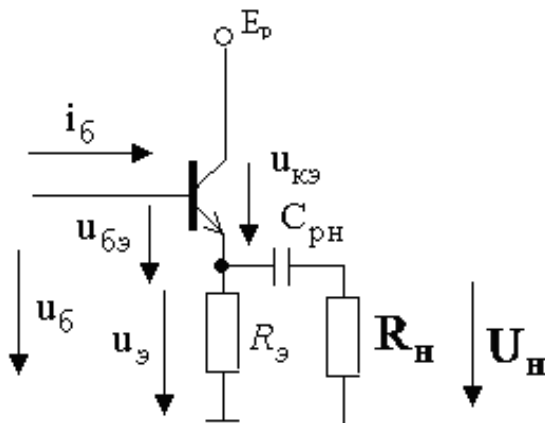


Рис.3. Схема выходного ЭП

Для расчета ЭП заменим БТ линейаризованной эквивалентной схемой для СЧ и НЧ. Частоты усиливаемого сигнала низкие (т.е. сопротивление емкостей $C_{диф}$ и C_K в области рабочих частот большое, поэтому их можно не учитывать). Кроме того допускаем, что $\frac{1}{\omega C_{pH}} \ll R_H$.

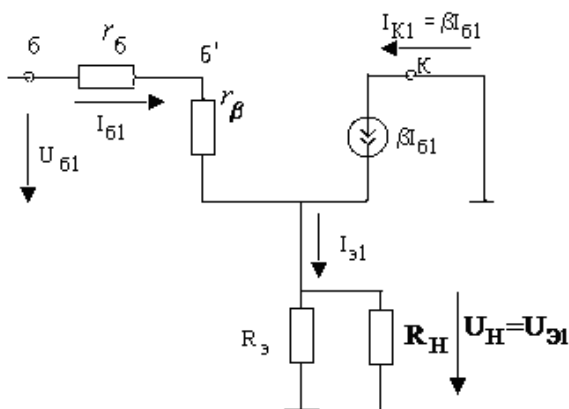


Рис.4. Эквивалентная схема ЭП1 по переменному сигналу

Выберем $R_{э1} = R_n = 250 \text{ Ом}$

Рассчитаем нагрузку ЭП1 по переменному сигналу $R_{э1}$ и $I_{э1}$ по формулам:

$$R_{э1\sim} = \frac{R_{э1} \cdot R_n}{R_{э1} + R_n} = 125 \text{ Ом}$$

$$I_{э1} = \frac{U_n}{R_{э1\sim}} = 10.4 \text{ мА}$$

Для того, чтобы ЭП1 работал в активной области, выбираем постоянную составляющую тока эмиттера на 25% больше, чем переменную, т.е.

$$I_{э01} = 1,25 \cdot I_{э1} = 13 \text{ мА}$$

Рассчитаем постоянное напряжение на сопротивлении в цепи эмиттера, максимальный ток и максимальное напряжение на эмиттере:

$$U_{э01} = R_{э1} \cdot I_{э1} = 2,6 \text{ В}$$

$$I_{э_max} = I_{э01} + I_{э1} = 23,4 \text{ мА}$$

$$U_{э_max} = U_{э01} + U_{э1} = 3,9 \text{ В}$$

При проверки условия нахождения БТ в активной области видно, что $I_{э_max} < I_{дон} \rightarrow 23,4 < 20 \text{ мА}$. Из этого следует, что требуется использовать ЭП с генератором тока. Кроме того, это послужит для увеличения нагрузки ЭП по переменному току и, следовательно, коэффициента передачи ЭП.

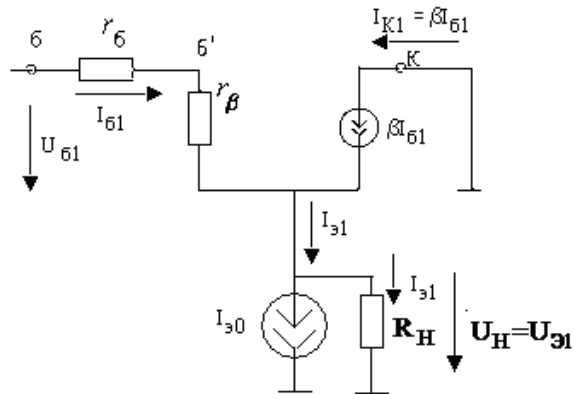


Рис.5. Эквивалентная схема ЭП1 с идеальным генератором тока

Считаем, что генератор тока по переменному сигналу имеет бесконечно большое сопротивление, поэтому весь переменный ток протекает через нагрузку. По этому

$$I_n = \frac{U_n}{R_n} = 5,2 \text{ мА}, \text{ следовательно и } I_{э11} = 5,2 \text{ мА}, I_{э01} = 1,25 \cdot I_{э11} = 6,5 \text{ мА}.$$

Проверим условие. $I_{э01} + I_{э11} = 11,7 \text{ мА}$ - меньше, чем $I_{дон} = 20 \text{ мА}$, поэтому мы можем использовать данный БТ в каскаде

Схема ЭП1 показана на рис.6, генератор тока реализован на БТ VTгг.

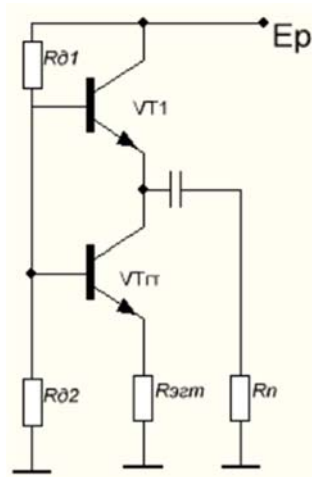


Рис.6. Принципиальная схема ЭП с ГТ в цепи эмиттера

По схеме можно увидеть, что будет выполняться равенство $I_{к0зт} = I_{э01} = 6.5мА$

$$\beta_{зт} = \beta = \sqrt{\beta_{\max} \cdot \beta_{\min}} = 140$$

$$I_{б0зт} = \frac{I_{к0зт}}{\beta_{зт}} = 46.429мкА \quad I_{э0зт} = (\beta_{зт} + 1) \cdot I_{б0зт} = 6.546мА$$

Для обеспечения достаточной стабильности постоянного тока коллектора и повышения входного сопротивления транзистора по переменному сигналу в 10-15 раз достаточно выбрать величину сопротивления $R_{эзт} = 30Ом$.

$$U_{б0зт} = I_{э0зт} \cdot R_{эзт} + 0,6 = 0.796В$$

Выберем ток делителя $I_{дел} = 10 \cdot I_{б0зт} = 464.286мкА$, тогда:

$$R_{дел1} = \frac{E_p - U_{б0зт}}{I_{дел}} = 19.823кОм$$

$$R_{дел2} = \frac{U_{б0зт}}{I_{дел} - I_{б0зт}} = 1.906кОм$$

Выбор постоянного напряжения на эмиттере БТ VT1 произведём из условия, что транзисторы VT1 и VTГТ должны работать в АО. Для выполнения этого условия необходимо, чтобы выполнялись следующие неравенства:

$$U_{кэ1_min} = E_p - U_{э01} - U_n \geq 1В,$$

$$U_{кэзт_min} = U_{э01} - R_{эзт} \cdot I_{э0зт} - U_n \geq 1В$$

Если считать, что для заданного типа БТ $U_{кэ_min_доп} = 1В$, то можно рассчитать наименьшее значение $U_{э01}$ по формуле:

$$U_{э01} = 2 + U_n + R_{эзт} \cdot I_{э0зт} = 3.496В$$

Теперь проверим выполнение двух указанных выше неравенств:

$$U_{кэ1_min} = E_p - U_{э01} - U_n = 5,204В$$

$$U_{кэзт_min} = U_{э01} - R_{эзт} \cdot I_{э0зт} - U_n = 2В$$

Для расчёта коэффициента передачи выходного эмиттерного повторителя K_{u1} необходимо рассчитать значения сопротивления базы $r_{\bar{o}}$ и сопротивления рекомбинации r_{β} транзистора в данном каскаде:

$$I_{\bar{o}01} = \frac{I_{\bar{e}01}}{1 + \beta} = 46.099 \text{ мкА}$$

$$\varphi_T = 25 \text{ мВ}$$

$$r_{\bar{o}1} = \frac{\tau}{0.5 C_{\kappa}} = 85.714 \text{ Ом}$$

$$r_{\beta 1} = \frac{\varphi_T}{I_{\bar{o}01}} = 542.308 \text{ Ом}$$

$$K_{u1} = \frac{R_n(1 + \beta)}{R_n(1 + \beta) + r_{\beta 1} + r_{\bar{o}1}} = 0.982$$

