

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
«ЛЭТИ» ИМ. В.И. УЛЬЯНОВА (ЛЕНИНА)
Кафедра РЭС

КУРСОВАЯ РАБОТА
по дисциплине «Схемотехника аналоговых устройств»
ТЕМА: Схемотехническое проектирование усилителя импульсных сигналов
ВАРИАНТ-6

Студент гр. 1191

Кан Д.М.

Преподаватель

Боровиков С.Г.

Санкт-Петербург

2023

ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ


Студент: Кан Д.М.

Группа: 1191

Тема работы: Схемотехническое проектирование усилителя импульсных сигналов.

Исходные данные:

Таблица 1

№ п/п	Фамилия Имя Отчество	Структура	$E_{п+}, В$	$E_{п-}, В$	$t_{нар}, нс$	$\Delta, \%$	$t_{в}, мкс$	$C_{п}, пФ$	$R_{в}, кОм$	$I_{max}, ^\circ C$	$I_{min}, ^\circ C$	Форма имп. на выходе	$ U_{н} , В$
6.	Кан Денис Михайлович	ОЭ-ОБ-ОК	6	-6	150	5	150	20	3	50	-20		3

Вспомогательные данные:

- Сопротивление базовой области: $r_b = 30 \text{ Ом}$.
- Коэффициент усиления по току в схеме ОЭ: $\beta = 100$.
- Напряжение Эрли: $U_{эрл} = 150 \text{ В}$.
- Максимальный ток коллектора: $I_{kmax} = 0,3 \text{ А}$.
- Паразитная ёмкость перехода база-коллектор: $C_k = 1 \text{ пФ}$.
- Модуль коэффициента усиления по току в схеме ОЭ на частоте 250 МГц:
- $|\beta(250 \text{ МГц})| = 4$.
- Технологический разброс номинального напряжения база-эмиттер: $\Delta U_{бэТ} = \pm 30 \text{ мВ}$.
- Разброс коэффициента передачи тока базы в схеме ОЭ: $\Delta \beta = \pm 15$.

Содержание пояснительной записки:

«Содержание», «Введение», «Исходные данные», Расчеты, «Заключение»,
«Список сокращений», «Список использованных источников»

Предполагаемый объем пояснительной записки:

Не менее 20 страниц.

Дата выдачи задания:

Дата сдачи курсовой работы:

Дата защиты курсовой работы:

Студент

Кан Д.М.

Преподаватель

Боровиков С.Г.

АННОТАЦИЯ

Целью курсовой работы является процесс построения структурной и принципиальных схем, а также расчеты усилительного устройства: расчет элементов схемы на постоянном токе, анализ воздействия дестабилизирующих факторов, мероприятия по снижению влияния дестабилизирующих факторов, организация конфигурации схемы для обеспечения работы усилителя на переменном токе, обеспечение требований к параметрам переходных процессов.

SUMMARY

The aim of the course work is the process of building structural and schematic diagrams, as well as calculations of the amplifying device: calculation of circuit elements at a direct current, analysis of the impact of destabilizing factors, measures to reduce the influence of destabilizing factors, organization of the circuit configuration to ensure the operation of the amplifier at alternating current, ensuring the requirements for transient parameters.

СОДЕРЖАНИЕ

Задание на курсовую работу	2
Аннотация	3
Введение	5
1. Синтез структурной схемы и определение типов проводимости транзисторов	6
2. Определение конфигурации схемы на постоянном токе	7
3. Расчёт элементов схемы на постоянном токе	8
4. Анализ воздействия дестабилизирующих факторов.....	9
5. Мероприятия по снижению влияния дестабилизирующих факторов.....	12
6. Организация конфигурации схемы для обеспечения работы усилителя на переменном токе	14
7. Обеспечение требований к параметрам переходных процессов	16
Заключение	19
Список аббревиатур	20
Список использованных источников	21

ВВЕДЕНИЕ

В данной работе осуществляется построение и расчет усилительного тракта со схемотехникой ОЭ-ОБ-ОК.

Цель работы – проектирование трёх каскадного усилительного тракта с предложенной структурой и получение на его выходе сигнала, соответствующего параметрам, указанным в техническом задании.

Работа предполагает следующие этапы проектирования:

1. Синтез структурной схемы и определение типов проводимости транзисторов
2. Определение конфигурации схемы на постоянном токе
3. Расчёт элементов схемы на постоянном токе
4. Анализ воздействия дестабилизирующих факторов
5. Мероприятия по снижению влияния дестабилизирующих факторов
6. Организация конфигурации схемы для обеспечения работы усилителя на переменном токе
7. Обеспечение требований к параметрам переходных процессов

1. СИНТЕЗ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТИПОВ ПРОВОДИМОСТИ ТРАНЗИСТОРОВ

