

Национальный Исследовательский Университет  
Московский Энергетический Институт

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова

Курсовой проект по курсу  
"Физические процессы в электронных цепях"

Выполнила: Потрикеева Анастасия Алексеевна  
Группа: ЭР-15-15

Преподаватель: Болдырева Т.И.

Москва 2018 год



Спроектировать широкополосный резистивный усилитель низкой частоты, если заданы следующие параметры:

1. Амплитуда напряжения генератора сигнала  $U_g := 2 \text{ мВ}$
2. Внутреннее сопротивление источника сигнала  $R_g := 8 \text{ кОм}$
3. Напряжение на нагрузке  $U_n := 1.8 \text{ В}$
4. Внешнее сопротивление нагрузки  $R_n := 100 \text{ Ом}$
5. Напряжение питания коллектора  $E_p := 8 \text{ В}$
6. Минимальная частота полосы пропускания  $f_{\min} := 1.5 \text{ Гц}$
7. Максимальная частота полосы пропускания  $f_{\max} := 360 \text{ кГц}$

Тип транзистора: КТ325А

Параметры транзистора: N-P-N

$$\beta_{\min} := 30 \quad \beta_{\max} := 90 \quad (I_k = 10 \text{ мА}) \quad \beta := \sqrt{\beta_{\min} \cdot \beta_{\max}} = 51.962$$

$C_k := 2 \text{ пФ}$  ( $U_{кб} = 5 \text{ В}$ ,  $f = 10 \text{ МГц}$ ) - емкость коллекторного перехода

$C_э := 2 \text{ пФ}$  ( $U_{эб} = 4 \text{ В}$ ,  $f = 10 \text{ МГц}$ ) - емкость эмиттерного перехода

$U_{кб\max} := 15 \text{ В}$  - максимально допустимое постоянное напряжение коллектор-база

$U_{эб\max} := 4 \text{ В}$  - максимально допустимое постоянное напряжение эмиттер-база

$U_{кэ\max} := 15 \text{ В}$  - максимально допустимое постоянное напряжение коллектор-эмиттер

$I_{к0} := 30 \text{ мА}$  - максимально допустимый ток коллектора

$P_{к\max} := 150 \text{ мВт}$  - максимально допустимая постоянная рассеиваемая мощность на коллект.

$F_\beta := 1000 \text{ МГц}$  - предельная частота коэффициента передачи тока БТ

$\tau := 50 \text{ пс}$  - постоянная времени

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

Усилитель проектируется с учётом особенностей изготовления устройства по микроэлектронной технологии, поэтому во всех каскадах

1) Используется один тип биполярных транзисторов (БТ) КТ325 А.

2) Для стабилизации режима используются усилители с обратной связью по току в цепи эмиттера, а не цепи автосмещения, т.к. технологически встроить в интегральную схему ёмкости с большими номиналами невозможно. В усилителях с коэффициентом усиления более 300 необходимо применить одну из схем обратной связи, позволяющей предотвратить уход постоянной составляющей.

3) Для согласования с источником сигнала и внешней нагрузкой и обеспечения необходимого усиления на входе, между каскадами и на выходе усилителя, используются эмиттерные повторители.

4) Для обеспечения режимов усиления без искажения между каскадами применяются диодные схемы согласования уровней.

## Порядок расчета:

1. Расчет сквозного коэффициента усиления:

$$K_{\text{скв}} := \frac{U_n}{U_g} = 900$$

2. Эскизный расчет всего усилителя:

Для расчета используем схему многокаскадного усилителя (рис. 1). Между каскадами стоят эмиттерные повторители (ЭП) для уменьшения влияния усилительных каскадов друг на друга.

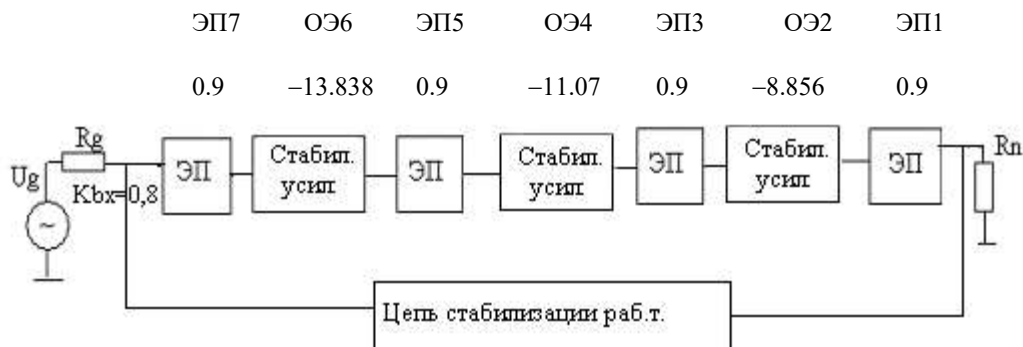


Рис. 1. Структурная схема многокаскадного усилителя низкой частоты

$$K_{U_{\text{скв}}} := K_{\text{вх}} \cdot K_{u7} \cdot K_{u6} \cdot K_{u5} \cdot K_{u4} \cdot K_{u3} \cdot K_{u2} \cdot K_{u1} = -900$$

Если

$$K_{\text{вх}} := 0.8$$

$$K_{u7} = K_{u5} = K_{u3} = K_{u1} = 0.9$$

Тогда

$$K_{u6} \cdot K_{u4} \cdot K_{u2} = \frac{K_{\text{скв}}}{K_{\text{вх}} \cdot K_{u1} \cdot K_{u3} \cdot K_{u5} \cdot K_{u7}}$$

$$K_{u2} = \alpha \cdot K_{u4}$$

$$K_{u6} = \alpha^{-1} \cdot K_{u4}$$

$$K_{u4} := \sqrt[3]{\frac{K_{\text{скв}}}{K_{\text{вх}} \cdot K_{u1} \cdot K_{u3} \cdot K_{u5} \cdot K_{u7}}} = 11.969$$

$$K_{u4} = 11.969$$

$$\alpha \sim 0.8 \quad K_{u4} := -11.07$$

$$K_{u2} := \alpha \cdot K_{u4} = -8.856$$

$$K_{u6} := \alpha^{-1} \cdot K_{u4} = -13.838$$

$$K_{u2} \cdot K_{u4} \cdot K_{u6} = -1.357 \times 10^3$$

$$\frac{K_{\text{скв}}}{K_{\text{вх}} \cdot K_{u1} \cdot K_{u3} \cdot K_{u5} \cdot K_{u7}} = 1.715 \times 10^3$$