Теперь рассчитаем оставшиеся параметры схемы ЭП:

$$U_{\bar{o}11} = (r_{\beta 1} + r_{\bar{o}1}) I_{\bar{o}01} + R_n \cdot I_n = 1.323 \text{ В}$$

$$U_{\bar{o}01} = U_{\bar{e}01} + 0.6 = 4.096 \text{ В}$$

$$R_{\text{exl}} = R_n \cdot (1 + \beta) + r_{\beta 1} + r_{\bar{o}1} = 35.878 \text{ кОм}$$

$$I_{\kappa 01} = I_{\bar{o}01} \cdot \beta = 6.454 \text{ мА}$$

Итоги:

$$I_{\bar{e}01} = 6.5 \text{ мА}$$

$$U_{\bar{e}01} = 3.496 \text{ В}$$

$$R_{\text{exl}} = 35.878 \text{ кОм}$$

$$I_{\kappa 01} = 6.454 \text{ мА}$$

$$U_{\kappa 01} = E_p = 10 \text{ В}$$

$$K_{u1} = 0.982$$

$$I_{\bar{o}01} = 46.099 \text{ мкА}$$

$$U_{\bar{o}01} = 4.096 \text{ В}$$

$$r_{\beta 1} = 542.308 \text{ Ом}$$

Проверка условий работы БТ VT1 в АО и значений токов базы и коллектора:

$$1) I_{\kappa 01} = 6.454 \text{ мА} < I_{\kappa \text{ max}} = 20 \text{ мА} - \text{условие выполнено.}$$

$$2) I_{\bar{o}01} = 46.099 \text{ мкА} > 10 \cdot I_{\kappa \bar{o}0} = 4 \text{ мкА} - \text{условие выполнено.}$$

$$3) U_{\kappa \bar{e}1 \text{ min}} = E_p - U_{\bar{e}01} - U_n = 5.204 \text{ В} > 1 \text{ В} - \text{условие выполнено.}$$

Все условия выполняются, следовательно каскад рассчитан верно и рабочая точка находится в активной области, допустимый ток коллектора не превышен, а обратный ток базы много меньше тока базы.

Расчёт каскада с резистивной обратной связью в цепи эмиттера (УК2).

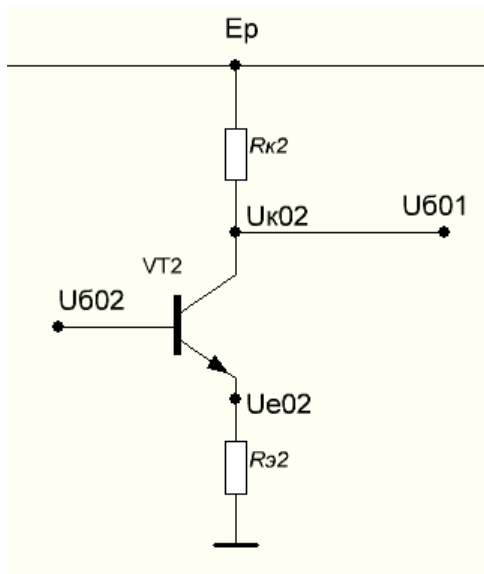


Рис.7. Принципиальная схема УК2

Для того, что бы транзистор работал в АО, должно выполняться условие $U_{кэ2\min} > 1B$.

Так же должны выполняться условия слабого влияния следующего каскада:

$$I_{б01} \ll I_{к02}$$

$$R_{к2} \ll R_{вх1}$$

Выбираем $I_{к02} \geq 10I_{б01}$

Пусть $I_{к02} = 2mA$, $U_{к02} = U_{б01} = 4.096B$.

$$R_{к2} = \frac{E_p - U_{к02}}{I_{к02} + I_{б01}} = 2.885k\Omega$$

Проверим условие слабого влияния следующего

каскада: $\frac{R_{к2}}{R_{вх1}} = 0.08 \ll 1$

Исходя из того, что K_{u2} известно из предварительно расчёта, из следующего уравнения найдём $R_{э2}$:

$$K_{u2} = \frac{-\beta R_{к2\sim}}{r_{б2} + r_{б2} + (\beta + 1)R_{э2}} = -4.262$$

$$R_{к2\sim} = \frac{R_{к2}R_{вх1}}{R_{к2} + R_{вх1}} = 2,671k\Omega$$

$$r_{б2} = \frac{\varphi_T}{I_{б02}} = 1.75k\Omega$$

$$I_{б02} = \frac{I_{к02}}{\beta} = 14.286\mu A$$

$$r_{б2} = \frac{\tau}{0.5C_k} = 85.714\Omega$$

$$R_{э2} = \frac{1}{1 + \beta} \cdot \left[\frac{\beta R_{к2\sim}}{K_{u2}} - (r_{б2} + r_{б2}) \right] = 609.18\Omega$$

$$I_{э02} = I_{к02} \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) = 2.014mA$$

$$U_{э02} = R_{э2}I_{э02} = 1.227B$$

$$U_{б02} = U_{э02} + 0,6 = 1.827B$$

$$I_{к12} = \frac{U_{к12}}{R_{к2}} = 458.587\mu A$$

$$I_{э12} = \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) I_{к12} = 461.863\mu A$$

$$I_{б12} = \frac{I_{к12}}{\beta} = 3.276\mu A$$

Рассчитаем входное сопротивление УК2: $R_{вх2} = r_{б2} + r_{б2} + (\beta + 1)R_{э2} = 87.73k\Omega$

Итоги:

$$I_{э02} = 2.014mA$$

$$U_{э02} = 1.227B$$

$$R_{вх2} = 87.73k\Omega$$

$$I_{к02} = 2mA$$

$$U_{к02} = 4.096B$$

$$K_{u2} = -4.262$$

$$I_{б02} = 14.286\mu A$$

$$U_{б02} = 1.827B$$

$$r_{б2} = 1.75k\Omega$$

Проверка условий работы БТ VT2 в АО и значений токов базы и коллектора:

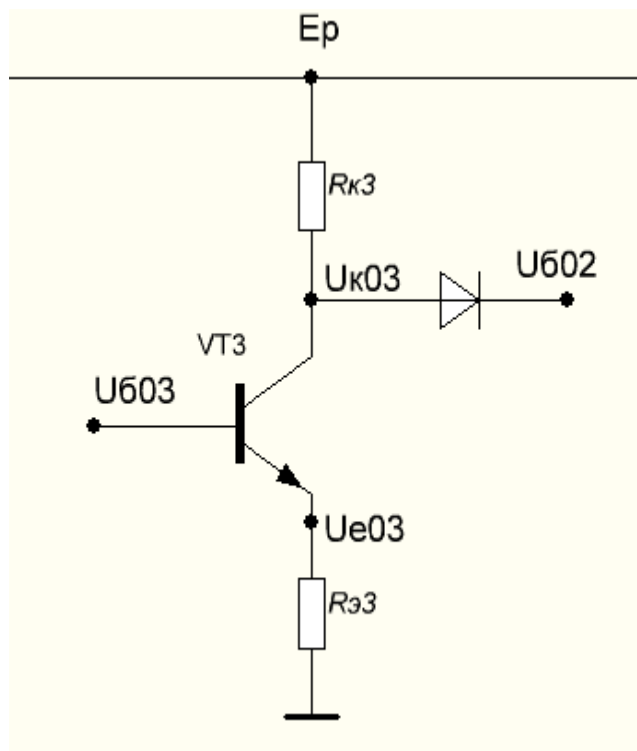
- 1) $I_{к02} = 2\text{мА} < I_{к\text{max}} = 20\text{мА}$ – условие выполнено.
- 2) $I_{б02} = 14.286\text{мкА} > 10 \cdot I_{кб0} = 4\text{мкА}$ – условие выполнено.
- 3) $U_{кэ2\text{min}} = U_{к02} - U_{б11} - U_{э02} - U_{э12} = 1.265\text{В} > 1\text{В}$ – условие выполнено.

Все условия выполняются, следовательно каскад рассчитан верно и рабочая точка находится в активной области, допустимый ток коллектора не превышен, а обратный ток базы много меньше тока базы.

Расчёт каскада с резистивной обратной связью в цепи эмиттера (УК3).