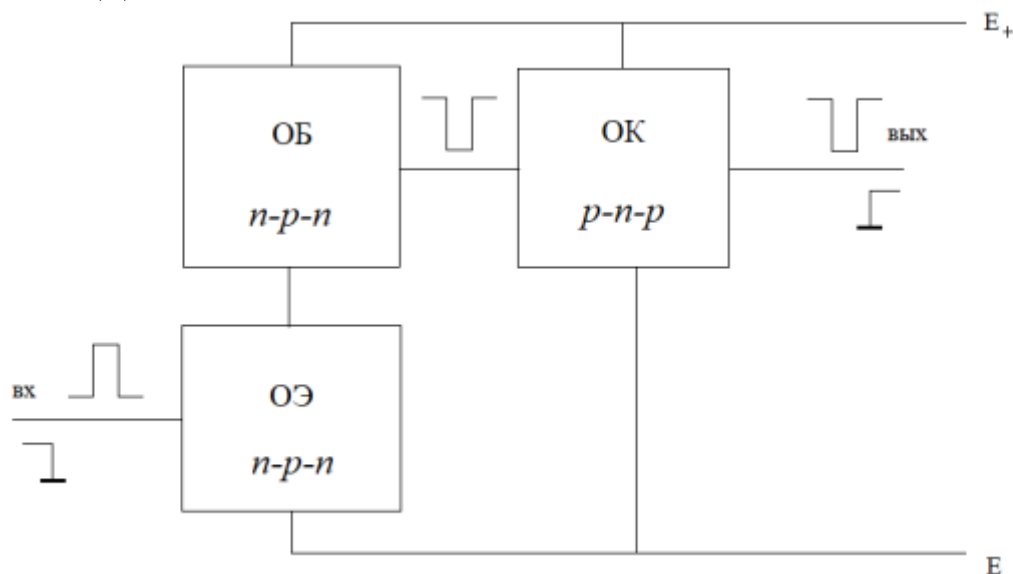


Рис.1 Каскад ОЭ-ОБ-ОК

Сочетание включений ОЭ-ОБ с точки зрения выбора типов проводимости следует рассматривать как один каскад со свойствами каскада ОЭ. Такой тип каскада является инвертирующим. Каскад ОК не является инвертирующим. На его выходе и входе должен образоваться импульс отрицательной полярности, а на входе всего каскада – положительной полярности. Таким образом получаем тип проводимости первого и второго каскада n-p-n, а третьего p-n-p.

Вывод: В результате выполнения этого этапа работы была построена структурная схема трехкаскадного усилителя, и выбраны типы проводимостей для трех каскадов: ОЭ – n-p-n, ОБ – n-p-n, ОК – p-n-p. Эффект Миллера в данной цепи будет незначителен. В каскаде ОЭ, взятом отдельно, эффект Миллера проявляется очень сильно, но при его включении совместно с каскадом ОБ эффект Миллера уменьшается до незначительных значений (свойство каскодной схемы включения), а в каскаде ОК эффект Миллера проявляется незначительно из-за того, что при прохождении через него сигнал не инвертируется. В целом эффект Миллера в данной цепи будет незначительным.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНФИГУРАЦИИ СХЕМЫ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

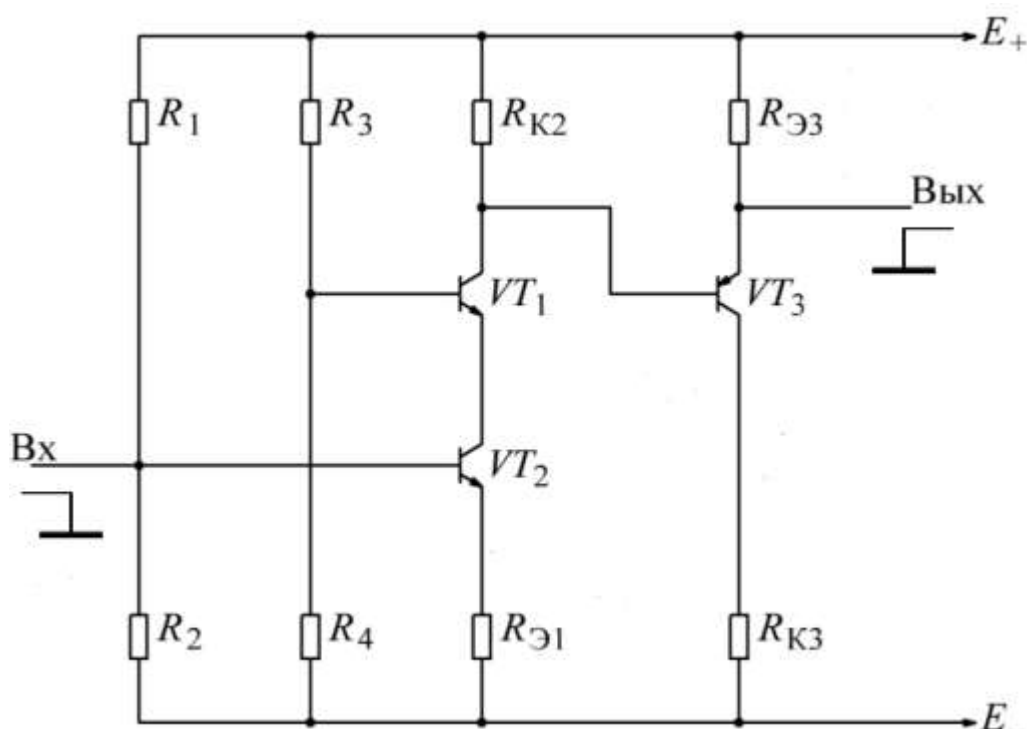


Рисунок 2. Принципиальная схема усилителя на постоянном токе

Потенциалы баз первых двух транзисторов задаются резистивными делителями напряжения R_1, R_2 и R_3, R_4 . В качестве токозадающей разности потенциалов в первом каскаде выступает падение напряжения на резисторе R_2 , а разность потенциалов на резисторе R_4 задает напряжение коллектор-эмиттер транзистора VT_1 .

3. РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ СХЕМЫ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

В схеме используется источник двухполярного питания $E_+=6\text{ В}$ и $E_-=-6\text{ В}$.

Считаем, что необходимо обеспечить $I_{K01} = I_{K02} = 1\text{ мА}$, $I_{K03} = 2\text{ мА}$, $U_{RЭ} = 1\text{ В}$
 $U_{RЭ3} = 1\text{ В}$ при $I_{K03} = 2\text{ мА}$. Тогда $R_{Э3} = U_{RЭ3} / I_{K03} = 1 / 0,002 = 500\text{ Ом}$.

