

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: Жеребцов И.С.
Группа: Эр-15-16
Преподаватель: Болдырева Т.И.

Москва
2019

Оглавление

Задание	3
Исходные данные	3
Предварительный расчёт усилителя	4
Приближенный расчёт коэффициентов усиления промежуточных каскадов и выбор структурной схемы	4
Расчёт усилителя на средних частотах	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
Расчет цепи отрицательной обратной связи (ООС)	16
Расчет частотный характеристик усилительных каскадов	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. $U_g = 1 \text{ мВ}$
2. $R_g = 6 \text{ кОм}$
3. $U_n = 0,8 \text{ В}$
4. $R_n = 300 \text{ Ом}$
5. $E_p = 9 \text{ В}$
6. $f_{\min} = 4 \text{ кГц}$
7. $f_{\max} = 400 \text{ кГц}$

Для всего усилителя используется БТ типа КТ368А со следующими характеристиками:

1. Коэффициент передачи тока в цепи с общим эмиттером $\beta = 50 - 300$
2. Емкость коллекторного перехода $C_{\kappa} = 1,7 \text{ пФ}$
3. Емкость эмиттерного перехода $C_{\varepsilon} = 3 \text{ пФ}$
4. Максимальное напряжение коллектор-база $U_{\kappa\delta_{\max}} = 15 \text{ В}$
5. Максимально допустимое постоянное напряжение эмиттер-база при токе коллектора, равном нулю $U_{\varepsilon\delta_{\max}} = 4 \text{ В}$
6. Максимально постоянный ток коллектора $I_{\kappa 0} = 30 \text{ мА}$
7. Максимальный импульсный ток коллектора $I_{\kappa 0_{\text{и}}} = 60 \text{ мА}$
8. Предельная частота коэффициента передачи тока в цепи с ОЭ $F_T = 900 \text{ МГц}$
9. Постоянная времени цепи обратной связи $\tau = 15 \text{ нс}$

Предварительный расчёт усилителя.

Требуемое значение коэффициента усиления:

$$K_{с\kappa\theta} = \frac{U_n}{U_g} = \frac{0,8 \text{ В}}{1 \text{ мВ}} = 800$$

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.

Приближенный расчёт коэффициентов усиления промежуточных каскадов и выбор структурной схемы.

$$K_{с\kappa\theta} = K_{вх} K_{u7} K_{u6} K_{u5} K_{u4} K_{u3} K_{u2} K_{u1} = -800$$

Если мы возьмём значения $K_{вх} = 0,8$, а $K_{u7} = K_{u5} = K_{u3} = K_{u1} = 0.9$, тогда

$$K_{u6} K_{u4} K_{u2} = \frac{K_{с\kappa\theta}}{K_{вх} K_{u1} K_{u3} K_{u5} K_{u7}}.$$

Так как для минимизации искажений требуется выполнение условия $K_{u2} < K_{u4} < K_{u6}$, тогда $K_{u2} = \alpha \cdot K_{u4}$, $K_{u6} = \alpha^{-1} K_{u4}$, где $\alpha = 0,5$ произвольный коэффициент.

Для расчёта K_{u4} используем формулу

$$K_{u4} = \sqrt[3]{\frac{K_{с\kappa\theta}}{K_{вх} K_{u1} K_{u3} K_{u5} K_{u7}}} = -11,5$$

после которой следует, что $K_{u2} = -5,8$, $K_{u6} = -23$

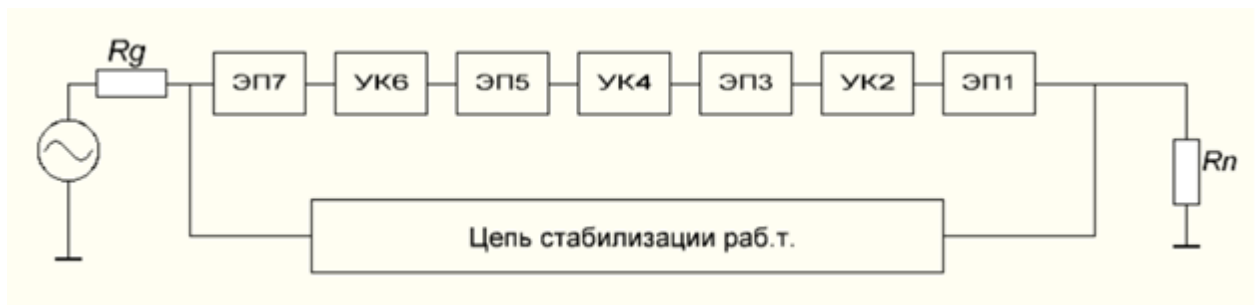


Рис. 1. Структурная схема многокаскадного усилителя низкой частоты

Расчёт усилителя на средних частотах.

Расчёт выходного эмиттерного повторителя (ЭП1).

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

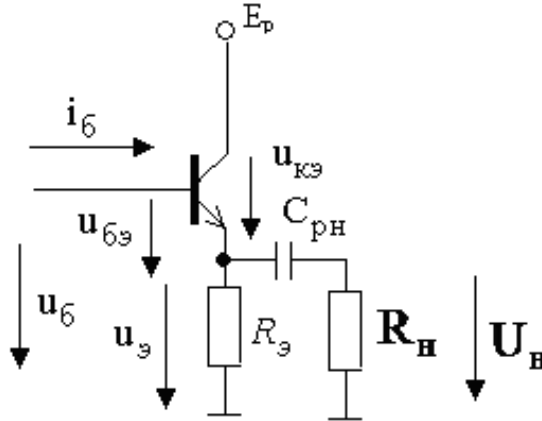


Рис. 2. Схема выходного ЭП

Для расчета ЭП заменим БТ линейаризованной 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 $\frac{1}{\omega C_{pH}} \ll R_H$.

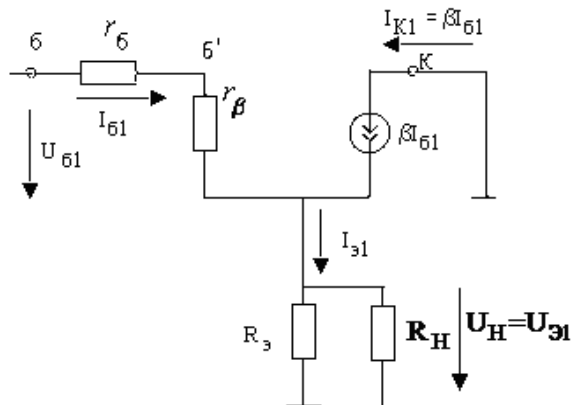


Рис.3. Эквивалентная схема ЭП1 по переменному сигналу

Выберем $R_{э1} = R_n = 300 \text{ Ом}$

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

$$R_{э1\sim} = \frac{R_{э1} R_n}{R_{э1} + R_n} = 150 \text{ Ом}$$

$$I_{э11} = \frac{U_n}{R_{э1\sim}} = 5,333 \text{ мА}$$

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

$$I_{э01} = 1,25 I_{э11} = 6,667 \text{ мА}$$

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

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

$$I_{э_max} = I_{э01} + I_{э1} = 12 \text{ мА}$$

$$U_{э_max} = U_{э01} + U_n = 2,8 \text{ В}$$

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.

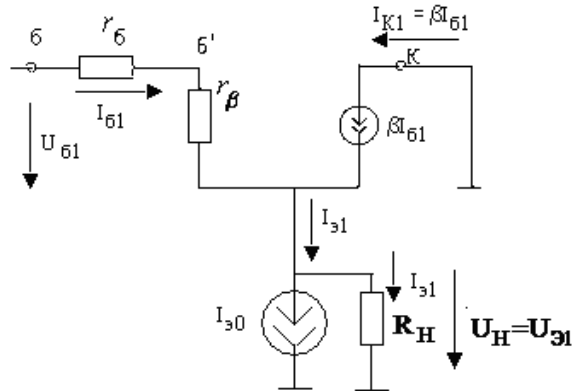


Рис.4. Эквивалентная схема ЭП1 с идеальным генератором тока

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

$$I_n = \frac{U_n}{R_n} = 2,667 \text{ мА}, \text{ следовательно и } I_{э11} = 2,667 \text{ мА}, I_{э01} = 1,25 \cdot I_{э11} = 3,333 \text{ мА}.$$

Проверим условие. $I_{э01} + I_{э11} = 6 \text{ мА}$ - 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.

