

Министерство образование и науки Российской Федерации

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**



Колесов И. А., Кологривов В.А., Якушевич Г.Н.

СХЕМОТЕХНИКА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

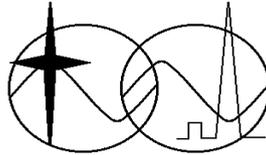
Учебное методическое пособие по лабораторным работам

2012

Министерство образование и науки Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра средств радиосвязи



Колесов И. А., Кологривов В.А., Якушевич Г.Н.

СХЕМОТЕХНИКА ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ

Описания компьютерных лабораторных работ
по схемотехнике телекоммуникационных устройств в среде Multisim
для студентов специальности 210700.62 -
инфокоммуникационные технологии и системы связи

Учебное методическое пособие по лабораторным работам

Колесов И.А., Кологривов В.А., Якушевич Г.Н.

Схемотехника телекоммуникационных устройств: Учебное методическое пособие – Томск: ТУСУР, 2012. – 24 с.

Учебное методическое пособие содержит описание четырех компьютерных лабораторных работ, выполняемых в ходе изучения дисциплины «Схемотехника телекоммуникационных устройств» в среде Multisim. Пособие содержит так же краткую вводную теоретическую часть, расчетные соотношения, расчетное задание, контрольные вопросы, требования по оформлению отчета.

Пособие предназначено для студентов направления 210700.62 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

СОДЕРЖАНИЕ

1. Вводная лабораторная работа по схемотехнике №1 «Исследование характеристик РС - цепей в среде Multisim	4
1.1. Цель	4
1.2. Вопросы, подлежащие изучению и исследованию	4
1.3. Рекомендации и методические указания	4
1.4. Содержание работы	5
2. Лабораторная работа по схемотехнике №2. КАСКАД С ОБЩИМ ИСТОКОМ	6
2.1. Цель работы	6
2.2. Схема исследуемого каскада	6
2.3. Расчетное задание	6
2.3.1. Исходные данные	6
2.3.2. Расчетное задание	7
2.3.3. Расчетные соотношения	8
2.4. Содержание моделирования	9
2.4.1. Сборка макета	9
2.4.2. Моделирование каскада в частотной и временной областях	9
2.5. Содержание отчета	11
2.6. Контрольные вопросы	12
3. Лабораторная работа по схемотехнике №3. КАСКАД С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ	13
3.1. Цель работы	13
3.2. Схема исследуемого каскада	13
3.3. Расчетное задание	13
3.3.1. Исходные данные	13
3.3.2. Расчетное задание	14
3.3.3. Расчетные соотношения	15
3.4. Содержание моделирования	16
3.4.1. Сборка макета	16
3.4.2. Моделирование каскада в частотной и временной областях	16
3.5. Содержание отчета	17
3.6. Контрольные вопросы	18
4. Лабораторная работа по схемотехнике №4. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕИНВЕРТИРУЮЩЕГО И ИНВЕРТИРУЮЩЕГО КАСКАДОВ НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ	19
4.1. Цель работы	19
4.2. Схема исследуемого каскада	19
4.3. Расчетное задание	19
4.3.1. Исходные данные	19
4.3.2. Расчетное задание	20
4.3.3. Расчетные соотношения	20
4.4. Содержание моделирования	22
4.5. Содержание отчета	23
4.6. Контрольные вопросы	23
5. Список использованных источников	24

1. Вводная лабораторная работа по схемотехнике №1 «Исследование характеристик RC - цепей в среде Multisim»

1.1 Цель

Ознакомление с программой **Multisim** на примерах исследования частотных и переходных характеристик простых RC - цепей.

1.2 Вопросы, подлежащие изучению и исследованию

1. Назначение и области применения программы **Multisim**.
2. Основные разделы библиотеки элементов моделирования АЭУ.
3. Параметры основных элементов и техника их установки при «сборе» схемы.
4. Набор приборов, предлагаемый **Multisim** при моделировании АЭУ.
5. Основные элементы управления приборами (функциональный генератор, осциллограф, измеритель частотных характеристик) и установка их параметров.
6. Назначение функционального генератора при моделировании устройств.
7. Назначение осциллографа и его типовое подключение.
8. Назначение панорамного измерителя АЧХ и особенности его подключения к схеме.
9. Связь параметров моделируемых АЭУ с параметрами элементов управления приборов.
10. Связь параметров простейших RC - цепей с граничными частотами АЧХ.
11. Пределы изменения АЧХ и ФЧХ RC - цепей.
12. Значения АЧХ и ФЧХ RC - цепей на граничных частотах.
13. Связь параметров RC - цепей со временем установления и спадом плоской вершины импульса.
14. Пределы измерения переходных характеристик RC - цепей.
15. Пределы отсчета времени нарастания по переходным характеристикам.
16. Пределы отсчета неравномерности АЧХ, ФЧХ.
17. Связь постоянных времени RC - цепей с граничными частотами АЧХ и искажениями П-импульсов.
18. Способы детального исследования АЧХ и ПХ с помощью средств **Analysis Graphs**.
19. Элементы оформления графических зависимостей исследуемых характеристик.
20. Техника копирования исследуемых характеристик в отчет .

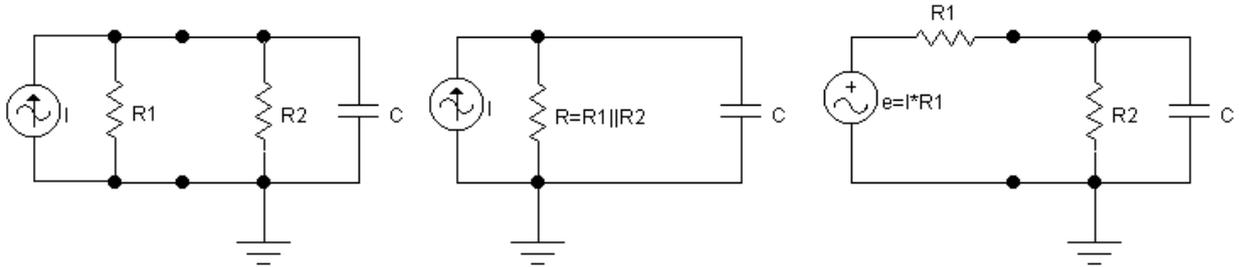
1.3 Рекомендации и методические указания

1. **Выполнение лабораторных работ провести в среде Multisim.**
2. Желательно параллельно с **Multisim** запустить **MatLab** (или калькулятор) для необходимых в процессе работы вычислений в диалоговом или программном режиме.
3. **Обязательно наличие рабочих тетрадей**, отражающих подготовку к работе и основные моменты выполнения лабораторной работы.
4. **Отчет представляется в электронной форме с соблюдением основных требований ОС ТУСУР 6.1-97*.**
5. **Отчеты по работам, выполненным по согласованию с преподавателем** вне расписания (или **представленным после завершения работы**), представляются в **твердой копии** (распечатка) + **в электронной форме** (все результаты моделирования).

