

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Шебзухова Татьяна Александровна

Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского
федерального университета

Дата подписания: 19.09.2023 10:52:14

Уникальный программный ключ:

d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a1c8ef96f

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания

по выполнению практических работ
по дисциплине «ОСНОВЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ»
для студентов направления подготовки /специальности
19.03.04 Технология продукции и организация общественного питания

(ЭЛЕКТРОННЫЙ ДОКУМЕНТ)

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
Наименование практических занятий	4
СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ	5
Практическая работа №1. Расчет параметров модели Эберса-Молла	5
биполярного транзистора	5
Практическая работа №2. Расчет параметров модели униполярных (полевых) транзисторов с управляющим р-п переходом	10
Практическая работа №3. Расчет параметров макромодели операционного усилителя	14

ВВЕДЕНИЕ

Цель и задачи освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины «ОСНОВЫ КОМПЬЮТЕРНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ» является ознакомление студентов с основами компьютерного проектирования и моделирования с применением современных пакетов прикладных программ (ППП) для автоматизированного проектирования радиоэлектронных средств.

Задачи дисциплины:

- определение целей, способов, задач и процессов автоматизированного компьютерного проектирования и моделирования;
- изучение математических основ компьютерного моделирования компонентов РЭС различного уровня сложности и электромагнитных полей;
- ознакомление с алгоритмами компьютерного анализа и оптимизации аналоговых и цифровых устройств;
- ознакомление с современными ППП для автоматизированного компьютерного проектирования РЭС и методами их использования.

Перечень осваиваемых компетенций:

Код	Формулировка
УК-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
ОПК-1	Способен применять информационную и коммуникационную культуру и технологии в области профессиональной деятельности с учетом основных требований информационной безопасности

Знания, умения, навыки и (или) опыт деятельности, характеризующие этапы формирования компетенций

Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций	Формируемые компетенции
Знать: основы поиска и критического анализа информации; методы системного подхода для решения поставленных задач с помощью цифровых и информационных технологий; технологии сбора и обработки информации, возможности применения технологии обработки данных Уметь: применять основы поиска и критического анализа информации; использовать методы системного подхода для решения поставленных задач с помощью цифровых и информационных технологий Владеть: навыками применения возможностей цифровых инструментов для решения поставленных задач	УК-1
Знать: основных требования информационной безопасности. Уметь: применять информационную и коммуникационную культуру и технологии в области профессиональной деятельности с учетом основных требований информационной безопасности Владеть: информационной и коммуникационной культурой и технологиями в области ИБ	ОПК-1

Наименование практических занятий

№ Темы дисциплины	Наименование тем лабораторных работ	Объем часов (астр.)	Интерактивная форма проведения
4 семестр			
1.	Расчет параметров модели Эберса-Молла биполярного транзистора	12	
2.	Расчет параметров модели униполярных (полевых) транзисторов с управляющим р-п переходом	12	
3.	Расчет параметров макромодели операционного усилителя	12	
Итого за 4 семестр		36.00	
	Итого	36.00	

СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Практическая работа №1. Расчет параметров модели Эберса-Молла биполярного транзистора

Цель работы: Ознакомиться с методикой расчета параметров модели Эберса-Молла биполярного транзистора

Теоретическая часть

Порядок работы в системе Micro-Cap

В соответствии с выбранным вариантом задания на курсовой проект, необходимо определить справочные параметры пассивных и активных компонентов, используемых в анализируемых устройствах, и рассчитать параметры математических моделей этих компонентов (см. раздел 2). Значения допусков на параметры пассивных компонентов выбираются в пределах (5 – 20)%, а на параметры активных компонентов – до 50%. Значения температурных коэффициентов для пассивных компонентов задаются не более чем 10^{-3} 1/град с произвольным знаком, а для активных компонентов выбираются в соответствии с рекомендациями библиотеки системы.

Работа в режиме схемного редактора.

Новая схема создается по команде New из меню File. При этом возможно как графическое изображение схемы (режим Schematic), так и ее текстовое описание (Spice/Text). Созданные ранее схемы загружаются по команде File – Open.