Входное сопротивление 2 каскада существенно больше сопротивление резистора коллектора, поэтому мы можем сразу 3 каскад сделать усилительным, без эмиттерного повторителя.

Для того, чтобы УСЗ работал в линейном режиме и VT3 работал в активной области, необходимо повысить потенциал коллектора, включив необходимое число диодов. В данном случае достаточно включить один диод, соответственно напряжение на коллекторе VT3 повысилось на 0.6В.



Дифференциальное сопротивление диода:

$$R_{\text{диф3}} = \frac{\Phi_T}{I_{б02}} = 1.75\text{кОм}$$

$$U_{к03} = U_{б02} + 0.6 = 2.427\text{В}$$

$$U_{к13} = U_{б12} = 310.481\text{мВ}$$

Выбираем коллекторный резистор из условия $R_{к3} \ll R_{вх2}$

$$R_{к3} = \frac{R_{вх2}}{11} = 7.975\text{кОм}$$

$$R_{к3\sim} = \frac{R_{к3} \cdot (R_{вх2} + R_{\text{диф3}})}{R_{к3} + R_{вх2} + R_{\text{диф3}}} = 7.323\text{кОм}$$

Рис.8. Принципиальная схема УК3.

Расчет постоянных токов:

$$I_{к03} = \frac{E_p - U_{к03}}{R_{к3\sim}} = 1.034\text{мА} \quad I_{б03} = \frac{I_{к03}}{\beta} = 7.387\text{мкА} \quad I_{э03} = I_{б03} + I_{к03} = 1.042\text{мА}$$

Исходя из того, что K_{u3} известно из предварительно расчёта, из следующего уравнения найдём $R_{э3}$:

$$r_{\beta3} = \frac{\varphi_T}{I_{\beta03}} = 3.384 \text{ кОм} \quad r_{\sigma3} = \frac{\tau}{0.5C_K} = 85.714 \text{ Ом}$$

$$R_{э3} = \frac{1}{1+\beta} \cdot \left[\frac{\beta R_{K3}}{K_{u3}} - (r_{\sigma3} + r_{\beta3}) \right] = 828.444 \text{ Ом}$$

$$R_{вх3} = r_{\sigma3} + r_{\beta3} + (1+\beta)R_{э3} = 120.281 \text{ кОм}$$

Расчет напряжений:

$$U_{э03} = R_{э3} \cdot I_{э03} = 0.863 \text{ В} \quad U_{\sigma03} = U_{э03} + 0.6 = 1.463 \text{ В}$$

$$U_{э13} = R_{э3} \cdot I_{э13} = 32.481 \text{ мВ} \quad U_{\sigma13} = \frac{U_{K13}}{K_{u3}} = 36.427 \text{ мВ}$$

Итоги:

$I_{э03} = 1.042 \text{ мА}$	$U_{э03} = 0.863 \text{ В}$	$R_{вх3} = 120.281 \text{ кОм}$
$I_{K03} = 1.034 \text{ мА}$	$U_{K03} = 2.427 \text{ В}$	$K_{u3} = -8.523$
$I_{\sigma03} = 7.387 \text{ мкА}$	$U_{\sigma03} = 1.463 \text{ В}$	$r_{\beta3} = 3.384 \text{ кОм}$

Проверка условий работы БТ VT3 в АО и значений токов базы и коллектора:

- 1) $I_{K03} = 1.042 \text{ мА} < I_{K \max} = 20 \text{ мА}$ – условие выполнено.
- 2) $I_{\sigma03} = 7.387 \text{ мкА} > 10 \cdot I_{K\sigma0} = 4 \text{ мкА}$ – условие выполнено.
- 3) $U_{Kэ3 \min} = U_{K03} - U_{\sigma12} - U_{э03} - U_{э13} = 1.221 \text{ В} > 1 \text{ В}$ – условие выполнено.

Все условия выполняются, следовательно каскад рассчитан верно и рабочая точка находится в активной области, допустимый ток коллектора не превышен, а обратный ток базы много меньше тока базы.

Расчёт каскада с резистивной обратной связью в цепи эмиттера (УК4).

Входное сопротивление 3 каскада существенно больше сопротивление резистора коллектора, поэтому мы можем сразу 4 каскад сделать усилительным, без эмиттерного повторителя.

Для того, чтобы УС4 работал в линейном режиме и VT4 работал в активной области, необходимо повысить потенциал коллектора, включив необходимое число диодов. В данном случае достаточно включить один диод, соответственно напряжение на коллекторе VT4 повысилось на 0.6В.

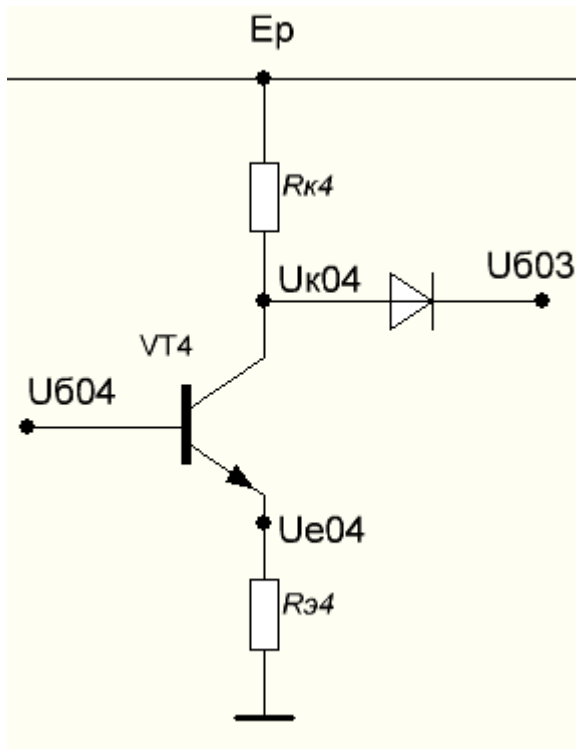


Рис.9. Принципиальная схема УК4.

Последующая проверка суммарного коэффициента усиления покажет, что при данном расчёте он несколько превышает нужное значение, поэтому в этом каскаде следует уменьшить коэффициент усиления и взять $K_{u4} = -11.615$

Расчет постоянных токов:

$$I_{к04} = \frac{E_p - U_{к04}}{R_{к4\sim}} = 0.856 \text{ мА} \quad I_{б04} = \frac{I_{к04}}{\beta} = 6.115 \text{ мкА} \quad I_{э03} = I_{б03} + I_{к03} = 0.862 \text{ мА}$$

Исходя из того, что K_{u4} известно из предварительно расчёта, из следующего уравнения найдём $R_{з4}$:

$$r_{б4} = \frac{\varphi_T}{I_{б04}} = 4.089 \text{ кОм} \quad r_{б4} = \frac{\tau}{0.5C_k} = 85.714 \text{ Ом}$$

$$R_{з4} = \frac{1}{1+\beta} \cdot \left[\frac{\beta R_{к4\sim}}{K_{u4}} - (r_{б4} + r_{б4}) \right] = 763 \text{ Ом}$$

$$R_{вх4} = r_{б4} + r_{б4} + (1+\beta) R_{з4} = 111.757 \text{ кОм}$$

Расчет напряжений:

$$U_{э04} = R_{з4} \cdot I_{э04} = 0.658 \text{ В} \quad U_{б04} = U_{э04} + 0.6 = 1.263 \text{ В}$$

$$U_{с14} = R_{к4} \cdot I_{с14} = 2.815 \text{ мВ} \quad U_{б13} = \frac{U_{к13}}{K_{u3}} = 36.427 \text{ мВ}$$

Итого:

$$\begin{array}{lll} I_{э04} = 0.862 \text{ мА} & U_{э04} = 0.658 \text{ В} & R_{вх4} = 111.757 \text{ кОм} \\ I_{к04} = 0.856 \text{ мА} & U_{к04} = 2.063 \text{ В} & K_{u4} = -11.615 \\ I_{б04} = 6.115 \text{ мкА} & U_{б04} = 1.258 \text{ В} & r_{б4} = 4.089 \text{ кОм} \end{array}$$

Проверка условий работы БТ VT4 в АО и значений токов базы и коллектора:

Дифференциальное сопротивление диода:

$$R_{диф4} = \frac{\varphi_T}{I_{б03}} = 3.384 \text{ кОм}$$

$$U_{к04} = U_{б03} + 0.6 = 2.063 \text{ В}$$

$$U_{к14} = U_{б13} = 36.427 \text{ мВ}$$

Выбираем коллекторный резистор из условия $R_{к4} \ll R_{вх3}$

$$R_{к4} = \frac{R_{вх3}}{12} = 10.023 \text{ кОм}$$

$$R_{к4\sim} = \frac{R_{к4} \cdot (R_{вх3} + R_{диф4})}{R_{к4} + R_{вх3} + R_{диф4}} = 9.272 \text{ кОм}$$

- 1) $I_{\kappa 04} = 0.856 \text{ мА} < I_{\kappa \max} = 20 \text{ мА}$ – условие выполнено.
- 2) $I_{\bar{6}04} = 6.115 \text{ мкА} > 10 \cdot I_{\kappa \bar{6}0} = 4 \text{ мкА}$ – условие выполнено.
- 3) $U_{\kappa \bar{4} \min} = U_{\kappa 04} - U_{\bar{6}13} - U_{\bar{9}04} - U_{\bar{9}14} = 1.366 \text{ В} > 1 \text{ В}$ – условие выполнено.