6. Выводы по работе предполагают **5 ответов** на изложенные выше вопросы.
 7. **Защита работы проводится** не позднее начала следующей работы **в виде краткого собеседования по всем вопросам 2-го раздела.**

1.4 Содержание работы

1. Докажите эквивалентность схем



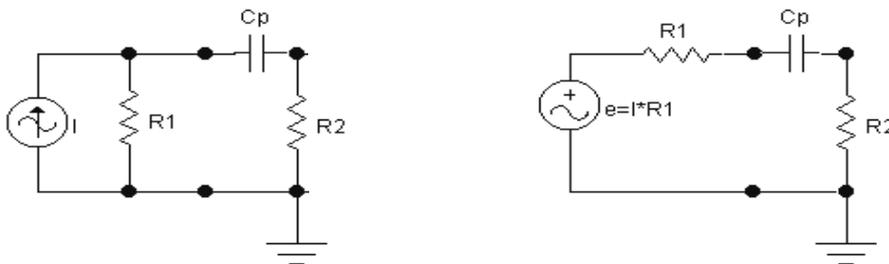
Какую из этих схем следует использовать для моделирования? Какую из этих схем лучше использовать для вывода выражения нормированного коэффициента передачи?

2. **Варианты** заданий на работу

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
R1, кОм	0,3	0,6	0,9	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0
R2, кОм	10	10	10	10	20	30	40	50
C, пФ	100	100	100	100	100	100	100	100
Cp, мкФ	1	1	0,5	0,5	0,5	0,1	0,1	0,1

3. Определите для заданного варианта работы: $Y(f)$, $f_{0.7}$; $h(t)$, t_y .

4. Докажите эквивалентность схем



Какую из этих схем следует использовать для моделирования? Какую из этих схем лучше использовать для вывода выражения нормированного коэффициента передачи?

5. Определите для заданного варианта работы: $Y(f)$, $f_{н0.7}$; $h(t)$, Δ при $t_u = 0,05 * C_p(R1 + R2)$.

6. **Промоделируйте в среде Multisim** одну из этих схем в частотной и временной областях.

7. Напишите ответы на пять любых из вышеописанных вопросов.
 8. Составьте отчет.

2. Лабораторная работа по схемотехнике №2 КАСКАД С ОБЩИМ ИСТОКОМ

2.1 Цель работы

Исследование влияния основных элементов схемы на характеристики резисторного каскада на полевом транзисторе.

2.2 Схема исследуемого каскада

Схема исследуемого каскада приведена на рис. 2.1.

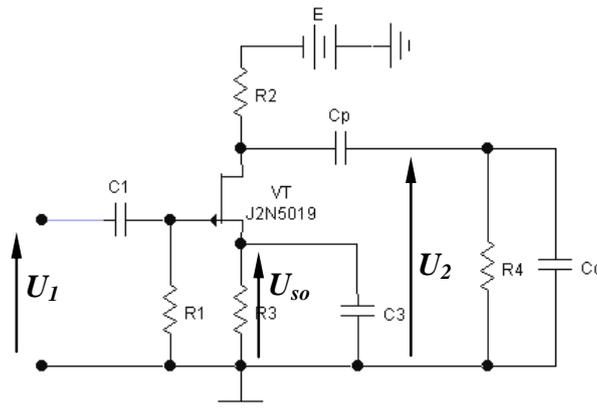


Рисунок 2.1 – Схема каскада с общим истоком

2.3 Расчетное задание

2.3.1 Исходные данные

Транзистор VT – J2N5019.

Выходные характеристики транзистора представлены на рис. 2.2.

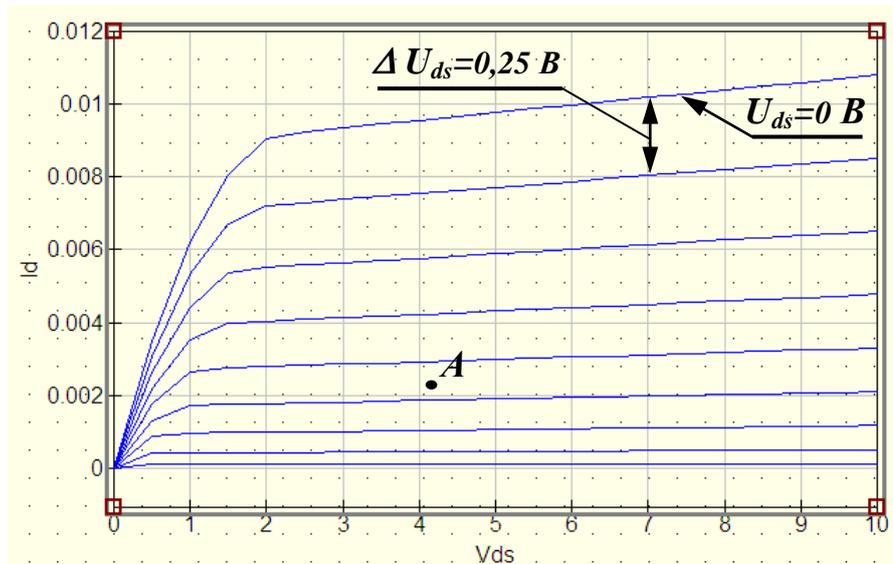


Рисунок 2.2 – Выходные характеристики транзистора J2N5019

Рабочая точка A (РТ): $U_{do} = 4,2 \text{ В}$ – напряжение сток - исток в рабочей точке; $I_{do} = 2,3 \text{ мА}$ – ток стока в рабочей точке; $U_{go} = +1,15 \text{ В}$ – напряжение смещения на затворе ($U_{go} = -U_{so}$).

Параметры транзистора в РТ: $S = 4,1 \text{ мА/В}$ – крутизна транзистора; $R_i = 15 \text{ кОм}$ – внутреннее сопротивление; $C_{\text{вых}} = 4 \text{ нФ}$ – выходная емкость.

Сопротивления: $R1 = 1 \text{ МОм}$; $R2$ – выбирается в соответствии с таблицей 1.1 по заданному варианту работы; заданное напряжение смещения обеспечивается сопротивлением резистора $R3 = \frac{U_{g0}}{I_{d0}}$; $R4 = 30 * R2$.

Емкости конденсаторов:

$C1 = 30 \text{ мкФ}$; $C3 = 500 \text{ мкФ}$; $C_p = 0,01 \text{ мкФ}$; C_o – выбирается в соответствии с табл. 1.1 по заданному варианту работы (этот конденсатор имитирует емкость нагрузки и монтажа).

Таблица 2.1 Варианты заданий на лабораторную работу

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$R2, \text{кОм}$	3	4.5	6	3	4.5	6	3	4.5
$C_o, \text{нФ}$	10	10	10	15	15	15	20	20

2.3.2 Расчетное задание

- На семействе выходных статических характеристик транзистора (рис. 1.2) построить нагрузочные прямые для постоянного и переменного токов.
- Определить максимально возможные амплитуды входного (U_1) и выходного (U_2) напряжений (при условии, что отсечки тока нет и амплитуда тока стока равна току покоя).
- Рассчитать:
 - коэффициент усиления каскада K_o ;
 - верхнюю ($f_{\text{в}0.7}$) и нижнюю ($f_{\text{н}0.7}$) граничные частоты каскада при уровнях частотных искажений $M_{\text{н}} = M_{\text{в}} = 3\text{дБ}$ (при этом считать, что конденсаторы $C1$ и $C3$ имеют емкости, стремящиеся к бесконечности);
 - время установления каскада t_y ;
 - частоту следования импульсов со скважностью 2 (меандр) f_a , рекомендуемую для измерения t_y ;
 - спад плоской вершины импульса Δ при емкостях конденсаторов $C1, C3$, стремящихся к бесконечностям, и длительности входного прямоугольного импульса t_u ;
 - частоту следования входных импульсов со скважностью 2 (меандр) f_b , рекомендуемую для измерения Δ .