Напряжение на коллекторном резисторе 2 каскада $U_{RK2} = U_{RЭ3} + 0,7 = 1 + 0,7 = 1,7\text{ В}$.

Тогда $R_{K2} = U_{RK2} / I_{K02} = 1,7 / 0,001 = 1700\text{ Ом}$.

Принимаем напряжение на эмиттерном резисторе транзистора первого каскада $U_{RЭ1} = 1\text{ В}$. Тогда $R_{Э1} = U_{RЭ1} / I_{K01} = 1 / 0,001 = 1000\text{ Ом}$.

Находим ток резистивного делителя напряжения в цепи базы 1 и 2 каскадов
 $\beta = 100$

$I_{\text{дел}} = 25 I_{K01} / \beta = 25 * 0,001 / 100 = 25 * 10^{-5}\text{ А} = 250\text{ мкА}$.

Находим падения напряжений на резисторах делителя в цепи базы первого каскада:

$$U_{R2} = U_{RЭ1} + 0,7\text{ В} = 1 + 0,7 = 1,7\text{ В};$$

$$U_{R1} = |E_+| + |E_-| - U_{R2} = 6 + 6 - 1,7 = 10,3\text{ В}.$$

Находим сопротивления резисторов:

$$R_1 = U_{R1} / I_{\text{дел}} = 10,3 / 0,00025 = 41200\text{ Ом} = 41,2\text{ кОм};$$

$$R_2 = U_{R2} / I_{\text{дел}} = 1,7 / 0,00025 = 6800\text{ Ом} = 6,8\text{ кОм}.$$

Учитывая, что транзистор второго каскада своим низким сопротивлением со стороны эмиттера препятствует сигнальным изменениям на коллекторе транзистора 1 каскада, выбираем напряжение коллектор-эмиттер транзистора 1 каскада равным $1,5\text{ В}$. Тогда падения напряжений на резисторах делителя второго каскада будут равны следующим величинам.

$$U_{R4} = U_{RЭ1} + U_{KЭ1} + 0,7\text{ В} = 1 + 1,5 + 0,7 = 3,2\text{ В};$$

$$U_{R3} = |E_+| + |E_-| - U_{R4} = 6 + 6 - 3,2 = 8,8\text{ В}.$$

Находим сопротивления резисторов:

$$R_3 = U_{R3} / I_{\text{дел}} = 8,8 / 0,00025 = 35200\text{ Ом};$$

$$R_4 = U_{R4} / I_{\text{дел}} = 3,2 / 0,00025 = 12800\text{ Ом}.$$

Вывод: Рассчитав номиналы резисторов, для выбранных значений токов и напряжений, мы обеспечили необходимое положение ИРТ, а значит и работу транзисторов в активном режиме (режиме линейного усиления).

4. АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

Найдём отклонения температуры относительно номинальной $t_{\text{ном}} = 20^\circ\text{C}$.

$$\Delta t^+ = |t_{\text{max}} - t_{\text{ном}}| = 50 - 20 = 30^\circ\text{C}$$

$$\Delta t^- = |t_{\text{min}} - t_{\text{ном}}| = |-20 - 20| = 40^\circ\text{C}$$

Выбираем большее по модулю отклонение, в данном случае $\Delta t = 40^\circ\text{C}$.

Отклонение температуры Δt приводят к следующим изменениям характеристик транзисторов.

$$\Delta U_{\text{БЭт}} = U_{\text{БЭном}} - U_{\text{БЭт}} = 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta t = 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot 60 = 0,084 \text{ В}$$

$$\Delta \beta_t = 0,005 \Delta \beta \Delta t = 0,005 \cdot 100 \cdot 40 = 20$$

В наиболее неблагоприятном случае отклонения параметров от номинальных значений за счет температурных изменений и технологического разброса имеют одинаковую направленность. $\Delta U_{\text{бэТ}}$ и $\Delta \beta_T$ – отклонение параметров $\Delta U_{\text{бэ}}$ и β вследствие технологического разброса. В этом случае:

$$\Delta U_{\text{БЭ}} = \Delta U_{\text{БЭт}} + \Delta U_{\text{БЭТ}} = 0,084 + 0,03 = 0,114 \text{ В};$$

$$\Delta \beta = \Delta \beta_t + \Delta \beta_T = 20 + 15 = 35$$

Найдем m - коэффициент неидеальности р-п перехода.

$$m_1 = m_2 = 1 + (r_b \cdot I_K) / (0,026 \beta) = 1 + (30 \cdot 0,001) / (0,026 \cdot 100) = 1,012$$

$$m_3 = 1 + (r_b \cdot I_K) / (0,026 \beta) = 1 + (30 \cdot 0,002) / (0,026 \cdot 100) = 1,023$$

Находим малосигнальные параметры транзисторов каждого каскада.

Для транзисторов первого и второго каскадов:

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж / К} - \text{постоянная Больцмана; } T - \text{температура в Кельвинах;}$$

$$q = 1,6 \cdot 10^{-19} - \text{заряд электрона.}$$

Температурный потенциал при номинальной температуре:

$$U_T = k T / q = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot (273 + 20) / (1,6 \cdot 10^{-19}) = 0,025 \text{ В}$$

Для транзисторов первых 2-х каскадов:

$$g_{21} = I_K / (m U_T) = 0,001 / (1,012 \cdot 0,025) = 0,038 \text{ См};$$

$$g_{11} = g_{21} / \beta = 0,038 / 100 = 0,00038 \text{ См};$$

$$g_{22} \approx I_K / |U_{\text{Эрли}}| = 0,001 / 150 = 6,67 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

$$g_{12} \approx 0$$

Для транзистора третьего каскада:

$$g_{21} = I_K / (m U_T) = 0,002 / (1,023 \cdot 0,025) = 0,075 \text{ См},$$

$$g_{11} = g_{21} / \beta = 0,075 / 100 = 0,00075 \text{ См},$$

$$g_{22} \approx I_K / |U_{\text{Эрли}}| = 0,002 / 150 = 13,3 \cdot 10^{-6} \text{ См.}$$

$$g_{12} \approx 0$$

Находим малосигнальные параметры каскадов.