Все условия выполняются, следовательно каскад рассчитан верно и рабочая точка находится в активной области, допустимый ток коллектора не превышен, а обратный ток базы много меньше тока базы.

Расчёт входного эмиттерного повторителя (ЭП5).

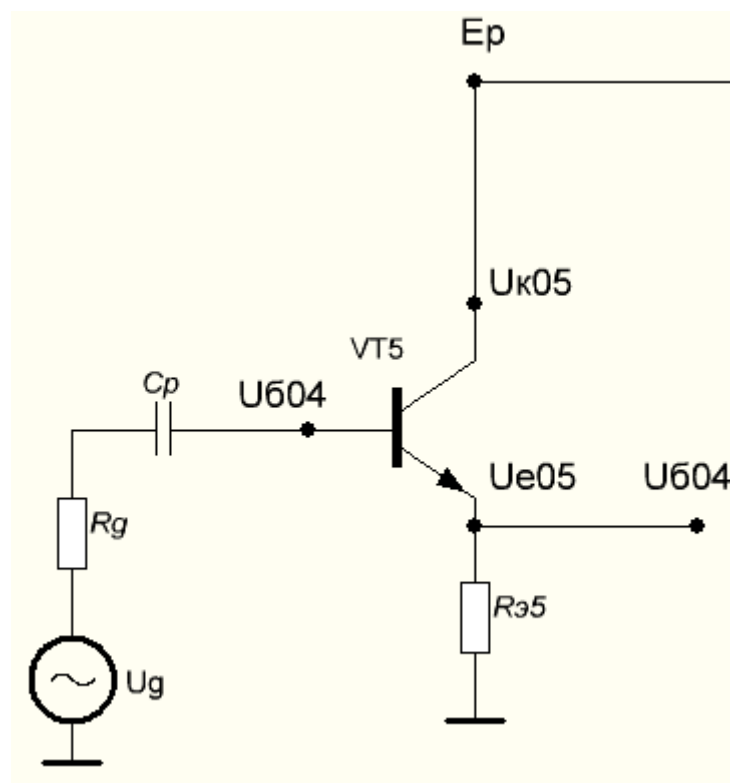


Рис.10. Принципиальная схема ЭП5 и источник сигнала.

Выберем $R_{\bar{9}5} = \frac{R_{\bar{6}x4}}{70} = 1.597 \text{ кОм}$

$$I_{R_{\bar{9}5}} = \frac{U_{\bar{6}04}}{R_{\bar{9}5}} = 0.788 \text{ мА}$$

Расчет постоянных токов:

$$I_{\bar{9}05} = I_{R_{\bar{9}5}} + I_{\bar{6}04} = 0.794 \text{ мА} \quad I_{\bar{6}05} = \frac{I_{\bar{9}05}}{1 + \beta} = 5.631 \text{ мкА} \quad I_{\kappa 05} = \beta \cdot I_{\bar{6}05} = 0.788 \text{ мА}$$

$$r_{\bar{\beta}5} = \frac{\varphi_T}{I_{\bar{6}05}} = 4.44 \text{ кОм} \quad r_{\bar{6}5} = \frac{\tau}{0.5 C_{\kappa}} = 85.714 \text{ Ом} \quad R_{\bar{9}5 \sim} = \frac{R_{\bar{9}5} R_{\bar{6}x4}}{R_{\bar{9}5} + R_{\bar{6}x4}} = 1.574 \text{ кОм}$$

$$R_{ex5} = r_{\bar{o}5} + r_{\beta5} + (\beta + 1)R_{\bar{a}5} = 226.466 \text{ кОм}$$

$$K_{u5} = \frac{(\beta + 1)R_{\bar{a}5}}{(\beta + 1)R_{\bar{a}5} + r_{\bar{o}5} + r_{\beta5}} = 0.98$$

В итоге получаем ожидаемый результат, а именно входное сопротивление первого каскада значительно превышает внутреннее сопротивление источника сигнала:

$$R_{ex7} = 226.466 \text{ кОм} > R_g = 6 \text{ кОм}$$

$$U_{\bar{a}05} = U_{\bar{o}04} = 1.258 \text{ В}$$

$$U_{\bar{o}05} = U_{\bar{a}05} + 0.6 = 1.858 \text{ В}$$

Итоги:

$$I_{\bar{a}05} = 0.794 \text{ мА}$$

$$U_{\bar{a}05} = 1.258 \text{ В}$$

$$R_{ex5} = 226.466 \text{ кОм}$$

$$I_{\bar{k}05} = 0.788 \text{ мА}$$

$$U_{\bar{k}05} = 10 \text{ В}$$

$$K_{u5} = 0.98$$

$$I_{\bar{o}05} = 5.631 \text{ мкА}$$

$$U_{\bar{o}05} = 1.858 \text{ В}$$

$$r_{\beta5} = 4.44 \text{ кОм}$$

Проверка условий работы БТ VT5 в АО и значений токов базы и коллектора:

$$1) I_{\bar{k}04} = 0.788 \text{ мА} < I_{\bar{k} \text{ max}} = 20 \text{ мА} - \text{условие выполнено.}$$

$$2) I_{\bar{o}04} = 5.631 \text{ мкА} > 10 \cdot I_{\bar{k}00} = 4 \text{ мкА} - \text{условие выполнено.}$$

$$3) U_{\bar{k} \bar{a}4 \text{ min}} = E_p - U_{\bar{o}14} - U_{\bar{a}05} - U_{\bar{a}15} = 8.736 \text{ В} > 1 \text{ В} - \text{условие выполнено.}$$

Все условия выполняются, следовательно каскад рассчитан верно и рабочая точка находится в активной области, допустимый ток коллектора не превышен, а обратный ток базы много меньше тока базы.

Проверка суммарного коэффициента усилителя.

После расчёта всех каскадов необходимо проверить, чтобы коэффициент усилителя был равен заданному $K_{u_скв}$:

$$K_{u_скв} = 0.8 K_{u1} K_{u2} K_{u3} K_{u4} K_{u5} = -324.982$$

Требуемое значение получено за счёт уменьшения коэффициента усиления 4-го усилительного каскада.

Расчет цепи отрицательной обратной связи (ООС).

Как правило, источник питания имеет некоторую нестабильность. Поэтому в усилителе с достаточно большим коэффициентом усиления (более 300) за счет нестабильности источника питания и других факторов, возможны уходы постоянной составляющей выходного напряжения, что может привести к заходу рабочей точки выходного каскада в область насыщения, а, следовательно, к резкому уменьшению коэффициента усиления на средних частотах и изменению формы выходного напряжения усилителя.

Поэтому, обычно, усилители охватывают обратной связью. На рис.12 показана схема усилителя с цепью отрицательной обратной связи. Необходимо рассчитать ее параметры R_6 , R_{oc1} , R_{oc2} , и C_ϕ так, чтобы компенсировать возможную нестабильность источника питания.

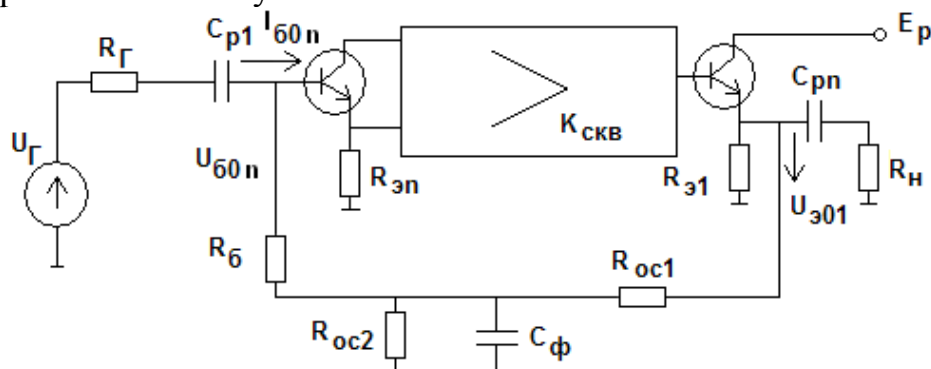


Рис.12. Структурная схема усилителя охваченного ОС.