2.3.3 Расчетные соотношения

- a. Выходная динамическая характеристика для постоянного тока описывается уравнением прямой линии

$$E = I_{d=} \cdot R_{H=} + U_{d=} = I_{d=}(R_2 + R_3) + U_{d=},$$

где индекс «=» относится к постоянному току. Для построения этой прямой на семействе выходных статических характеристик транзистора достаточно определить две точки, принадлежащие прямой: 1) РТ ($U_{do}; I_{do}$), 2) ($E; 0$).

- b. Выходная динамическая характеристика для переменного тока тоже описывается уравнением прямой

$$\Delta U_{d\sim} = -\Delta I_{d\sim} \cdot R_{H\sim},$$

где индекс «~» относится к приращениям переменных составляющих тока и напряжения сигнала относительно РТ. Для построения этой прямой на семействе выходных статических характеристик транзистора достаточно тоже определить две точки, принадлежащие прямой:

$$1) \text{ РТ } (U_{do}; I_{do}), 2) (E' = U_{do} + I_{do} \cdot R_{H\sim}; 0).$$

- c. Коэффициент усиления каскада

$$K_o = S \cdot R_{экв},$$

где $R_{экв} = R_i // R_2 // R_4$ – эквивалентное сопротивление нагрузки для зависимого генератора тока, которым представляется выход транзистора.

- d. Верхняя граничная частота $f_{\omega 0.7} = \frac{1}{2\pi\tau_{\omega}}$,

где постоянная времени для верхних частот $\tau_{\omega} = R_{экв} \cdot (C_o + C_{вых})$.

- e. Нижняя граничная частота $f_{H0.7} = \frac{1}{2\pi\tau_H}$,

где постоянная времени для нижних частот $\tau_H = C_p \langle (R_i // R_2 + R_4) \rangle$.

- f. Время установления каскада $t_y = 2,2 \cdot \tau_{\omega}$.

- g. Частота следования импульсов, рекомендуемая для измерения t_y ,

$$f_a = \frac{1}{10 \cdot t_y}.$$

- h. Рекомендуемая длительность входного прямоугольного импульса для измерения Δ

$$t_u = \frac{1}{20} \cdot (R_i // R_2 + R_4) \cdot C_p.$$

При скважности импульсов равной 2 это соответствует частоте следования прямоугольных импульсов функционального генератора $f_b = \frac{10}{\tau_H}$.

- i. Спад плоской вершины импульса за счет разделительного конденсатора C_p в первом приближении определяется равенством: $\Delta = \frac{t_u}{\tau_H}$.

2.4 Содержание моделирования

2.4.1 Сборка макета

d. В среде EWB собрать схему каскада в соответствии с рис.1 и номером варианта задания. Дополнить схему необходимыми приборами для измерения режима транзистора VT по постоянному току. Запустить работу макета, проверить обеспечение расчетного режима работы транзистора (допуск отклонения рабочей точки от расчетного положения по току и по напряжению не более 10%).

d. Собрать макет экспериментальной установки для исследования частотных и временных характеристик макета. Для этого дополнить схему макета по п. 1.4.1а включением функционального генератора, осциллографа и измерителя частотных характеристик (Bode Plotter).

d. Установить пределы измеряемых величин на приборах в соответствии со значениями, полученными в расчетах.

2.4.2 Моделирование каскада в частотной и временной областях

Указание. Все результаты моделирования необходимо четко фиксировать в файле (или в рабочей тетради) для составления отчета.

Сравниваемые характеристики, полученные при вариации параметра элемента схемы, **должны представляться на одном рисунке.**

Моделирование в частотной области

a. Измерить коэффициент усиления (модуль коэффициента передачи на средних частотах). Отключить конденсатор в цепи истока $C3$ (можно вместо отключения поставить его емкость 1 нФ) и повторить измерение коэффициента усиления. Вновь включить конденсатор в цепь истока (поставить конденсатор $C3$ емкостью 500 мкФ).

b. Определить максимальную амплитуду выходного сигнала при уровне, соответствующем началу захода в область ограничения. Сравнить эту амплитуду с результатом п.1.3.2b.

c. Снять АЧХ каскада. Определить граничные частоты при заданных для расчета параметрах схемы.

d. Исследовать влияние емкости нагрузки C_o на изменение АЧХ. Для этого *снять и сравнить АЧХ, граничные частоты каскада для двух значений емкости C_o :*

- C_{o1} , равной заданному в таблице 1.1 значению;
- $C_{o2}=10 * C_{o1}$, увеличенной 10 раз по сравнению с заданной.

e. Исследовать влияние сопротивления нагрузки $R4$ на изменение АЧХ. Для этого *снять и сравнить АЧХ, граничные частоты каскада для двух значений $R4$:*

- Сопротивления $R4=30 * R2$;
- Сопротивления $R4=R2$ (равного заданному значению $R2$ в таблице 2.1).

f. Исследовать влияние емкости разделительного конденсатора C_p на изменение АЧХ. Для этого *снять и сравнить АЧХ, граничные частоты каскада для двух значений емкости разделительного конденсатора C_p :*

- $C_{p1} = 0, 01 \text{ мкФ}$, равной исходному значению, заданному в п. 2.3.1;
- $C_{p2}=0,1 * C_{p1}= 0, 001 \text{ мкФ}$ (уменьшенной в 10 раз).

Моделирование во временной области

a. Восстановить модель с заданными (исходными) значениями элементов схемы рис. 2.1.

b. *Для исследования времени установления* собрать модель экспериментальной установки с функциональным генератором в качестве источника сигнала и с двух лучевым осциллографом, подключенным ко входу и выходу исследуемого каскада.

c. С помощью функционального генератора *задать:*

- *расчетную частоту следования импульсов со скважностью 2 f_a ;*
- *амплитуду входных импульсов, соответствующую линейному усилению каскада (на порядок меньше расчетной максимальной амплитуды по п. 1.3.2 б, см. также динамическую характеристику для переменного тока);*
- *длительность развертки осциллографа и цены делений по напряжению для входного и выходного каналов осциллографа, соответствующие расчетам.*

d. Определить времена установления каскада при следующей вариации параметров элементов схемы:

- *емкости C_o : C_{o1} , равной заданному в таблице 2.1 значению; $C_{o2}=10 * C_{o1}$;*
- *сопротивления $R4$: $R4=30 * R2$; $R4=R2$;*
- *емкости C_p : C_{p1} , равной заданному в таблице 1.1 значению; $C_{p2}=0,1 * C_{p1}$.*

е. Для исследования спада плоской вершины импульса на выходе каскада задать:

- рекомендуемую расчетную частоту следования входных импульсов f_b ;
- амплитуду входных импульсов, соответствующую линейному усилению каскада (на порядок меньше расчетной максимальной амплитуды по п. 2.3.2, см. также динамическую характеристику для переменного тока)

ф. Определить спады плоской вершины импульса при следующей вариации параметров элементов схемы:

- емкости C_p : C_{p1} , равной заданному в таблице 1.1 значению; $C_{p2} = 0,1 * C_{p1}$;
- сопротивления $R4$: $R4 = 30 * R2$; $R4 = R2$.
- емкости C_o : C_{o1} , равной заданному в таблице 1.1 значению; $C_{o2} = 10 * C_{o1}$.