Каскад ОЭ:

$$K_{F1} = (-g_{21} \cdot R_{K2}) / (1 + g_{21} \cdot R_{\beta 1}) = - (0,038 \cdot 1700) / (1 + 0,038 \cdot 1000) = -1,656.$$

$$G_{\text{вх1}} = g_{11} / (1 + g_{21} \cdot R_{\beta 1}) = 0,00038 / (1 + 0,038 \cdot 1000) = 9,74 \cdot 10^{-6} \text{ См},$$

$$G_{\text{вых1}} = g_{22} / (1 + g_{21} \cdot R_{31}) = 6,67 \cdot 10^{-6} / (1 + 0,038 \cdot 1000) = 17,1 \cdot 10^{-6} \text{ СМ.}$$

Каскад ОБ:

$$R_6 = R_3 \parallel R_4 = 35200 \cdot 12800 / (35200 + 12800) = 9386 \text{ Ом;}$$

$$K_{F2} = (g_{21} \cdot R_{k2}) / (1 + g_{11} \cdot R_6) = (0,038 \cdot 1700) / (1 + 0,00038 \cdot 9386) = 14,15$$

$$G_{\text{вхF2}} = g_{21} / (1 + g_{11} \cdot R_6) = 0,038 / (1 + 0,00038 \cdot 9386) = 8,32 \cdot 10^{-3} \text{ СМ;}$$

$$G_{\text{выхF2}} = g_{22} / [(1 + g_{21} \cdot R_{\text{выхF1}}) (1 + g_{11} \cdot R_6)] = 6,67 \cdot 10^{-6} / [(1 + 0,038 \cdot 58479) (1 + 0,00038 \cdot 9386)] = 6,57 \cdot 10^{-10} \text{ СМ.}$$

Каскад ОК:

$$R_6 = R_{k2} = 1700 \text{ Ом}$$

$$K_{F3} = g_{21} \cdot R_{33} / (1 + g_{21} \cdot R_{33}) = 0,075 \cdot 500 / (1 + 0,075 \cdot 500) = 0,974;$$

$$G_{\text{вхF3}} = g_{11} / (1 + g_{21} \cdot R_{33}) = 0,00075 / (1 + 0,075 \cdot 500) = 1,94 \cdot 10^{-5} \text{ СМ;}$$

$$G_{\text{выхF3}} = g_{21} / (1 + g_{11} \cdot R_6) = 0,075 / (1 + 0,00075 \cdot 1700) = 0,033 \text{ СМ.}$$

Для каждого каскада находим эквивалентные сопротивления R_6 и R_3 по отношению к выводам базы и эмиттера.

Для первого каскада:

$$R_6 = R_1 \parallel R_2 = 41200 \cdot 6800 / (41200 + 6800) = 5836 \text{ Ом;}$$

$$R_3 = R_{31} = 1000 \text{ Ом.}$$

Для второго каскада:

$$R_6 = R_3 \parallel R_4 = 9386 \text{ Ом}$$

$$R_3 = R_{\text{выхF1}} = 58479 \text{ Ом}$$

Для третьего каскада:

$$R_6 = R_{k2} \parallel R_{\text{выхF2}} = R_{k2} \cdot R_{\text{выхF2}} / (R_{k2} + R_{\text{выхF2}}) \approx R_{k2} = 1700 \text{ Ом}$$

$$R_3 = R_{33} = 1000 \text{ Ом.}$$

По формуле $\Delta I_K = \frac{\Delta U_{БЭ} g_{21} + \Delta \beta I_{60} (1 + g_{11} R_6)}{1 + g_{21} R_3 + g_{11} R_6}$ рассчитываем собственные нестабильности коллекторных токов всех каскадов:

$$I_{B01} = I_{B02} = I_{K01} / \beta = 0,001 / 100 = 0,00001 \text{ А}$$

$$\Delta I_{K1} = \frac{0,114 \cdot 0,038 + 35 \cdot 0,00001 \cdot (1 + 0,00038 \cdot 5836)}{1 + 0,038 \cdot 1000 + 0,00038 \cdot 5836} = 0,000132 \text{ А}$$

$$\Delta I_{K2} = \frac{0,114 \cdot 0,038 + 35 \cdot 0,00001 \cdot (1 + 0,00038 \cdot 9386)}{1 + 0,038 \cdot 58479 + 0,00038 \cdot 9386} = 2,68 \cdot 10^{-6} \text{ А}$$

$$I_{B03} = I_{K03} / \beta = 0,002 / 100 = 0,00002 \text{ А}$$

$$\Delta I_{K3} = \frac{0,114 \cdot 0,075 + 35 \cdot 0,00002 \cdot (1 + 0,00075 \cdot 1700)}{1 + 0,075 \cdot 1000 + 0,00075 \cdot 1700} = 0,000132 \text{ А}$$

Нестабильность ΔI_K в двухтранзисторном каскаде ОЭ–ОБ с последовательным питанием практически определяется только нестабильностью каскада ОЭ.