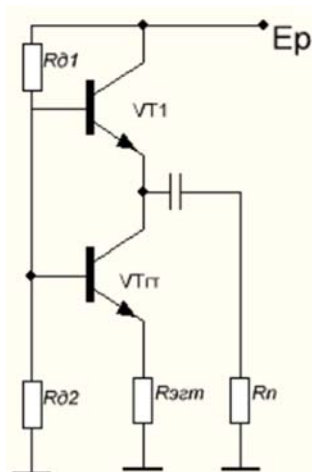


Рис. 5. Принципиальная схема ЭП1 с ГТ в цепи эмиттера

По схеме можно увидеть, что будет выполняться равенство $I_{к0_эм} = I_{э01} = 3,333 \text{ мА}$

$$\beta_{эм} = \beta = \sqrt{\beta_{max} \beta_{min}} = 122,5$$

$$I_{\bar{\sigma}0_эм} = \frac{I_{\kappa0_эм}}{\beta_{эм}} = 27,217 \text{ мкА} \quad I_{\bar{\sigma}0_эм} = (\beta_{эм} + 1)I_{\bar{\sigma}0_гт} = 3,4 \text{ мА}$$

Для обеспечения достаточной стабильности постоянного тока коллектора и повышения входного сопротивления транзистора по переменному сигналу в 10-15 раз достаточно выбрать величину сопротивления $R_{\bar{\sigma}0_эм} = 30 \text{ Ом}$.

$$U_{\bar{\sigma}0_эм} = I_{\bar{\sigma}0_эм} R_{\bar{\sigma}0_эм} + 0,6 = 0,7 \text{ В}$$

Выберем $I_{дел} = 10I_{\bar{\sigma}0_эм} = 0,272 \text{ мА}$, тогда:

$$R_{дел1} = \frac{E_p - U_{\bar{\sigma}0_эм}}{I_{дел}} = 30,493 \text{ кОм}$$

$$R_{дел2} = \frac{U_{\bar{\sigma}0_эм}}{I_{дел} - I_{\bar{\sigma}0_эм}} = 2,861 \text{ кОм}$$

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:

$$U_{\kappa\bar{\sigma}1_min} = E_p - U_{\bar{\sigma}01} - U_n \geq 1 \text{ В},$$

$$U_{\kappa\bar{\sigma}0_эм_min} = U_{\bar{\sigma}01} - R_{\bar{\sigma}0_эм} I_{\bar{\sigma}0_эм} - U_n \geq 1 \text{ В}$$

Если считать, что для заданного типа БТ $U_{\kappa\bar{\sigma}0_эм_доп} = 1 \text{ В}$, то можно рассчитать наименьшее значение $U_{\bar{\sigma}01}$ по формуле:

$$U_{\bar{\sigma}01} = 2 + U_n + R_{\bar{\sigma}0_эм} I_{\bar{\sigma}0_эм} = 2,9 \text{ В}$$

Теперь проверим выполнение двух указанных выше неравенств:

$$U_{\kappa\bar{\sigma}1_min} = E_p - U_{\bar{\sigma}01} - U_n = 5,3 \text{ В}$$

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

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

$$I_{\bar{\sigma}01} = \frac{I_{\bar{\sigma}01}}{1 + \beta} = 26,996 \text{ мкА}$$

$$\varphi_T = 25 \text{ мВ}$$

$$r_{\bar{\sigma}1} = \frac{\tau}{0,5C_{\kappa}} = 17,647 \text{ Ом}$$

$$r_{\beta1} = \frac{\varphi_T}{I_{\bar{\sigma}01}} = 926,059 \text{ Ом}$$

$$K_{u1} = \frac{R_n(1 + \beta)}{R_n(1 + \beta) + r_{\beta1} + r_{\bar{\sigma}1}} = 0,975$$

Теперь рассчитаем оставшиеся параметры схемы ЭП:

$$U_{\bar{\sigma}11} = (r_{\beta1} + r_{\bar{\sigma}1})I_{\bar{\sigma}01} + R_n I_n = 0,825 \text{ В}$$

$$R_{вх1} = R_n(1 + \beta) + r_{\beta1} + r_{\bar{\sigma}1} = 37,986 \text{ кОм}$$

$$U_{\bar{\sigma}01} = U_{\bar{\sigma}01} + 0,6 = 3,501 \text{ В}$$

Итоги:

$I_{\delta 01} = 26,996 \text{ мкА}$	$U_{\delta 01} = 3,501 \text{ В}$	$R_{\text{ex}1} = 37,986 \text{ кОм}$	$R_{\text{э-эм}} = 30 \text{ Ом}$
$I_{\text{e}01} = 3,333 \text{ мА}$	$U_{\delta 11} = 0,825 \text{ В}$	$R_{\text{дел}1} = 30,493 \text{ кОм}$	$r_{\delta 1} = 17,647 \text{ Ом}$
$I_{\kappa 01} = 3,306 \text{ мА}$	$K_{u1} = 0,975$	$R_{\text{дел}2} = 2,861 \text{ кОм}$	$r_{\beta 1} = 926,059 \text{ Ом}$

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

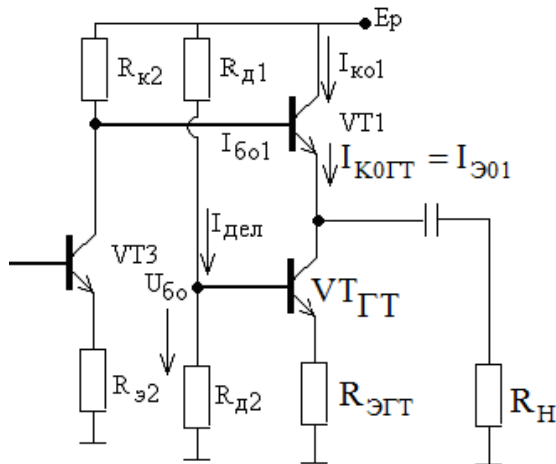


Рис. 6. Принципиальная схема каскадов УК2 и ЭП1

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

Так же должны выполняться условия слабого влияния следующего каскада:

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

$$R_{\kappa 2} \ll R_{\text{ex}1}$$

Выбираем $I_{\kappa 02} \geq 10I_{\delta 01}$. Пусть $I_{\kappa 02} = 1 \text{ мА}$, $U_{\kappa 02} = U_{\delta 01} = 3,501 \text{ В}$.

$$R_{\kappa 2} = \frac{E_p - U_{\kappa 02}}{I_{\kappa 02} + I_{\delta 01}} = 5,355 \text{ кОм}$$

Проверим условие слабого влияния

следующего каскада: $\frac{R_{\kappa 2}}{R_{\text{ex}1}} = 0,141 \ll 1$

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

$$K_{u2} = -\frac{\beta R_{\kappa 2\sim}}{r_{\delta 2} + r_{\beta 2} + (\beta + 1)R_{\text{э}2}} = -5,754$$

$$R_{\kappa 2\sim} = \frac{R_{\kappa 2} R_{\text{ex}1}}{R_{\kappa 2} + R_{\text{ex}1}} = 5,355 \text{ кОм}$$

$$r_{\beta 2} = \frac{\varphi_T}{I_{\delta 02}} = 3,062 \text{ кОм}$$

$$I_{\delta 02} = \frac{I_{\kappa 02}}{\beta} = 8,165 \text{ мкА}$$

$$r_{\delta 2} = \frac{\tau}{0,5C_{\kappa}} = 17,647 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{э}2} = \frac{-\beta R_{\kappa 2\sim} - K_{u2}(r_{\delta 2} + r_{\beta 2})}{(\beta + 1)K_{u2}} = 784,055 \text{ Ом}$$

$$I_{\text{э}02} = I_{\kappa 02} \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = 1,008 \text{ мА}$$

$$U_{\text{э}02} = R_{\text{э}2} I_{\text{э}02} = 0,79 \text{ В}$$

$$U_{\kappa 12} = U_{\delta 11} = 0,825 \text{ В}$$

$$I_{\kappa 12} = \frac{U_{\kappa 12}}{R_{\kappa 2}} = 0,154 \text{ мА}$$

$$U_{\delta 12} = \frac{U_{\kappa 12}}{|K_{u2}|} = 143,458 \text{ мВ}$$

$$I_{\text{э}12} = \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) I_{\kappa 12} = 0,155 \text{ мА}$$

$$K_{u3} = \frac{(1 + \beta)R_{\pi3}}{(1 + \beta)R_{\pi3} + r_{\beta3} + r_{\sigma3}} = 0,982$$

Постоянное напряжение на входе 3-го каскада $U_{\sigma03} = U_{\pi03} + 0,6 = 1,99 В$

$$U_{\sigma13} = \frac{U_{\sigma12}}{|K_{u3}|} = 146,096 мВ$$

$$I_{\sigma03} = \frac{I_{\pi03}}{1 + \beta} = 11,327 мкА$$

Входное сопротивление $R_{\pi3} = r_{\sigma3} + r_{\beta3} + (\beta + 1)R_{\pi3} = 124,475 кОм$

Итого:

$$I_{\sigma03} = 11,327 мкА$$

$$U_{\sigma03} = 1,99 В$$

$$R_{\pi3} = 124,475 кОм$$

$$r_{\sigma4} = 17,647 Ом$$

$$I_{\sigma03} = 1,399 мА$$

$$U_{\sigma13} = 146,069 мВ$$

$$R_{\sigma2} = 1 кОм$$

$$r_{\beta4} = 2,207 кОм$$

$$I_{\kappa03} = 1,387 мА$$

$$K_{u3} = 0,982$$

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

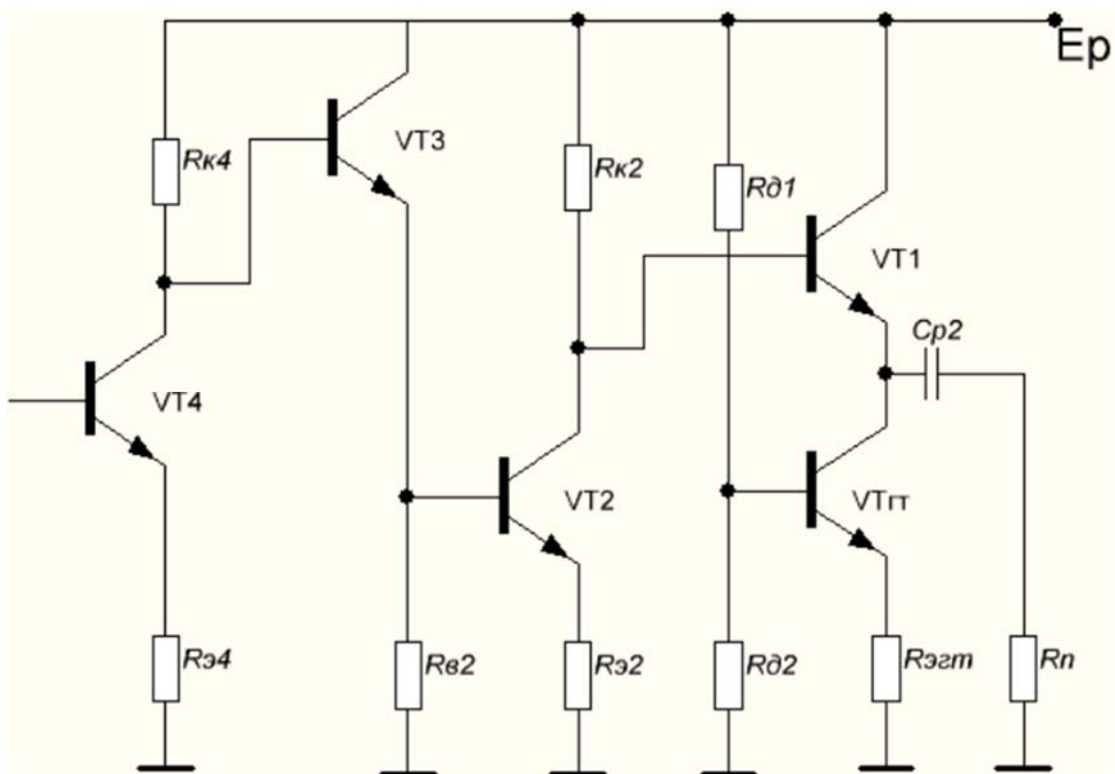


Рис. 8. Принципиальная схема УК4, ЭП3, УК2 и ЭП1

Выбираем $R_{\kappa4} = \frac{R_{\pi3}}{30} = 4,149 кОм$, следовательно $R_{\kappa4-} = \frac{R_{\kappa4}R_{\pi3}}{R_{\kappa4} + R_{\pi3}} = 4,015 кОм$

Выберем $U_{\kappa04} = U_{\sigma03} = 1,99 В$, тогда:

$$I_{\kappa04} = \frac{E_p - U_{\kappa04}}{R_{\kappa4-}} = 1,746 мА$$

$$I_{\sigma04} = \frac{I_{\kappa04}}{\beta} = 14,254 мкА$$

Проверим условие слабого влияния следующего каскада: $\frac{R_{\kappa4}}{R_{\pi3}} = 0,033 \ll 1$.

$$r_{\beta4} = \frac{\varphi_T \beta}{I_{\kappa04}} = 1,754 кОм$$

$$r_{\sigma4} = \frac{\tau}{0,5C_{\kappa}} = 17,647 Ом$$

При известном $K_{u4} = -11,5$ рассчитаем $R_{э4}$ по формуле:

$$R_{э4} = \frac{1}{\beta + 1} \left[\frac{\beta R_{к4}}{|K_{u4}|} - (r_{б4} + r_{β4}) \right] = 331,735 \text{ Ом}$$

$$I_{э04} = I_{к04} \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = 1,76 \text{ мА}$$

$$U_{э04} = R_{э4} I_{э04} = 583,836 \text{ мВ}$$

$$U_{б04} = U_{э04} + 0,6 = 1,184 \text{ В}$$

$$U_{б14} = \frac{U_{к14}}{|K_{u4}|} = 12,692 \text{ мВ}$$

$$U_{кэ4_min} = U_{к04} - U_{б13} - (U_{э04} + R_{э4} I_{э04}) = 1,249 \text{ В}$$

$$R_{вх4} = r_{б4} + r_{β4} + (\beta + 1) R_{э4} = 42,732 \text{ кОм}$$

Итоги:

$$I_{б04} = 14,254 \text{ мкА}$$

$$U_{б04} = 1,184 \text{ В}$$

$$R_{вх4} = 42,732 \text{ кОм}$$

$$r_{б4} = 17,647 \text{ Ом}$$

$$I_{е04} = 1,76 \text{ мА}$$

$$U_{б14} = 12,692 \text{ мВ}$$

$$R_{е4} = 331,735 \text{ Ом}$$

$$r_{β4} = 1,754 \text{ кОм}$$

$$I_{к04} = 1,746 \text{ мА}$$

$$K_{u4} = -11,5$$

$$R_{к4} = 4,149 \text{ кОм}$$

Расчёт промежуточного эмиттерного повторителя (ЭП5).

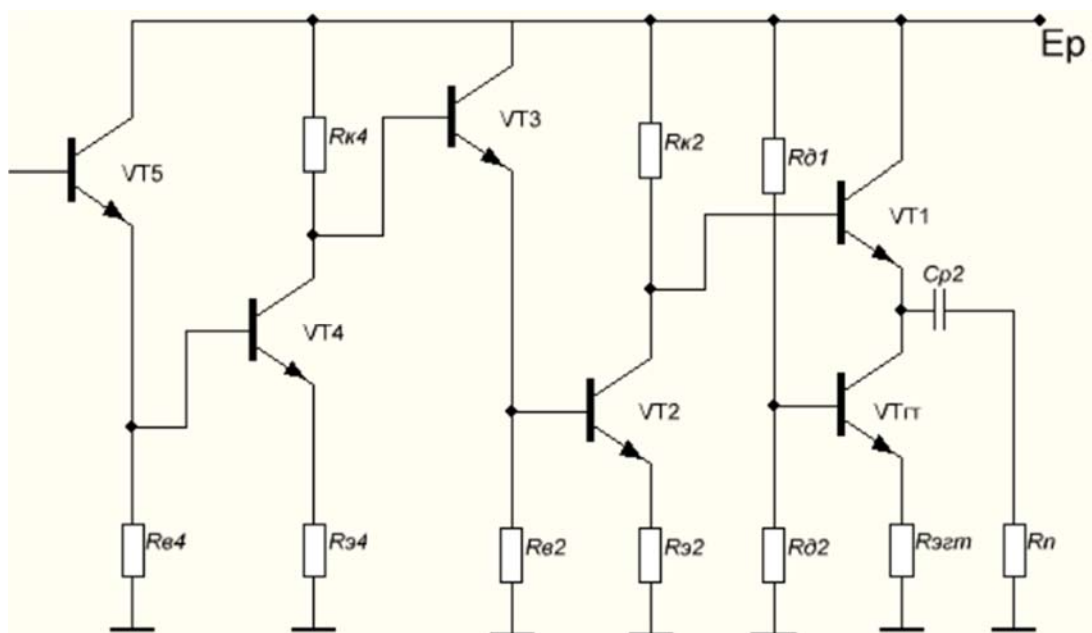


Рис. 9. Принципиальная схема ЭП5, УК4, ЭП3, УК2 и ЭП1

Расчёт данного эмиттерного повторителя производится аналогично расчёту ЭП3, так же без включения диодов.

$$U_{э05} = U_{б04} = 1,164 \text{ В}$$

$$\text{Выберем } R_{б4} = 1000 \text{ Ом}$$

$$I_{R_{б4}} = \frac{U_{б04}}{R_{б4}} = 1,184 \text{ мА}$$

$$I_{э05} = I_{R_{б4}} + I_{б04} = 1,198 \text{ мА}$$

Полное сопротивление нагрузки ЭП5 рассчитывается по формуле:

$$R_{э5} = \frac{R_{б4} R_{вх4}}{R_{б4} + R_{вх4}} = 0,977 \text{ кОм}$$

$$r_{β5} = \frac{\varphi_T (1 + \beta)}{I_{э05}} = 2,576 \text{ кОм}$$

$$r_{б5} = \frac{\tau}{0,5 C_{к}} = 17,647 \text{ Ом}$$

$$K_{u5} = \frac{(1 + \beta)R_{\pi5}}{(1 + \beta)R_{\pi5} + r_{\beta5} + r_{\sigma5}} = 0,979$$

Постоянное напряжение на входе 5-го каскада $U_{\sigma05} = U_{\pi05} + 0,6 = 1,784 \text{ В}$

$$U_{\sigma15} = \frac{U_{\sigma14}}{|K_{u5}|} = 12,965 \text{ мВ}$$

$$I_{\sigma05} = \frac{I_{\pi05}}{1 + \beta} = 9,703 \text{ мкА}$$

Входное сопротивление $R_{\pi5} = r_{\sigma5} + r_{\beta5} + (\beta + 1)R_{\pi5} = 124,845 \text{ кОм}$