2.5 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- титульный лист;
- цель работы;
- схему исследуемого каскада;
- краткое изложение расчетов по расчетному заданию;
- обработанные результаты моделирования в виде семейств графиков, показывающих влияние изменения параметров элементов схемы на характеристики каскада;
- выводы по результатам моделирования.

Указание. Выводы, как минимум, должны строиться по логическому алгоритму:

от цели работы → к результатам моделирования (со ссылками на результаты моделирования в виде таблиц, графиков, рисунков) → к физическому объяснению результатов моделирования.

Применительно к данной работе каждый из выводов должен иметь структуру: изменение параметра → изменение характеристики → физическое объяснение. При этом желательно сопоставить результаты расчетов с результатами моделирования, объяснить расхождение результатов расчета и моделирования.

Пример. Увеличение емкости нагрузки ведет к снижению верхней граничной частоты каскада (ссылка на рисунок с обработанными результатами моделирования, т.е. с отмеченными на рисунке изменениями $f_{60,7}$). Это объясняется снижением на верхних частотах полного эквивалентного сопротивления нагрузки для зависимого генератора тока, которым представляется выход транзистора. Расчетная частота $f_{60,7}$ совпадает с полученной в результате моделирования (ссылка на расчет с указанием номера формулы или соотношения, на рисунок с обработанной АЧХ каскада при расчетных значениях параметров элементов).

Указание.

Отчет должен оформляться в соответствии с требованиями ОС ТУСУР 6.1-97.*

Допускается краткое изложение содержания отчета (в том числе расчетов и выводов) без расшифровки условных обозначений и символов, использованных в настоящем описании работы.

2.6 Контрольные вопросы

1. Начертите принципиальную схему каскада. Объясните назначение элементов.
2. Покажите по принципиальной схеме пути протекания постоянной и переменной составляющих тока стока. Что называют сопротивлениями нагрузки каскада по постоянному и по переменному току. Могут ли они быть разными?
3. Начертите эквивалентные схемы каскада для нижних, средних и верхних частот. Объясните физически причины завалов АЧХ.
4. Что является причиной частотных искажений в областях нижних и верхних частот?
5. Напишите выражения для нормированной АЧХ и граничных частот в областях нижних и верхних частот.
6. Напишите уравнение и начертите вид переходной характеристики в области больших времен.
7. Что является мерой линейных искажений в области больших времен? Напишите соотношение для расчета линейных искажений импульсного сигнала в области больших времен.
8. Напишите уравнение и начертите вид переходной характеристики в области малых времен.
9. Что является мерой линейных искажений в области малых времен? Напишите соотношение для расчета линейных искажений импульсного сигнала в области малых времен.
10. Как влияет емкость нагрузки на искажение формы усиленного сигнала? Нарисуйте форму искаженного каскадом импульсного сигнала.
11. Как влияет сопротивление нагрузки на искажение формы усиленного сигнала? Нарисуйте форму искаженного каскадом импульсного сигнала.
12. Как влияет емкость разделительного конденсатора на искажение формы усиленного сигнала? Нарисуйте форму искаженного каскадом импульсного сигнала.
13. Дайте определение амплитудной характеристике усилителя. Чем определяются границы линейного участка этой характеристики?
14. Как изменится коэффициент усиления каскада, если отключить блокировочный конденсатор в цепи истока? Объясните физически этот эффект.
15. Чем определяется максимальная амплитуда выходного сигнала каскада? Поясните это графическими построениями.

3. Лабораторная работа по схемотехнике №3 КАСКАД С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

3.1 Цель работы

Исследование влияния основных элементов схемы на характеристики резисторного каскада на биполярном транзисторе.

3.2 Схема исследуемого каскада

Схема исследуемого каскада приведена на рис. 3.1.

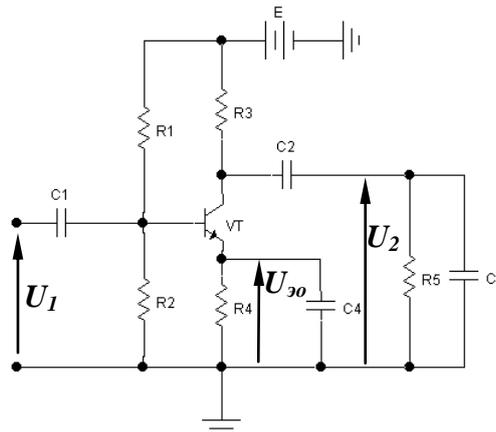


Рисунок 3.1 – Схема каскада с общим эмиттером

3.3 Расчетное задание

3.3.1. Исходные данные

Транзистор VT – КТ312В.

Выходные и входные характеристики транзистора КТ312В представлены на рис. 3.2.

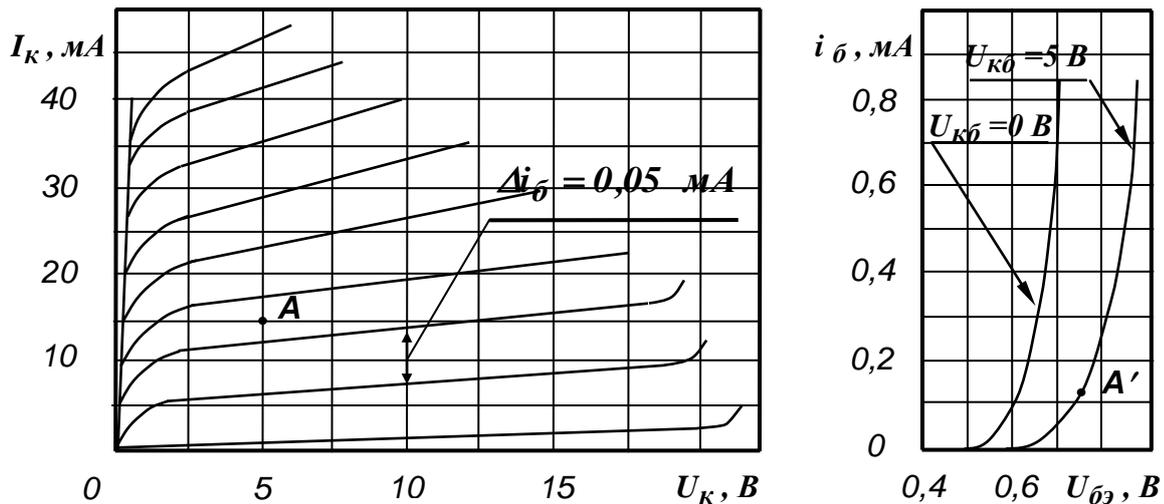


Рисунок 3.2 – Характеристики КТ312В в схеме с общим эмиттером

Рабочая точка A (PT):

$U_{к0} = 5 \text{ В}$ – напряжение на коллекторе; $I_{к0} = 15 \text{ mA}$ – ток коллектора;

$U_{б0} = 0,75 \text{ В}$ – напряжение на базе; $i_{б0} = 0,12 \text{ mA}$ – ток базы.

$U_{э0} = 3 \text{ В}$; $I_{дел} = 1 \text{ mA}$.