Следовательно нестабильность тока коллектора 3 каскада, обусловленная нестабильностью тока первого каскада.

$$\Delta I_{k3.1} = \Delta I_{k1} R_{k2} K_{3F} / R_{э3} = 0,000132 \cdot 1700 \cdot 0,974 / 500 = 0,00044 \text{ А.}$$

Суммарная нестабильность тока коллектора третьего каскада

$$\Delta I_{k3\Sigma} = \Delta I_{k3} + \Delta I_{k3.1} = 0,000132 + 0,00044 = 0,000572 \text{ А.}$$

Вывод: Суммарная нестабильность тока коллектора третьего каскада равна 0,572 мА, что меньше тока коллектора равного 2мА. Однако такая нестабильность не является приемлемой для большинства задач.

5. МЕРОПРИЯТИЯ ПО СНИЖЕНИЮ ВЛИЯНИЯ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ

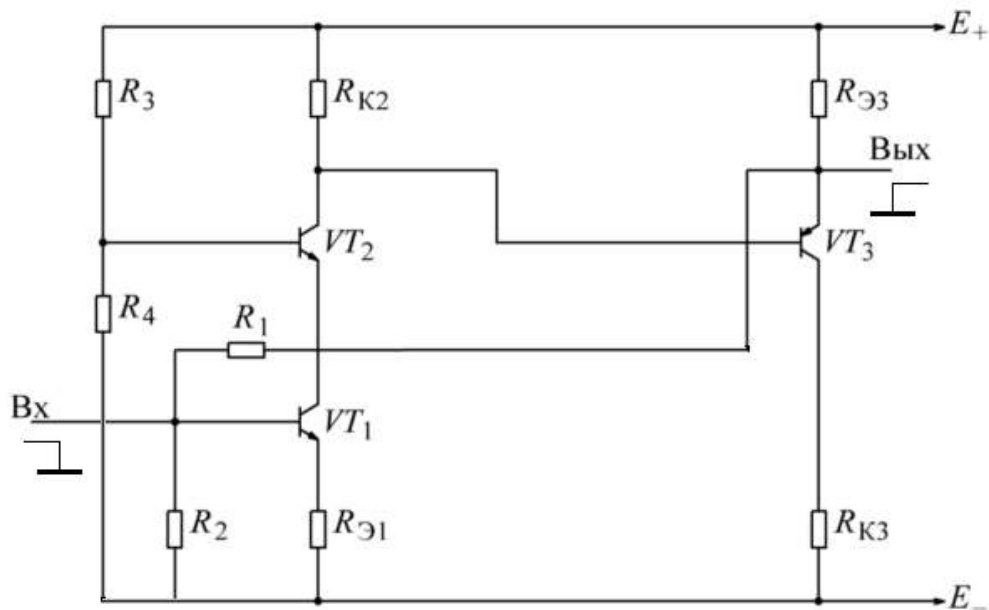


Рисунок 3 – Схема цепи с введённой обратной связью

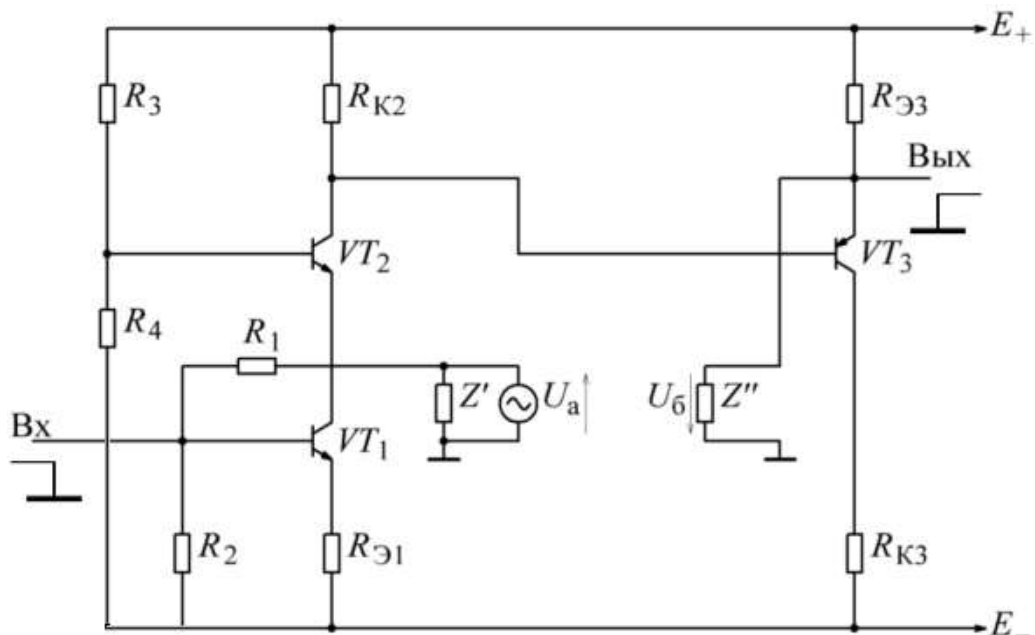


Рисунок 4 – Схема цепи для расчета коррекции сопротивлений

Поскольку падение напряжения на резисторе R_1 и ток через резистор $R_{\Sigma 3}$ изменились, то для сохранения тока через резистор R_1 и напряжения на резисторе $R_{\Sigma 3}$ их сопротивления следует скорректировать:

$$U_{61} = E_+ - U_{R1} = 6 - 10,3 = -4,3 \text{ В};$$

$$U_{\Sigma 3} = E_+ - U_{R_{\Sigma 3}} = 6 - 1 = 5 \text{ В};$$

$$R_1 = (U_{\Sigma 3} - U_{61}) / I_{\text{дел}} = (5 - (-4,3)) / 0,00025 = 37200 \text{ Ом};$$

$$R_{\Sigma 3} = U_{R_{\Sigma 3}} / (I_{K03} + I_{\text{дел}}) = 1 / (0,002 + 0,00025) = 444,4 \text{ Ом.}$$