В результате выполнения команды File – New открывается пустой экран, на котором создается новая схема. Для упрощения построения схемы рекомендуется первоначально нанести на экран координатную сетку путем нажатия мышью на соответствующую пиктограмму.

Элемент, размещаемый на схеме, выбирается в меню Component. Наиболее часто встречающиеся компоненты целесообразно разместить на специальных панелях (с1 по 9), которые открываются путем нажатия клавиши Ctrl+номер соответствующей панели. Выбранный компонент размещается на схеме щелчком мыши. Поворот компонента на 90° осуществляется нажатием правой кнопки до отпускания левой кнопки. Фиксация компонента на схеме выполняется отпусканием левой кнопки мыши. После ввода на схему компонента появляется диалоговое окно атрибутов, к которым относятся позиционное обозначение PART (например, R1, C2) и номинальное значение параметра VALUE (например, 2.2к, 10pF). Большинство компонентов, за исключением простейших, имеют атрибут имени модели MODEL (например, транзистор KT315A). Количество атрибутов определяется типом компонента.

В окне, расположенном в правой части окна атрибутов, приводится список моделей в доступных библиотеках.

Редактирование атрибута выполняется после двойного щелчка мышью при расположении курсора на выбранном атрибуте. Ввод проводника осуществляется по команде Options – Mode – Wire или щелчком мыши по соответствующей пиктограмме. Начало проводника отмечается нажатием левой клавиши мыши, не отпуская которую наносят проводник на чертеж. Отпускание клавиши фиксирует окончание линии.

Ввод проводников под произвольным углом выполняется в режиме Options – Mode – WireD или нажатием на соответствующую пиктограмму.

Если в процессе проведения проводника он пересекает другой проводник, не останавливаясь в точке пересечения, электрическое соединение не образуется, и точка не проставляется. Соединение образуется, если проводник пересекает конечную точку другого проводника или вывод компонента.

Нанесение на схему текстовых надписей осуществляется в режиме Options – Mode – Text или щелчком мыши по пиктограмме T.

При размещении на схеме компонентов, имеющих модели, их текстовые описания автоматически выводятся в текстовое окно, расположенное ниже окна схем. Параметры математических моделей компонентов редактируются, как и в обычном текстовом редакторе.

Работа в режиме анализа характеристик.

Выбор вида анализа осуществляется из режима Analysis главного меню, который включает в себя следующие подрежимы:

- 1) Transient Analysis (Alt+1) – расчет переходных процессов;
- 2) AC Analysis (Alt+2) – расчет частотных характеристик;
- 2) DC Analysis (Alt+3) – расчет передаточных функций по постоянному току.

Каждый из перечисленных подрежимов имеет дополнительные возможности, перечень которых зависит от выбранного подрежима.

После выбора необходимого подрежима при отсутствии ошибок в схеме открывается окно задания параметров моделирования, которое необходимо отредактировать в соответствии с заданием.

После установки всех параметров следует нажать кнопку Run или клавишу F2, при этом система перейдет к расчету характеристик. Результаты анализа выводятся на экран в виде графиков и могут быть выведены на принтер из режима File – Print или нажатием на соответствующую пиктограмму. Кроме того, если нажата пиктограмма Numeric Output (вывод таблиц), то результаты анализа будут выведены в виде таблиц, которые можно просмотреть, нажав клавишу F5, и вывести на принтер.

Методические указания

Расчёт параметров модели Эберса-Молла биполярных транзисторов

Содержание расчётов:

1. Рассчитать ток насыщения I_{SO} эмиттерного и коллекторного переходов.
2. Рассчитать напряжение Эрли V_A .
3. Определить прямой B_F и обратный B_R коэффициенты усиления по току.
4. Определить барьерные ёмкости эмиттерного CJE и коллекторного CJC переходов при нулевом напряжении на соответствующих переходах.
5. Рассчитать сопротивление базы R_B .
6. Рассчитать время переноса носителей через базу в прямом включении T_F и инверсном включении T_R .