Параметры транзистора в РТ:

$S_o = 180 \text{ мА/В}$ – крутизна транзистора; $R_i = 5 \text{ кОм}$ – внутреннее сопротивление; $r_b = 100 \text{ Ом}$ – сопротивление базы; $C_{бкРТ} = 5 \text{ нФ}$ – емкость коллекторного перехода в РТ; $\tau = 27 \text{ нс}$ – постоянная времени, определяющая частотную зависимость крутизны транзистора на ВЧ.

Сопротивление $R3$ – выбирается в соответствии с таблицей 3.1 по заданному варианту работы; $R5 = 30 * R3$.

Заданное положение РТ обеспечивается сопротивлениями резисторов $R1, R2; R4$.

Емкости конденсаторов:

$C1 = 30 \text{ мкФ}$; $C2 = 0,1 \text{ мкФ}$; $C4 = 500 \text{ мкФ}$; $C5$ – выбирается в соответствии с табл. 3.1 по заданному варианту работы (этот конденсатор имитирует емкость нагрузки и монтажа).

Таблица 3.1 Варианты заданий на лабораторную работу

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$R3, \text{ Ом}$	100	150	200	300	100	150	200	100
$C5, \text{ нФ}$	100	100	100	150	150	150	200	200

3.3.2. Расчетное задание

- d. На семействе выходных статических характеристик транзистора (рис. 1.2) построить нагрузочные прямые для постоянного и переменного токов.
- e. Определить максимально возможные амплитуды входного (U_1) и выходного (U_2) напряжений (при условии, что ограничения тока нет).
- f. Рассчитать:
 - сопротивления резисторов $R1, R2$;
 - коэффициент усиления каскада K_o ;
 - верхнюю ($f_{в0.7}$) и нижнюю ($f_{н0.7}$) граничные частоты каскада при уровнях частотных искажений $M_n = M_v = 3\text{дБ}$ (при этом считать, что конденсаторы $C1$ и $C4^*$ имеют емкости, стремящиеся к бесконечности);
 - время установления каскада t_y ;
 - частоту следования импульсов со скважностью 2 (меандр) f_a , рекомендуемую для измерения t_y ;
 - спад плоской вершины импульса Δ при емкостях конденсаторов $C1, C4$, стремящихся к бесконечностям, и длительности входного прямоугольного импульса t_u ;
 - частоту следования входных импульсов со скважностью 2 (меандр) f_b , рекомендуемую для измерения Δ .

3.3.3. Расчетные соотношения

ж. Сопротивление в цепи эмиттера

$$R4 = \frac{U_{э0}}{I_{к0} + i_{б0}}$$

к. Выходная динамическая характеристика для постоянного тока описывается уравнением прямой линии

$$E = I_{к=} \cdot R_{н=} + U_{к=} = I_{к=} (R3 + R4) + U_{к=},$$

где индекс «=» относится к постоянному току. Для построения этой прямой на семействе выходных статических характеристик транзистора достаточно определить две точки, принадлежащие прямой: 1) РТ ($U_{к0}; I_{к0}$), 2) ($E; 0$).

л. Сопротивления делителя в цепи базы

$$R1 = \frac{E - (U_{б0} + U_{э0})}{I_{б0} + I_{дел}}, \quad R2 = \frac{(U_{б0} + U_{э0})}{I_{дел}}.$$

м. Выходная динамическая характеристика для переменного тока описывается уравнением прямой

$$\Delta U_{к\sim} = -\Delta I_{к\sim} \cdot R_{н\sim},$$

где индекс «~» относится к приращениям переменных составляющих тока и напряжения сигнала относительно РТ, $R_{н\sim} = R3 // R5$. Для построения этой прямой на семействе выходных статических характеристик транзистора достаточно тоже определить две точки, принадлежащие прямой:

$$1) \text{ РТ } (U_{к0}; I_{к0}), \quad 2) (E' = U_{к0} + I_{к0} \cdot R_{н\sim}; 0).$$

н. Коэффициент усиления каскада

$$K_0 = S \cdot R_{экв},$$

где $R_{экв} = R_i // R3 // R5$ – эквивалентное сопротивление нагрузки для зависимого генератора тока в области средних частот, которым представляется выход транзистора.

о. Верхняя граничная частота $f_{в0.7} = \frac{1}{2\pi\tau_в}$,

где постоянная времени для верхних частот

$$\tau_в = \tau + S_0 r_{б} C_{бкРТ} R_{экв} + (C_{бкРТ} + C5) R_{экв}.$$

р. Нижняя граничная частота $f_{н0.7} = \frac{1}{2\pi\tau_н}$,

где постоянная времени для нижних частот $\tau_н = C_p \langle (R_i // R3 + R5) \rangle^*$.

q. Время установления каскада $t_y = 2,2 \cdot \tau_в$.

- г. Частота следования импульсов, рекомендуемая для измерения t_y ,

$$f_a = \frac{1}{20 \cdot t_y}.$$

- с. Рекомендуемая длительность входного прямоугольного импульса для измерения Δ

$$t_u = \frac{1}{20} \cdot (R_i // R3 + R4) \cdot C_p^*.$$

- т. Спад плоской вершины импульса за счет разделительного конденсатора C_p в

первом приближении определяется равенством: $\Delta = \frac{t_u}{\tau_H}$.

- и. Частота следования импульсов, рекомендуемая для измерения Δ ,

$$f_b = \frac{1}{10 \cdot \tau_H}.$$

3.4 Содержание моделирования

3.4.1 Сборка макета

- В среде EWB собрать схему каскада в соответствии с рис.3.1 и номером варианта задания. Дополнить схему необходимыми приборами для измерения режима транзистора VT по постоянному току. Запустить работу макета, проверить обеспечение расчетного режима работы транзистора (допуск отклонения рабочей точки от расчетного положения по току и по напряжению не более 10%).
- Собрать макет экспериментальной установки для исследования частотных и временных характеристик макета. Для этого дополнить схему макета по п. 3.4.1.а включением функционального генератора, осциллографа и измерителя частотных характеристик (Vode Plotter).
- Установить пределы измеряемых величин на приборах в соответствии со значениями, полученными в расчетах.

3.4.2 Моделирование каскада в частотной и временной областях

Указание. Все результаты моделирования необходимо четко фиксировать в файле (или в рабочей тетради) для составления отчета.

Сравниваемые характеристики, полученные при вариации параметра каждого элемента схемы, должны представляться на одном рисунке (или представлять основной рисунок а результаты вариации должны сводиться в таблицы).

Моделирование в частотной области

- Измерить коэффициент усиления (модуль коэффициента передачи на средних частотах).

Отключить конденсатор в цепи истока $C4$ *(можно вместо отключения поставить его емкость 1 нФ) и повторить измерение коэффициента усиления.

Вновь включить конденсатор в цепь истока (поставить конденсатор $C4$ * емкостью 500 мкФ).

- Определить максимальную амплитуду выходного сигнала при уровне, соответствующем началу захода в область ограничения. Сравнить эту амплитуду с результатом п.3.3.2.б.

- с. Снять АЧХ каскада. Определить граничные частоты при заданных для расчета параметрах схемы. Сравнить с результатами расчета.
- д. Исследовать влияние емкости нагрузки $C5$ на изменение АЧХ. Для этого *снять и сравнить АЧХ, граничные частоты* каскада для двух значений емкости $C5$:
 - $C5_1$, равной заданному в таблице 3.1 значению;
 - $C5_2=2 * C5_1$, увеличенной 2 раза по сравнению с заданной.
- е. Исследовать влияние емкости разделительного конденсатора $C2$ на изменение АЧХ. Для этого *снять АЧХ и сравнить, граничные частоты* каскада для двух значений емкости $C2$:
 - $C2_1$, равной заданному в п.3.3.1 значению;
 - $C2_2=0,33 * C2_1$, уменьшенной в 3 раза по сравнению с заданной в п.3.3.1.