Рассчитаем коэффициент петлевой передачи, для этого сначала пересчитаем K_{F3} , так как после введения ОС было скорректировано $R_{\Sigma 3}$:

$$K_{F3} = g_{21} \cdot R_{\Sigma 3} / (1 + g_{21} \cdot R_{\Sigma 3}) = 0,075 \cdot 444,4 / (1 + 0,075 \cdot 444,4) = 0,971;$$

$$T = R_2 / (R_1 + R_2) |K_{F1} * K_{F2} * K_{F3}| = 6800 / (37200 + 6800) \cdot 1,656 * 14,15 * 0,971 = 3,5.$$

Уменьшим найденное при вычислениях на предыдущем этапе значение неустойчивости:

$$\Delta I_{K3\Sigma F} = \Delta I_{K3\Sigma} / (1+T) = 0,000572 / (1+3,5) = 0,000127 \text{ А.}$$

Вывод: Для уменьшения влияния дестабилизирующих факторов была введена отрицательная обратная связь, что существенно повлияло на значение неустойчивости.

6. ОРГАНИЗАЦИЯ КОНФИГУРАЦИИ СХЕМЫ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТЫ УСИЛИТЕЛЯ НА ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

Для обеспечения работоспособности схемы на переменном токе вводим в схему два разделительных конденсатора – на входе и на выходе схемы, а также блокировочный конденсатор с дополнительным сопротивлением R_F на эмиттерном выводе каскада ОЭ для уменьшения искажений сигнала и увеличения определенности свойств транзистора. Для снижения искажений C_p и C_6 необходимо выбрать, исходя из предельных допустимых частотных искажений.

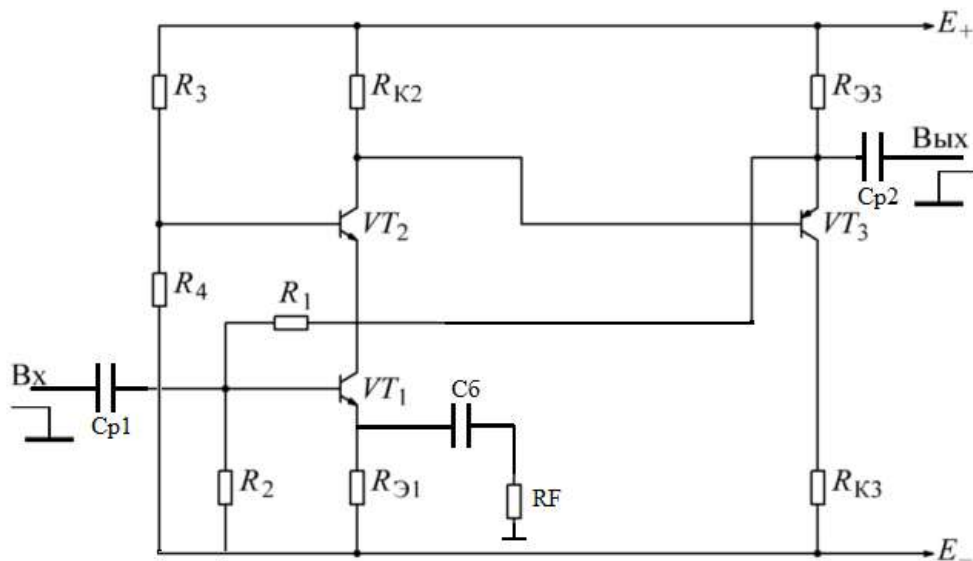


Рисунок 5. Результирующая схема трехкаскадного усилителя

Распределим общий спад переходной характеристики между этими звеньями при допустимом спаде ее вершины $\Delta = 5\%$:

$$\Delta_{p1} = 0,005(0,5\%),$$

$$\Delta_{p2} = 0,005(0,5\%),$$

$$\Delta_{61} = 0,04(4\%),$$

Наибольший спад создает блокировочный конденсатор в цепи эмиттера.

Определим граничные частоты f_{ni} всех четырех звеньев тракта по формуле:

$$f_{ni} = \Delta_i / (2\pi t_u)$$

$$f_{np1} = f_{np2} = 0,005 / 2 \cdot \pi \cdot 0,00015 = 5,3 \text{ Гц}$$

$$f_{n61} = 0,04 / 2 \cdot \pi \cdot 0,00015 = 42,44 \text{ Гц}$$

Дополнительное сопротивление в эмиттерной цепи:

$$R_F = 1/g_{21} = 26,31 \text{ Ом}$$

$$C_p \geq \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{np} \cdot (R_1 + R_2) \sqrt{\frac{1}{(1 - \varepsilon_H)^2} - 1}}$$

Для входной разделительной цепи R_1 – это сопротивление источника сигнала $R = 1 \text{ О}_\text{с}$, R_2 - эквивалентные сопротивление цепи справа от конденсатора

$$R_2 = R_{\text{вх1F}} || R_1 || R_2 = \frac{\frac{37200 \cdot 6800}{37200 + 6800} \cdot 102670}{\frac{37200 \cdot 6800}{37200 + 6800} + 102670} = 5444 \text{ Ом}$$

$$\varepsilon_{\text{нi}} = 0,3$$

$$C_{p1} \geq \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 5,3(1 + 5444) \sqrt{\frac{1}{(1 - 0,3)^2} - 1}} = 5,4 \text{ мкФ}$$