Исходными данными для расчётов являются справочные параметры (см. табл.1) со следующими обозначениями: $B_{ст}$ - статический коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером; $C_э$ - ёмкость эмиттера; $C_к$ - ёмкость коллектора; $\tau_k = r_b C_k$ - постоянная времени коллекторного перехода; f_T - предельная частота усиления по току; $|\beta|$ - модуль коэффициента усиления по току на частоте измерения $f_{и}$; $I_{э2}$ - ток эмиттера в режиме измерения f_T или $|\beta|$; h_{22} - выходная проводимость в схеме с общей базой; $I_{э1}$ - ток эмиттера в режиме измерения h_{22} ; $I_б$ - ток базы; $U_{эб}$ - напряжение база-эмиттер в режиме измерения $I_б$.

Указания

1. Ток насыщения I_{SO} .

В соответствии с моделью Эберса-Молла токи эмиттера $I_э$ и коллектора $I_к$ выражаются соотношениями:

$$I_э = \frac{I_{э0}}{1 - \alpha_N \alpha_I} (e^{U_{эб}/\varphi_T} - 1) - \frac{\alpha_I I_{к0}}{1 - \alpha_N \alpha_I} (e^{U_{кб}/\varphi_T} - 1), \quad (1)$$

$$I_K = \frac{\alpha_N I_{\varepsilon 0}}{1 - \alpha_N \alpha_I} (e^{U_{\varepsilon 6} / \varphi_T} - 1) - \frac{I_{K0}}{1 - \alpha_N \alpha_I} (e^{U_{K6} / \varphi_T} - 1). \quad (2)$$

где $I_{\varepsilon 0}$, I_{K0} - токи насыщения соответственно эмиттерного и коллекторного переходов; α_N, α_I - прямой и инверсный коэффициенты усиления по току в схеме с общей базой; $\varphi_T = 0,026\text{В}$ - температурный потенциал; $U_{\varepsilon 6}, U_{K6}$ - напряжения, соответственно, на эмиттерном и коллекторном переходах.

Обычно выполняются условия:

$$\alpha_N \approx 1; \alpha_I \ll \alpha_N; 0 \ll \varphi_T \ll U_{\varepsilon 6}; I_{\varepsilon 0} \approx I_{K0} = ISO$$

Поэтому справедливы соотношения

$$I_{\varepsilon} = ISO e^{U_{\varepsilon 6} / \varphi_T},$$

$$ISO = I_{\varepsilon} e^{-U_{\varepsilon 6} / \varphi_T}. \quad (3)$$

Подставляя в (3) выражение

$$I_{\varepsilon} = (B_{\text{ст}} + 1) I_{\varepsilon 6},$$

получим формулу для расчета тока насыщения

$$ISO = I_{\varepsilon 6} (B_{\text{ст}} + 1) / e^{U_{\varepsilon 6} / \varphi_T}.$$

2. Напряжение Эрли VA.

В соответствии с уравнением (2) при прямосмещенном эмиттерном и обратносмещенном коллекторном переходах ток коллектора практически не зависит от напряжения U_{K6} и, следовательно, характеристика $I_K(U_{K6})$ не имеет наклона относительно оси абсцисс. Реальные характеристики, ход которых иллюстрирует рис.1, имеют наклон, угол которого ϕ возрастает с возрастанием тока базы $I_{\varepsilon 6}$.

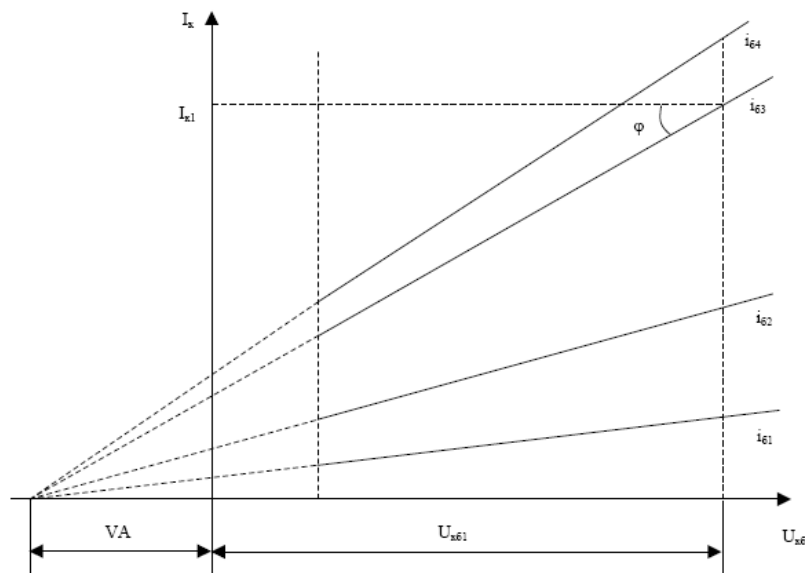


Рисунок 1.

