

Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования  
Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
Институт радиотехники и электроники  
Кафедра формирования и обработки радиосигналов

Курсовой проект  
«Расчёт широкополосного резистивного усилителя низкой частоты»  
по курсу  
ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОННЫХ ЦЕПЯХ

Студент: Попов М.Г.  
Группа: ЭР-15-16  
Преподаватель: Болдырева Т.И.

Москва  
2019

## Оглавление

<b>Задание</b>	3
<b>Исходные данные</b>	3
<b>Предварительный расчёт усилителя</b>	4
Приближенный расчёт коэффициентов усиления промежуточных каскадов и выбор структурной схемы	4
<b>Расчёт усилителя на средних частотах</b>	5
Расчёт выходного эмиттерного повторителя (ЭП1)	5
Расчёт каскада с резистивной обратной связью в цепи эмиттера (УК2)	8
Расчёт промежуточного эмиттерного повторителя (ЭП3)	9
Расчёт каскада с резистивной обратной связью в цепи эмиттера (УК4)	10
Расчёт промежуточного эмиттерного повторителя (ЭП5)	11
Расчёт каскада с резистивной обратной связью в цепи эмиттера (УК6)	12
Расчёт входного эмиттерного повторителя (ЭП7)	13
<b>Расчет цепи отрицательной обратной связи (ООС)</b>	16
<b>Расчет частотный характеристик усилительных каскадов</b>	18
Расчёт выходного эмиттерного повторителя (ЭП1) на высоких частотах	18
Расчёт предвыходного усилительного каскада (УК2) на высоких частотах	19
Расчёт промежуточного эмиттерного повторителя (ЭП3) на высоких частотах	20
Расчёт промежуточного усилительного каскада (УК4) на высоких частотах	21
Расчёт промежуточного эмиттерного повторителя (ЭП5) на высоких частотах	22
Расчёт промежуточного усилительного каскада (УК6) на высоких частотах	23
Расчёт входного эмиттерного повторителя (ЭП7) на высоких частотах	24
Расчёт разделительных емкостей на входе $C_{p1}$ и на выходе $C_{p2}$ усилительного каскада	25
АЧХ усилителя	26

### **Задание.**

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

1. Амплитуда напряжения генератора сигнала  $U_g$
2. Внутреннее сопротивление источника сигнала  $R_g$
3. Напряжение на нагрузке (выходное напряжение усилителя)  $U_n$
4. Внешнее сопротивление нагрузки  $R_n$ .
5. Напряжение питания коллектора  $E_p$ .
6. Минимальная частота полосы пропускания  $f_{\min}$ .
7. Максимальная частота полосы пропускания  $f_{\max}$ .

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

### **Исходные данные.**

1.  $U_g = 3 \text{ мВ}$
2.  $R_g = 15 \text{ кОм}$
3.  $U_n = 1,7 \text{ В}$
4.  $R_n = 200 \text{ Ом}$
5.  $E_p = 12 \text{ В}$
6.  $f_{\min} = 1 \text{ кГц}$
7.  $f_{\max} = 450 \text{ кГц}$

Для всего усилителя используется БТ типа КТ325А со следующими характеристиками:

1. Коэффициент передачи тока в цепи с общим эмиттером  $\beta = 30 - 90$

$$\beta = \sqrt{\beta_{\min} \beta_{\max}} = 52$$

2. Емкость коллекторного перехода  $C_k = 2 \text{ пФ}$
3. Емкость эмиттерного перехода  $C_{\varepsilon} = 2 \text{ пФ}$
4. Максимальное напряжение коллектор-база  $U_{кб\_max} = 15 \text{ В}$
5. Максимально допустимое постоянное напряжение эмиттер-база при токе коллектора, равном нулю  $U_{эб\_max} = 4 \text{ В}$
6. Максимально постоянный ток коллектора  $I_{к0} = 30 \text{ мА}$
7. Максимальный импульсный ток коллектора  $I_{к0\_u} = 60 \text{ мА}$
8. Предельная частота коэффициента передачи тока в цепи с ОЭ  $F_T = 1000 \text{ МГц}$
9. Постоянная времени цепи обратной связи  $\tau = 125 \text{ нс}$

### Предварительный расчёт усилителя.

Требуемое значение коэффициента усиления:

$$K_{скв} = \frac{U_n}{U_g} = \frac{1,7}{3 \times 10^{-3}} = 567$$

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

- 1.Используется один тип биполярных транзисторов (БТ).
- 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 емкости 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.

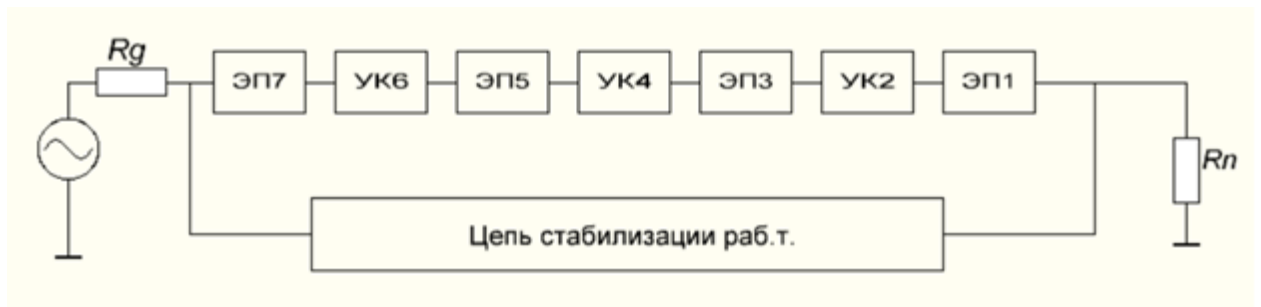


Рис. 1. Структурная схема многокаскадного усилителя низкой частоты

Приближенный расчёт коэффициентов усиления промежуточных каскадов и выбор структурной схемы.

$$K_{скв} = K_{вх} K_{у7} K_{у6} K_{у5} K_{у4} K_{у3} K_{у2} K_{у1} = -567$$

Если мы возьмём значения  $K_{вх} = 0,8$ , а  $K_{у7} = K_{у5} = K_{у3} = K_{у1} = 0,9$ , тогда

$$K_{у6} K_{у4} K_{у2} = \frac{K_{скв}}{K_{вх} K_{у1} K_{у3} K_{у5} K_{у7}}.$$

Так как для минимизации искажений требуется выполнение условия  $K_{у2} < K_{у4} < K_{у6}$ , тогда  $K_{у2} = \alpha \cdot K_{у4}$ ,  $K_{у6} = \alpha^{-1} K_{у4}$ , где  $\alpha = 0,5$  произвольный коэффициент.

Для расчёта  $K_{у4}$  используем формулу

$$K_{у4} = \sqrt[3]{\frac{K_{скв}}{K_{вх} K_{у1} K_{у3} K_{у5} K_{у7}}} = -10,3$$

после которой следует, что  $K_{у2} = -5,1$ ,  $K_{у6} = -20,5$

### Расчёт усилителя на средних частотах.

#### Расчёт выходного эмиттерного повторителя (ЭП1).

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

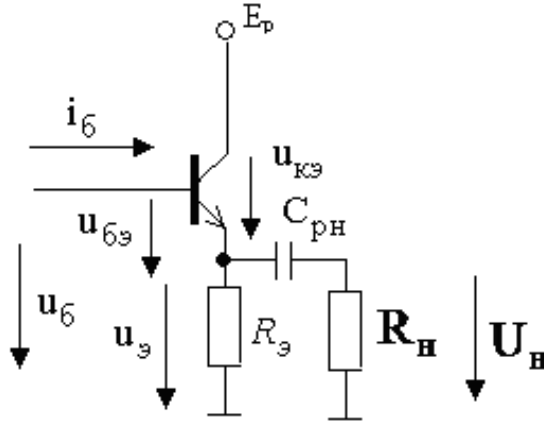


Рис. 2. Схема выходного ЭП

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

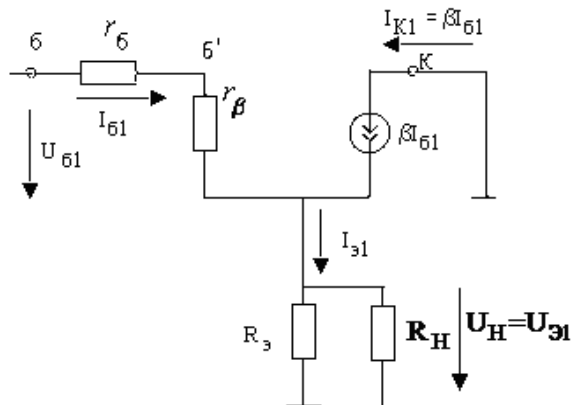


Рис.3. Эквивалентная схема ЭП1 по переменному сигналу

Выберем  $R_{э1} = R_n = 200 \text{ Ом}$

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

$$R_{э1\sim} = \frac{R_{э1} R_n}{R_{э1} + R_n} = 100 \text{ Ом}$$

$$I_{э11} = \frac{U_n}{R_{э1\sim}} = 17 \text{ мА}$$

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

$$I_{э01} = 1,25 I_{э11} = 21 \text{ мА}$$

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

$$U_{э01} = R_{э1} I_{э01} = 4,25 \text{ В}$$

$$I_{э\_max} = I_{э01} + I_{э11} = 38,25 \text{ мА}$$

$$U_{э\_max} = U_{э01} + U_{э11} = 5,95 \text{ В}$$

При проверке условия нахождения БТ в активной области видно, что  $I_{э\_max} < I_{дон} = 30 / 60 \text{ мА}$ . 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.

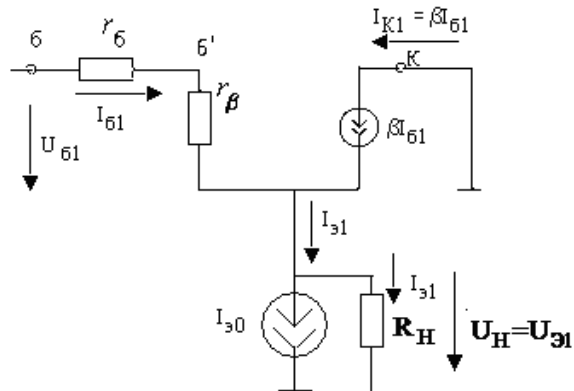


Рис.4. Эквивалентная схема ЭП1 с идеальным генератором тока

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

$$I_n = \frac{U_n}{R_n} = 8,5 \text{ мА}, \text{ следовательно и } I_{э11} = 8,5 \text{ мА}, I_{э01} = 1,25 \cdot I_{э11} = 10,625 \text{ мА}.$$

Проверим условие.  $I_{э01} + I_{э1} = 19,125 \text{ мА}$  - меньше, чем  $I_{дон} = 30 / 60 \text{ мА}$ , поэтому мы можем использовать данный БТ в каскаде

Схема ЭП1 показана на рис.5, генератор тока реализован на БТ VTГг.