Каскады 2,4,6 инвертируют фазу.

$$K_{u2} = -8.856$$

$$K_{u4} = -11.07$$

$$K_{u6} = -13.838$$

### Расчет выходного эмиттерного повторителя на средних частотах:

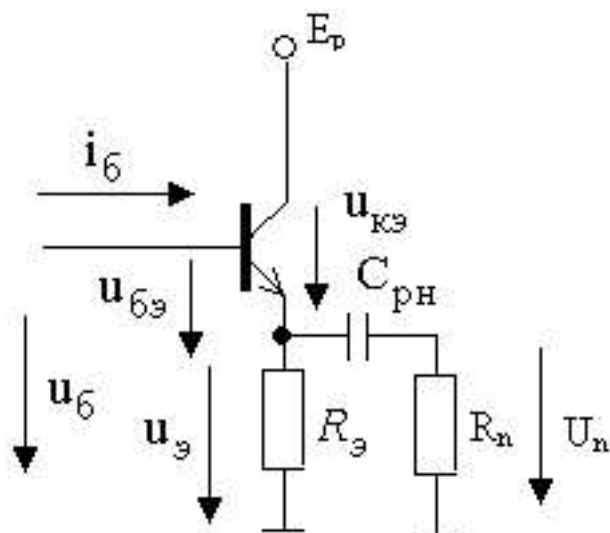


Схема эмиттерного повторителя представлена на рис. 2. Все напряжения, кроме напряжения на нагрузке  $U_n$ , имеют постоянную и переменную составляющие:

$$u_n(t) = U_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_n)$$

$$u_3(t) = U_{30} + U_{31} \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi_3)$$

Постановка задачи: известны  $U_n$ ,  $R_n$ ,  $E_p$ , выбран БТ. Необходимо выбрать  $R_3$ . Рассчитать  $U_{60}$ ,  $U_{61}$ ,  $I_{61}$ ,  $K_{u1}$  и  $R_{вх1}$ .

Рис. 2. Схема эмиттерного повторителя

1. Выбор режима ЭП по постоянному току и напряжению:

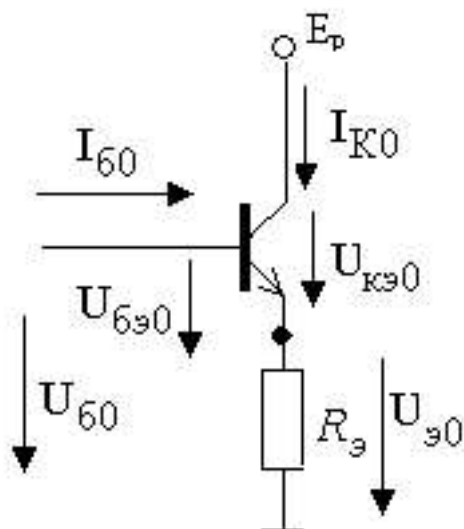


Рис. 3. Эквивалентная схема ЭП по пост. току

Эквивалентная схема ЭП по постоянному току представлена на рис. 3. Для этого при самом большом токе  $I_{к0max}$  должно выполняться неравенство  $U_{кэmin} > 1$  В. При этом должно выполняться неравенство  $I_{к0max} < I_{кдоп}$  (рис. 4.)

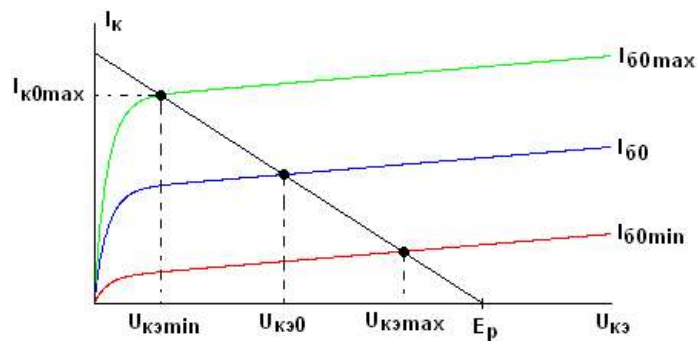


Рис. 4. Выбор рабочей точки БТ в ЭП1

## 2. Порядок расчета ЭП1:

### 1) Выбор начального сопротивления:

$$R_{э1} := R_n = 100 \quad \text{Ом}$$

### 2) Расчет нагрузки ЭП1 по переменному току:

$$R_{э1экв} := \frac{1R_{э1} \cdot R_n}{1R_{э1} + R_n} = 50 \quad \text{Ом}$$

$$I_{э1} := \frac{U_n}{R_{э1экв}} = 0.036 \quad \text{А} \quad I_{э1} = 36 \quad \text{мА} - \text{переменная составляющая тока эмиттера}$$

### 3) Выбор постоянной составляющей тока эмиттера:

$$I_{э01} := 1.25 \cdot I_{э1} = 0.045 \quad \text{А} \quad I_{э01} = 45 \quad \text{мА}$$

### 4.1) Расчет постоянного напряжения на сопротивлении в цепи эмиттера и максимального тока $I_{\max}$ :

$$U_{э01} := I_{э01} \cdot R_{э1} = 4.5 \quad \text{В}$$

$$I_{э\max} := I_{э01} + I_{э1} = 0.081 \quad \text{А} \quad I_{э\max} = 81 \quad \text{мА}$$