Для расчёта цепи ОС зададим следующие исходные данные:

$$U_{э01} = 3.496V$$

$$R_g = 6k\Omega$$

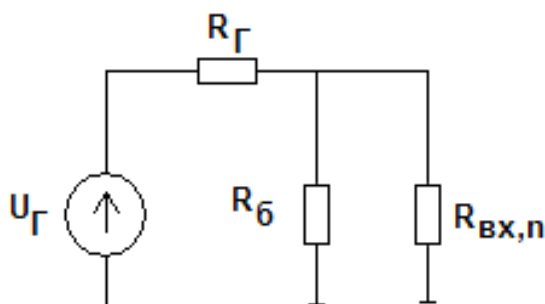
$$U_{60_yc} = U_{605} = 1.858V$$

$$K_{ex_yc} = 0,8$$

$$I_{60_yc} = I_{605} = 5.631mA$$

$$R_{ex_yc} = R_{ex5} = 226.466k\Omega$$

На рис. 13 показана эквивалентная схема усилителя по переменному сигналу (весь усилитель заменён R_{ex_n} , а C_ϕ выбрана таким образом, что $1/\omega C_\phi \rightarrow 0$).



Из данной схемы рассчитаем $R_{ex\Sigma}$ и R_6 :

$$R_{ex\Sigma} = 4 \cdot R_g = 24k\Omega$$

$$R_6 = \frac{R_{ex\Sigma} R_{ex_yc}}{R_{ex_yc} - R_{ex\Sigma}} = 26.845k\Omega$$

$$K_{вх_yc} = \frac{R_{вх_yc}}{R_{вх_yc} + R_g} = 0.974$$

Рис.13. Эквивалентная схема усилителя

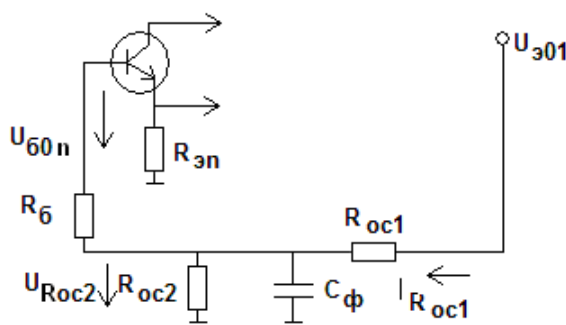


Рис.14.

$$I_{R_{oc1}} = 4I_{607} = 22.524 \text{ мкА}$$

$$U_{R_{oc2}} = U_{60_yc} + I_{R_{oc1}} R_{60} = 2.462 \text{ В}$$

$$R_{oc1} = \frac{U_{301} - U_{R_{oc2}}}{I_{R_{oc1}}} = 45.903 \text{ кОм}$$

$$R_{oc2} = \frac{U_{R_{oc2}}}{I_{R_{oc1}} - I_{60_yc}} = 145.771 \text{ кОм}$$

$$K_{U_{oc}} = \frac{U_{60_yc}}{U_{301}} = 0,531$$

$$T_{\phi} = \frac{3K_{U_{oc}} K_{ck6}}{2\pi f_{\min}} = 0.825 \text{ с}$$

$$R_{oc\Sigma} = \frac{1}{\frac{1}{R_{oc2}} + \frac{1}{R_{oc1}} + \frac{1}{R_{60} + R_{60_yc}}} = 30.682 \text{ кОм}$$

$$C_{\phi} = T_{\phi} \left(\frac{1}{R_{oc2}} + \frac{1}{R_{oc1}} \right) = 23.619 \text{ мкФ}$$

Расчет частотный характеристик усилительных каскадов.

После расчета всех каскадов на средних частотах необходимо рассчитать полосу пропускания каждого из них. Пусть усилитель состоит из пяти каскадов. Введем обозначение, $\dot{K}_{\Sigma}(j\omega)$ - суммарный сквозной коэффициент усиления по напряжению усилителя. Его можно рассчитать по формуле:

$$\dot{K}_{\Sigma}(j\omega) = \dot{K}_1(j\omega) \dot{K}_2(j\omega) \dot{K}_3(j\omega) \dot{K}_4(j\omega) \dot{K}_5(j\omega),$$

где каждый из коэффициентов $\dot{K}_i(j\omega)$ - это коэффициент усиления каждого отдельного каскада с учетом передачи входной цепи. Очевидно, что полоса пропускания всего усилителя будет определяться самым узкополосным усилителем. Поэтому для расчета полосы пропускания всего усилителя необходимо рассчитать полосу пропускания каждого.

Расчёт выходного эмиттерного повторителя (ЭП1) на высоких частотах.

Для расчета коэффициента усиления на высоких частотах воспользуемся полной эквивалентной схемой ЭП с учётом эквивалентной схемы транзистора на высоких частотах.

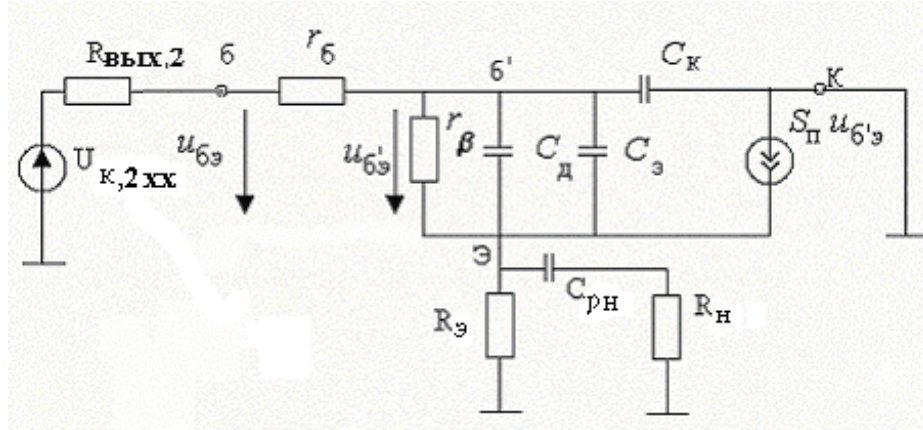


Рис. 15. Эквивалентная схема выходного ЭП на высоких частотах

$$S_{\Pi 1} = \frac{I_{K01}}{\varphi_T} = 258.156 \frac{\text{мА}}{\text{В}}$$

$$C_{\text{ex1}} = \frac{C_{\text{дуф1}}}{1 + S_{\Pi 1} R_n} = 1.393 \text{ нФ}$$

$$R_{\text{ббх2}} = R_{K2} = 2.885 \text{ кОм}$$

$$f_{\text{с1}} = \frac{1}{2\pi C_{\text{ex1}} \frac{R_{\text{д1}} r_{\text{ex1}}}{R_{\text{д1}} + r_{\text{ex1}}}} = 41.644 \text{ МГц}$$

$$C_{\text{дуф1}} = \frac{S_{\Pi 1}}{2\pi F_T} = 91.304 \text{ пФ}$$

$$r_{\text{ex1}} = r_{\beta 1} + (1 + \beta) R_n = 35.792 \text{ кОм}$$

$$R_{\text{д1}} = R_{\text{ббх2}} + r_{\text{с1}} = 2.971 \text{ кОм}$$

$$K_{u1}(f) = \frac{K_{u1}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{\text{с1}}}\right)^2}}$$