Для выходной разделительной цепи R_1 - эквивалентные сопротивление цепи слева от конденсатора, $R_2 = R_{\text{нагр}} = 3000 \text{ Ом}$

$$R_1 = R_{\text{вых3F}} || R_1 || R_2 = \frac{\frac{37200 \cdot 500}{37200 + 500} \cdot 30}{\frac{37200 \cdot 500}{37200 + 500} + 30} = 28 \text{ Ом}$$

$$C_{p2} \geq \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 5,3(3000 + 28) \sqrt{\frac{1}{(1 - 0,3)^2} - 1}} = 9,7 \text{ мкФ}$$

$$\begin{aligned} C_6 &\geq \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot R_{\text{э2}}(1 + g_{21}R_F)} \sqrt{\frac{(1 + g_{21} \cdot R_{\text{э2}})^2 - \frac{1}{(1 - \varepsilon_0)^2}}{1 - (1 - \varepsilon_0)^2}} \\ &= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 42,44 \cdot 1000(1 + 0,038 \cdot 26,31)} \sqrt{\frac{(1 + 0,038 \cdot 1000)^2 - \frac{1}{(1 - 0,3)^2}}{1 - (1 - 0,3)^2}} \\ &= 102 \text{ мкФ} \end{aligned}$$

Вывод: Таким образом в схему были введены три конденсатора были рассчитаны минимальные значения разделяющих и блокирующих конденсаторов, для обеспечения работоспособности схемы на переменном токе. Использование конденсаторов на входе и выходе позволяет отсечь постоянные составляющие сигналов, а также их значения ограничивают

частоты, при которых происходят искажения входящего и выходящего из цепи сигнала.

7. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ПАРАМЕТРАМ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

По значению длительности фронта выходного импульса $t_{нар}$ определим требуемое значение граничной частоты

$$f_B = 0,35 / t_{нар} = 0,35 / 150 \cdot 10^{-9} = 2,3 \cdot 10^6 \text{ Гц.}$$

Для обеспечения значения глубины обратной связи $F_{ОЭ} = 2$ сопротивление двухполюсников в цепи эмиттера по переменному току должны быть равны:

$$R_{э1F} = 1 / g_{21} = 1 / 0,038 = 27 \text{ Ом.}$$

Определим приближенное значение граничной частоты по крутизне для каскада ОБ:

$$f_{S2} = 0,026 \cdot f_0 \cdot \beta(f_0) / (r_6 \cdot I_{к2}) = 0,026 \cdot 250 \cdot 10^6 \cdot 4 / (30 \cdot 0,001) = 866 \text{ МГц.}$$

Значение граничной частоты по крутизне для каскада ОК:

$$f_{S3} = 0,026 \cdot f_0 \cdot \beta(f_0) / (r_6 \cdot I_{к3}) = 0,026 \cdot 250 \cdot 10^5 \cdot 4 / (30 \cdot 0,002) = 433 \text{ МГц}$$

Значения граничных частот по крутизне при включении в состав транзистора R_F Для каскада ОЭ

$$f_{s1} = f_s \cdot F_{ОЭ} = \frac{0,026 \cdot 4 \cdot 250 \cdot 10^6}{30 \cdot 0,002} \cdot 2 = 866,6 \text{ МГц,}$$

Определим значения спадов ε_S , возникающих в каскадах ОЭ и ОБ на частоте f_0 :

$$\varepsilon_{S1} = (f / f_{S1})^2 / 2 = (2,3 / 866)^2 / 2 = 3,5 \cdot 10^{-6};$$

$$\varepsilon_{S2} = (f_0 / f_{S2})^2 / 2 = (2,3 / 866,6)^2 / 2 = 3,5 \cdot 10^{-6}.$$

Общий спад из-за инерционных свойств транзистора:

$$\varepsilon_{S\Sigma} = \varepsilon_{S1} + \varepsilon_{S2} = 3,5 \cdot 10^{-6} + 3,5 \cdot 10^{-6} = 7 \cdot 10^{-6}$$

В каскаде ОБ паразитная емкость оказывает заметное шунтирующее влияние.

Найдем входные и выходные емкости каскадов.

$$C_{вх1} = C_{вхОЭ} = 1 / (2 \cdot \pi \cdot f_{SF1} \cdot r_6 \cdot F_{ОЭ}) + C_K (1 + K_{ОЭF}) = \\ = 1 / (2 \cdot \pi \cdot 866,6 \cdot 10^6 \cdot 30 \cdot 2) + 10^{-12} (1 + 1,656) = 5,7 \text{ пФ,}$$

$$C_{вх3} = C_{вхОК} = C_K + (1 - K_{ОК}) / (2 \cdot \pi \cdot f_{S3} \cdot r_6) = \\ = 10^{-12} + (1 - 0,974) / (2 \pi \cdot 433 \cdot 10^6 \cdot 30) = 1 \text{ пФ,}$$

$$C_{вых1} = C_{выхОЭ} = C_K (1 + r_6 \cdot g_{21}) / F_{ОЭ} = 10^{-12} (1 + (30 \cdot 0,038)) / 2 = 1,76 \text{ пФ,}$$

$$C_{вых2} = C_{выхОБ} = C_K (1 + r_6 \cdot g_{21}) = 3,52 \text{ пФ.}$$

Принимаем емкость монтажа $C_M = 1 \text{ пФ.}$

Полная паразитная емкость, шунтирующая выход второго каскада:

$$C_{\text{пар}} = C_{\text{вых2}} + C_{\text{вх3}} + C_{\text{м}} = 3,52 + 1 + 1 = 5,52 \text{ пФ.}$$

Проведем оценку значения спада $\varepsilon_{\text{вх}}$ НАЧХ входной цепи на частоте $f_{\text{в}}$ и при частоте среза :

$$\tau_{\text{вх}} = C_{\text{вх1}} / G_{\text{вхэкв}} = C_{\text{вх1}} / (G_{\text{вх}} + 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_c) \\ = 5,7 \cdot 10^{-12} / (9,74 \cdot 10^{-6} + 1/37200 + 1/6800) = 3,1 \cdot 10^{-8} \text{ с}$$

$$f_{\text{вх}} = 1 / (2 \cdot \pi \cdot \tau_{\text{вх}}) = 5,2 \cdot 10^6$$

$$\varepsilon_{\text{вх}}(f) = 1/2 \cdot (f_{\text{в}} / f_{\text{вх}})^2 = 1/2 \cdot (2,3 / 5,2)^2 = 0,09$$