Моделирование во временной области

- а. Восстановить модель с заданными (исходными) значениями элементов схемы рис. 1.1.
- б. **Для исследования времени установления** собрать модель экспериментальной установки с функциональным генератором в качестве источника сигнала и с двух лучевым осциллографом, подключенным ко входу и выходу исследуемого каскада.
- с. С помощью функционального генератора *задать*:
 - *расчетную частоту* следования импульсов со скважностью 2 f_a ;
 - *амплитуду* входных импульсов, соответствующую линейному усилению каскада (на порядок меньше расчетной максимальной амплитуды по п. 3.3.2 б, см. также динамическую характеристику для переменного тока);
 - *длительность развертки* осциллографа и *цены делений* по напряжению для входного и выходного каналов осциллографа, соответствующие расчетам.
- д. Определить времена установления каскада при следующей вариации параметров элементов схемы:
 - *емкости $C5$* : $C5_1$, равной заданному в таблице 1.1 значению; $C5_2=2 * C5_1$.
- е. **Для исследования спада плоской вершины импульса** на выходе каскада *задать*:
 - *рекомендуемую расчетную частоту* следования входных импульсов f_b ;
 - *амплитуду* входных импульсов, соответствующую линейному усилению каскада (на порядок меньше расчетной максимальной амплитуды по п. 3.3.2*, см. также динамическую характеристику для переменного тока)
- ф. Определить спады плоской вершины импульса при следующей вариации параметров элементов схемы:
 - *емкости $C2^*$* : $C2_1$, равной заданному в таблице 1.1 значению; $C2_2=0,33 * C2_1$.

3.5 Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- титульный лист;
- цель работы;
- схему исследуемого каскада;
- краткое изложение расчетов по расчетному заданию;
- обработанные результаты моделирования в виде семейств графиков, показывающих влияние изменения параметров элементов схемы на характеристики каскада;
- выводы по результатам моделирования.

Указание. Выводы, как минимум, должны строиться по логическому алгоритму:

от цели работы → к результатам моделирования (со ссылками на результаты моделирования в виде таблиц, графиков, рисунков) → к физическому объяснению результатов моделирования.

Применительно к данной работе каждый из выводов должен иметь структуру: изменение параметра → изменение характеристики → физическое объяснение. При этом желательно сопоставить результаты расчетов с результатами моделирования, объяснить расхождение результатов расчета и моделирования.

Например: Увеличение емкости нагрузки ведет к снижению верхней граничной частоты каскада в меньшее число раз, чем увеличение емкости нагрузки (ссылка на рисунок с обработанными результатами моделирования, т.е. с отмеченными на рисунке изменениями $f_{\omega 0,7}$). Это объясняется снижением полного эквивалентного сопротивления нагрузки для зависимого генератора тока, которым представляется на верхних частотах выход транзистора. Непропорциональное понижение верхней граничной частоты объясняется тем, что кроме емкости нагрузки на завал АЧХ влияет инерционность транзистора (частотная зависимость крутизны). Расчетная частота $f_{\omega 0,7}$ совпадает с полученной в результате моделирования (ссылка на расчет с указанием номера формулы или соотношения, на рисунок с обработанной АЧХ каскада при расчетных значениях параметров элементов).

Указание.

1.5.1 Отчет должен оформляться в соответствии с требованиями ОС ТУСУР 6.1-97*.

1.5.1 Допускается краткое изложение содержания отчета (в том числе расчетов и выводов) без расшифровки условных обозначений и символов, использованных в настоящем описании работы.

3.6 Контрольные вопросы

1. Начертите принципиальную схему каскада. Объясните назначение элементов.
2. Покажите по принципиальной схеме пути протекания постоянной и переменной составляющих тока коллектора. Что называют сопротивлениями нагрузки каскада по постоянному и по переменному току. Могут ли они быть разными?
3. Начертите эквивалентные схемы каскада для нижних, средних и верхних частот. Объясните физические причины завалов АЧХ.
4. Что является причиной частотных искажений в областях нижних и верхних частот?
5. Напишите выражения для нормированной АЧХ и граничных частот в областях нижних и верхних частот.
6. Напишите уравнение и начертите вид переходной характеристики в области больших времен.
7. Что является мерой линейных искажений в области больших времен? Напишите соотношение для расчета линейных искажений импульсного сигнала в области больших времен.
8. Напишите уравнение и начертите вид переходной характеристики в области малых времен.
9. Что является мерой линейных искажений в области малых времен? Напишите соотношение для расчета линейных искажений импульсного сигнала в области малых времен.
10. Как влияет емкость нагрузки на искажение формы усиленного сигнала? Нарисуйте форму искаженного каскадом импульсного сигнала.
11. Как влияет сопротивление нагрузки на искажение формы усиленного сигнала? Нарисуйте форму искаженного каскадом импульсного сигнала.
12. Как влияет емкость разделительного конденсатора на искажение формы усиленного сигнала? Нарисуйте форму искаженного каскадом импульсного сигнала.
13. Дайте определение амплитудной характеристике усилителя. Чем определяются границы линейного участка этой характеристики?
14. Как изменится коэффициент усиления каскада, если отключить блокировочный конденсатор в цепи эмиттера? Объясните физически этот эффект.
15. Чем определяется максимальная амплитуда выходного сигнала каскада? Поясните это графическими построениями.
16. В чем разница формирования АЧХ каскада на биполярном транзисторе и каскада на полевом транзисторе?

4. Лабораторная работа по схемотехнике №4

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕИНВЕРТИРУЮЩЕГО И ИНВЕРТИРУЮЩЕГО КАСКАДОВ НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

4.1 Цель работы

Исследование характеристик неинвертирующего и инвертирующего каскадов на ОУ при одинаковых цепях обратных связей. Исследование каскада усилителя низкой частоты (УНЧ), корректора нижних частот (НЧ) со скатом диаграммы Боде бдБ/октава и корректора верхних частот (ВЧ) с подъемом диаграммы Боде бдБ/октава.

4.2 Схемы исследуемых каскадов

Схемы исследуемых каскадов приведены на рис. 4.1.