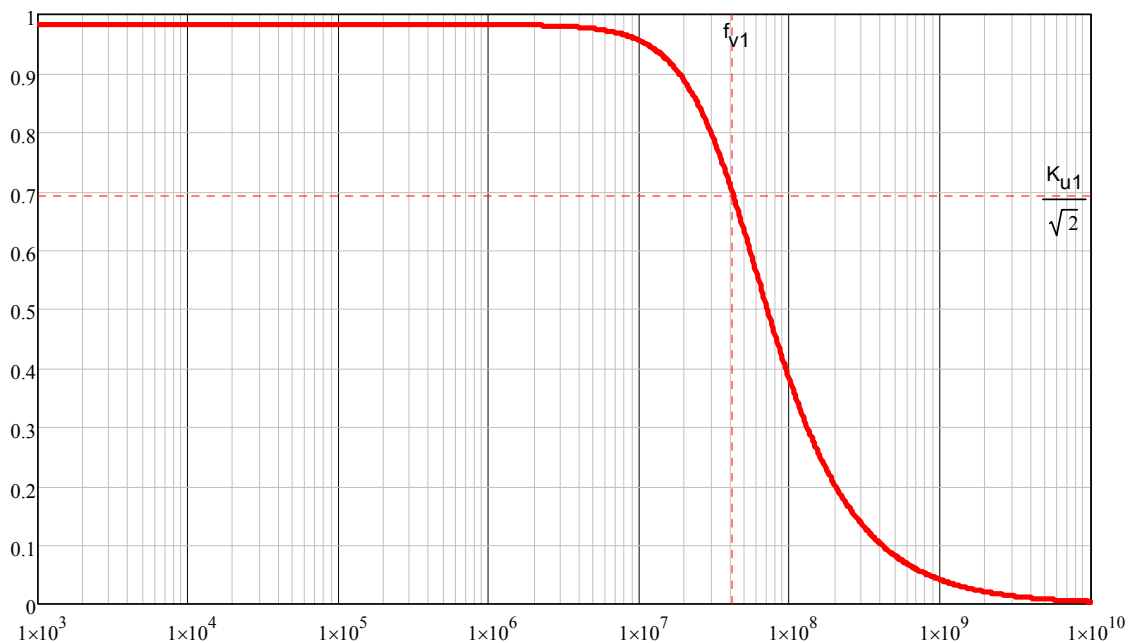


Рис. 16. АЧХ выходного эмиттерного повторителя ЭП1

Расчёт предвыходного усилительного каскада (УК2) на высоких частотах.

Для расчета частотной характеристики усилительного каскада также воспользуемся полной эквивалентной схемой УК с учетом эквивалентной схемы транзистора на высоких частотах.

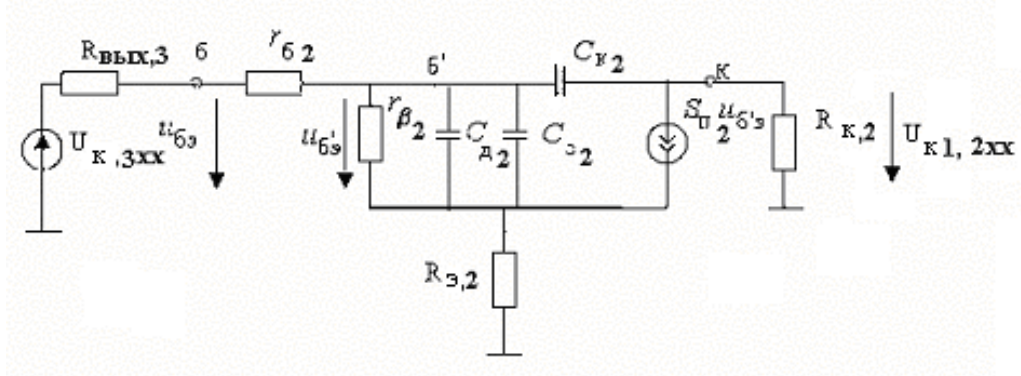


Рис. 17. Эквивалентная схема предвыходного усилителя УК2 на высоких частотах

$$S_{П2} = \frac{I_{K02}}{\varphi_T} = 80 \frac{\text{мА}}{\text{В}}$$

$$C_{\text{диф}2} = \frac{S_{П2}}{2\pi F_T} = 28.294 \text{ нФ}$$

$$R_{\text{вых}3} = R_{\kappa 3} = 7.975 \text{ кОм}$$

$$r_{\text{ex}2} = r_{\beta 2} + (1 + \beta) R_{\pi 2} = 87.644 \text{ кОм}$$

$$R_{g2} = R_{\text{вых}3} + r_{62} = 8.061 \text{ кОм}$$

$$C_{\text{ex}2} = \frac{C_{\text{диф}2}}{1 + S_{П2} R_{\pi 2}} + C_{\kappa} (1 + K_{u2}) = 18.985 \text{ нФ}$$

$$f_{62} = \frac{1}{2\pi C_{\text{ex}2} \frac{R_{g2} r_{\text{ex}2}}{R_{g2} + r_{\text{ex}2}}} = 73,941 \text{ МГц}$$

$$K_{u2}(f) = \frac{K_{u2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{62}}\right)^2}}$$

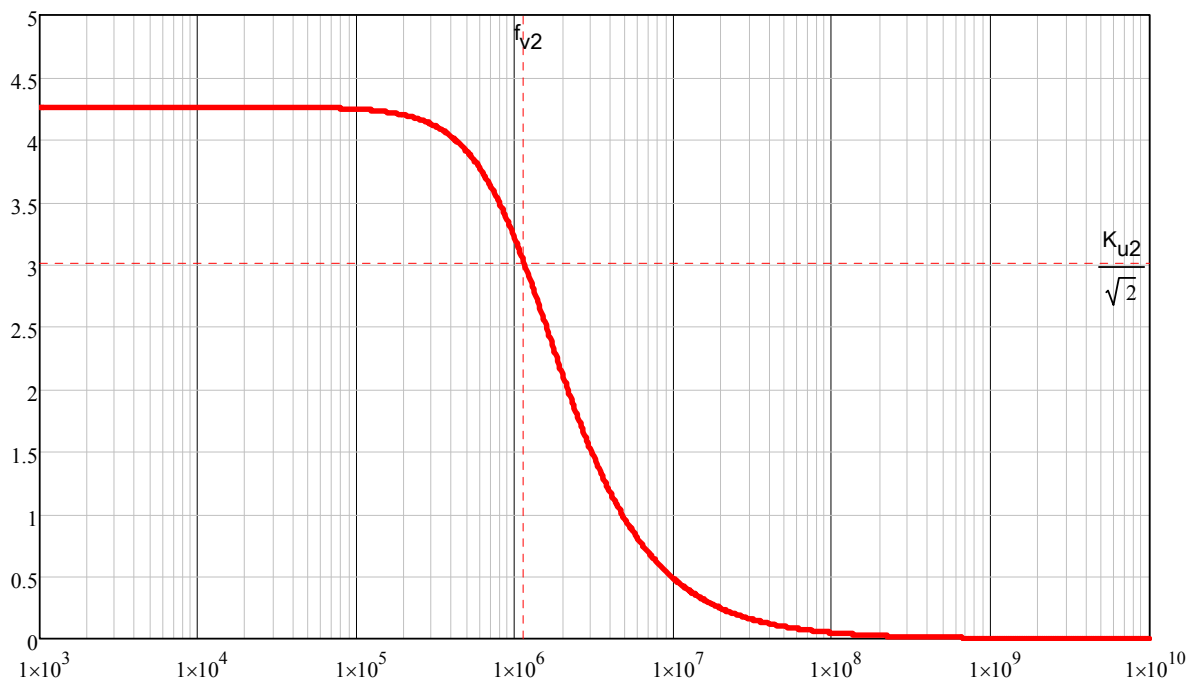


Рис. 18. АЧХ усилительного каскада УК2

Расчёт предвыходного усилительного каскада (УК3) на высоких частотах.

У данного каскада наименьшая верхняя частота, следовательно для коррекции верхней частоты всего усилителя, мы должны добавить такую дополнительную емкость, что бы скорректировать полосу пропускания усилителя.