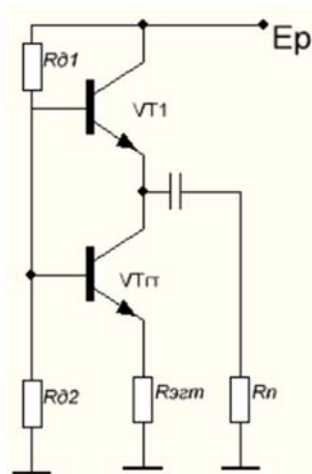


Рис. 5. Принципиальная схема ЭП1 с ГТ в цепи эмиттера

По схеме можно увидеть, что будет выполняться равенство  $I_{к0\_эм} = I_{э01} = 10,625 \text{ мА}$

$$\beta_{эм} = \beta = \sqrt{\beta_{max} \beta_{min}} = 52$$

$$I_{\bar{\sigma}0\_эм} = \frac{I_{\kappa0\_эм}}{\beta_{эм}} = 204,478 \text{ мкА} \quad I_{\bar{\sigma}0\_эм} = (\beta_{эм} + 1)I_{\bar{\sigma}0\_гт} = 10,8 \text{ мА}$$

Для обеспечения достаточной стабильности постоянного тока коллектора и повышения входного сопротивления транзистора по переменному сигналу в 10-15 раз достаточно выбрать величину сопротивления  $R_{\bar{\sigma}\_эм} = 25 \text{ Ом}$ .

$$U_{\bar{\sigma}0\_эм} = I_{\bar{\sigma}0\_эм} R_{\bar{\sigma}\_эм} + 0,6 = 0,87 \text{ В}$$

Выберем  $I_{\text{дел}} = 10I_{\bar{\sigma}0\_эм} = 2 \text{ мА}$ , тогда:

$$R_{\text{дел}1} = \frac{E_p - U_{\bar{\sigma}0\_эм}}{I_{\text{дел}}} = 5,443 \text{ кОм}$$

$$R_{\text{дел}2} = \frac{U_{\bar{\sigma}0\_эм}}{I_{\text{дел}} - I_{\bar{\sigma}0\_эм}} = 473 \text{ Ом}$$

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:

$$U_{\kappa\bar{\sigma}1\_мин} = E_p - U_{\bar{\sigma}01} - U_n \geq 1B,$$

$$U_{\kappa\bar{\sigma}\_эм\_мин} = U_{\bar{\sigma}01} - R_{\bar{\sigma}\_эм} I_{\bar{\sigma}0\_эм} - U_n \geq 1B$$

Если считать, что для заданного типа БТ  $U_{\kappa\bar{\sigma}\_мин\_доп} = 1B$ , то можно рассчитать наименьшее значение  $U_{\bar{\sigma}01}$  по формуле:

$$U_{\bar{\sigma}01} = 2 + U_n + R_{\bar{\sigma}\_эм} I_{\bar{\sigma}0\_эм} = 4 \text{ В}$$

Теперь проверим выполнение двух указанных выше неравенств:

$$U_{\kappa\bar{\sigma}1\_мин} = E_p - U_{\bar{\sigma}01} - U_n = 6,3 \text{ В}$$

$$U_{\kappa\bar{\sigma}\_эм\_мин} = U_{\bar{\sigma}01} - R_{\bar{\sigma}\_эм} I_{\bar{\sigma}0\_эм} - U_n = 2 \text{ В}$$

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

$$I_{\bar{\sigma}01} = \frac{I_{\bar{\sigma}01}}{1 + \beta} = 200,6 \text{ мкА}$$

$$r_{\bar{\sigma}1} = \frac{\tau}{0,5C_{\kappa}} = 125 \text{ Ом}$$

$$\varphi_T = 25 \text{ мВ}$$

$$r_{\beta1} = \frac{\varphi_T}{I_{\bar{\sigma}01}} = 124,615 \text{ Ом}$$

$$K_{u1} = \frac{R_n(1 + \beta)}{R_n(1 + \beta) + r_{\beta1} + r_{\bar{\sigma}1}} = 0,977$$

Теперь рассчитаем оставшиеся параметры схемы ЭП:

$$U_{\bar{\sigma}11} = (r_{\beta1} + r_{\bar{\sigma}1})I_{\bar{\sigma}11} + R_n I_n = 1,74 \text{ В}$$

$$R_{\text{вх}1} = R_n(1 + \beta) + r_{\beta1} + r_{\bar{\sigma}1} = 10,842 \text{ кОм}$$

$$U_{\bar{\sigma}01} = U_{\bar{\sigma}01} + 0,6 = 4,571 \text{ В}$$

Итоги:

$I_{\delta 01} = 200,617 \text{ мкА}$	$U_{\delta 01} = 4,571 \text{ В}$	$R_{\text{ex1}} = 10,842 \text{ кОм}$	$R_{\text{э-эм}} = 25 \text{ Ом}$
$I_{\text{e01}} = 10,625 \text{ мА}$	$U_{\delta 11} = 1,74 \text{ В}$	$R_{\text{дел1}} = 5,443 \text{ кОм}$	$r_{\delta 1} = 125 \text{ Ом}$
$I_{\kappa 01} = 10,242 \text{ мА}$	$K_{u1} = 0,977$	$R_{\text{дел2}} = 473 \text{ Ом}$	$r_{\beta 1} = 124,615 \text{ Ом}$

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

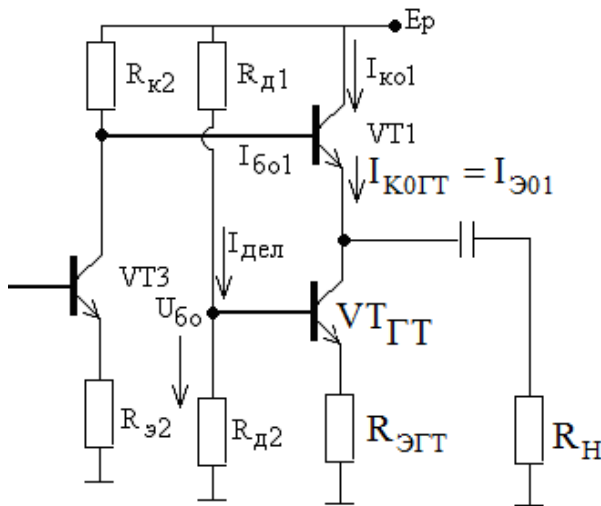


Рис. 6. Принципиальная схема каскадов УК2 и ЭП1

Для того, что бы транзистор работал в АО, должно выполняться условие  $U_{\kappa\text{Э}2\_min} > 1B$ .

Так же должны выполняться условия слабого влияния следующего каскада:

$$I_{\delta 01} \ll I_{\kappa 02}$$

$$R_{\kappa 2} \ll R_{\text{ex1}}$$

Выбираем  $I_{\kappa 02} \geq 10I_{\delta 01}$ . Пусть  $I_{\kappa 02} = 10 \cdot I_{\delta 01} = 2,006 \text{ мА}$ ,  $U_{\kappa 02} = U_{\delta 01} = 4,571 \text{ В}$ .

$$R_{\kappa 2} = \frac{E_p - U_{\kappa 02}}{I_{\kappa 02} + I_{\delta 01}} = 3,367 \text{ кОм}$$

Проверим условие слабого влияния

$$\text{следующего каскада: } \frac{R_{\kappa 2}}{R_{\text{ex1}}} = 0,311 \ll 1$$

Исходя из того, что  $K_{u2}$  известно из предварительно расчёта, из следующего уравнения найдём  $R_{\text{э}2}$ :

$$K_{u2} = -\frac{\beta R_{\kappa 2}}{r_{\delta 2} + r_{\beta 2} + (\beta + 1)R_{\text{э}2}} = -5,1$$

$$R_{\kappa 2} = \frac{R_{\kappa 2} R_{\text{ex1}}}{R_{\kappa 2} + R_{\text{ex1}}} = 2,569 \text{ кОм}$$

$$r_{\beta 2} = \frac{\phi_T}{I_{\delta 02}} = 647,52 \text{ Ом}$$

$$I_{\delta 02} = \frac{I_{\kappa 02}}{\beta} = 38,609 \text{ мкА}$$

$$r_{\delta 2} = \frac{\tau}{0,5C_{\kappa}} = 125 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{э}2} = \frac{-\beta R_{\kappa 2} - K_{u2}(r_{\delta 2} + r_{\beta 2})}{(\beta + 1)K_{u2}} = 476,78 \text{ Ом}$$

$$I_{\text{э}02} = I_{\kappa 02} \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = 2,045 \text{ мА}$$

$$U_{\text{э}02} = R_{\text{э}2} I_{\text{э}02} = 0,975 \text{ В}$$

$$U_{\kappa 12} = U_{\delta 11} = 1,74 \text{ В}$$

$$I_{\kappa 12} = \frac{U_{\kappa 12}}{R_{\kappa 2}} = 0,517 \text{ мА}$$

$$U_{\delta 12} = \frac{U_{\kappa 12}}{|K_{u2}|} = 339,239 \text{ мВ}$$

$$I_{\text{э}12} = \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) I_{\kappa 12} = 0,527 \text{ мА}$$



Проверим условие нахождения транзистора в активной области:

$$U_{\kappa 2\_min} = U_{\kappa 02} - U_{\kappa 12} - U_{\vartheta 02} - I_{\vartheta 12} R_{\vartheta 2} = 1,605 B > 1 B$$

$$U_{\vartheta 2} = 0,6 B$$

$$U_{\vartheta 02} = U_{\vartheta 02} + U_{\vartheta 2} = 1,575 B$$

Рассчитаем входное сопротивление УК2:  $R_{\kappa 2} = r_{\vartheta 2} + r_{\beta 2} + (\beta + 1) R_{\vartheta 2} = 26,024 \kappa O M$

Итоги:

$$I_{\vartheta 02} = 38,609 \mu K A$$

$$U_{\vartheta 02} = 1,575 B$$

$$R_{\kappa 2} = 26,024 \kappa O M$$

$$R_{\kappa 2} = 3,367 \kappa O M$$

$$I_{e 02} = 2,045 M A$$

$$U_{\vartheta 12} = 339,239 M B$$

$$R_{e 2} = 476,78 O M$$

$$r_{\vartheta 2} = 125 O M$$

$$I_{\kappa 02} = 2,006 M A$$

$$K_{u 2} = -5,1$$

$$r_{\beta 2} = 647,52 O M$$

### Расчёт промежуточного эмиттерного повторителя (ЭП3).

Для того, чтобы УС4 работал в линейном режиме и VT4 работал в активной области, необходимо повысить потенциал  $U_{\vartheta 03}$  транзистора VT3, включив необходимое число диодов. В данном случае достаточно включить один диод, соответственно напряжение на эмиттере VT3 повысилось на 0,6В.