Итого:

$$I_{\sigma05} = 9,703 \text{ мкА}$$

$$U_{\sigma05} = 1,784 \text{ В}$$

$$R_{\pi5} = 124,845 \text{ кОм}$$

$$r_{\sigma4} = 17,647 \text{ Ом}$$

$$I_{\sigma05} = 1,198 \text{ мА}$$

$$U_{\sigma15} = 12,965 \text{ мВ}$$

$$R_{\sigma4} = 1 \text{ кОм}$$

$$r_{\beta4} = 2,576 \text{ кОм}$$

$$I_{\kappa05} = 1,188 \text{ мА}$$

$$K_{u5} = 0,979$$

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

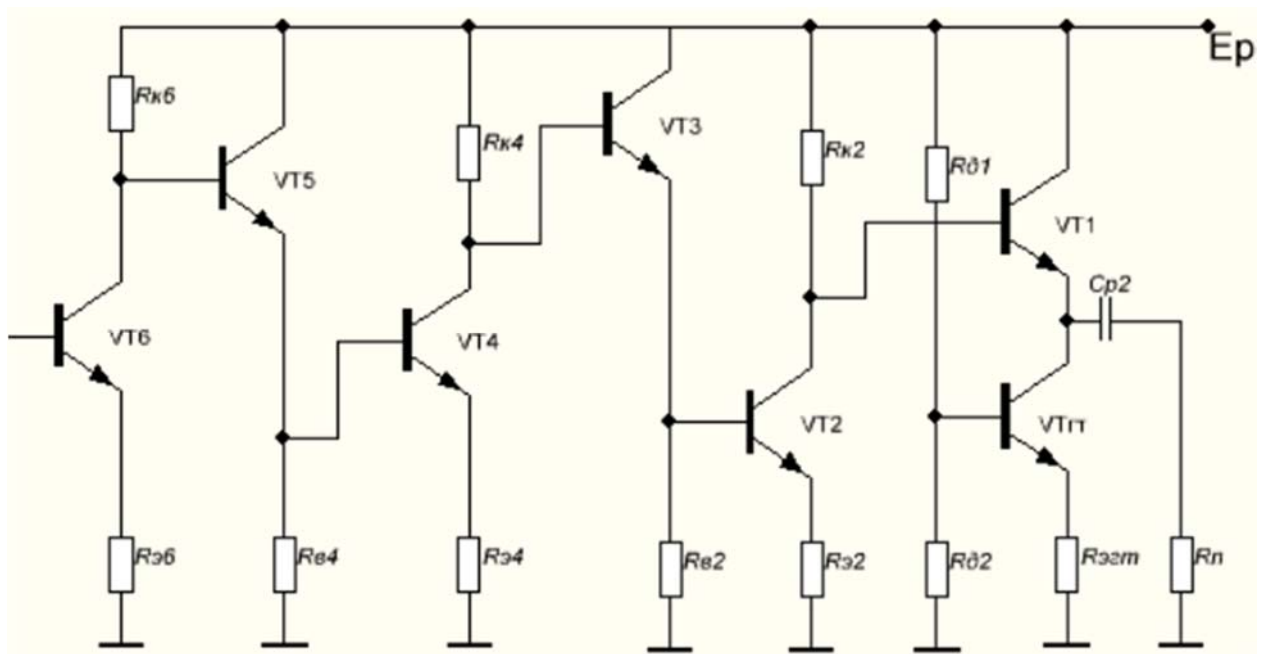


Рис. 10. Принципиальная схема УК6, ЭП5, УК4, ЭП3, УК2, ЭП1

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 $K_{u6} = -16,6$

$$\text{Выбираем } R_{\kappa 6} = \frac{R_{\text{ex}5}}{20} = 6,242 \text{ кОм}, \text{ следовательно } R_{\kappa 6\sim} = \frac{R_{\kappa 6} R_{\text{ex}5}}{R_{\kappa 6} + R_{\text{ex}5}} = 5,945 \text{ кОм}$$

Выберем $U_{\kappa 06} = U_{\sigma 05} = 1,784 \text{ В}$, тогда:

$$I_{\kappa 06} = \frac{E_p - U_{\kappa 06}}{R_{\kappa 6\sim}} = 1,214 \text{ мА} \quad I_{\sigma 06} = \frac{I_{\kappa 06}}{\beta} = 9,911 \text{ мкА}$$

Проверим условие слабого влияния следующего каскада: $\frac{R_{\kappa 6}}{R_{\text{ex}5}} = 0,05 \ll 1$.

$$r_{\beta 6} = \frac{\varphi_T \beta}{I_{\kappa 06}} = 2,522 \text{ кОм} \quad r_{\sigma 4} = \frac{\tau}{0,5 C_{\kappa}} = 17,647 \text{ Ом}$$

При взятом $K_{u4} = -16,6$ рассчитаем $R_{\sigma 6}$ по формуле:

$$R_{\sigma 6} = \frac{1}{\beta + 1} \left[\frac{\beta R_{\kappa 6\sim}}{|K_{u6}|} - (r_{\sigma 6} + r_{\beta 6}) \right] = 235,628 \text{ Ом}$$

$$I_{\sigma 06} = I_{\kappa 06} \left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = 1,224 \text{ мА} \quad U_{\sigma 06} = R_{\sigma 6} I_{\sigma 06} = 288,346 \text{ мВ}$$

$$U_{\sigma 06} = U_{\sigma 06} + 0,6 = 0,888 \text{ В} \quad U_{\sigma 16} = \frac{U_{\kappa 16}}{|K_{u6}|} = 781,048 \text{ мВ}$$

$$U_{\kappa \sigma 6_min} = U_{\kappa 06} - U_{\sigma 15} - (U_{\sigma 06} + R_{\sigma 6} I_{\sigma 16}) = 1,482 \text{ В}$$

$$R_{\text{ex}6} = r_{\sigma 6} + r_{\beta 6} + (\beta + 1) R_{\sigma 6} = 31,634 \text{ кОм}$$

Итоги:

$I_{\sigma 06} = 9,911 \text{ мкА}$	$U_{\sigma 06} = 0,888 \text{ В}$	$R_{\text{ex}6} = 31,634 \text{ кОм}$	$r_{\sigma 6} = 17,647 \text{ Ом}$
$I_{e06} = 1,224 \text{ мА}$	$U_{\sigma 16} = 781,048 \text{ мВ}$	$R_{\sigma 6} = 235,628 \text{ Ом}$	$r_{\beta 6} = 2,522 \text{ кОм}$
$I_{\kappa 06} = 1,214 \text{ мА}$	$K_{u6} = -16,6$	$R_{\kappa 6} = 6,242 \text{ кОм}$	

Расчёт входного эмиттерного повторителя (ЭП7).

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

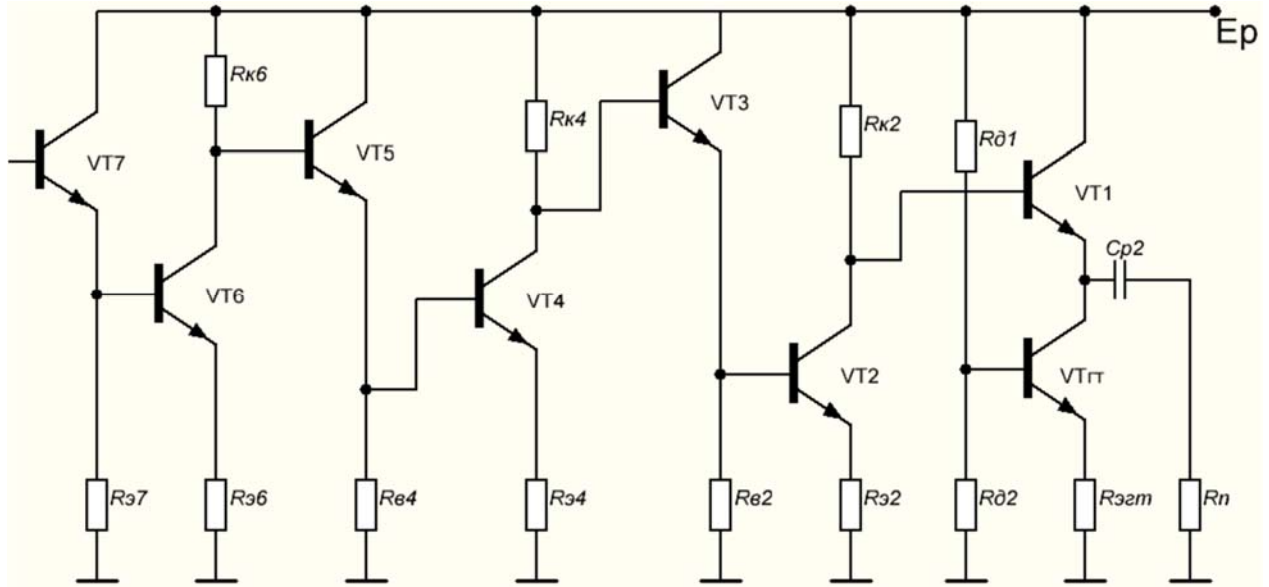


Рис. 11. Принципиальная схема ЭП7, УК6, ЭП5, УК4, ЭП3, УК2, ЭП1

Выберем $R_{g7} = 700 \text{ Ом}$

$$I_{R_{g7}} = \frac{U_{\phi 06}}{R_{g7}} = 1,238 \text{ мА}$$

$$I_{\phi 07} = I_{R_{g7}} + I_{\phi 06} = 1,247 \text{ мА}$$

$$I_{\phi 07} = \frac{I_{\phi 07}}{1 + \beta} = 10,101 \text{ мкА}$$

$$r_{\beta 7} = \frac{\phi_T \beta}{I_{\kappa 07}} = 2,475 \text{ кОм}$$

$$r_{\phi 7} = \frac{\tau}{0,5 C_{\kappa}} = 17,647 \text{ Ом}$$

$$R_{ex7} = r_{\phi 7} + r_{\beta 7} + (\beta + 1) \frac{R_{g7} R_{ex6}}{R_{g7} + R_{ex6}} = 87,12 \text{ кОм}$$

$$K_{u7} = \frac{(\beta + 1) \frac{R_{g7} R_{ex6}}{R_{g7} + R_{ex6}}}{(\beta + 1) \frac{R_{g7} R_{ex6}}{R_{g7} + R_{ex6}} + r_{\phi 7} + r_{\beta 7}} = 0,971$$

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

$$R_{ex7} = 123,167 \text{ кОм} > R_g = 4 \text{ кОм}$$

Итого:

$$R_{ex_yc} = R_{ex7} = 87,12 \text{ кОм}$$

$$I_{\phi 07} = 10,101 \text{ мкА}$$

$$K_{ex_yc} = \frac{R_{ex_yc}}{R_{ex_yc} + R_g} = 0.936$$

$$I_{\phi 07} = 1,247 \text{ мА}$$

$$I_{\kappa 07} = 1,237 \text{ мА}$$

$$U_{\phi 0_yc} = U_{\phi 07} = 1,473 \text{ В}$$

Проверка суммарного коэффициента усилителя.