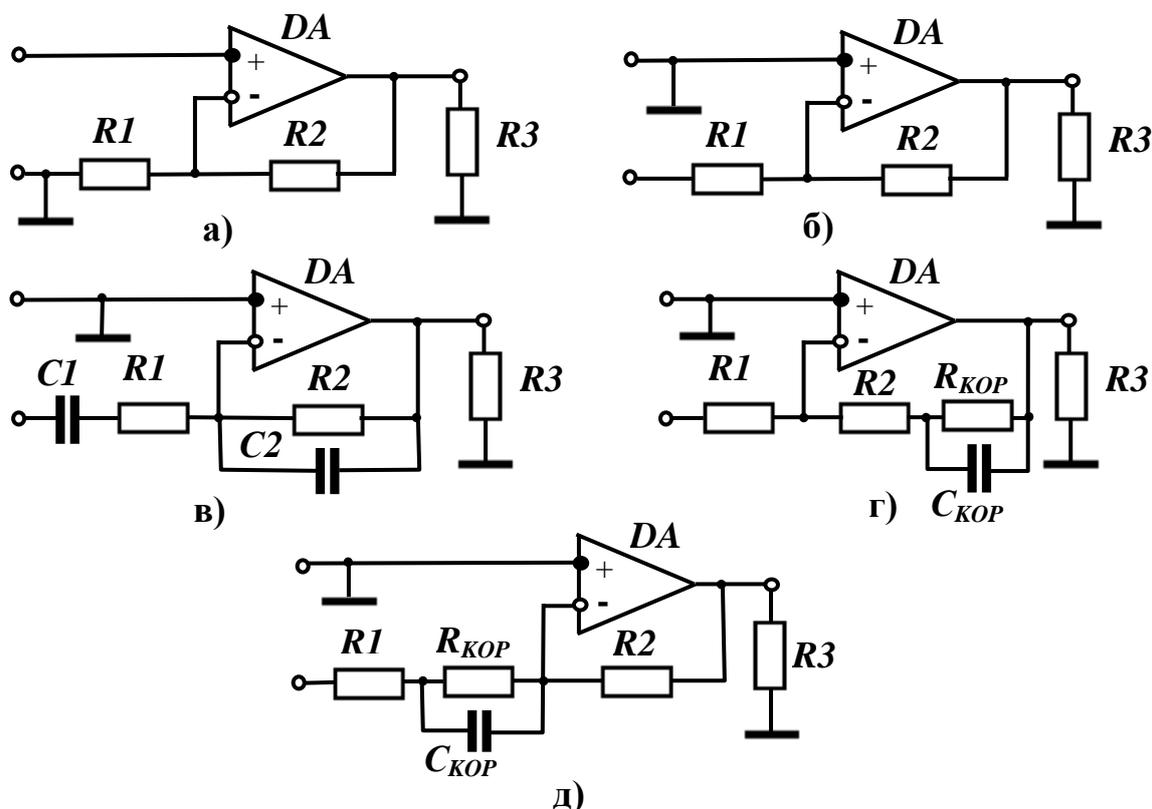


Рисунок 4.1 – Схемы каскадов на ОУ: а) – неинвертирующего, б) – инвертирующего, в) – УНЧ, г) – корректора НЧ, д) – корректора ВЧ

4.3 Расчетное задание

4.3.1. Исходные данные

Операционный усилитель (ОУ): – модель – линейная, "по умолчанию" "идеальный", коэффициент усиления ОУ - не менее 100 дБ , частота единичного усиления $f_1^* = 10 \text{ МГц}$; Низкочастотное значение максимальной амплитуды выходного напряжения $U_{m2}^* = 10 \text{ В}$; скорость нарастания выходного напряжения $V_{max}^* = 5 \text{ В/мкс}$, минимально допустимое сопротивление

нагрузки ОУ - $R_{\min}^* = 2\text{кОм}$, крутизна ската АЧХ диаграммы Боде в полосе частот до f_1^* - 6дБ на октаву.

Сопротивление внешней нагрузки каскада $R_3 \geq 100\text{ кОм}$.

Неинвертирующий каскад должен обеспечить коэффициент усиления (K_{oc}) - в соответствии с вариантом задания (задано индивидуально по Таблице 4.1).

Инвертирующий каскад выполняется на резисторах тех же номиналов, что и неинвертирующий.

(а) Таблица 4.1 – Варианты заданий для расчета каскадов на ОУ

№ вар.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$K_{oc}, \text{дБ}$	6	10	12	18	20	23	26	30	33	36

4.3.2. Расчетное задание

Необходимо рассчитать:

- верхние граничные частоты $f_{\text{в}0.7}$ при коэффициентах частотных искажений 3дБ (для неинвертирующего и инвертирующего каскадов);
- максимальные амплитуды неискаженного выходного напряжения на верхних граничных частотах $U_{m2}(f_{\text{в}0.7})$,
- номиналы сопротивлений резисторов R_1 и R_2 .
- номиналы емкостей C_1 и C_2 для верхней граничной частоты каскада УНЧ $f_B = 0.1 \cdot f_1^* / K_O$ и для нижней граничной частоты каскада УНЧ $f_H = 0.001 \cdot f_B$.
- номиналы сопротивления $R_{\text{КОР}}$ и емкости $C_{\text{КОР}}$ корректора НЧ для частоты полюса $f_P = 0.001 \cdot f_1^* / K_O$.
- номиналы сопротивления $R_{\text{КОР}}$ и емкости $C_{\text{КОР}}$ корректора ВЧ для частоты нуля $f_O = 0.001 \cdot f_1^* / K_O$.

Примечания.

- Расчеты необходимо представлять по схеме: формула = подстановка числовых значений в СИ (без указания размерности) в соответствии с местом буквенного обозначения величины в формуле = числовой результат (с приемлемой для расчета точностью, с указанием размерности).
- Допускается использование нестандартных номиналов резисторов.

4.3.3 Расчетные соотношения

- Верхние граничные частоты неинвертирующего и инвертирующего каскадов для одинаковых сопротивлений резисторов R_1 и R_2 оказываются

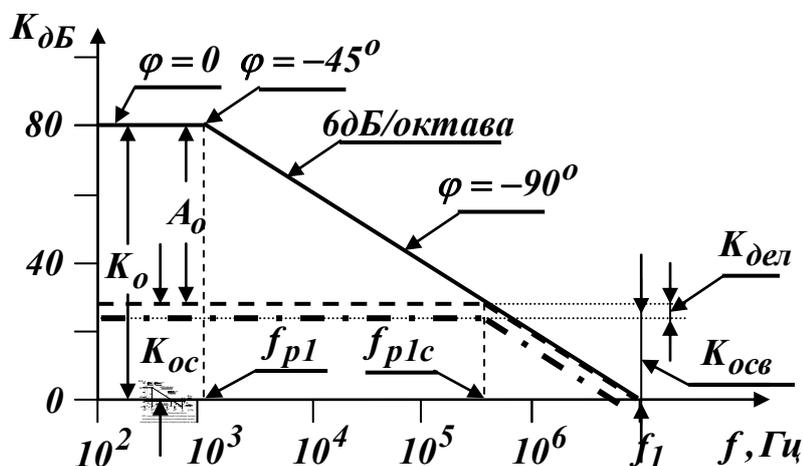
одинаковыми $f_{\text{в}0.7} = f_{p1c} = \frac{f_1^*}{1 + \frac{R_2}{R_1}}$ (Рисунок 4.1).

- Максимальная амплитуда выходного напряжения $U_{m2}(f_{\text{в}0.7})$ определяется меньшим из значений:

U_{m2}^* , определяемой напряжением питания,

$$U_{m2}(f_{\phi 0.7}) = \frac{V_{max}^*}{2\pi f_{\phi 0.7}}, \text{ определяемой максимальной скоростью нарастания}$$

выходного напряжения ОУ.