Выберем  $R_{\vartheta 2} = 1 \kappa O M$

$$U_{\vartheta 03} = U_{\vartheta 02} + 1 \cdot 0,6 = 2,175 B$$

$$I_{R_{\vartheta 2}} = \frac{U_{\vartheta 02}}{R_{\vartheta 2}} = 1,575 M A$$

$$I_{\vartheta 03} = I_{R_{\vartheta 2}} + I_{\vartheta 02} = 1,614 M A$$

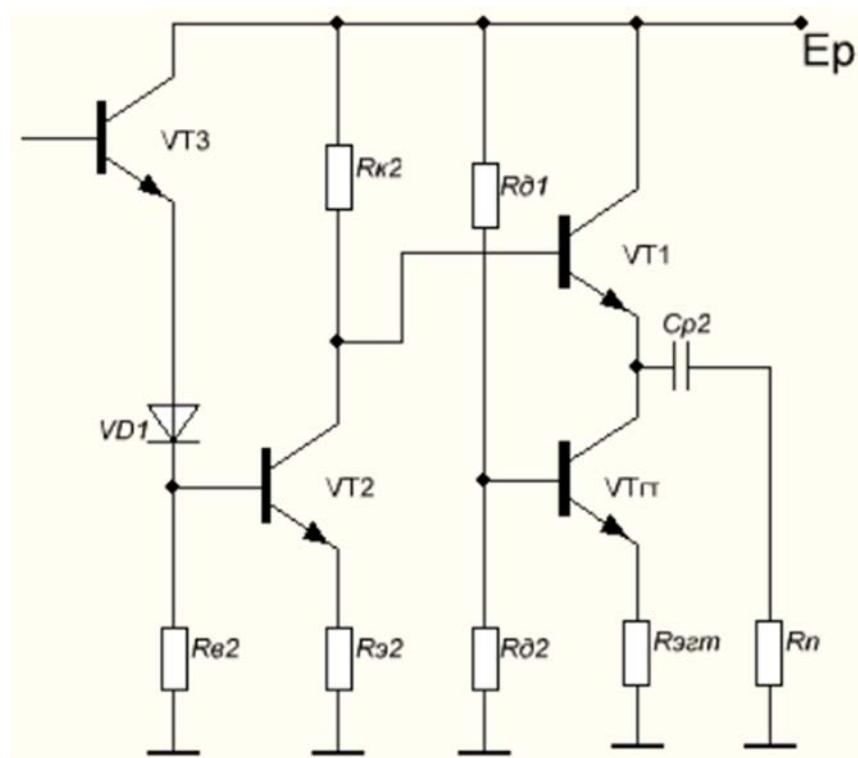


Рис. 7. Принципиальная схема 3 каскадов: ЭП3, УК2 и ЭП1

$$\text{Дифференциальное сопротивление диода: } R_{\text{диф}} = \frac{\varphi_T}{I_{\vartheta 03}} = 15,494 O M$$

Полное сопротивление нагрузки ЭПЗ рассчитывается по формуле:

$$R_{\pi 3} = \frac{R_{\pi 2} R_{\text{ex}2}}{R_{\pi 2} + R_{\text{ex}2}} + R_{\text{диф}} = 978,489 \text{ Ом}$$

$$r_{\beta 3} = \frac{\varphi_T (1 + \beta)}{I_{\pi 03}} = 0,821 \text{ кОм}$$

$$r_{\sigma 3} = \frac{\tau}{0,5 C_{\kappa}} = 125 \text{ Ом}$$

$$K_{u3} = \frac{(1 + \beta) R_{\pi 3}}{(1 + \beta) R_{\pi 3} + r_{\beta 3} + r_{\sigma 3}} \frac{R_{\pi 2}}{R_{\pi 2} + R_{\text{диф}}} = 0,967$$

Постоянное напряжение на входе 3-го каскада  $U_{\sigma 03} = U_{\pi 03} + 0,6 = 2,775 \text{ В}$

$$U_{\sigma 13} = \frac{U_{\sigma 12}}{|K_{u3}|} = 350,781 \text{ мВ}$$

$$I_{\sigma 03} = \frac{I_{\pi 03}}{1 + \beta} = 30,466 \text{ мкА}$$

Входное сопротивление  $R_{\text{ex}3} = r_{\sigma 3} + r_{\beta 3} + (\beta + 1) R_{\pi 3} = 52,768 \text{ кОм}$

Итоги:

$I_{\sigma 03} = 30,466 \text{ мкА}$	$U_{\sigma 03} = 2,775 \text{ В}$	$R_{\text{ex}3} = 52,768 \text{ кОм}$	$r_{\sigma 3} = 125 \text{ Ом}$
$I_{e03} = 1,614 \text{ мА}$	$U_{\sigma 13} = 350,781 \text{ мВ}$	$R_{\pi 2} = 1 \text{ кОм}$	$r_{\beta 3} = 0,821 \text{ кОм}$
$I_{\kappa 03} = 1,583 \text{ мА}$	$K_{u3} = 0,967$		

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

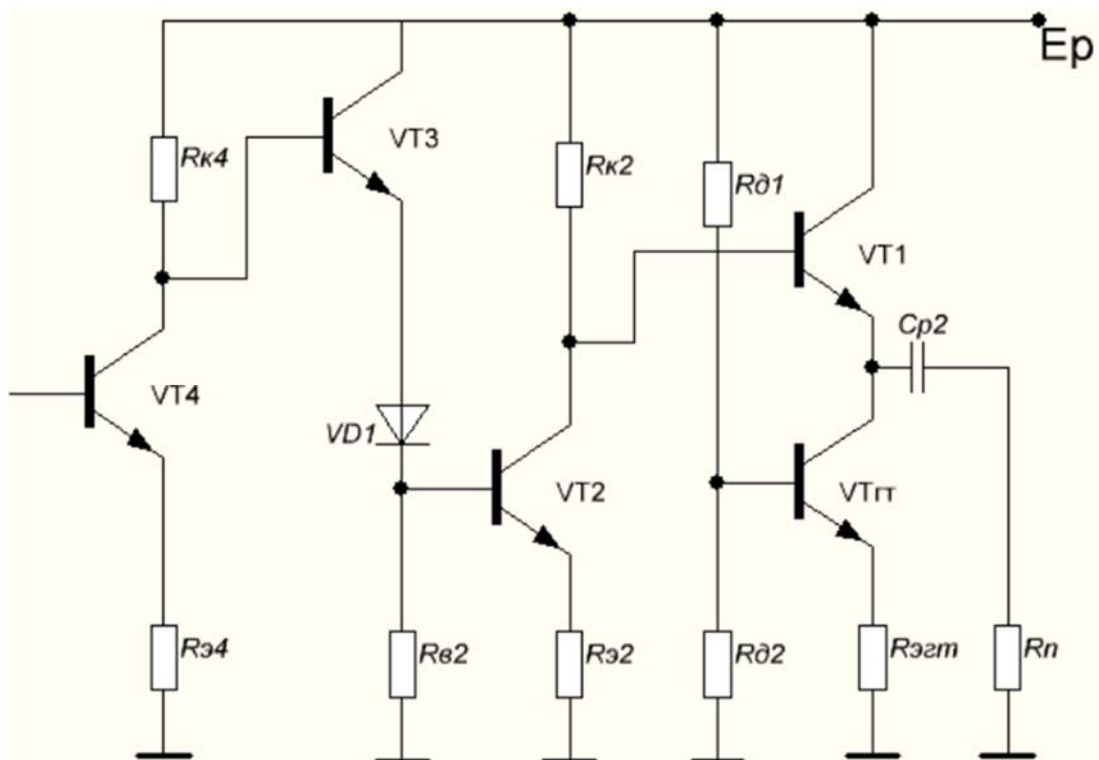


Рис. 8. Принципиальная схема УК4, ЭПЗ, УК2 и ЭП1

Выбираем  $R_{\kappa 4} = \frac{R_{\text{ex}3}}{10} = 5,277 \text{ кОм}$ , следовательно  $R_{\kappa 4 \sim} = \frac{R_{\kappa 4} R_{\text{ex}3}}{R_{\kappa 4} + R_{\text{ex}3}} = 4,797 \text{ кОм}$

Выберем  $U_{\kappa 04} = U_{\sigma 03} = 2,775 \text{ В}$ , тогда:

$$I_{\kappa 04} = \frac{E_p - U_{\kappa 04}}{R_{\kappa 4 \sim}} = 1,923 \text{ мА}$$

$$I_{\sigma 04} = \frac{I_{\kappa 04}}{\beta} = 37,009 \text{ мкА}$$

Проверим условие слабого влияния следующего каскада:  $\frac{R_{\kappa 4}}{R_{\text{ex}3}} = 0,1 \ll 1$ .

$$r_{\beta 4} = \frac{\varphi_T \beta}{I_{\kappa 04}} = 0,676 \text{ кОм}$$

$$r_{\delta 4} = \frac{\tau}{0,5 C_{\kappa}} = 125 \text{ Ом}$$

При известном  $K_{u4} = -10,3$  рассчитаем  $R_{\text{э}4}$  по формуле:

$$R_{\text{э}4} = \frac{1}{\beta + 1} \left[ \frac{\beta R_{\kappa 4}}{|K_{u4}|} - (r_{\delta 4} + r_{\beta 4}) \right] = 443,67 \text{ Ом}$$

$$I_{\text{э}04} = I_{\kappa 04} \left( 1 + \frac{1}{\beta} \right) = 1,96 \text{ мА}$$

$$U_{\text{э}04} = R_{\text{э}4} I_{\text{э}04} = 869,626 \text{ мВ}$$

$$U_{\delta 04} = U_{\text{э}04} + 0,6 = 1,47 \text{ В}$$

$$U_{\delta 14} = \frac{U_{\kappa 14}}{|K_{u4}|} = 34,194 \text{ мВ}$$

$$U_{\kappa \text{э}4\_min} = U_{\kappa 04} - U_{\delta 13} - (U_{\text{э}04} + R_{\text{э}4} I_{\text{э}04}) = 1,524 \text{ В}$$

$$R_{\text{ex}4} = r_{\delta 4} + r_{\beta 4} + (\beta + 1) R_{\text{э}4} = 24,298 \text{ кОм}$$