### 4.2) Максимальное напряжение на эмиттере:

$$U_{э\max} := U_{э01} + U_n = 6.3 \quad \text{В}$$

### 5) Проверка условия нахождения БТ в активной области при максимальном напряжении на эмиттере:

$$E_p - U_{э\max} = 1.7 \quad \text{В} > 1 \text{ В} \quad I_{э\max} = 81 \text{ мА} > I_{\text{кдоп}} = 30 \quad (\text{мА}) \quad \text{условие не выполнено}$$

Тогда ,нужно воспользоваться схемой ЭП с генератором тока в цепи эмиттера:

В данной цепи вся переменная составляющая идет через нагрузку,соответственно :

$$I_n := \frac{U_n}{R_n} = 0.018 \quad (\text{In} = 18 \text{ мА})$$

$$I_{э1} := I_n = 0.018 \quad \text{А}$$

Чтобы транзистр не заходил в ОО и не вносил нелинейные искажения,примем:

$$I_{э01} := 1.25 \cdot I_{э1} = 0.023 \quad \text{А} \quad I_{э01} = 23 \quad \text{мА} \quad \text{Этот же ток является током коллектора для второго транзистора.}$$

Расчет токов эмиттера и базы транзистора VTгт:

Т.к. для генератора тока мы берем тот же тип транзистора :

$$\beta_{гт} := \beta = 51.962$$

$$I_{когт} := I_{э01}$$

$$I_{богт} := \frac{I_{когт}}{\beta_{гт}} = 4.33 \times 10^{-4} \quad \text{А} \quad I_{богт} = 0.4 \text{ мА}$$

$$I_{эогт} := (\beta_{гт} + 1) \cdot I_{богт} = 0.023 \quad \text{А} \quad I_{эогт} = 23 \text{ мА}$$

Выбор  $R_{эгт}$ .

Для обеспечения достаточной стабильности постоянного тока коллектора и повышения выходного сопротивления транзистора по переменному сигналу в 10-15 раз, достаточно выбрать  $R_{эгт} = (25-30) \text{ Ом}$ .

Расчет сопротивлений  $R_{д1}$  и  $R_{д2}$ :

Если учесть, что  $I_{дел} := 10 \cdot I_{богт} = 4.33 \times 10^{-3} \text{ А}$

$$R_{эгт} := 27 \text{ Ом}$$

$$U_{б0гт} := I_{эогт} \cdot R_{эгт} + 0.6 = 1.219 \text{ В}$$

$$\text{Тогда } R_{д1} := \frac{(E_p - U_{б0гт})}{I_{дел}} = 1.566 \times 10^3 \text{ Ом} \quad R_{д1} = 1.566 \text{ кОм}$$

$$R_{д2} := \frac{U_{б0гт}}{I_{дел} - I_{богт}} = 312.845 \text{ Ом} \quad R_{д2} = 0.3 \text{ кОм}$$

Выбор постоянного напряжения на эмиттере БТ VT1.

Условие выбора: транзисторы VT1 и VTгт должны работать в АО. Для этого должны выполняться следующие равенства:

$$U_{кэ1\min} := E_p - U_{э01} - U_n$$

$$U_{кэ1\min} \geq 1 \text{ В}$$

$$U_{кэгт\min} := U_{э01} - R_{эгт} \cdot I_{эогт} - U_n$$

$$U_{кэгт\min} \geq 1 \text{ В}$$

Если учесть, что  $U_{кэ1\min\text{доп}} := 1 \text{ В}$

$$\text{Тогда } U_{э01} := 2 + U_n + R_{эгт} \cdot I_{эогт} = 4.419 \text{ В}$$

$$U_{кэ1\min} := E_p - U_{э01} - U_n = 1.781 \text{ В}$$

$$U_{кэ1\min} \geq 1 \text{ В}$$

$$U_{кэгт\min} := U_{э01} - R_{эгт} \cdot I_{эогт} - U_n = 2 \text{ В}$$

$$U_{кэгт\min} \geq 1 \text{ В}$$

Следовательно транзисторы работают в АО.

7) Расчет  $K_{u1}$  и  $R_{вх}$ :

$$I_{\bar{6}01} := \frac{I_{\bar{5}01}}{1 + \beta} = 4.248 \times 10^{-4} \quad \text{А} \quad I_{\bar{6}01} = 0.43 \quad \text{мА}$$

$$\varphi_T := 25 \cdot 10^{-3}$$

$$r_{\beta 1} := \frac{\varphi_T}{I_{\bar{6}01}} = 58.846 \quad \text{Ом} \quad r_{\bar{6}1} := \frac{\tau}{0.5C_k} = 50 \quad \text{Ом}$$

$$K_{u1} := \frac{R_n \cdot (1 + \beta)}{R_n \cdot (1 + \beta) + r_{\beta 1} + r_{\bar{6}1}} = 0.98$$

$$U_{\bar{6}1} := (r_{\beta 1} + r_{\bar{6}1}) \cdot I_{\bar{6}01} + R_n \cdot I_n = 1.846 \quad \text{В - переменная составляющая напряжения на базе БТ}$$

$$R_{вх1} := R_n \cdot (1 + \beta) + r_{\beta 1} + r_{\bar{6}1} = 5404.999 \quad \text{Ом} \quad R_{вх1} = 5.4 \text{кОм}$$

$$U_{\bar{6}01} := U_{\bar{5}01} + 0.6 = 5.019 \quad \text{В}$$

Итог расчета:  $R_{\bar{5}1} = 100 \quad \text{Ом} \quad I_{\bar{6}01} = 0.43 \quad \text{мА} \quad U_{\bar{6}1} = 1.846 \quad \text{В}$

$$R_{вх1} = 5.4 \text{кОм} \quad K_{u1} = 0.98 \quad r_{\beta 1} = 58.846 \quad \text{Ом}$$

$$U_{\bar{6}01} = 5.019 \quad \text{В}$$



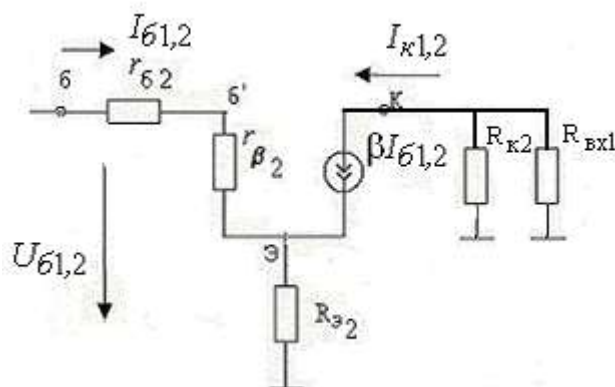
### Расчет каскада с резистивной обратной связью в цепи эмиттера:

1. Транзистор должен работать в активной области,

т.е.  $U_{кэ2.min} > 1 \quad В$

2. Должны выполняться условия слабого влияния следующего каскада, т.е.

$$I_{б01} \ll I_{к02}, \quad R_{к2} \ll R_{вх1}$$



Эквивалентная схема по малому сигналу второго усилителя с учетом влияния первого эмиттерного повторителя показана на рис. 5.

Рис. 5. Эквивалентная схема УС2

2. Порядок расчета УС2:

1) Выберем  $I_{к02} := 10 \cdot I_{б01} = 4.248 \times 10^{-3} \quad А \quad I_{к02} = 4.3 \quad мА$

2) Т.к.  $U_{к02} := U_{б01} = 5.019 \quad В$

то  $R_{к2} := \frac{E_p - U_{к02}}{I_{к02} + I_{б01}} = 637.851 \quad Ом$

Для этого усилителя нагрузка по переменному сигналу равна:

$$R_{к2эКВ} := \frac{R_{к2} \cdot R_{вх1}}{R_{к2} + R_{вх1}} = 570.523 \quad Ом \quad R_{к2эКВ} = 571 \quad Ом$$

3) Проверка  $\frac{R_{к2}}{R_{вх1}} = 0.118 \ll 1$

4) Найдем  $R_{э2}$ :

$K_{у2} = -8.856$  (по предварительному расчету)

Из формулы:  $K_{у2} = \frac{-\beta \cdot R_{к2эКВ}}{r_{б2} + r_{б2} + (\beta + 1)R_{э2}}$  выразим  $R_{э2}$ , предварительно вычислив  $r_{б2}$  и  $r_{б2}$ :

$$I_{б02} := \frac{I_{к02}}{\beta} = 8.176 \times 10^{-5} \quad А \quad I_{б02} = 0.08 \quad мА \quad r_{б2} := \frac{\varphi_T}{I_{б02}} = 305.774 \quad Ом \quad r_{б2} = 0.31 \quad кОм$$

$r_{б2} := 50 \quad Ом$

$$R_{\beta 2} := \frac{\frac{-\beta}{K_{u2}} R_{K2\text{экв}} - r_{\beta 2} - r_{\beta 2}}{\beta + 1} = 56.488$$

$$(\beta + 1) \cdot R_{\beta 2} = 2.992 \times 10^3 \gg r_{\beta 2} + r_{\beta 2} = 355.774 \text{ следовательно, } K_{u2} \text{ слабо зависит от } \beta$$

$$R_{\beta 2} = 46.7 \text{ Ом} - \text{сопротивление в цепи эмиттера}$$

$$5) \text{ Проверка условия } U_{K\beta 2, \min} > 1 \text{ В}$$

Переменная составляющая напряжения в цепи коллектора:

$$U_{K12} := U_{\beta 1} + 0.6 = 2.446 \text{ В}$$

Переменная составляющая тока в цепи коллектора:

$$I_{K12} := \frac{U_{K12}}{R_{K2}} = 3.835 \times 10^{-3} \text{ А} \quad I_{K12} = 3.835 \text{ мА}$$

$$I_{K02} = 4.248 \times 10^{-3} \text{ что бы не было искажений, нужно, что бы } I_{K02} = I_{K12} * 1.25$$

$$I_{K12} \cdot 1.25 = 4.794 \times 10^{-3} \text{ условие выполнено.}$$

Постоянная составляющая тока в цепи эмиттера:

$$I_{\beta 02} := \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \cdot I_{K02} = 4.33 \times 10^{-3} \text{ А} \quad I_{\beta 02} = 4.33 \text{ мА}$$

Переменная составляющая тока эмиттера:

$$I_{\beta 12} := \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \cdot I_{K12} = 3.909 \times 10^{-3} \text{ А} \quad I_{\beta 12} = 1.465 \text{ мА}$$

Постоянное напряжение на эмиттере:

$$U_{\beta 02} := R_{\beta 2} \cdot I_{\beta 02} = 0.245 \text{ В}$$

$$U_{K\beta 2 \min} := U_{K02} - U_{K12} - U_{\beta 02} - I_{\beta 12} \cdot R_{\beta 2} = 2.108 \text{ В}$$

Минимальное напряжение на коллекторно-эмиттерном переходе больше 1 В, следовательно транзистор работает в активной области

6) Расчет  $U_{\beta 02}$ :

$$U_{\beta 02} := 0.6 \text{ В}$$

$$U_{\beta 02} := U_{\beta 02} + U_{\beta 02} = 0.845 \text{ В}$$

7) Расчет  $R_{\beta 2}$ :

$$R_{\beta 2} := r_{\beta 2} + r_{\beta 2} + (\beta + 1)R_{\beta 2} = 3.347 \times 10^3 \text{ Ом} \quad R_{\beta 2} = 2.8 \text{ кОм}$$

8) Расчет  $R_{\beta 2}$ :

$$R_{\beta 2} := \frac{U_{\beta 02}}{I_{\beta 02}} = 56.488 \text{ Ом} \quad R_{\beta 2} := R_{\beta 2}$$

9) Расчет  $U_{\beta 12}$ :