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

$$K_{u_скв} = 0,8K_{u1}K_{u2}K_{u3}K_{u4}K_{u5}K_{u6}K_{u7} = -801,459$$

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_ϕ так, чтобы компенсировать возможную нестабильность источника питания.

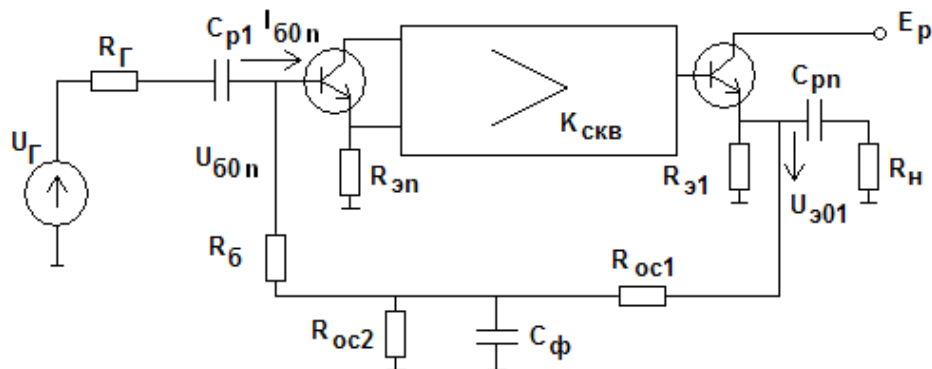


Рис. 12. Структурная схема усилителя охваченного ОС

Для расчёта цепи ОС зададим следующие исходные данные:

$$U_{э01} = 2,9 \text{ В}$$

$$R_g = 6 \text{ кОм}$$

$$U_{б07} = 1,473 \text{ В}$$

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

$$I_{б07} = 10,101 \text{ мкА}$$

$$R_{ex7} = 87,12 \text{ кОм}$$

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

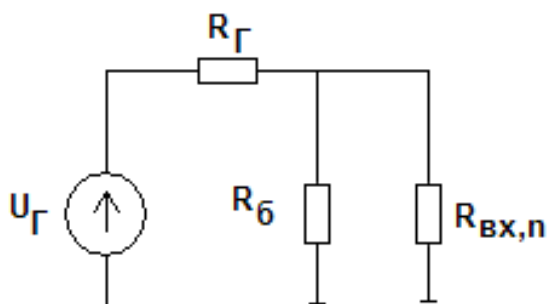


Рис. 13

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

$$R_{ex\Sigma} = \frac{K_{ex_yc} R_g}{1 - K_{ex_yc}} = 24 \text{ кОм}$$

$$R_6 = \frac{R_{ex\Sigma} R_{ex7}}{R_{ex7} - R_{ex\Sigma}} = 33,126 \text{ кОм}$$

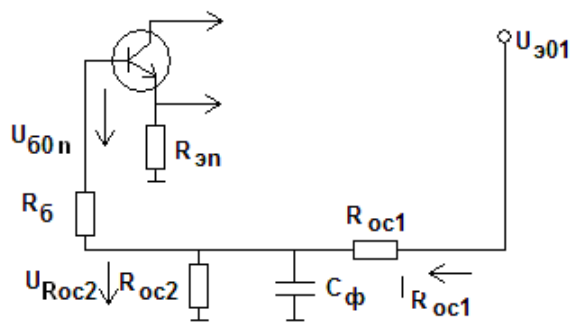


Рис. 14

$$I_{R_{oc1}} = 4I_{\bar{6}07} = 40,404 \text{ мкА}$$

$$U_{R_{oc2}} = U_{\bar{6}07} + I_{\bar{6}07} R_{\bar{6}} = 1,808 \text{ В}$$

$$R_{oc1} = \frac{U_{\bar{6}01} - U_{R_{oc2}}}{I_{R_{oc1}}} = 27,056 \text{ кОм}$$

$$R_{oc2} = \frac{U_{R_{oc2}}}{I_{R_{oc1}} - I_{\bar{6}07}} = 59,653 \text{ кОм}$$

$$K_{U_{oc}} = \frac{U_{\bar{6}07}}{U_{\bar{6}01}} = 0,508$$

$$T_{\phi} = \frac{3K_{U_{oc}} |K_{ck\theta}|}{2\pi f_{\min}} = 0,048 \text{ с}$$

$$R_{oc\Sigma} = \frac{1}{\frac{1}{R_{oc2}} + \frac{1}{R_{oc1}} + \frac{1}{R_{\bar{6}} + R_{ex7}}} = 16,118 \text{ кОм}$$

$$C_{\phi} = T_{\phi} \left(\frac{1}{R_{oc2}} + \frac{1}{R_{oc1}} \right) = 2,605 \text{ мкФ}$$

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

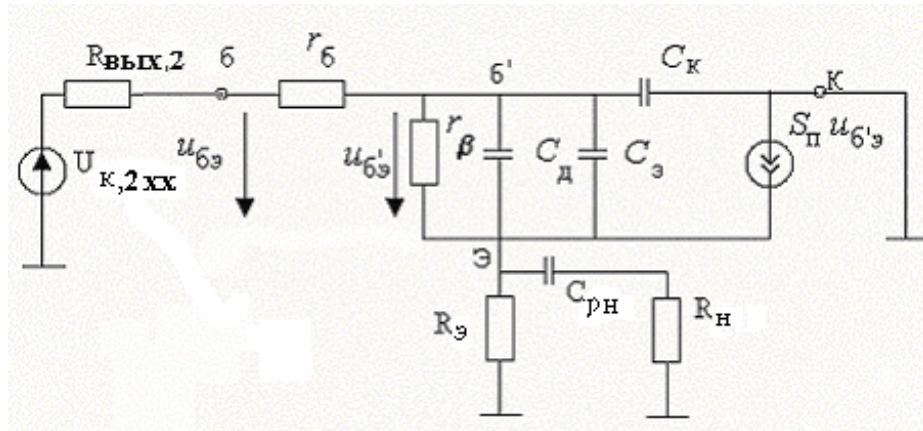


Рис. 15. Эквивалентная схема выходного ЭП на высоких частотах

$$S_{П1} = \frac{I_{к0}}{\varphi_T} = 132 \frac{mA}{B}$$

$$C_{диф1} = \frac{S_{П1}}{2\pi F_T} = 23,388 n\Phi$$

$$C_{ex1} = \frac{C_{диф1}}{1 + S_{П1} R_n} + C_k = 2,275 n\Phi$$

$$r_{ex1} = r_{\beta1} + (1 + \beta) R_n = 37,968 k\Omega$$

$$R_{\partial1} = R_{ex2} + r_{\partial1} = 801,702 \Omega$$

$$R_{ex2} = R_{к2} = 5,355 k\Omega$$

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

$$f_{\partial1} = \frac{1}{2\pi C_{ex1} \frac{R_{\partial1} r_{ex1}}{R_{\partial1} + r_{ex1}}} = 89,106 MHz$$

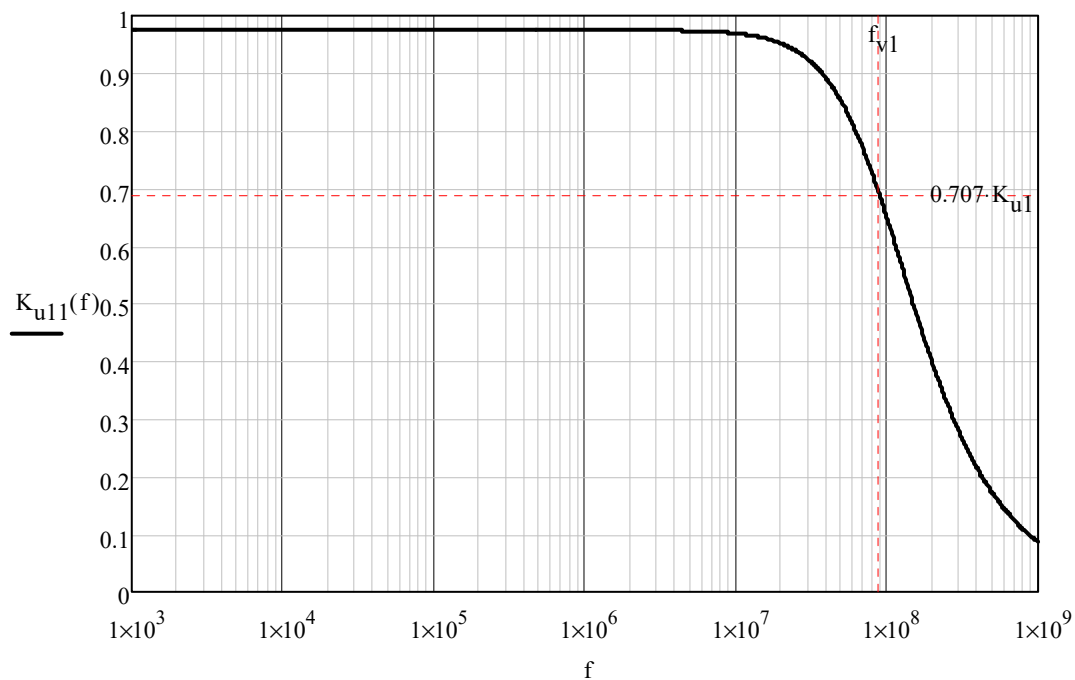


Рис. 16. АЧХ выходного эмиттерного повторителя ЭП1

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.