Итоги:

$$I_{\delta 04} = 37,009 \text{ мкА}$$

$$U_{\delta 04} = 1,47 \text{ В}$$

$$R_{\text{ex}4} = 24,298 \text{ кОм}$$

$$R_{\kappa 4} = 5,277 \text{ кОм}$$

$$I_{e04} = 1,96 \text{ мА}$$

$$U_{\delta 14} = 34,194 \text{ мВ}$$

$$R_{e4} = 443,67 \text{ Ом}$$

$$r_{\delta 4} = 125 \text{ Ом}$$

$$I_{\kappa 04} = 1,923 \text{ мА}$$

$$K_{u4} = -10,3$$

$$r_{\beta 4} = 0,676 \text{ кОм}$$

#### Расчёт промежуточного эмиттерного повторителя (ЭП5).

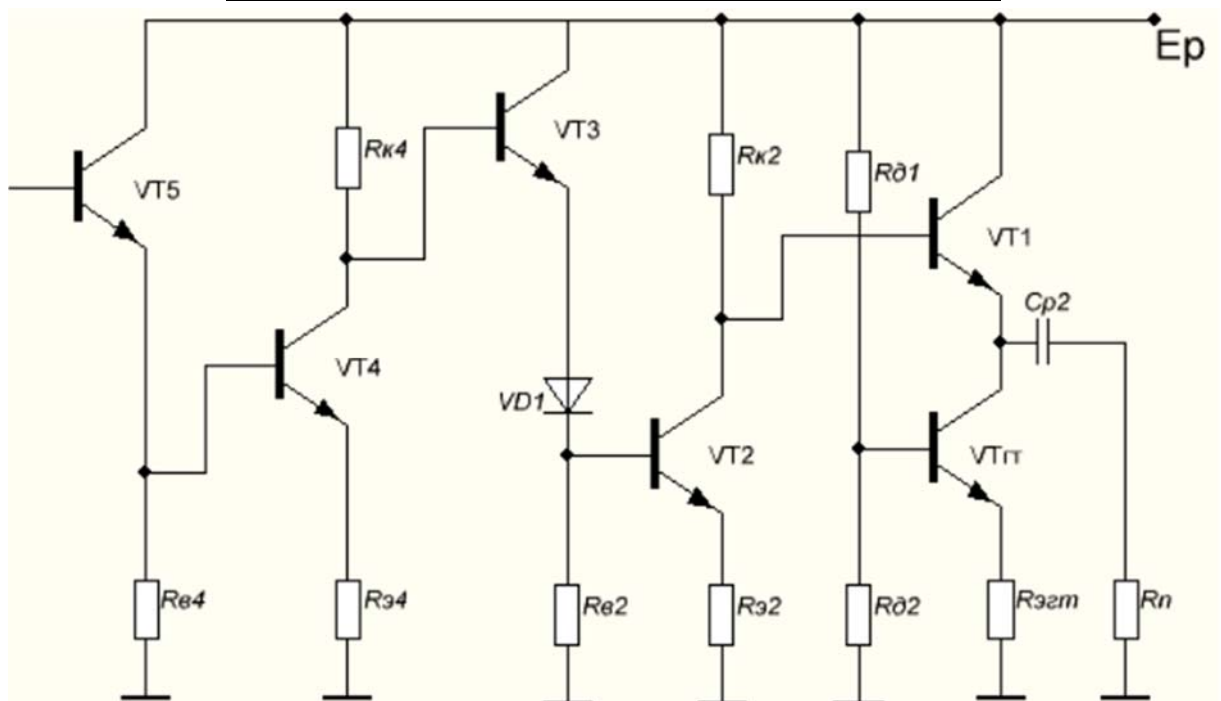


Рис. 9. Принципиальная схема ЭП5, УК4, ЭП3, УК2 и ЭП1

Расчёт данного эмиттерного повторителя производится аналогично расчёту ЭП3, но при этом использование диодов не потребуется.

$$U_{\text{э}05} = U_{\delta 04} = 1,47 \text{ В}$$

$$\text{Выберем } R_{\text{э}4} = 1000 \text{ Ом}$$

$$I_{R_{\text{э}4}} = \frac{U_{\delta 04}}{R_{\text{э}4}} = 1,47 \text{ мА}$$

$$I_{\text{э}05} = I_{R_{\text{э}4}} + I_{\delta 04} = 1,507 \text{ мА}$$

Полное сопротивление нагрузки ЭП5 рассчитывается по формуле:

$$R_{\pi 5} = \frac{R_{\pi 4} R_{\text{ex}4}}{R_{\pi 4} + R_{\text{ex}4}} = 0,960 \text{ кОм}$$

$$r_{\beta 5} = \frac{\varphi_T (1 + \beta)}{I_{\pi 05}} = 0,879 \text{ кОм}$$

$$r_{\sigma 5} = \frac{\tau}{0,5 C_{\kappa}} = 125 \text{ Ом}$$

$$K_{u5} = \frac{(1 + \beta)(R_{\pi 5})}{(1 + \beta)R_{\pi 5} + r_{\beta 5} + r_{\sigma 5}} = 0,981$$

Постоянное напряжение на входе 5-го каскада  $U_{\sigma 05} = U_{\pi 05} + 0,6 = 2,07 \text{ В}$

$$U_{\sigma 15} = \frac{U_{\sigma 14}}{|K_{u5}|} = 34,869 \text{ мВ}$$

$$I_{\sigma 05} = \frac{I_{\pi 05}}{1 + \beta} = 28,448 \text{ мкА}$$

Входное сопротивление  $R_{\text{ex}5} = r_{\sigma 5} + r_{\beta 5} + (\beta + 1)R_{\pi 5} = 52,826 \text{ кОм}$

Итоги:

$$I_{\sigma 05} = 28,448 \text{ мкА}$$

$$U_{\sigma 05} = 2,07 \text{ В}$$

$$R_{\text{ex}5} = 52,826 \text{ кОм}$$

$$r_{\sigma 5} = 125 \text{ Ом}$$

$$I_{e05} = 1,507 \text{ мА}$$

$$U_{\sigma 15} = 34,869 \text{ мВ}$$

$$R_{\pi 4} = 1 \text{ кОм}$$

$$r_{\beta 5} = 0,879 \text{ кОм}$$

$$I_{\kappa 05} = 1,478 \text{ мА}$$

$$K_{u5} = 0,981$$

Расчёт каскада с резистивной обратной связью в цепи эмиттера (УК6).

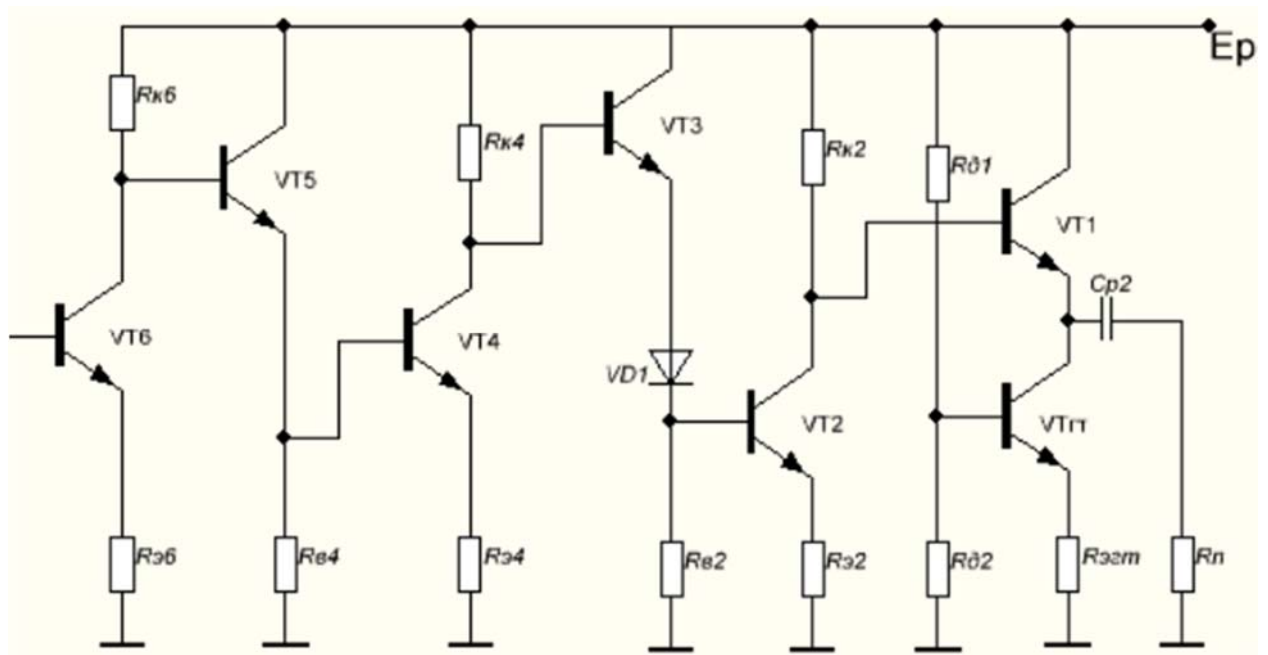


Рис. 10. Принципиальная схема УК6, ЭП5, УК4, ЭП3, УК2, ЭП1

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  $K_{u6} = -15$

$$\text{Выбираем } R_{\kappa 6} = \frac{R_{\text{ex}5}}{10} = 5,283 \text{ кОм}, \text{ следовательно } R_{\kappa 6\sim} = \frac{R_{\kappa 6} R_{\text{ex}5}}{R_{\kappa 6} + R_{\text{ex}5}} = 4,802 \text{ кОм}$$

Выберем  $U_{\kappa 06} = U_{\sigma 05} = 2,07 \text{ В}$ , тогда:

$$I_{\kappa 06} = \frac{E_p - U_{\kappa 06}}{R_{\kappa 6\sim}} = 2,068 \text{ мА} \quad I_{\sigma 06} = \frac{I_{\kappa 06}}{\beta} = 39,795 \text{ мкА}$$

Проверим условие слабого влияния следующего каскада:  $\frac{R_{\kappa 6}}{R_{\text{ex}5}} = 0,1 \ll 1$ .

$$r_{\beta 6} = \frac{\varphi_T \beta}{I_{\kappa 06}} = 0,628 \text{ кОм} \quad r_{\sigma 6} = \frac{\tau}{0,5 C_{\kappa}} = 125 \text{ Ом}$$

При взятом  $K_{u4} = -15$  рассчитаем  $R_{\text{э}6}$  по формуле:

$$R_{\text{э}6} = \frac{1}{\beta + 1} \left[ \frac{\beta R_{\kappa 6\sim}}{|K_{u6}|} - (r_{\sigma 6} + r_{\beta 6}) \right] = 215,423 \text{ Ом}$$

$$I_{\text{э}06} = I_{\kappa 06} \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = 2,108 \text{ мА} \quad U_{\text{э}06} = R_{\text{э}6} I_{\text{э}06} = 454,027 \text{ мВ}$$

$$U_{\sigma 06} = U_{\text{э}06} + 0,6 = 1,054 \text{ В} \quad U_{\sigma 16} = \frac{U_{\kappa 16}}{|K_{u6}|} = 2,325 \text{ мВ}$$

$$U_{\kappa \text{э}6\_min} = U_{\kappa 06} - U_{\sigma 15} - (U_{\text{э}06} + R_{\text{э}6} I_{\text{э}06}) = 1,579 \text{ В}$$

$$R_{\text{ex}6} = r_{\sigma 6} + r_{\beta 6} + (\beta + 1) R_{\text{э}6} = 12,162 \text{ кОм}$$

Итоги:

$I_{\sigma 06} = 39,795 \text{ мкА}$	$U_{\sigma 06} = 1,054 \text{ В}$	$R_{\text{ex}6} = 12,162 \text{ кОм}$	$R_{\kappa 6} = 5,283 \text{ кОм}$
$I_{\text{э}06} = 2,108 \text{ мА}$	$U_{\sigma 16} = 2,325 \text{ мВ}$	$R_{\text{э}6} = 215,423 \text{ Ом}$	$r_{\sigma 6} = 125 \text{ Ом}$
$I_{\kappa 06} = 2,068 \text{ мА}$	$K_{u6} = -15$		$r_{\beta 6} = 0,628 \text{ кОм}$

### Расчёт входного эмиттерного повторителя (ЭП7).

Как показывает практика, обычно входное сопротивление всего усилителя  $R_{\text{ex\_yc}}$  без выходного ЭП близко к  $R_g$  и коэффициент передачи входной цепи  $K_{\text{ex}} \approx 0,8$ , что значительно снижает  $K_{U\_цкв}$ , поэтому обычно на входе используется ЭП.