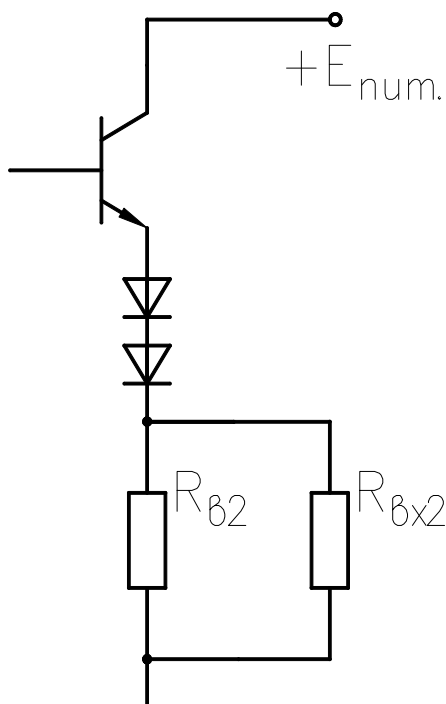
$$U_{\beta 12} := \frac{U_{K12}}{|K_{u2}|} = 0.276 \text{ В} \quad K_{u2} := \frac{-\beta \cdot R_{K2\text{экв}}}{r_{\beta 2} + r_{\beta 2} + (\beta + 1)R_{\beta 2}} = -8.856$$

### Итоги расчета УС2:

$$\begin{aligned} I_{602} &= 0.08 \text{ мА} & U_{612} &= 0.276 \text{ В} & R_{\text{вх}2} &= 3.5 \text{ кОм} \\ U_{602} &= 0.845 \text{ В} & R_{\text{э}2} &= R_{\text{вых}} &= 56.5 \text{ Ом} \end{aligned}$$

### Расчет промежуточного эмиттерного повторителя:

#### 1. Схема ЭП3:



Для того чтобы УС4 работал в линейном режиме и VT4 работал в активной области необходимо повысить потенциал  $U_{\text{э}3}$  транзисторе VT3, включив необходимое число диодов.

#### 2. Расчет ЭП3:

##### 1) Постоянная составляющая в цепи эмиттера:

$$U_{\text{э}3} := U_{602} + 2 \cdot 0.6 = 2.045 \text{ В}$$

##### 2) Постоянный ток эмиттера третьего ЭП:

$$R_{\text{б}2} := 1000 \text{ Ом} \quad (\text{Входное сопротивление каскада выбирает из идеи, что диф. сопротивление диодов были малы})$$

$$I_{\text{Рв}2} := \frac{U_{602}}{R_{\text{б}2}} = 8.446 \times 10^{-4} \quad I_{\text{Рв}2} = 0.8 \text{ мА}$$

$$I_{\text{э}3} := I_{\text{Рв}2} + I_{602} = 9.264 \times 10^{-4} \quad I_{\text{э}3} = 0.9 \text{ мА}$$

##### 3) Расчет дифференциальных сопротивлений диодов:

$$R_{\text{диф}} := \frac{\varphi_{\text{T}}}{I_{\text{э}3}} = 26.987 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{дифсум}} := 2R_{\text{диф}} = 53.975 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{э}3} := R_{\text{дифсум}} + \frac{R_{\text{б}2} \cdot R_{\text{вх}2}}{R_{\text{б}2} + R_{\text{вх}2}} = 823.956 \text{ Ом} \quad \text{сопротивление цепи эмиттера}$$

4) Расчет коэффициента передачи третьего ЭП:

$$r_{\beta 3} := \frac{\varphi_T \cdot (1 + \beta)}{I_{\beta 03}} = 1.429 \times 10^3 \quad \text{Ом} \quad r_{\beta 3} := \frac{\tau}{0.5C_K} = 50 \quad \text{Ом}$$

$$K_{u3} := \frac{(1 + \beta) \cdot (R_{\beta 3} - R_{\text{дифсум}})}{(1 + \beta) \cdot R_{\beta 3} + r_{\beta 3} + r_{\beta 3}} = 0.904$$

5) Переменная и постоянная составляющие напряжения на базе БТ:

$$U_{\beta 13} := \frac{U_{\beta 12}}{K_{u3}} = 0.306 \quad \text{В}$$

$$U_{\beta 03} := U_{\beta 03} + 0.6 = 2.645 \quad \text{В}$$

6) Постоянный ток на базе БТ:

$$I_{\beta 03} := \frac{I_{\beta 03}}{1 + \beta} = 1.749 \times 10^{-5} \quad \text{А} \quad I_{\beta 03} = 0.02 \quad \text{мА}$$

7) Входное сопротивление ЭП:

$$R_{\text{вх}3} := r_{\beta 3} + r_{\beta 3} + (\beta + 1)R_{\beta 3} = 4.512 \times 10^4 \quad \text{Ом} \quad R_{\text{вх}3} = 45 \quad \text{кОм}$$

8) Выходное сопротивление ЭП:

$$R_{\text{вых}3} := \frac{U_{\beta 03}}{I_{\beta 03}} = 2.207 \times 10^3 \quad \text{Ом} \quad R_{\text{вых}3} = 2.2 \quad \text{кОм}$$

**Итоги расчета:**

$$R_{\beta 2} = 1 \times 10^3 \quad \text{Ом}$$

$$R_{\text{вх}3} = 45 \quad \text{кОм}$$

$$R_{\text{вых}3} = 2.2 \quad \text{кОм}$$

$$U_{\beta 03} = 2.645 \quad \text{В}$$

$$U_{\beta 13} = 0.306 \quad \text{В}$$

$$I_{\beta 03} = 0.02 \quad \text{мА}$$

$$K_{u3} = 0.904$$

**Расчет 4-го каскада:**

1. Схема 4-го усилительного каскада:

2. Выбор  $R_K$ :

$$R_{K4} := \frac{R_{\text{вх}3}}{10} = 4.512 \times 10^3 \quad \text{Ом}$$

$$R_{K4'} := \frac{R_{K4} \cdot R_{\text{вх}3}}{R_{K4} + R_{\text{вх}3}} = 4.102 \times 10^3 \quad \text{Ом}$$