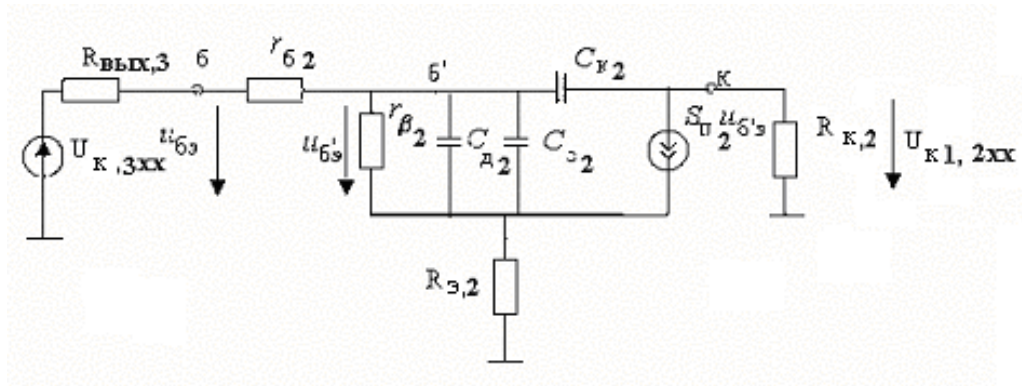


Рис. 17. Эквивалентная схема предвыходного усилителя УК2 на высоких частотах

$$S_{П2} = \frac{I_{к02}}{\phi_T} = 40 \frac{mA}{B}$$

$$K_{u2-0} = \frac{\beta R_{к2}}{r_{б2} + (\beta + 1) R_{э2}} = 6,566$$

$$R_{г2} = r_{62} = 17,647 \Omega$$

$$f_{62} = \frac{1}{2\pi C_{э2} \frac{R_{г2} r_{62}}{R_{г2} + r_{62}}} = 689,45 \text{ МГц}$$

$$C_{диф1} = \frac{S_{П2}}{2\pi F_T} = 7,074 \text{ нФ}$$

$$r_{62} = r_{б2} + (1 + \beta) R_{к2} = 664,222 \text{ кОм}$$

$$C_{э2} = \frac{C_{диф2}}{1 + S_{П2} R_{э2}} + C_{к2} (1 + K_{u2-0}) = 13,081 \text{ нФ}$$

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

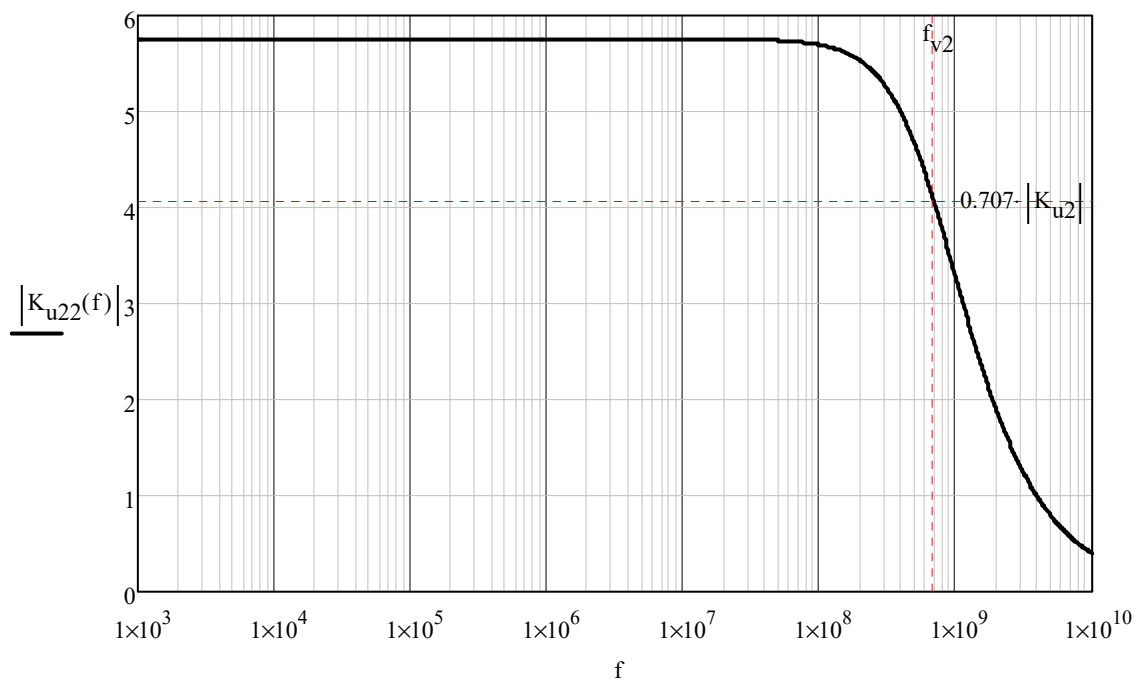


Рис. 18. АЧХ предвыходного усилительного каскада УК2

Расчёт промежуточного эмиттерного повторителя (ЭПЗ) на высоких частотах.

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

$$S_{ПЗ} = \frac{I_{к03}}{\varphi_T} = 55 \frac{мА}{В}$$

$$R_{вых4} = R_{к4} = 4,296 кОм$$

$$C_{ex3} = \frac{C_{диф3}}{1 + S_{ПЗ} R_{э3}} + C_{к} = 1,869 нФ$$

$$f_{э3} = \frac{1}{2\pi C_{ex3} \frac{R_{д3} r_{ex3}}{R_{э3} + r_{ex3}}} = 20,396 МГц$$

$$C_{диф3} = \frac{S_{ПЗ}}{2\pi F_T} = 9,813 нФ$$

$$R_{д3} = R_{вых4} + r_{э3} = 4,314 кОм$$

$$r_{ex3} = r_{б3} + (1 + \beta) R_{э3} = 128,872 кОм$$

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

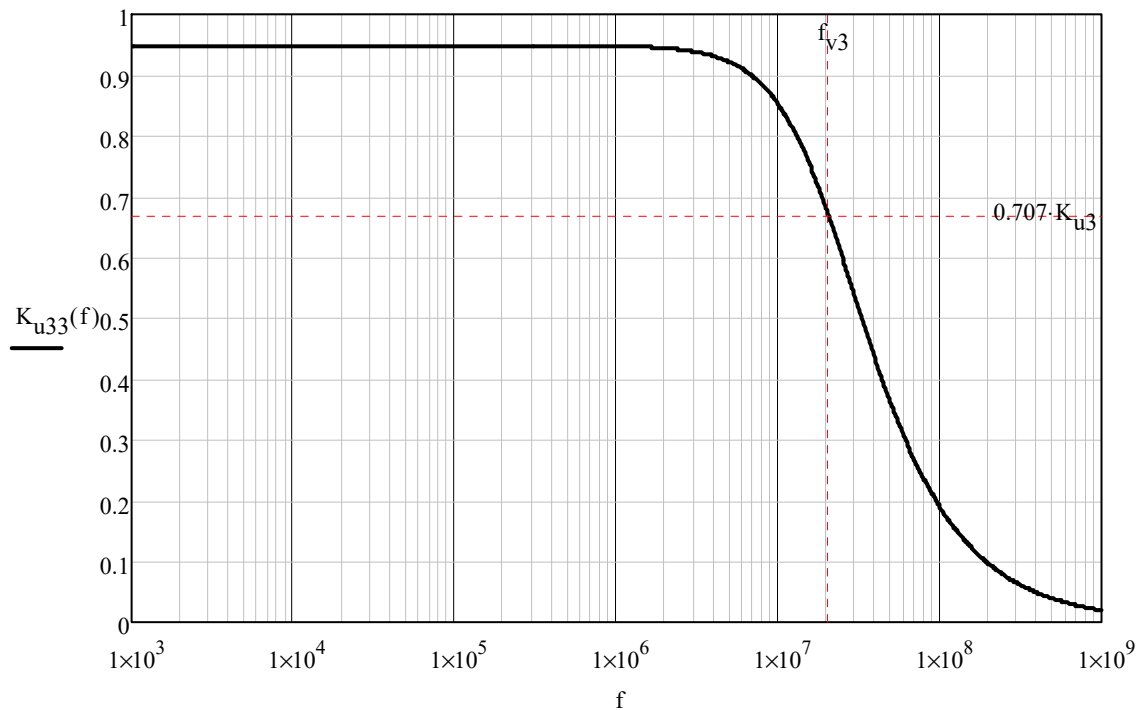


Рис. 19. АЧХ промежуточного эмиттерного повторителя ЭПЗ

Расчёт промежуточного усилительного каскада (УК4) на высоких частотах.