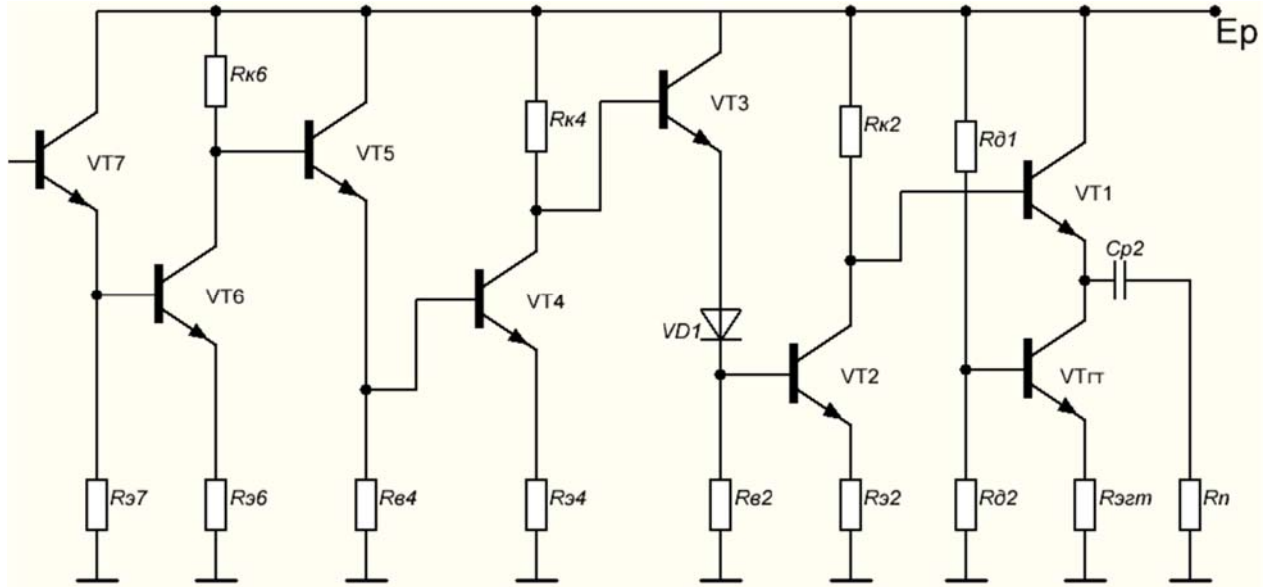


Рис. 11. Принципиальная схема ЭП7, УК6, ЭП5, УК4, ЭП3, УК2, ЭП1

Выберем  $R_{\text{э}7} = 2 \text{ кОм}$

$$I_{R_{\text{э}7}} = \frac{U_{\text{б}06}}{R_{\text{э}7}} = 0,527 \text{ мА}$$

$$I_{\text{э}07} = I_{R_{\text{э}7}} + I_{\text{б}06} = 0,567 \text{ мА}$$

$$I_{\text{б}07} = \frac{I_{\text{э}07}}{1 + \beta} = 10,702 \text{ мкА}$$

$$r_{\beta 7} = \frac{\varphi_T \beta}{I_{\text{к}07}} = 2,336 \text{ кОм}$$

$$r_{\text{б}7} = \frac{\tau}{0,5 C_{\kappa}} = 125 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{ex}7} = r_{\text{б}7} + r_{\beta 7} + (\beta + 1) \frac{R_{\text{э}7} R_{\text{ex}6}}{R_{\text{э}7} + R_{\text{ex}6}} = 93,426 \text{ кОм}$$

$$K_{u7} = \frac{(\beta + 1) \frac{R_{\text{э}7} R_{\text{ex}6}}{R_{\text{э}7} + R_{\text{ex}6}}}{(\beta + 1) \frac{R_{\text{э}7} R_{\text{ex}6}}{R_{\text{э}7} + R_{\text{ex}6}} + r_{\text{б}7} + r_{\beta 7}} = 0,974$$

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

$$R_{\text{ex}7} = 93,426 \text{ кОм} > R_g = 15 \text{ кОм}$$

Итого:

$$R_{\text{ex\_yc}} = R_{\text{ex}7} = 93,426 \text{ кОм}$$

$$I_{\text{б}0\_yc} = I_{\text{б}07} = 10,702 \text{ мкА}$$

$$K_{\text{ex\_yc}} = \frac{R_{\text{ex\_yc}}}{R_{\text{ex\_yc}} + R_g} = 0,862$$

$$I_{\text{э}07} = 0,567 \text{ мА}$$

$$I_{\text{к}07} = \beta I_{\text{б}07} = 0,556 \text{ мА}$$

$$U_{\text{б}0\_yc} = U_{\text{б}07} = 1,734 \text{ В}$$

### Проверка суммарного коэффициента усилителя.

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

$$K_{u\_скв} = 0,8K_{u1}K_{u2}K_{u3}K_{u4}K_{u5}K_{u6}K_{u7} = -569,6$$

Требуемое значение получено за счёт уменьшения коэффициента усиления 6-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  $C_\phi$  так, чтобы компенсировать возможную нестабильность источника питания.

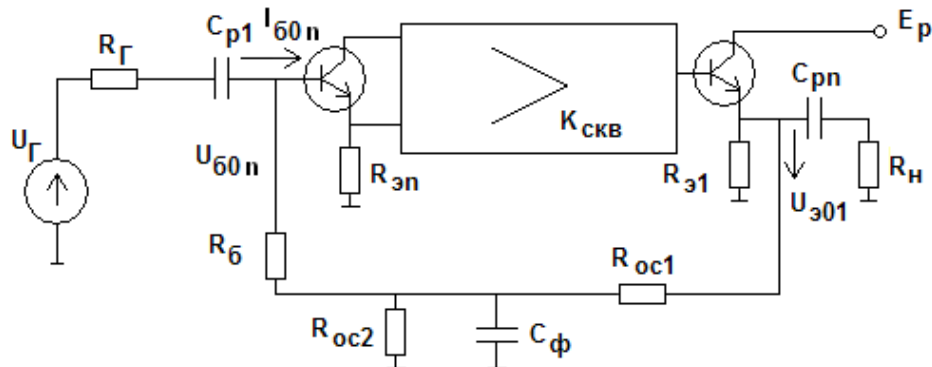


Рис. 12. Структурная схема усилителя охваченного ОС

Для расчёта цепи ОС зададим следующие исходные данные:

$$U_{э01} = 3,971 \text{ В}$$

$$R_g = 15 \text{ кОм}$$

$$U_{б07} = 1,734 \text{ В}$$

$$K_{ex\_yc} = 0,8$$

$$I_{б07} = 10,702 \text{ мкА}$$

$$R_{ex7} = 93,426 \text{ кОм}$$

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

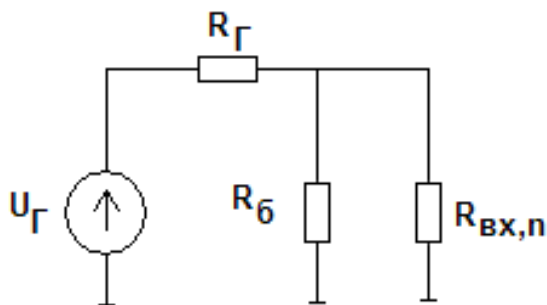


Рис. 13

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

$$R_{ex\Sigma} = \frac{K_{ex\_yc} R_g}{1 - K_{ex\_yc}} = 4 R_g = 60 \text{ кОм}$$

$$R_\phi = \frac{R_{ex\Sigma} R_{ex7}}{R_{ex7} - R_{ex\Sigma}} = 167,702 \text{ кОм}$$



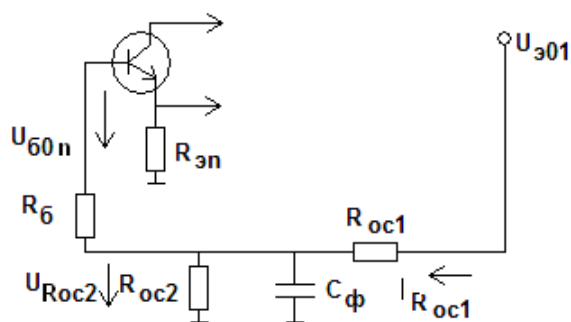


Рис. 14

$$I_{R_{oc1}} = 4I_{\bar{6}07} = 42,809 \text{ мкА}$$

$$U_{R_{oc2}} = U_{\bar{6}07} + I_{\bar{6}07} R_{\bar{6}} = 3,528 \text{ В}$$

$$R_{oc1} = \frac{U_{\bar{6}01} - U_{R_{oc2}}}{I_{R_{oc1}}} = 10,333 \text{ кОм}$$

$$R_{oc2} = \frac{U_{R_{oc2}}}{I_{R_{oc1}} - I_{\bar{6}07}} = 109,896 \text{ кОм}$$

$$K_{U_{oc}} = \frac{U_{\bar{6}07}}{U_{\bar{6}01}} = 0,437$$

$$T_{\phi} = \frac{3K_{U_{oc}} |K_{ck\bar{6}}|}{2\pi f_{\min}} = 118 \text{ мс}$$

$$R_{oc\Sigma} = \frac{1}{\frac{1}{R_{oc2}} + \frac{1}{R_{oc1}} + \frac{1}{R_{\bar{6}} + R_{\bar{6}x7}}} = 9,115 \text{ кОм}$$

$$C_{\phi} = T_{\phi} \left( \frac{1}{R_{oc2}} + \frac{1}{R_{oc1}} \right) = 12,507 \text{ мкФ}$$

### Расчет частотных 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.

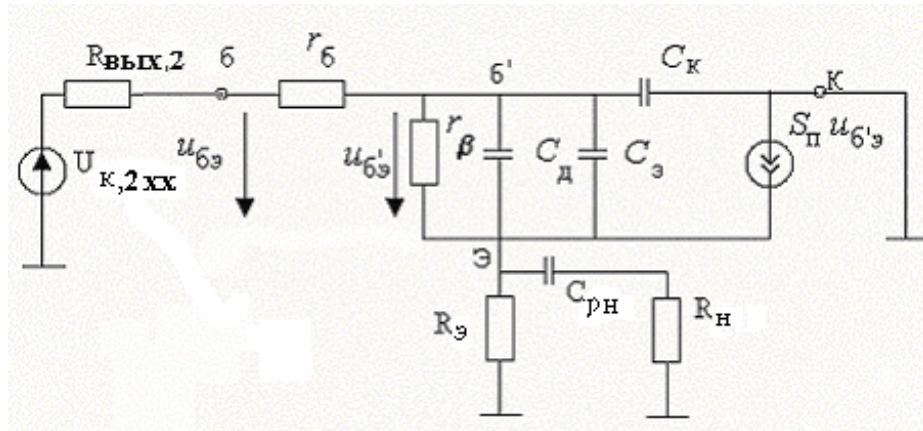


Рис. 15. Эквивалентная схема выходного ЭП на высоких частотах

$$S_{п1} = \frac{I_{к0}}{\varphi_T} = 417 \text{ мА/В}$$

$$C_{диф1} = \frac{S_{п1}}{2\pi F_T} = 66,364 \text{ нФ}$$

$$C_{ex1} = \frac{C_{диф1}}{1 + S_{п1} R_n} + C_k = 2,786 \text{ нФ}$$

$$r_{ex1} = r_{\beta1} + (1 + \beta) R_n = 10,717 \text{ кОм}$$

$$R_{\partial1} = R_{вых2} + r_{\partial1} = 601,78 \text{ Ом}$$

$$R_{вых2} = R_{к2} = 3,367 \text{ кОм}$$

$$K_{u11}(f) = \frac{K_{u1}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{\partial1}}\right)^2}}$$

$$f_{\partial1} = \frac{1}{2\pi C_{ex1} \frac{R_{\partial1} r_{ex1}}{R_{\partial1} + r_{ex1}}} = 100,248 \text{ МГц}$$