Таким образом $\varepsilon_{\text{вх}} < 0,15$, значит уменьшение НАЧХ не требуется

Определим допустимое значение спада НАЧХ

$$\varepsilon_{\text{пар}\Sigma} = 0,3 - \varepsilon_{\text{вх}}(f_{\text{в}}) - \varepsilon_{\Sigma} = 0,3 - 0,09 - 7 \cdot 10^{-6} = 0,21$$

Найдем допустимые значения проводимостей $G_{\text{экв}}$ коллекторной цепи в соответствии с искажениями, приходящимися на каждое фильтрующее звено:

$$G_{\text{экв}} = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{в}} \cdot C_{\text{пар}} / (2 \cdot \varepsilon_{\text{пар}}(f_{\text{в}}))^{1/2} = 2 \cdot \pi \cdot 2,3 \cdot 10^6 \cdot 5,52 \cdot 10^{-12} / (2 \cdot 0,3)^{1/2} = \\ = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ См.}$$

Вычислим предельно допустимое значение сопротивления $R_{\text{к}}^*$, состоящее в коллекторной цепи второго каскада:

$$G_{\text{вых2}} = g_{22} / [(1 + g_{21} \cdot R_{\text{э1F}}) (1 + g_{11} \cdot R_6)] = \\ = 6,67 \cdot 10^{-6} / [(1 + 0,038 \cdot 15) (1 + 0,00038 \cdot 30)] = 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ См;}$$

$$R_{\text{к}}^* = 1 / (G_{\text{экв}} - G_{\text{вых2}} - G_{\text{вх3}}) = 1 / (1,1 \cdot 10^{-4} - 4,2 \cdot 10^{-6} - 1,94 \cdot 10^{-5}) = 11 \text{ кОм.}$$

Полученное значение превышает сопротивление резистора в коллекторной цепи рассматриваемого второго каскада, рассчитанного из условия обеспечения работы на постоянном токе. Поэтому шунтирование частей этих резисторов не требуется.

Оценим нижнее значение граничной частоты:

$$f_{\text{н}\Sigma} = \Delta_{\Sigma} / (2 \cdot \pi \cdot t_{\text{и}}) = 0,05 / (2 \cdot \pi \cdot 150 \cdot 10^{-6}) = 53 \text{ Гц.}$$

Найдём коэффициент усиления конечной схемы увеличиться за счет увеличения коэффициента усиления первого каскада (ОЭ):

$$K_{F1} = (-g_{21} \cdot R_{k2}) / (1 + g_{21} \cdot R_{э1F}) = -0,0377 \cdot 1700 / (1 + 0,037 \cdot 27) = -32,061$$

$$K_{\Sigma} = K_{\text{вх}} K_1 K_2 K_3 = 1 \cdot (-32,061) \cdot 14,15 \cdot 0,971 = -440$$

Вывод: в результате выполнения пункта были рассчитаны влияния искажений каскадов на амплитудно-частотную характеристику цепи, сделан вывод о том, что искажения незначительны и почти не влияют на итоговую амплитудно-частотную характеристику. Также путем расчетов проверено, что шунтирование резисторов второго каскада не требуется, так как в исходной схеме оно меньше предельного допустимого. В следствии изменения коэффициента усиления ОЭ каскада был пересчитан коэффициент усиления всего устройства, который составляет -440. Отрицательная полярность коэффициента объясняется инвертированием импульса каскадом ОЭ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной курсовой работы была получена схема электрическая принципиальная трехкаскадного усилителя, изображенная на рисунке 4. В процессе прохождения через схему сигнал меняет свою полярность.

Схема использованная при задании ИРТ первого транзистора обеспечивает наилучшую стабильность ИРТ. В устройстве присутствует эффект Миллера, выражающийся в появлении паразитной емкости обратно смещенного перехода, коллектор-база в первом инвертирующем каскаде.

Был проведен расчет дестабилизирующих факторов, который показал, что значение неустойчивости равно 0,572 мА. Также были проведены мероприятия по их уменьшению, в результате значение неустойчивости было уменьшено.

Для обеспечения работоспособности схемы на переменном токе были введены три конденсатора с определенными рассчитанными емкостями. Также проведен анализ хода НАЧХ, в ходе которого была рассчитана полоса пропускания [53 Гц ; 2,3 МГц] и выявлено, что значение спада $\epsilon_{\text{вх}} = 0,09$

НАЧХ входной цепи на частоте $f_{\text{в}} = 2,3 \cdot 10^6$ Гц принимает допустимые значения. Коэффициент усиления синтезированной в ходе работы схемы получился равным -440.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ СОКРАЩЕНИЙ

ВЧ – высокие частоты

НАЧХ – нормированная амплитудно-частотная характеристика

НЧ – низкие частоты

ОБ – общая база

ОК – общий коллектор

ООС – отрицательная обратная связь

ОЭ – общий эмиттер

ОУ – операционный усилитель

ИРТ – исходная рабочая точка

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Павлов В.Н. «Схемотехника аналоговых устройств. Схемотехническое проектирование усилителя импульсных сигналов»: учебное пособие по курсовому проектированию.
2. Павлов В.Н., Ногин В.Н. «Схемотехника аналоговых электронных устройств»: Учебник для вузов – 2-е изд., исправ. – М: Горячая линия – Телеком, 2001.
3. ГОСТ 2.105-95* «ЕСКД. Общие требования к текстовым документам».