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

$$S_{\Pi 4} = \frac{I_{\kappa 04}}{\varphi_T} = 56 \frac{\text{мА}}{\text{В}}$$

$$r_{\text{ex}4} = r_{\beta 4} + (1 + \beta) R_{\kappa 4} = 532,677 \text{ кОм}$$

$$K_{U4_0} = \frac{\beta R_{\kappa 4}}{r_{\beta 4} + (\beta + 1) R_{\kappa 4}} = 11,897$$

$$f_{\text{ex}4} = \frac{1}{2\pi C_{\text{ex}4} \frac{R_{g4} r_{\text{ex}4}}{R_{g4} + r_{\text{ex}4}}} = 402,319 \text{ МГц}$$

$$C_{\text{out}4} = \frac{S_{\Pi 4}}{2\pi F_T} = 9,884 \text{ нФ}$$

$$R_{g4} = r_{\beta 4} = 17,647 \text{ Ом}$$

$$C_{\text{ex}4} = \frac{C_{\text{out}4}}{1 + S_{\Pi 4} R_{\kappa 4}} + C_{\kappa} (1 + K_{U4_0}) = 22,418 \text{ нФ}$$

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

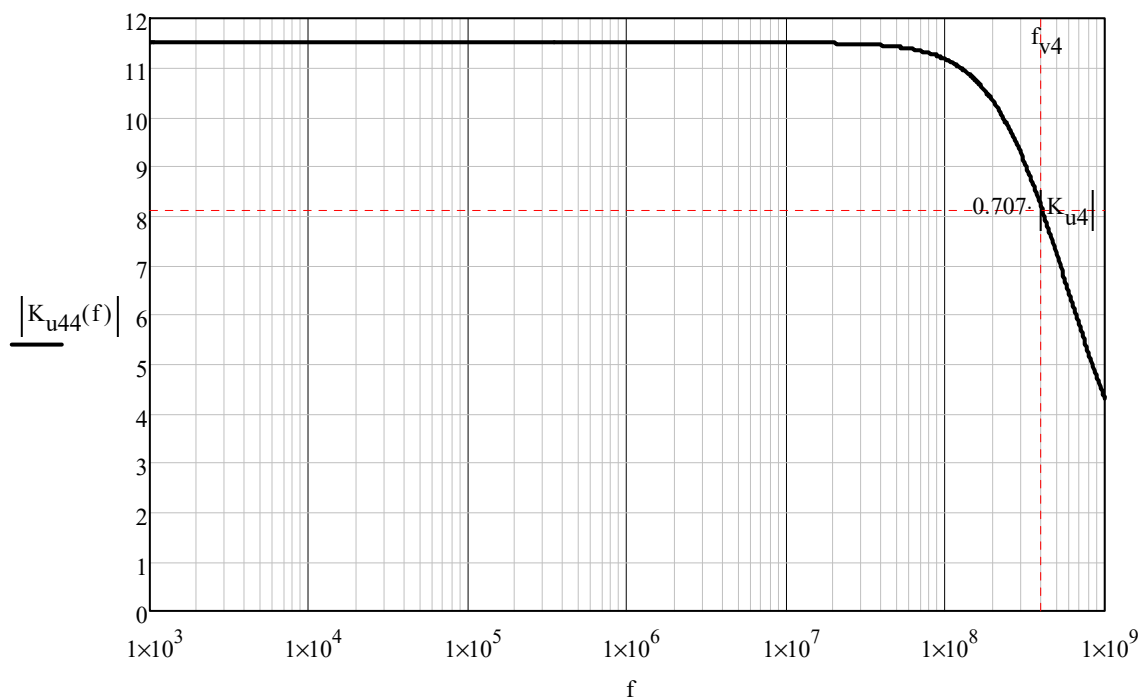


Рис. 20. АЧХ промежуточного усилительного каскада УК4

Расчёт промежуточного эмиттерного повторителя (ЭП5) на высоких частотах.

$$S_{П5} = \frac{I_{к05}}{\varphi_T} = 43 \frac{mA}{B}$$

$$R_{вых6} = R_{к6\sim} = 6,167 k\Omega$$

$$C_{ex5} = \frac{C_{диф5}}{1 + S_{П5} R_{э5}} + C_{к} = 1,873 nF$$

$$f_{э5} = \frac{1}{2\pi C_{ex5} \frac{R_{э5} r_{ex5}}{R_{э5} + r_{ex5}}} = 14,413 MHz$$

$$C_{диф5} = \frac{S_{П5}}{2\pi F_T} = 7,655 nF$$

$$R_{э5} = R_{вых6} + r_{э5} = 6,185 k\Omega$$

$$r_{ex5} = r_{б5} + (1 + \beta) R_{э5} = 126,096 k\Omega$$

$$K_{u55}(f) = \frac{K_{u5}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{э5}}\right)^2}}$$

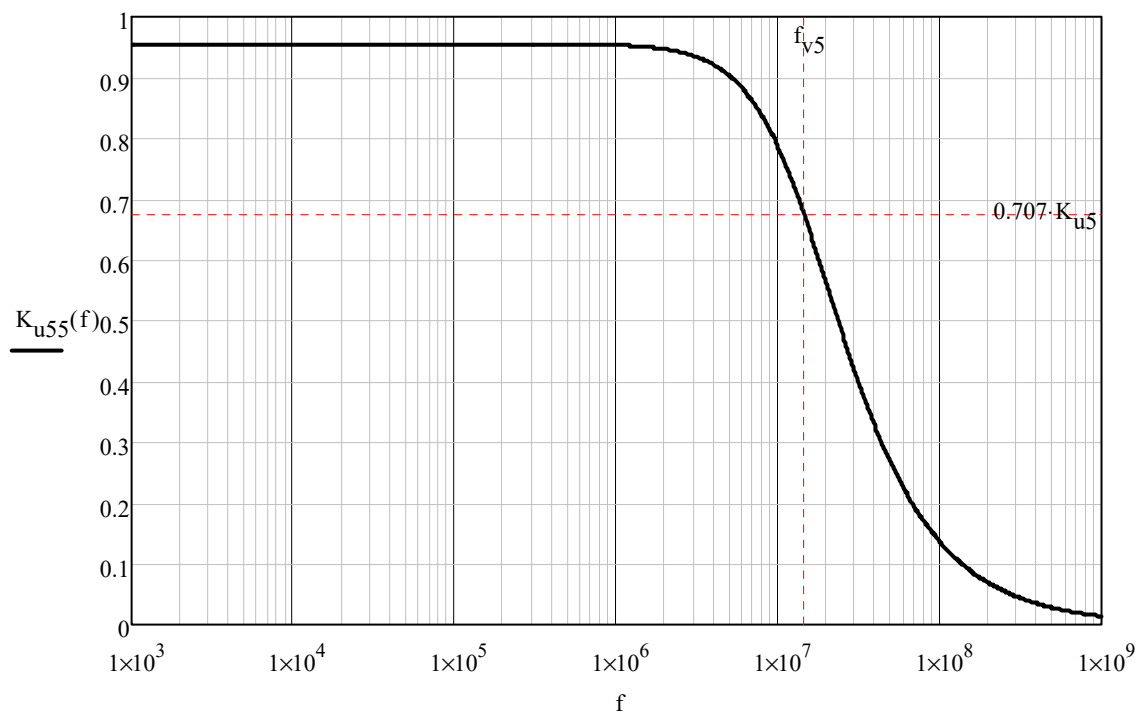


Рис. 21. АЧХ промежуточного эмиттерного повторителя ЭП3

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.

$$S_{П6} = \frac{I_{к06}}{\varphi_T} = 44 \frac{мА}{В}$$

$$r_{вх6} = r_{\beta6} + (1 + \beta)R_{к6\sim} = 764,305 кОм$$

$$K_{У6_0} = \frac{\beta R_{к6\sim}}{r_{\beta6} + (\beta + 1)R_{э6}} = 23,029$$

$$C_{сум} = \frac{1}{2\pi f_{max} \frac{R_{г6}r_{вх5}}{R_{г6} + r_{вх5}}} = 22,55 нФ$$

$$f_{\omega6} = f_{max} = \frac{1}{2\pi C_{вх6} \frac{R_{г6}r_{вх5}}{R_{г6} + r_{вх5}}} = 800 кГц$$

$$C_{диф6} = \frac{S_{П6}}{2\pi F_T} = 7,708 нФ$$

$$R_{г6} = r_{\sigma6} = 17,647 Ом$$

$$C_{вх6} = \frac{C_{диф6}}{1 + S_{П6}R_{э6}} + C_{к}(1 + K_{У6_0}) = 41,514 нФ$$

$$C_{нав} = C_{сум} - C_{вх6} = 22,509 нФ$$

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

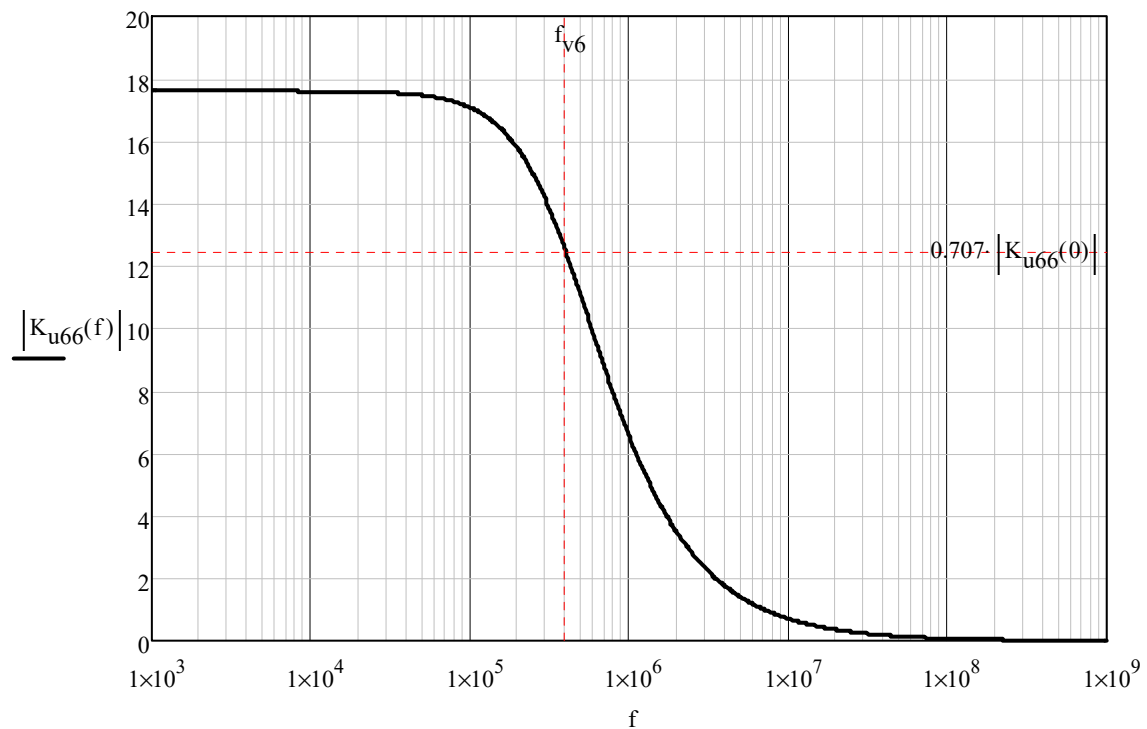


Рис. 22. АЧХ промежуточного усилительного каскада УК6

Расчёт входного эмиттерного повторителя (ЭП7) на высоких частотах.