Рассчитываем частотные характеристики усилительного каскада так же, как и для УК2.

$$\begin{aligned}
 S_{ПЗ} &= \frac{I_{к03}}{\varphi_T} = 41.366 \frac{мА}{В} & C_{диф3} &= \frac{S_{ПЗ}}{2\pi F_T} = 14.63 нФ \\
 R_{вых4} &= R_{к4} = 10.023 кОм & r_{ex3} &= r_{\beta3} + (1 + \beta) R_{э3} = 120.195 кОм \\
 R_{г3} &= R_{вых4} + r_{\beta3} = 10.109 кОм & C_{ex3} &= \frac{C_{диф3}}{1 + S_{ПЗ} R_{э3}} + C_{к} (1 + K_{u3}) = 33.746 нФ \\
 f_{\epsilon3} &= \frac{1}{2\pi (C_{ex3} + C_{дон}) \frac{R_{г3} r_{ex3}}{R_{г3} + r_{ex3}}} = 150 кГц & K_{u3}(f) &= \frac{K_{u3}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{\epsilon3}}\right)^2}} \\
 C_{дон} &= 80 нФ
 \end{aligned}$$

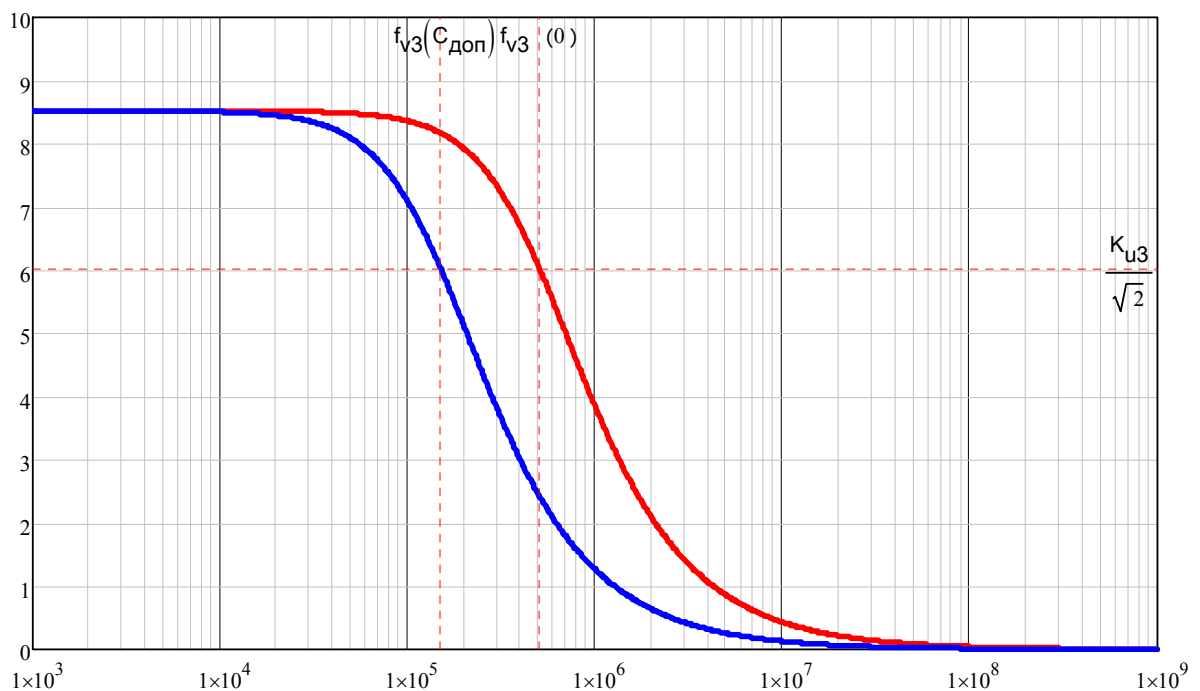


Рис. 19. АЧХ предвыходного усилительного каскада УК3

Расчёт предвыходного усилительного каскада (УК4) на высоких частотах.

Рассчитываем частотные характеристики усилительного каскада аналогично УК2 и УК3.

$$S_{\Pi 4} = \frac{I_{\kappa 04}}{\varphi_T} = 34.242 \frac{\text{мА}}{\text{В}}$$

$$R_{g4} = r_{g4} = 85.7 \text{ Ом}$$

$$f_{g4} = \frac{1}{2\pi C_{\text{ex}4} \frac{R_{g4} r_{\text{ex}4}}{R_{g4} + r_{\text{ex}4}}} = 41.665 \text{ МГц}$$

$$C_{\text{ду}\phi 4} = \frac{S_{\Pi 4}}{2\pi F_T} = 12.1 \text{ нФ}$$

$$r_{\text{ex}4} = r_{\beta 4} + (1 + \beta) R_{\text{э}4} = 111.67 \text{ кОм}$$

$$C_{\text{ex}4} = \frac{C_{\text{ду}\phi 4}}{1 + S_{\Pi 4} R_{\text{э}4}} + C_{\kappa} (1 + K_{u4}) = 44.599 \text{ нФ}$$

$$K_{u4}(f) = \frac{K_{u4}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{g4}}\right)^2}}$$

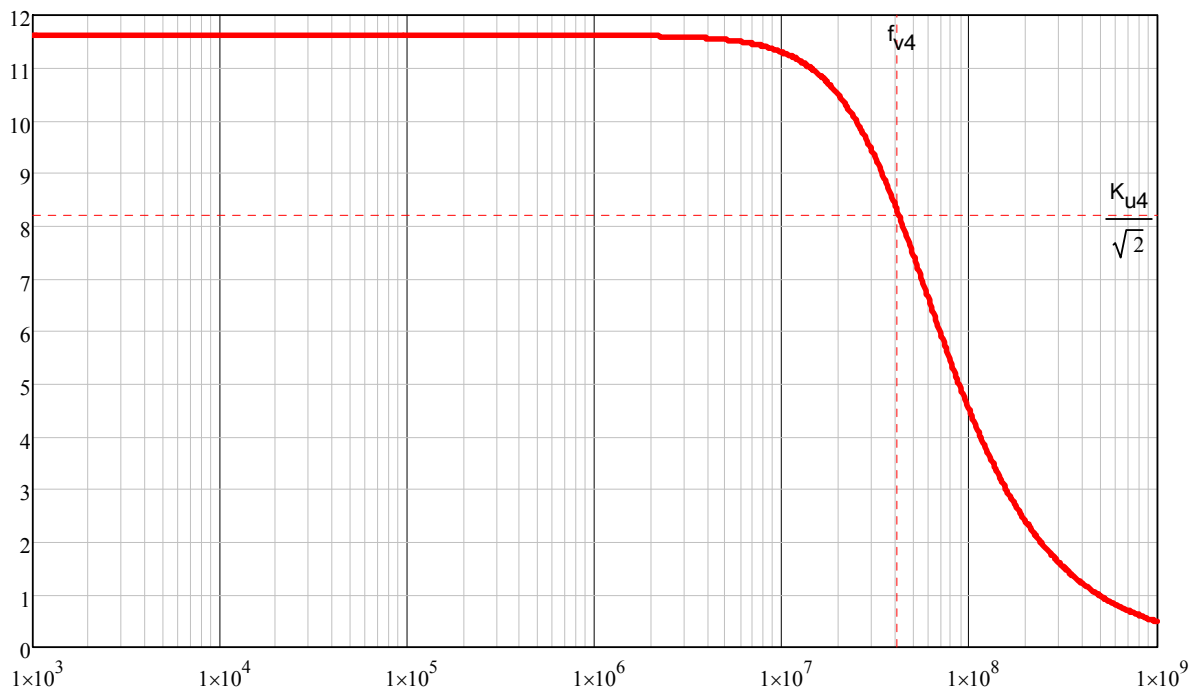


Рис. 20. АЧХ предвыходного усилительного каскада УК4

Расчет входного эмиттерного повторителя (ЭП5) на высоких частотах.

Рассчитываем частотные характеристики эмиттерного повторителя аналогично ЕП1.

$$S_{П5} = \frac{I_{к05}}{\varphi_T} = 31.533 \frac{мА}{В}$$

$$R_{г5} = \frac{R_g \cdot R_b}{R_g + R_b} = 4.99 кОм$$

$$f_{г5} = \frac{1}{2\pi C_{г5} \frac{R_{г5} r_{г5}}{R_{г5} + r_{г5}}} = 8.767 МГц$$

$$C_{диф5} = \frac{S_{П5}}{2\pi F_T} = 11.15 нФ$$

$$r_{г5} = r_{б5} + (1 + \beta) R_{э5} = 229.55 кОм$$

$$C_{г5} = \frac{C_{диф5}}{1 + S_{П5} R_{э5}} + C_{к} = 3.717 нФ$$

$$K_{u5}(f) = \frac{K_{u5}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{г5}}\right)^2}}$$