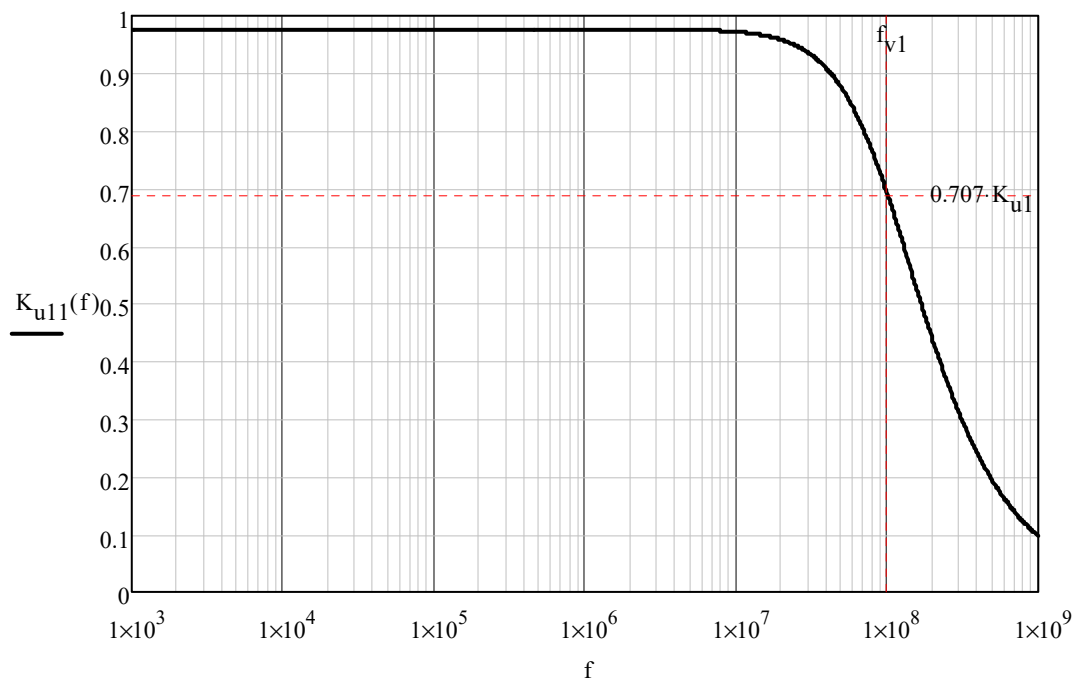


Рис. 16. АЧХ выходного эмиттерного повторителя ЭП1

### 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.

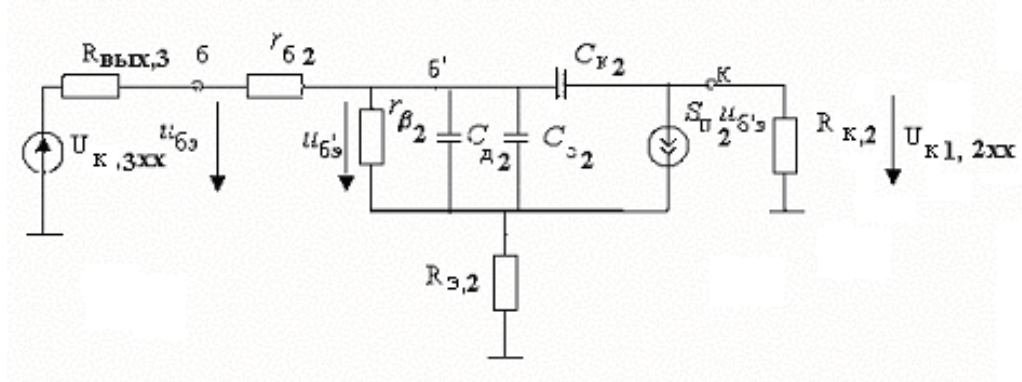


Рис. 17. Эквивалентная схема предвыходного усилителя УК2 на высоких частотах

$$S_{П2} = \frac{I_{к02}}{\phi_T} = 80 \text{ мА/В}$$

$$K_{u2-0} = \frac{\beta R_{к2}}{r_{б2} + (\beta + 1) R_{э2}} = 6,754$$

$$R_{г2} = r_{62} = 125 \text{ Ом}$$

$$f_{62} = \frac{1}{2\pi C_{э2} \frac{R_{г2} r_{62}}{R_{г2} + r_{62}}} = 80,467 \text{ МГц}$$

$$C_{диф1} = \frac{S_{П2}}{2\pi F_T} = 12,772 \text{ нФ}$$

$$r_{62} = r_{б2} + (1 + \beta) R_{к2} = 178,945 \text{ кОм}$$

$$C_{62} = \frac{C_{диф2}}{1 + S_{П2} R_{э2}} + C_{к2} (1 + K_{u2-0}) = 15,834 \text{ нФ}$$

$$K_{u22}(f) = K_{u2} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{62}}\right)^2}}$$

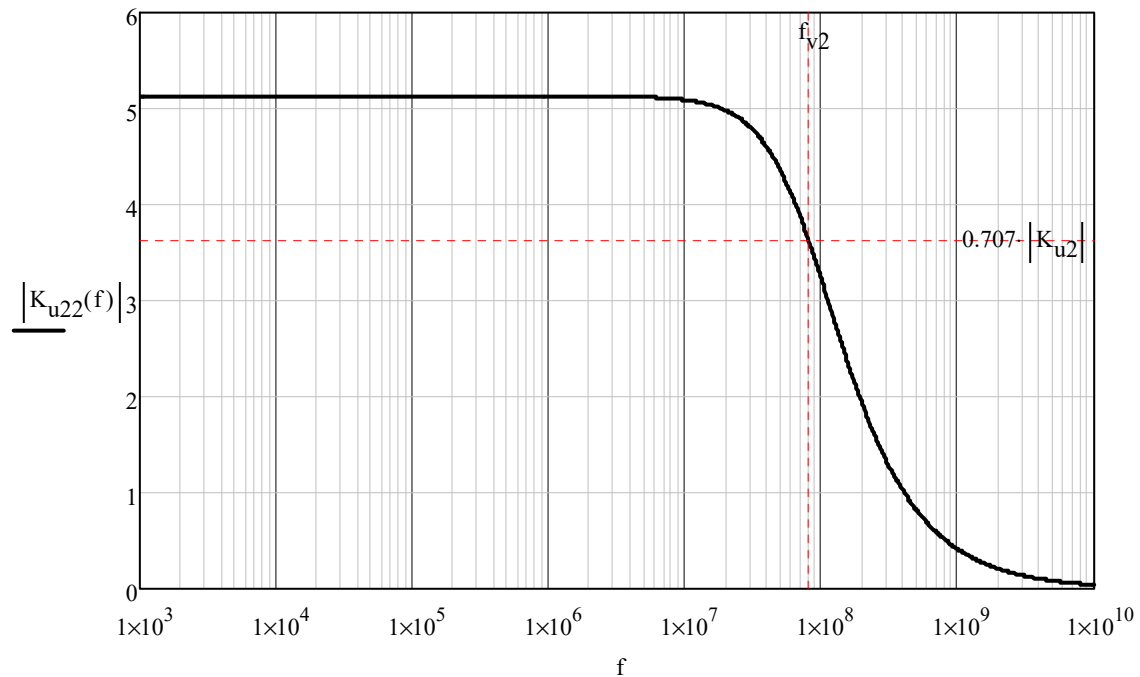


Рис. 18. АЧХ предвыходного усилительного каскада УК2

Расчёт промежуточного эмиттерного повторителя (ЭПЗ) на высоких частотах.

Расчёт частотных характеристик промежуточных эмиттерных повторителей ЭПЗ, ЭП5 полностью аналогичен расчёту выходного эмиттерного повторителя ЭП1.

$$S_{ПЗ} = \frac{I_{к03}}{\varphi_T} = 43 \text{ мА/В}$$

$$R_{вых4} = R_{к4} = 5,277 \text{ кОм}$$

$$C_{ex3} = \frac{C_{диф3}}{1 + S_{ПЗ} R_{э3}} + C_{к} = 2,16 \text{ нФ}$$

$$f_{э3} = \frac{1}{2\pi C_{ex3} \frac{R_{э3} r_{ex3}}{R_{э3} + r_{ex3}}} = 15,04 \text{ МГц}$$

$$C_{диф3} = \frac{S_{ПЗ}}{2\pi F_T} = 10,078 \text{ нФ}$$

$$R_{э3} = R_{вых4} + r_{э3} = 5,402 \text{ кОм}$$

$$r_{ex3} = r_{β3} + (1 + \beta) R_{э3} = 52,643 \text{ кОм}$$

$$K_{u33}(f) = \frac{K_{u3}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{э3}}\right)^2}}$$