### 3. Расчет $I_{к04}$ :

$$U_{к04} := U_{603} = 2.645 \text{ В}$$

$$I_{к04} := \frac{E_p - U_{к04}}{R_{к4'}} = 1.306 \times 10^{-3} \text{ А}$$

$$I_{604} := \frac{I_{к04}}{\beta} = 2.513 \times 10^{-5} \text{ А}$$

$$I_{904} := I_{к04} \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = 1.331 \times 10^{-3}$$

### 4. Расчет $R_{94}$ :

$$r_{\beta4} := \frac{\varphi_T \cdot \beta}{I_{к04}} = 994.902 \text{ Ом}$$

$$r_{64} := \frac{\tau}{0.5C_k} = 50 \text{ Ом}$$

$$R_{94} := \frac{1}{\beta + 1} \cdot \left[ \frac{\beta \cdot R_{к4'}}{|K_{u4}|} - (r_{64} + r_{\beta4}) \right] = 343.787 \text{ Ом}$$

### 5. Расчет $R_{вх4}$ :

$$R_{вх4} := r_{64} + r_{\beta4} + (\beta + 1)(R_{94}) = 19252.374 \text{ Ом}$$

### 6. Расчет $U_{904}$ :

$$U_{90.4} := R_{94} \cdot I_{604} \cdot (1 + \beta) = 0.458 \text{ В}$$

### 7. Расчет $U_{604}$ :

$$U_{604} := U_{90.4} + 0.6 = 1.058 \text{ В}$$

$$U_{614} := \frac{U_{к04}}{|K_{u4}|} = 0.239 \text{ В}$$

### 8. Расчет $U_{к94min}$ :

$$U_{к94min} := U_{к04} - U_{613} - (U_{90.4} + R_{94} \cdot I_{904}) = 1.424 \text{ В}$$

## 5. Расчет ЭП5:

1) Постоянная составляющая в цепи эмиттера:

$$U_{э05} := U_{б04} + 2 \cdot 0.6 = 2.258 \quad \text{В}$$

2) Постоянный ток эмиттера третьего ЭП:

$$R_{в4} := 1100 \quad \text{Ом}$$

(Входное сопротивление каскада  
выбирает из идеи, что диф.  
сопротивление диодов были малы)

$$I_{Рв4} := \frac{U_{б04}}{R_{в4}} = 9.614 \times 10^{-4} \quad \text{А}$$

$$I_{э05} := I_{Рв4} + I_{б04} = 9.865 \times 10^{-4} \quad \text{А}$$

3) Расчет дифференциальных сопротивлений диодов:

$$R_{\text{диф}} := \frac{\varphi_T}{I_{э05}} = 25.342 \quad \text{Ом}$$

$$R_{\text{дифсум}} := 2R_{\text{диф}} = 50.684 \quad \text{Ом}$$

$$R_{э5} := R_{\text{дифсум}} + \frac{R_{в4} \cdot R_{вх4}}{R_{в4} + R_{вх4}} = 1.091 \times 10^3 \quad \text{Ом} \quad \text{сопротивление цепи эмиттера}$$

4) Расчет коэффициента передачи третьего ЭП:

$$r_{\beta5} := \frac{\varphi_T \cdot (1 + \beta)}{I_{э05}} = 1.342 \times 10^3 \quad \text{Ом} \quad r_{б5} := \frac{\tau}{0.5C_K} = 50 \quad \text{Ом}$$

$$K_{u5} := \frac{(1 + \beta) \cdot (R_{э3} - R_{\text{дифсум}})}{(1 + \beta) \cdot R_{э3} + r_{\beta3} + r_{б3}} = 0.908$$

5) Переменная и постоянная составляющие напряжения на базе БТ:

$$U_{б15} := \frac{U_{б14}}{K_{u5}} = 0.263 \quad \text{В}$$

$$U_{б05} := U_{э05} + 0.6 = 2.858 \quad \text{В}$$

6) Постоянный ток на базе БТ:

$$I_{б05} := \frac{I_{э05}}{1 + \beta} = 1.863 \times 10^{-5} \quad \text{А}$$

7) Входное сопротивление ЭП:

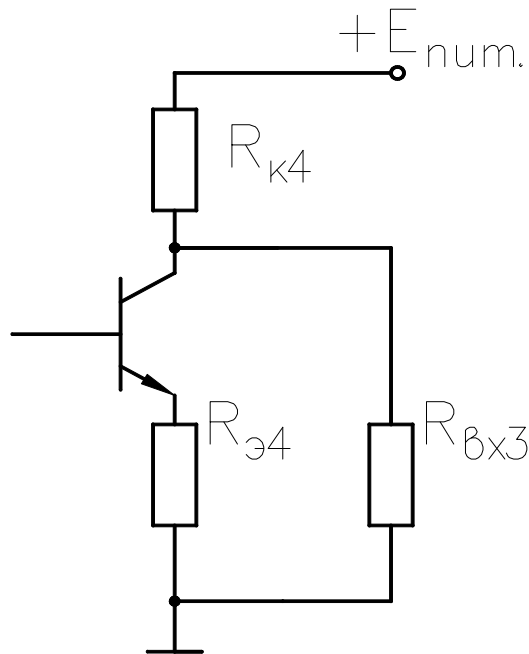
$$R_{вх5} := r_{б5} + r_{\beta5} + (\beta + 1)R_{э3} = 4.503 \times 10^4 \quad \text{Ом}$$

8) Выходное сопротивление ЭП:

$$R_{вых5} := \frac{U_{э05}}{I_{э05}} = 2.288 \times 10^3 \quad \text{Ом}$$

## Расчет 6-го каскада:

1. Схема 6-го усилительного каскада:



2. Выбор  $R_k$ :

$$R_{k6} := \frac{R_{bx5}}{10} = 4.503 \times 10^3 \quad \text{Ом}$$

$$R_{k6'} := \frac{R_{k6} \cdot R_{bx5}}{R_{k6} + R_{bx5}} = 4.094 \times 10^3 \quad \text{Ом}$$

3. Расчет  $I_{k04}$ :

$$U_{k06} := U_{605} = 2.858 \quad \text{В}$$

$$I_{k06} := \frac{E_p - U_{k06}}{R_{k6'}} = 1.256 \times 10^{-3} \quad \text{А} \quad I_{606} := \frac{I_{k04}}{\beta} = 2.513 \times 10^{-5}$$

$$I_{906} := I_{k06} \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = 1.28 \times 10^{-3} \quad \text{А}$$

4. Расчет  $R_{э4}$ :

$$r_{\beta6} := \frac{\varphi_T \cdot \beta}{I_{k06}} = 1.034 \times 10^3 \quad \text{Ом} \quad r_{66} := \frac{\tau}{0.5C_k} = 50 \quad \text{Ом}$$

$$R_{э6} := \frac{1}{\beta + 1} \cdot \left[ \frac{\beta \cdot R_{k6'}}{|K_{u6}|} - (r_{66} + r_{\beta6}) \right] = 269.782 \quad \text{Ом} \quad |K_{u6}| = 13.838$$

5. Расчет  $R_{BX4}$ :

$$R_{BX6} := r_{66} + r_{\beta 6} + (\beta + 1)(R_{\beta 6}) = 15372.15 \quad \text{Ом}$$

6. Расчет  $U_{\beta 04}$ :

$$U_{\beta 0.6} := R_{\beta 6} \cdot I_{\beta 06} \cdot (1 + \beta) = 0.359 \quad \text{В}$$

7. Расчет  $U_{\beta 04}$ :

$$U_{\beta 06} := U_{\beta 0.6} + 0.6 = 0.959 \quad \text{В}$$

$$U_{\beta 16} := \frac{U_{K06}}{|K_{u6}|} = 0.207 \quad \text{В}$$

8. Расчет  $U_{K\beta 4min}$ :

$$U_{K\beta 4min} := U_{K06} - U_{\beta 15} - (U_{\beta 0.6} + R_{\beta 6} \cdot I_{\beta 06}) = 1.89 \quad \text{В}$$

**Расчет 7-го каскада:**

1. Выбор  $R_{\beta 7}$ :

$$R_{\beta 7} := 900 = 900 \quad \text{Ом}$$

2. Расчет  $I_{R\beta 7}$ :

$$I_{R\beta 7} := \frac{U_{\beta 06}}{R_{\beta 7}} = 1.066 \times 10^{-3} \quad \text{А}$$

3. Расчет токов:

$$I_{\beta 07} := I_{R\beta 7} + I_{\beta 06} = 1.091 \times 10^{-3} \quad \text{А}$$

$$I_{\beta 07} := \frac{I_{\beta 07}}{1 + \beta} = 2.059 \times 10^{-5} \quad \text{А}$$

$$I_{K07} := \beta \cdot I_{\beta 07} = 1.07 \times 10^{-3} \quad \text{А}$$



#### 4. Расчет токов:

$$U_{\text{э}07} := I_{\text{э}07} \cdot R_{\text{э}7} = 0.982 \quad \text{В} \quad U_{\text{б}07} := U_{\text{э}07} + 0.6 = 1.582 \quad \text{В}$$

#### 4. Расчет $R_{\text{BX}7}$ :

$$r_{\beta 7} := \frac{\varphi_T \cdot \beta}{I_{\text{к}07}} = 1.214 \times 10^3 \quad \text{Ом} \quad r_{\text{б}7} := \frac{\tau}{0.5C_{\text{к}}} = 50 \quad \text{Ом}$$

$$R_{\text{BX}7} := r_{\text{б}7} + r_{\beta 7} + (\beta + 1) \cdot \frac{R_{\text{э}7} \cdot R_{\text{BX}6}}{R_{\text{э}7} + R_{\text{BX}6}} = 4.629 \times 10^4 \quad \text{Ом}$$

$$K_{\text{u}7} := \frac{(\beta + 1) \cdot \frac{R_{\text{э}7} \cdot R_{\text{BX}6}}{R_{\text{э}7} + R_{\text{BX}6}}}{r_{\text{б}7} + r_{\beta 7} + (\beta + 1) \cdot \frac{R_{\text{э}7} \cdot R_{\text{BX}6}}{R_{\text{э}7} + R_{\text{BX}6}}} = 0.973$$

#### Итоги расчета:

$$R_{\text{BXyc}} := R_{\text{BX}7} = 4.629 \times 10^4 \quad \text{Ом}$$

$$I_{\text{б}0\text{yc}} := I_{\text{б}07} = 2.059 \times 10^{-5} \quad \text{А}$$

$$K_{\text{u}7} = 0.973 \quad K_{\text{u}2} = -8.856 \quad K_{\text{u}4} = -11.07 \quad K_{\text{u}6} = -13.838$$

$$U_{\text{б}07} = 1.582 \quad \text{В}$$

$$K_{\text{u}3} = 0.904$$

$$K_{\text{BXyc}} := \frac{R_{\text{BXyc}}}{R_{\text{BXyc}} + R_{\text{г}}} = 0.853$$

$$K_{\text{u}1} = 0.98$$

$$K_{\text{u}5} = 0.908$$

#### 8. Проверка суммарного коэффициента усилителя $K_{\text{СКВ(сум)}}$ :

$$K_{\text{СКВ}\Sigma} := K_{\text{BXyc}} \cdot K_{\text{u}1} \cdot K_{\text{u}2} \cdot K_{\text{u}3} \cdot K_{\text{u}4} \cdot K_{\text{u}5} \cdot K_{\text{u}6} \cdot K_{\text{u}7} = -904.493$$

Рассчитаем цепь обратной связи:

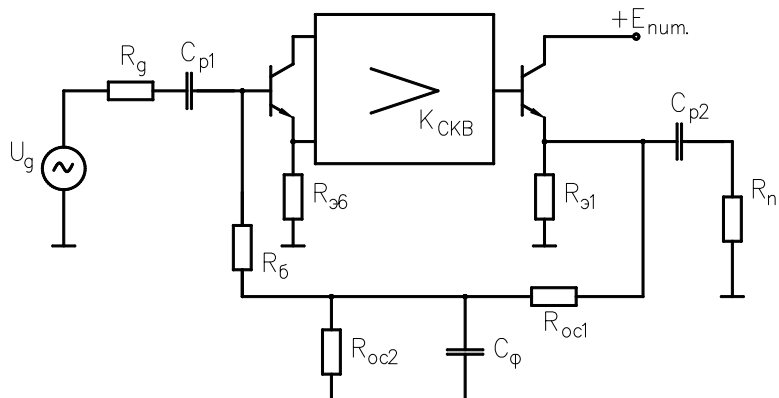


Рис. 8. Структурная схема усилителя с ООС

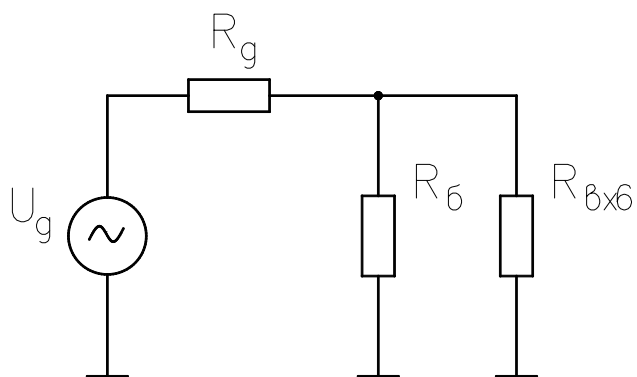
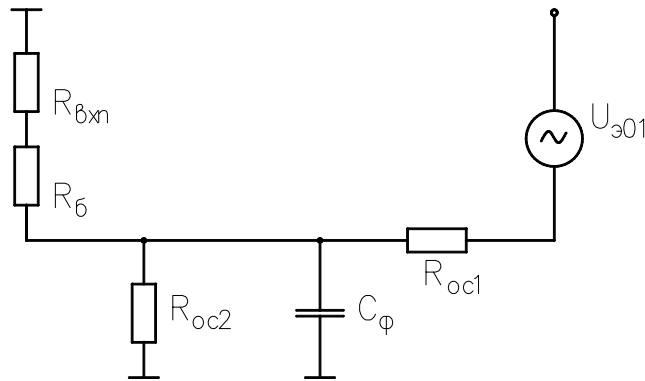


Рис. 9. Эквивалентная схема усилителя по переменному сигналу

Рассчитаем  $R_6$ :

$$K_{\text{вх.yc}} := 0.85 \quad R_{\text{BX}\Sigma} := \frac{K_{\text{вх.yc}} \cdot R_g}{1 - K_{\text{вх.yc}}} \quad R_{\text{BX}\Sigma} = 4.533 \times 10^4 \quad \text{Ом} \quad R_6 := \frac{R_{\text{BX}\Sigma} \cdot R_{\text{BX}7}}{R_{\text{BX}7} - R_{\text{BX}\Sigma}} = 2.187 \times 10^6 \quad \text{Ом}$$

Рассчитаем  $R_{\text{OC}1}$ ,  $R_{\text{OC}2}$  и  $C_\Phi$ :



$$I_{\text{ROC}1} := 4I_{607} = 8.238 \times 10^{-5} \quad \text{А}$$

$$U_{\text{ROC}2} := U_{607} + I_{607} \cdot R_6 \quad U_{\text{ROC}2} = 46.62 \quad \text{В}$$

Рассчитаем сопротивления  $R_{\text{OC}1}$  и  $R_{\text{OC}2}$ :

$$R_{\text{OC}1} := \frac{U_{301} - U_{\text{ROC}2}}{I_{\text{ROC}1}} \quad R_{\text{OC}1} = -5.113 \times 10^5 \quad \text{Ом}$$

$$R_{\text{OC}2} := \frac{U_{\text{ROC}2}}{I_{\text{ROC}1} - I_{607}} \quad R_{\text{OC}2} = 7.546 \times 10^5 \quad \text{Ом}$$

Рис. 9. Эквивалентная схема усилителя с ОС для расчёта  $C_\Phi$

Теперь рассчитаем ёмкость  $C_\Phi$  для заданной  $f_{\text{min}}$ , чтобы цепь ОС не влияла на АЧХ усилителя

$$K_{\text{UOC}} := \frac{U_{607}}{U_{301}} \quad K_{\text{UOC}} = 0.351$$

$$T_\Phi := \frac{K_{\text{UOC}} \cdot 3 \cdot K_{\text{CKB}}}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{min}}} \quad T_\Phi = 100.69 \quad \text{с}$$

$$R_{\text{OC}\Sigma} := \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{OC}2}} + \frac{1}{R_{\text{OC}1}} + \frac{1}{R_6 + R_{\text{BX}7}}} \quad R_{\text{OC}\Sigma} = -5.472 \times 10^6 \quad \text{Ом}$$

$$C_\Phi := T_\Phi \cdot \left( \frac{1}{R_{\text{OC}2}} + \frac{1}{R_{\text{OC}1}} \right) \quad C_\Phi = -6.349 \times 10^{-5} \quad \text{Ф}$$

$$U_g := 2 \cdot 10^{-3}$$

$$K_{u7} := 0.9$$

$$K_{u5} := K_{u7}$$

$$K_{u3} := K_{u5}$$

$$K_{u1} := K_{u3}$$

$$K_{u4} := \sqrt[3]{\frac{900}{0.8 \cdot 0.9 \cdot 0.9 \cdot 0.9 \cdot 0.9}} = 11.969$$

$$\alpha := 0.8$$







$$R_g := 8 \cdot 10^3$$