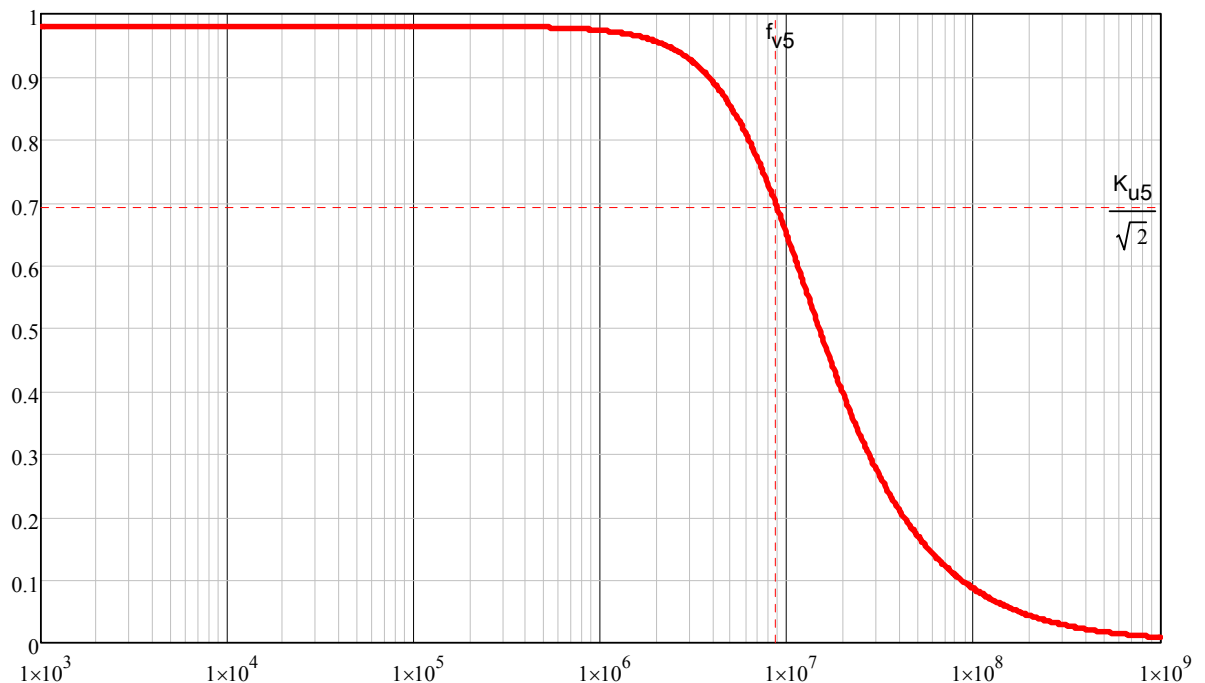


Рис. 21. АЧХ выходного эмиттерного повторителя ЭП5.

Табл.2. Итоговые верхние частоты усилителя.

Каскад	Верхняя частота, $f_{г}$, МГц
ЭП1	41.6
УК2	1.1
УК3	0.5
УК4	41.7
ЭП5	8.8

Расчёт разделительных емкостей на входе C_{p1} и на выходе C_{p2} усилительного каскада.

Конденсаторы C_{p1} и C_{p2} рассчитываются из условия обеспечения нижней частоты f_{\min} полосы пропускания усилителя. C_{p1} и C_{p2} так, чтобы при перемножении коэффициентов передачи входной и выходной цепей на частоте f_{\min} общий коэффициент передачи $K_{\text{ex}} \cdot K_{\text{вых}} = 0,707$.

$$\omega_{\min} = 2\pi f_{\min} = 628.32 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Коэффициент передачи входной цепи можно рассчитать по формуле:

$$K_{\text{ex}}(j\omega) = \frac{j\omega C_{p1} R_{\text{ex_сум}}}{1 + j\omega C_{p1} (R_{\text{ex_сум}} + R_g)}$$

На f_{\min} этот коэффициент должен быть равен:

$$|K_{\text{ex}}(j\omega_{\min})| = \frac{\omega_{\min} C_{p1} R_{\text{ex_сум}}}{\sqrt{1 + (\omega_{\min} C_{p1} (R_{\text{ex_сум}} + R_g))^2}} = \frac{R_{\text{ex_сум}}}{\sqrt{2} (R_{\text{ex_сум}} + R_g)}$$

Коэффициент передачи выходной цепи можно рассчитать по формуле:

$$K_{\text{вых}}(j\omega) = \frac{j\omega C_{p2} R_n}{1 + j\omega C_{p2} (R_n + R_{\text{вых1}})}$$

На f_{\min} этот коэффициент должен быть равен:

$$|K_{\text{ex}}(j\omega_{\min})| = \frac{\omega_{\min} C_{p2} R_n}{\sqrt{1 + (\omega_{\min} C_{p2} (R_n + R_{\text{вых1}}))^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,841$$

Выходное сопротивление эмиттерного повторителя значительно меньше сопротивления нагрузки, поэтому им можно пренебречь.

С учетом указанных выше формул C_{p1} и C_{p2} можно рассчитать по формулам:

$$C_{p1} = \frac{1}{\sqrt{0,41} \omega_{\min} (R_{\text{ex_сум}} + R_g)} = 82.853 \text{ нФ}$$

$$C_{p2} = \frac{1}{\sqrt{0,41} \omega_{\min} R_n} = 9.942 \text{ мкФ}$$

$$K_{\text{ex}}(f) = \frac{j2\pi f C_{p1} R_{\text{ex_сум}}}{1 + j2\pi f C_{p1} (R_{\text{ex_сум}} + R_g)}$$

$$K_{\text{вых}}(f) = \frac{j2\pi f C_{p2} R_n}{1 + j2\pi f C_{p2} R_n}$$

АЧХ усилителя.

Суммарный коэффициент всего усилителя и его график рассчитывается по следующей формуле:

$$K_{\text{ус}}(f) = |K_{\text{вх}}(f) \cdot K_{\text{вых}}(f)| \cdot K_1(f) \cdot K_2(f) \cdot K_3(f) \cdot K_4(f) \cdot K_5(f)$$

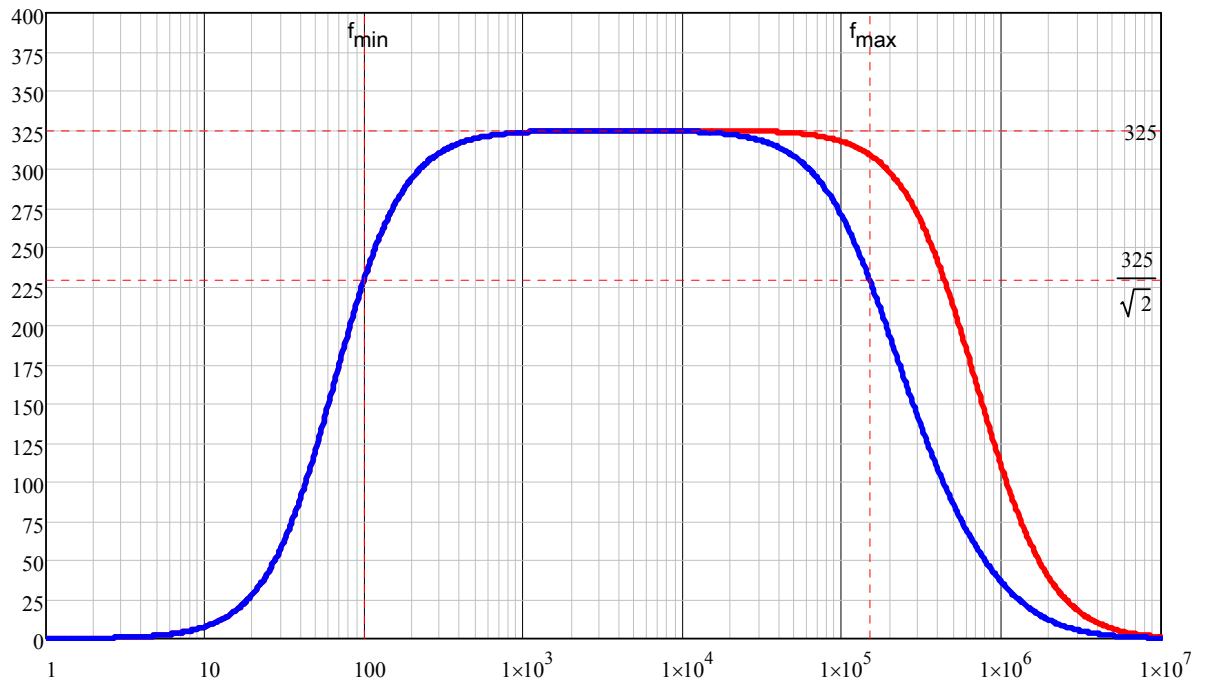


Рис. 22. АЧХ Усилителя.