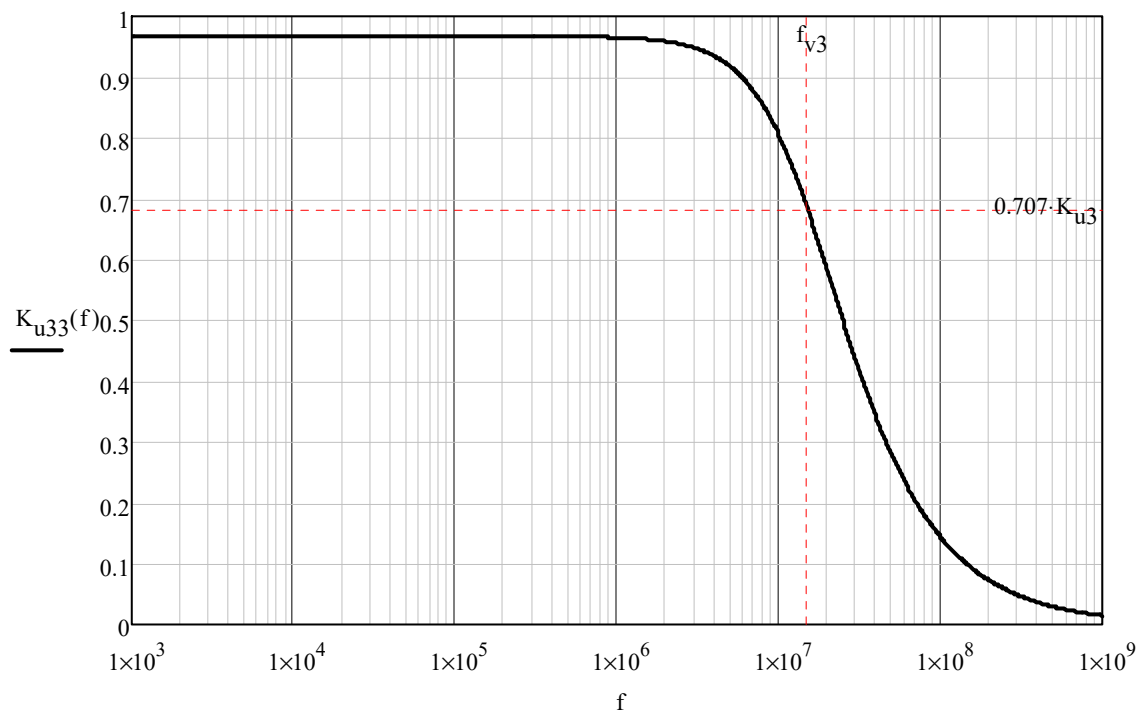


Рис. 19. АЧХ промежуточного эмиттерного повторителя ЭПЗ

### Расчёт промежуточного усилительного каскада (УК4) на высоких частотах.

Расчёт частотных характеристик промежуточных усилительных каскадов УК4 и УК6 производится аналогично расчёту АЧХ для УК2.

$$S_{\Pi 4} = \frac{I_{\kappa 04}}{\varphi_T} = 77 \text{ мА/В}$$

$$C_{\partial u \phi 4} = \frac{S_{\Pi 4}}{2\pi F_T} = 12,243 \text{ нФ}$$

$$r_{\text{ex}4} = r_{\beta 4} + (1 + \beta)R_{\kappa 4} = 280,142 \text{ кОм}$$

$$R_{g4} = r_{\delta 4} = 125 \text{ Ом}$$

$$K_{U4\_0} = \frac{\beta R_{\kappa 4}}{r_{\beta 4} + (\beta + 1)R_{\gamma 4}} = 11,343$$

$$C_{\text{ex}4} = \frac{C_{\partial u \phi 4}}{1 + S_{\Pi 4}R_{\gamma 4}} + C_{\kappa}(1 + K_{U4\_0}) = 25,034 \text{ нФ}$$

$$f_{\text{ex}4} = \frac{1}{2\pi C_{\text{ex}4} \frac{R_{g4}r_{\text{ex}4}}{R_{g4} + r_{\text{ex}4}}} = 50,883 \text{ МГц}$$

$$K_{u44}(f) = \frac{K_{u4}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{\text{ex}4}}\right)^2}}$$

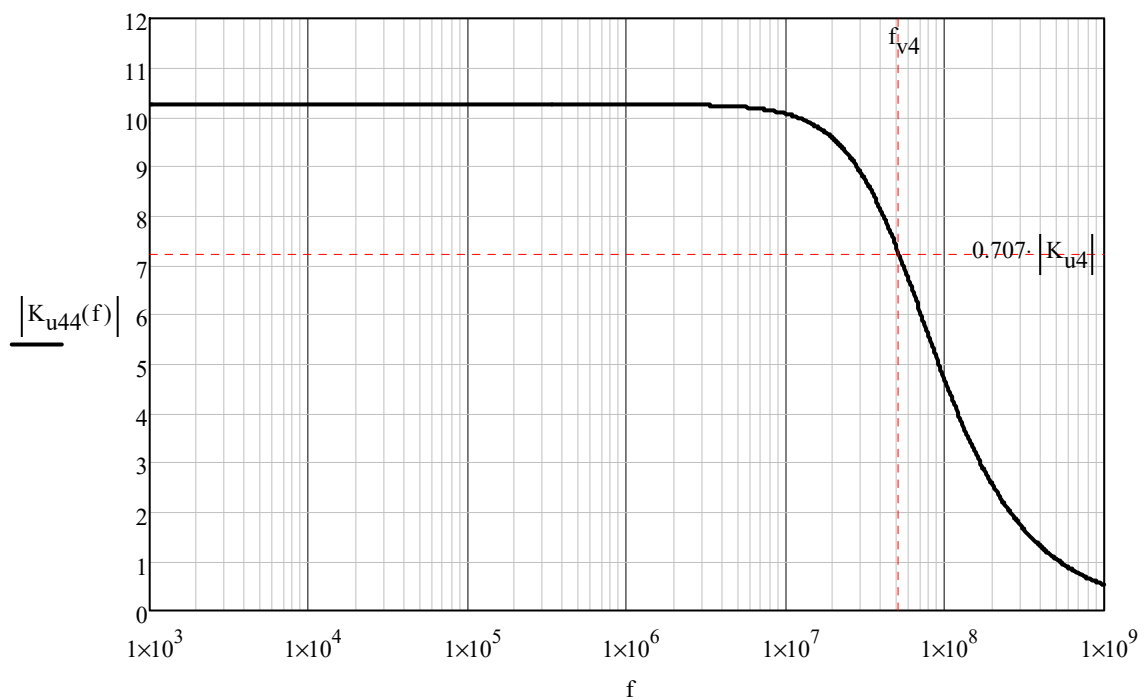


Рис. 20. АЧХ промежуточного усилительного каскада УК4

Расчёт промежуточного эмиттерного повторителя (ЭП5) на высоких частотах.

$$S_{П5} = \frac{I_{к05}}{\varphi_T} = 59 \text{ мА/В}$$

$$R_{вых6} = R_{к6\sim} = 4,802 \text{ кОм}$$

$$C_{ex5} = \frac{C_{out5}}{1 + S_{П5} R_{э5}} + C_{к} = 2,163 \text{ нФ}$$

$$f_{с5} = \frac{1}{2\pi C_{ex5} \frac{R_{д5} r_{ex5}}{R_{д5} + r_{ex5}}} = 16,356 \text{ МГц}$$

$$C_{out5} = \frac{S_{П5}}{2\pi F_T} = 9,41 \text{ нФ}$$

$$R_{д5} = R_{вых6} + r_{д5} = 4,927 \text{ кОм}$$

$$r_{ex5} = r_{б5} + (1 + \beta) R_{э5} = 51,747 \text{ кОм}$$

$$K_{u55}(f) = \frac{K_{u5}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{с5}}\right)^2}}$$

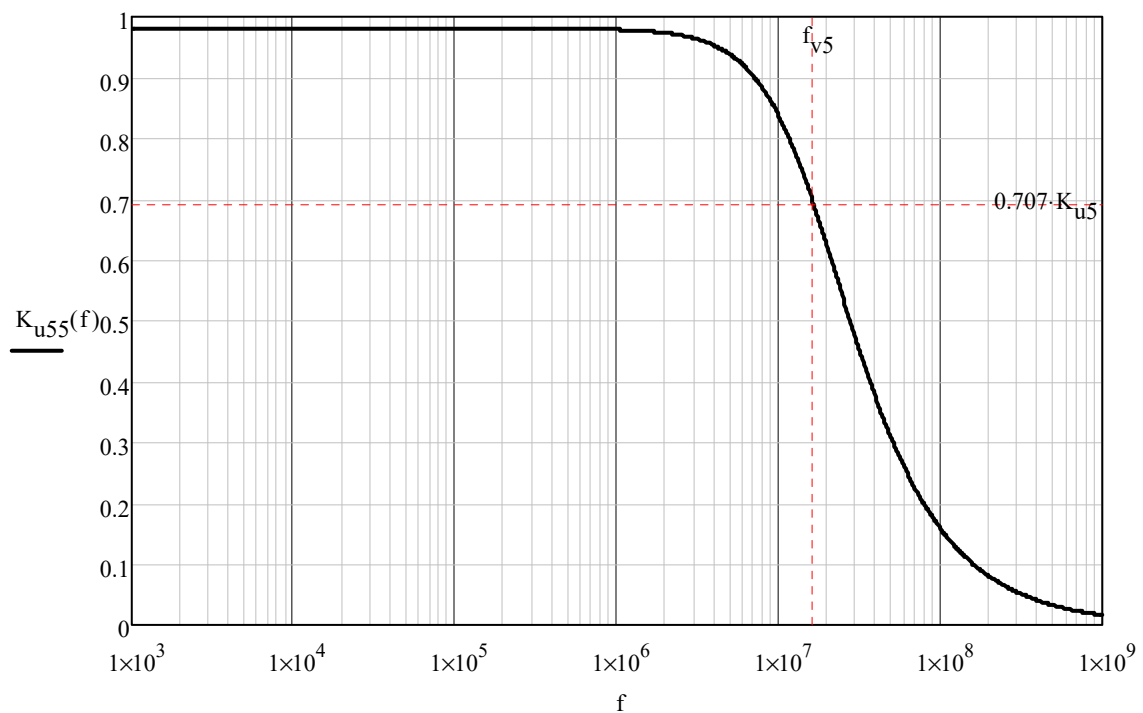


Рис. 21. АЧХ промежуточного эмиттерного повторителя ЭП3

### Расчёт промежуточного усилительного каскада (УК6) на высоких частотах.

В расчёте АЧХ данного усилительного каскада возникает необходимость использования навесной ёмкости  $C_{нав}$ , причиной чего является завышение верхней граничной частоты АЧХ всего усилителя. Для её понижения и, соответственно, удовлетворения требований к частоте пропускания усилителя и используется ёмкость.

$$S_{П6} = \frac{I_{к06}}{\varphi_T} = 83 \text{ МА/В}$$

$$r_{ex6} = r_{\beta6} + (1 + \beta)R_{к6\sim} = 254,969 \text{ кОм}$$

$$K_{U6\_0} = \frac{\beta R_{к6\sim}}{r_{\beta6} + (\beta + 1)R_{э6}} = 20,73$$

$$C_{сум} = \frac{1}{2\pi f_{max} \frac{R_{г6} r_{ex6}}{R_{г6} + r_{ex6}}} = 2,831 \text{ нФ}$$

$$f_{с6} = f_{max} = \frac{1}{2\pi C_{ex6} \frac{R_{г6} r_{ex6}}{R_{г6} + r_{ex6}}} = 450 \text{ кГц}$$

$$C_{диф6} = \frac{S_{П6}}{2\pi F_T} = 13,164 \text{ нФ}$$

$$R_{г6} = r_{\beta6} = 125 \text{ Ом}$$

$$C_{ex6} = \frac{C_{диф6}}{1 + S_{П6} R_{э6}} + C_{к(1 + K_{U6\_0})} = 44,16 \text{ нФ}$$

$$C_{нав} = C_{сум} - C_{ex6} = 2,787 \text{ нФ}$$

$$K_{u66}(f) = \frac{K_{u6}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{с6}}\right)^2}}$$