$$S_{П7} = \frac{I_{к07}}{\varphi_T} = 49 \frac{mA}{B}$$

$$R_{вых7} = R_g + r_{\delta7} = 4,8 k\Omega$$

$$C_{ex7} = \frac{C_{\partial u\phi7}}{1 + S_{П7} R_{\gamma7}} + C_{\kappa} = 1,946 n\Phi$$

$$f_{\delta7} = \frac{1}{2\pi C_{ex7} \frac{R_{\delta7} r_{ex7}}{R_{\delta7} + r_{ex7}}} = 17,963 MГц$$

$$C_{\partial u\phi7} = \frac{S_{П7}}{2\pi F_T} = 8,751 n\Phi$$

$$R_{\delta7} = R_{вых7} = 4,8 k\Omega$$

$$r_{ex7} = r_{\beta7} + (1 + \beta) R_{\gamma7} = 88,907 k\Omega$$

$$K_{u77}(f) = \frac{K_{u7}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{\delta7}}\right)^2}}$$

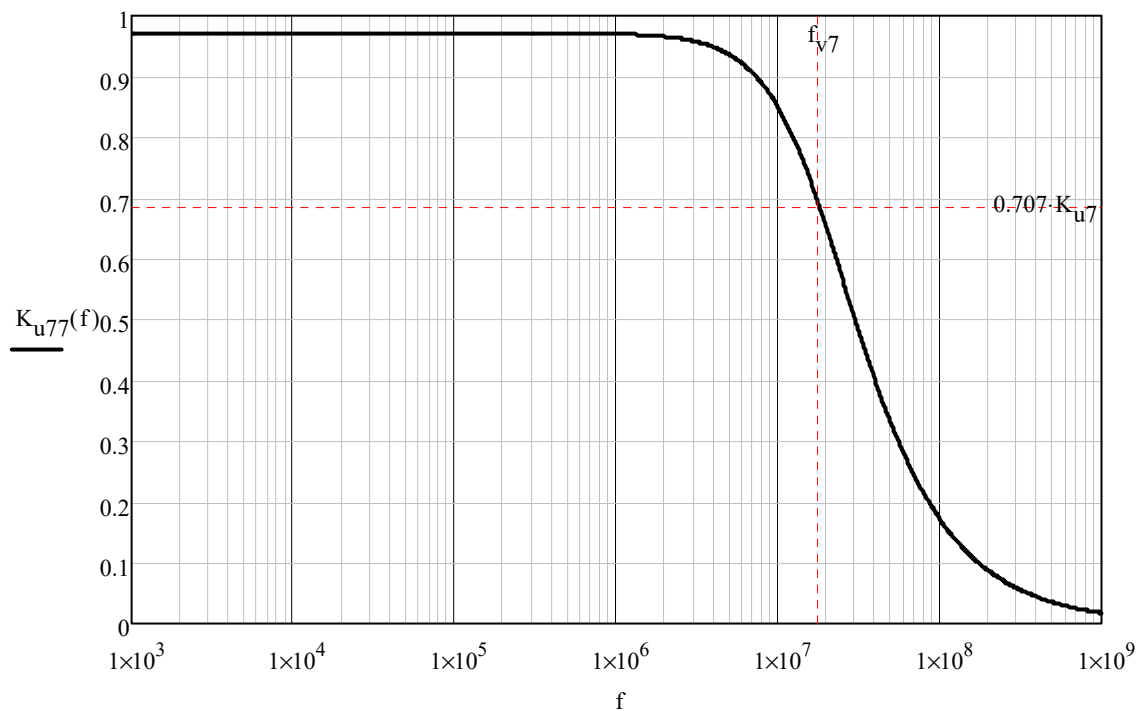


Рис. 23. АЧХ входного эмиттерного повторителя ЭП7

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 $K_{\text{вх}} \cdot K_{\text{вых}} = 0,707$.

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

Коэффициент передачи входной цепи можно рассчитать по формуле:

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

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

$$|K_{\text{вх}}(j\omega_{\min})| = \frac{\omega_{\min} C_{p1} R_{\text{вх_сум}}}{\sqrt{1 + (\omega_{\min} C_{p1} (R_{\text{вх_сум}} + R_g))^2}} = \frac{R_{\text{вх_сум}}}{\sqrt[4]{2} (R_{\text{вх_сум}} + R_g)}$$

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:

$$|K_{\text{вых}}(j\omega_{\min})| = \frac{\omega_{\min} C_{p2} R_n}{\sqrt{1 + (\omega_{\min} C_{p2} (R_n + R_{\text{вых1}}))^2}} = \frac{1}{\sqrt[4]{2}} = 0,841$$

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

С учетом указанных выше формул Ср1 и Ср2 можно рассчитать по формулам:

$$C_{p1} = \frac{1}{\sqrt{0,41} \omega_{\min} (R_{\text{вх_сум}} + R_g)} = 2,071 \text{ нФ}$$

$$C_{p2} = \frac{1}{\sqrt{0,41} \omega_{\min} R_n} = 0,207 \text{ мкФ}$$

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

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

$$R_{\text{вх_сум}} = 86,992 \text{ кОм}$$

АЧХ усилителя

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

$$K_{u_сум}(f) = K_{u77}(f)K_{u66}(f)K_{u55}(f)K_{u44}(f)K_{u33}(f)K_{u22}(f)K_{u11}(f)|K_{6x}(f)K_{6yx}(f)|$$

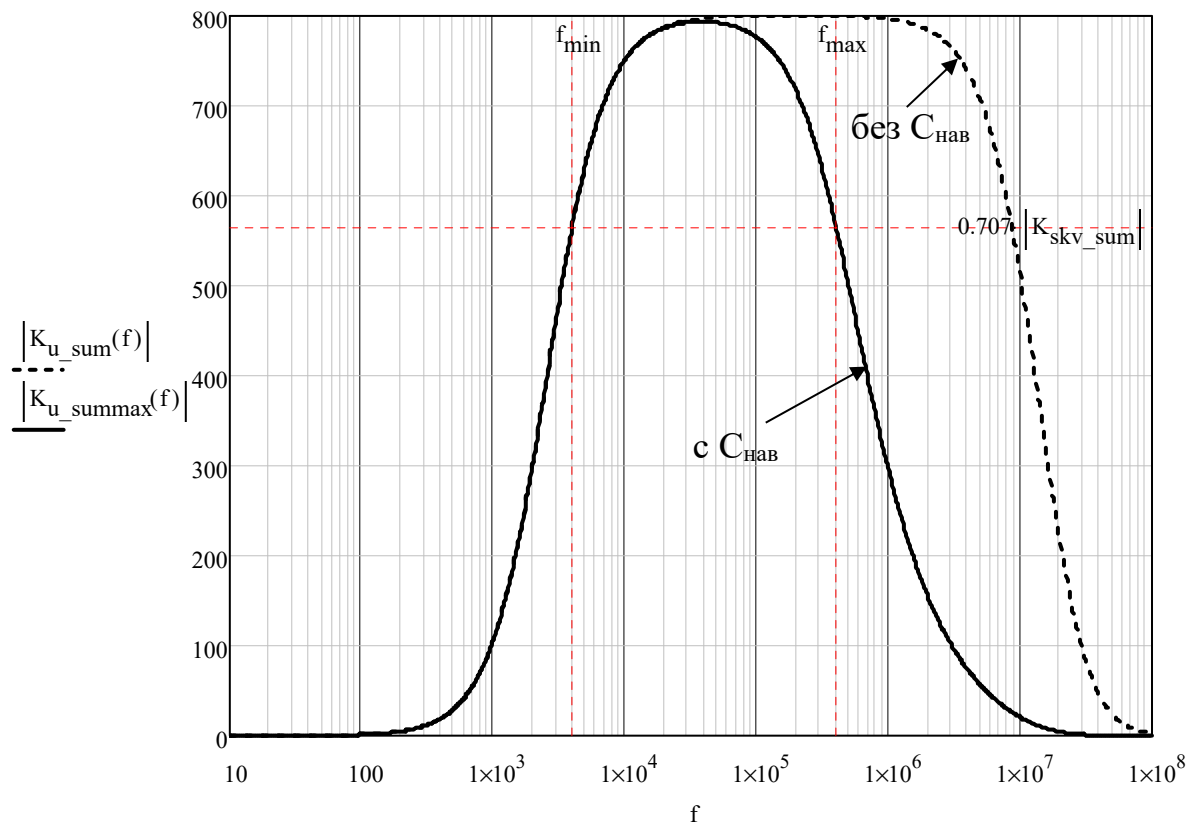


Рис. 24. Итоговая АЧХ усилителя