1) Рисунок 4.2. – Диаграммы Бode

2) ОУ с внутренней коррекцией (сплошная линия),
неинвертирующего каскада (штриховая линия),
инвертирующего каскада (штрихпунктирная линия)

• Номиналы сопротивлений резисторов $R1$ и $R2$ определяются решением системы уравнений, связывающей сопротивление нагрузки для переменного тока каскада $R_{н\sim}$ и коэффициента усиления неинвертирующего каскада K_{oc} с сопротивлениями резисторов $R1$ и $R2$:

$$\left. \begin{aligned} R_{н\sim} &= (R1 + R2) // R3 \geq R_{нmin}^* \\ K_{oc} &= 1 + \frac{R2}{R1} \end{aligned} \right\} .$$

Коэффициент усиления инвертирующего каскада

$$K_{osc} = \frac{R2}{R1} .$$

На рисунке 4.3 приведены логарифмические амплитудно-частотные характеристики УНЧ, и корректоров НЧ и ВЧ.

Для каскада УНЧ коэффициент усиления равен

$$K_o = \frac{R2}{R1} .$$

Для нижней и верхней граничных частот каскада УНЧ номиналы емкостей находятся из следующих соотношений соответственно:

$$C1 = \frac{1}{2\pi f_H R1} ;$$

$$C2 = \frac{1}{2\pi f_B R2}.$$

Для корректора НЧ коэффициенты усиления равны

$$K_O = \frac{R2}{R1};$$

$$K_{КОР} = \frac{R2 + R_{КОР}}{R1}.$$

Тогда номиналы сопротивления $R_{КОР}$ и емкости $C_{КОР}$ для корректора НЧ определяются из выражений

$$R_{КОР} = (K_{КОР} - K_O) R1;$$

$$C_{КОР} = \frac{1}{2\pi f_P R_{КОР}}.$$

Для корректора ВЧ коэффициенты усиления равны

$$K_O = \frac{R2}{R1 + R_{КОР}};$$

$$K_{КОР} = \frac{R2}{R1}.$$

Тогда номиналы сопротивления $R_{КОР}$ и емкости $C_{КОР}$ для корректора ВЧ определяются из выражений

$$R_{КОР} = (1/K_{КОР} - 1/K_O) R2;$$

$$C_{КОР} = \frac{1}{2\pi f_O R_{КОР}}.$$

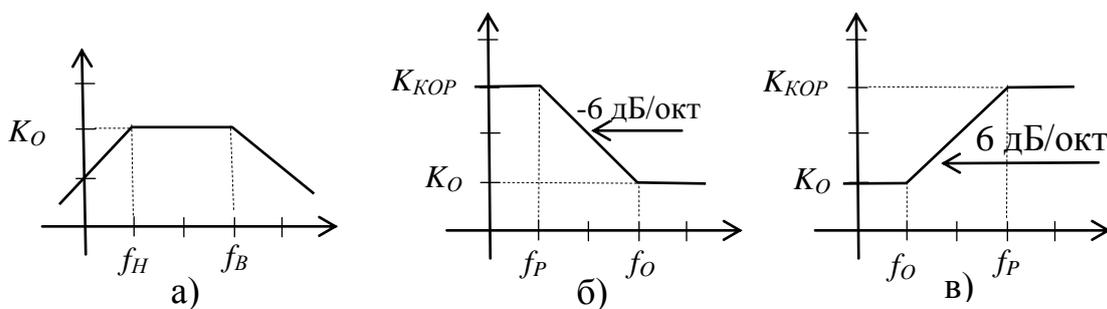


Рисунок 4.3 -.ЛАЧХ: а) УНЧ, б) корректора НЧ, в) корректора ВЧ

4.4. Содержание моделирования

- Моделирование проводится в частотной области.
- Исследуется соответствие основных параметров функционирования каскадов расчетным значениям: коэффициентов усиления, верхних граничных частот и максимальной величине неискаженной амплитуды выходного напряжения.
- Определяется форма выходного сигнала при амплитуде существенно превышающей расчетную для $f_{0.7}$. Объясняется причина такой формы выходного напряжения.
- Исследовать соответствие расчетных значений граничных частот УНЧ.

Указание.

Все результаты моделирования необходимо четко фиксировать в файле (или в рабочей тетради) для составления отчета.

Сравниваемые характеристики**, полученные при вариации параметра каждого элемента схемы, **должны представляться на одном рисунке (или результаты моделирования должны сводиться в таблицу)**. **Загромождение отчета массой подобных характеристик не допускается!

Моделирование во временной области выполнять не обязательно.

4.5. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- титульный лист;
- цель работы;
- схемы исследуемых каскадов;
- краткое изложение расчетов по расчетному заданию;
- обработанные результаты моделирования в виде семейств графиков (или таблиц), показывающих влияние изменения параметров элементов схемы на характеристики каскада;
- выводы по результатам моделирования.

Указание. Выводы, как минимум, должны строиться по логическому алгоритму:

от цели работы → к результатам моделирования (со ссылками на результаты моделирования в виде таблиц, графиков, рисунков) → к физическому объяснению результатов моделирования.

Указание.

1.5.1 **Отчет должен оформляться в соответствии с требованиями ОС ТУСУР 6.1-97*.**

1.5.1 **Допускается краткое изложение содержания отчета (в том числе расчетов и выводов) без расшифровки условных обозначений и символов, использованных в настоящем описании работы.**

4.6. Контрольные вопросы

1. Начертите принципиальную схему неинвертирующего каскада. Объясните, какого вида обратная связь использована в схеме неинвертирующего каскада.
2. Напишите выражение для АЧХ неинвертирующего каскада.
3. Напишите выражение для $f_{60,7}$ неинвертирующего каскада.
4. Напишите выражение для $R_{H\sim}$ неинвертирующего каскада?
5. Чем определяется $f_{60,7}$ неинвертирующего каскада.
6. Чем определяется $R_{H\sim}$ неинвертирующего каскада.
7. Начертите принципиальную схему инвертирующего каскада. Объясните, какого вида обратная связь использована в схеме инвертирующего каскада.
8. Напишите выражение для АЧХ инвертирующего каскада.
9. Напишите выражение для $f_{60,7}$ инвертирующего каскада.
10. Напишите выражение для $R_{H\sim}$ инвертирующего каскада.
11. Чем определяется $R_{H\sim}$ инвертирующего каскада?

12. Какими справочными характеристиками ОУ определяется достижимая амплитуда неискаженного сигнала в каскадах на ОУ.
13. Покажите по принципиальной схеме пути протекания переменной составляющей выходного тока ОУ.
14. Что является причиной частотных искажений в областях нижних и верхних частот?
15. Напишите выражения для нормированной АЧХ каскадов на ОУ и граничных частот в областях нижних и верхних частот.
16. Что является причиной появления линейных искажений в каскадах на ОУ?

5. Список использованных источников

1. Павлов В.Н., Ногин В.Н. Схемотехника аналоговых электронных устройств: Учебник для вузов – 3-е изд., исправ. М.: Горячая линия - Телеком, 2005. – 320с.: ил. (53 экз.)
2. Опадчий Ю.Ф. и др. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): Учебник для вузов / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров; Под ред. О.П. Глудкина.– М.: Горячая линия – Телеком, 2005. – 768с.: ил. (100 экз.)
3. Колесов И. А. Усилительные устройства бытовой радиоэлектронной аппаратуры: Учебное пособие. – Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2003. 247с.: (42 эк.)
4. Хернитер М. Е. Multisim® 7: Современная система компьютерного моделирования и анализа схем электронных устройств. (Пер. с англ.) / Пер. с англ. Осипов А.И. – М.: Издательский дом ДМК-пресс, 2006.- 488 с.