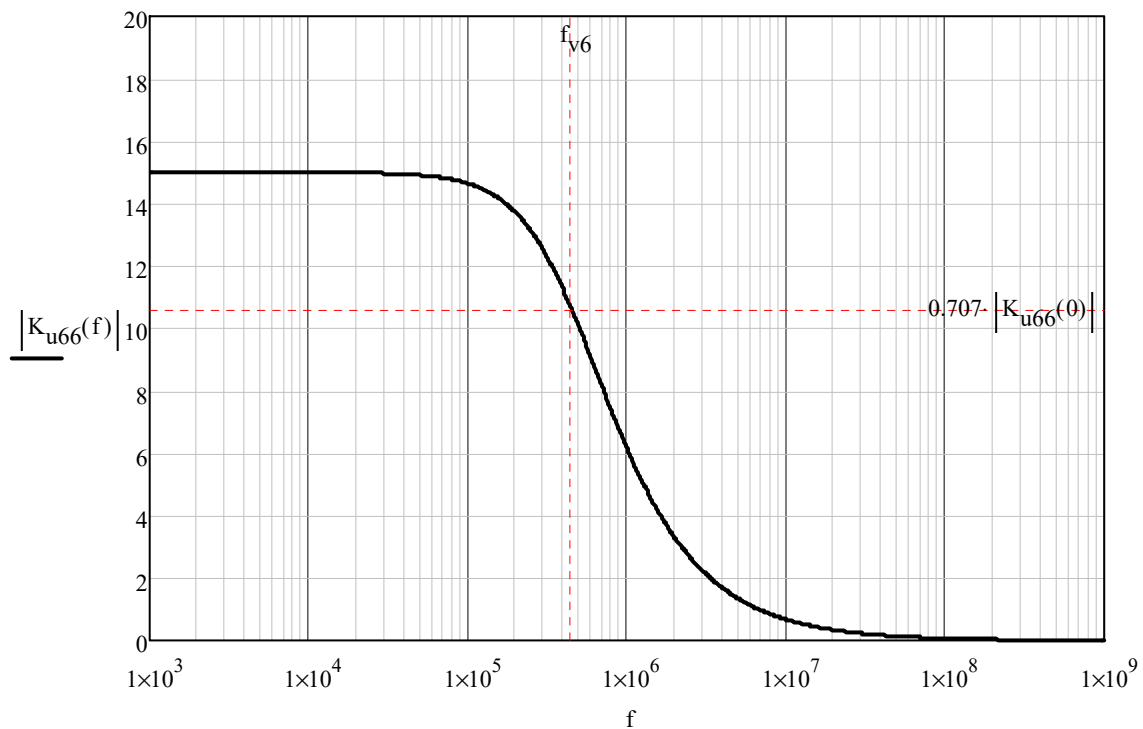


Рис. 22. АЧХ промежуточного усилительного каскада УК6

Расчёт входного эмиттерного повторителя (ЭП7) на высоких частотах.

$$S_{П7} = \frac{I_{к07}}{\varphi_T} = 22 \text{ мА/В}$$

$$R_{бкx7} = \frac{R_g r_{\delta7}}{R_g + r_{\delta7}} = 12 \text{ кОм}$$

$$C_{\text{ex}7} = \frac{C_{\text{диф}7}}{1 + S_{П7} R_{\gamma7}} + C_{\kappa} = 2,078 \text{ нФ}$$

$$f_{\gamma7} = \frac{1}{2\pi C_{\text{ex}7} \frac{R_{\delta7} r_{\text{ex}7}}{R_{\delta7} + r_{\text{ex}7}}} = 7,091 \text{ МГц}$$

$$C_{\text{диф}7} = \frac{S_{П7}}{2\pi F_T} = 3,54 \text{ нФ}$$

$$R_{\delta7} = R_{бкx7} = 12 \text{ кОм}$$

$$r_{\text{ex}7} = r_{\beta7} + (1 + \beta) R_{\gamma7} = 108,259 \text{ кОм}$$

$$K_{u77}(f) = \frac{K_{u7}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{\gamma7}}\right)^2}}$$

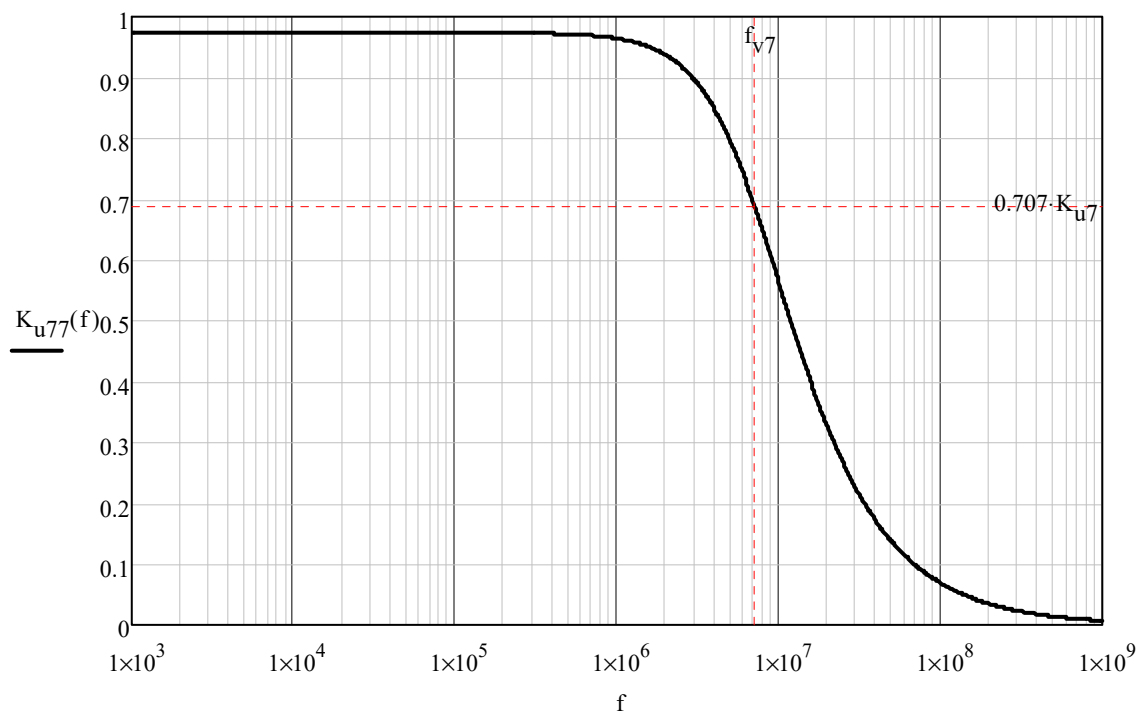


Рис. 23. АЧХ входного эмиттерного повторителя ЭП7



Расчёт разделительных емкостей на входе Ср1 и на выходе Ср2 усилительного каскада.

Конденсаторы Ср1 и Ср2 рассчитываются из условия обеспечения нижней частоты  $f_{\min}$  полосы пропускания усилителя. Ср1 и Ср2 так, чтобы при перемножении коэффициентов передачи входной и выходной цепей на частоте  $f_{\min}$  общий коэффициент передачи  $K_{\text{ex}} \cdot K_{\text{вых}} = 0,707$ .

$$\omega_{\min} = 2\pi f_{\min} = 6,283 \cdot 10^3 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

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 Ср1 и Ср2 можно рассчитать по формулам:

$$C_{p1} = \frac{1}{\sqrt{0,41} \omega_{\min} (R_{\text{ex\_сум}} + R_g)} = 3,314 \text{ нФ}$$

$$C_{p2} = \frac{1}{\sqrt{0,41} \omega_{\min} R_n} = 1,243 \text{ мкФ}$$

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

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

### АЧХ усилителя

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

$$K_{u\_sum}(f) = K_{u77}(f) K_{u66}(f) K_{u55}(f) K_{u44}(f) K_{u33}(f) K_{u22}(f) K_{u11}(f) |K_{ex}(f) K_{bex}(f)|$$

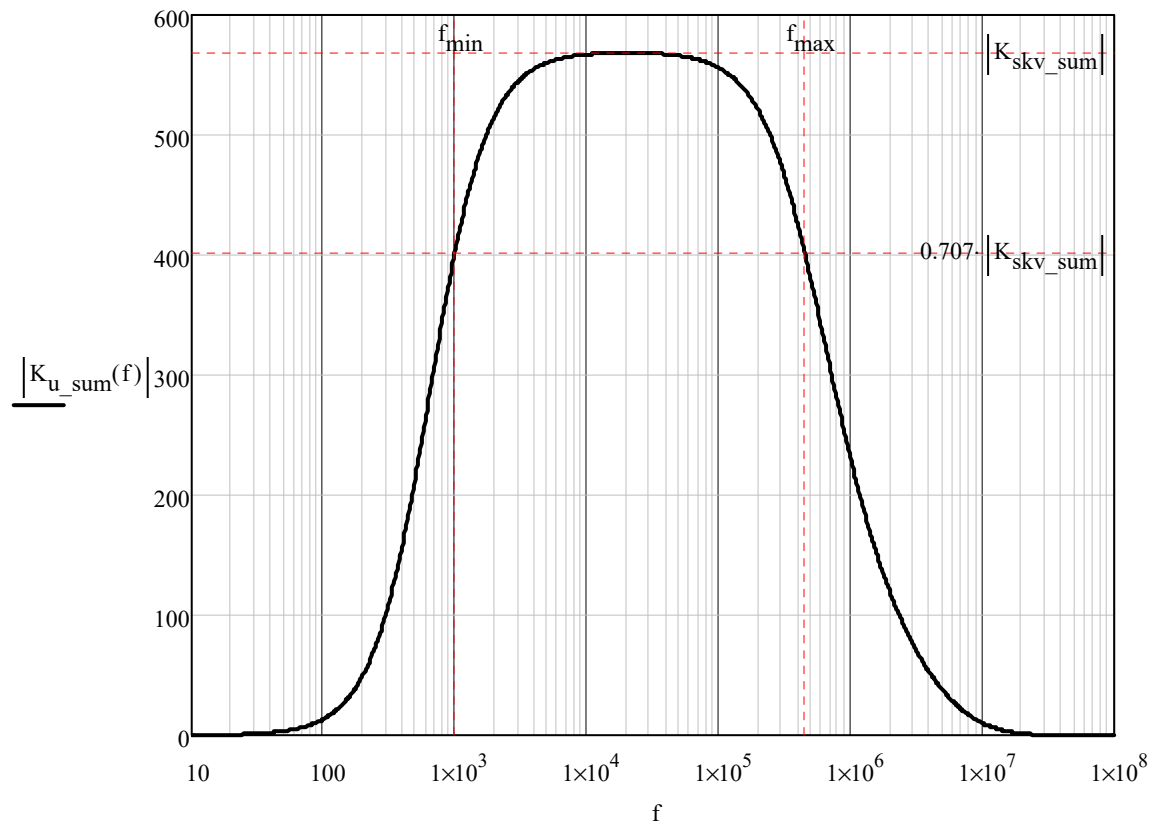


Рис. 24. Итоговая АЧХ усилителя