Это несоответствие уравнения (2) реальным характеристикам вызвано тем, что при выводе выражения (2) не учтен так называемый эффект Эрли. Он заключается в изменении ширины обедненного слоя базы при изменении напряжения U_{K6} . Все характеристики, будучи условно продолжены в левую часть рисунка, пересекаются с осью абсцисс при

напряжении Эрли V_A , которое вводится в модель Эберса-Молла, является ее параметром и находится по формуле:

$$V_A = I_{K1} / h_{22} - U_{КБ},$$

где $U_{КБ} = (3 - 5) В$.

3. Прямой коэффициент усиления по току равен $B_F = B_{ст}$, обратный коэффициент усиления по току определяется из соотношения $B_R = B_F / 100$.

Барьерные емкости эмиттерного и коллекторного переходов равны $C_{JE} = C_{э}$, $C_{JC} = C_{к}$.

4. Сопротивление базы находится из соотношения

$$R_B = \tau_k / C_{JC}$$

5. Время переноса носителей через базу в прямом и инверсном включениях соответственно рассчитывается по формулам:

$$TF = 1 / (2\pi f_T) - (C_{JC} + C_{JE}) \phi_T / I_{э2} - \tau_k$$

$$TR = TF \cdot 10,$$

где значение f_T берется из табл.1, либо находится из соотношения:

$$f_T = |\beta| \cdot f_H$$

1. Исследование усилителя промежуточной частоты (УПЧ)

На рис. 2 представлена схема одного каскада одноконтурного УПЧ с частичным включением контура

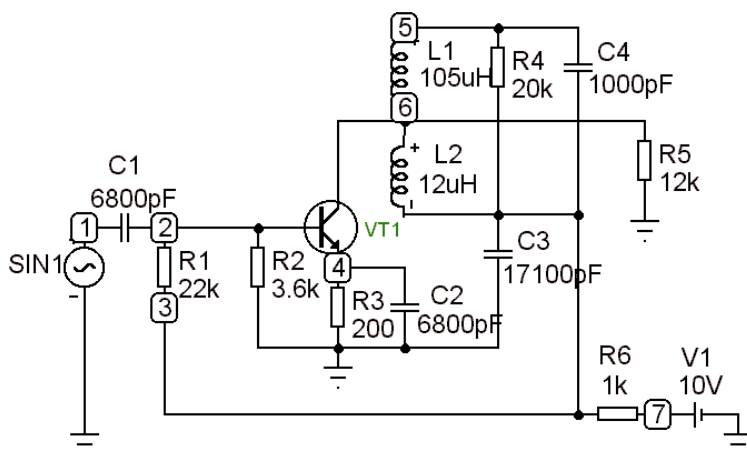


Рисунок 2.

Сопротивления R_1 , R_2 представляют собой делитель для подачи смещения на базу транзистора. Сопротивление R_3 совместно с емкостью C_2 образуют цепочку автосмещения в цепи эмиттера. Сопротивление R_4 играет роль шунтирующего сопротивления, вносящего затухание в колебательный контур для изменения добротности контура УПЧ. Сопротивление R_5 является нагрузкой усилителя.

Для проведения частотного анализа ко входу устройства следует подключить источник синусоидального сигнала с амплитудой $A = 1 В$ и произвольной частотой. Частотный анализ нужно проводить в диапазоне частот 400 – 500 кГц для различных значений шунтирующего сопротивления $R_4 = 30 кОм$, $20 кОм$, $10 кОм$. По полученным частотным характеристикам для каждого значения сопротивления R_4 необходимо

$$Q = \frac{f_p}{\Delta f}$$

вычислить коэффициент добротности по формуле, где f_p – резонансная частота усилителя, $\Delta f = f_2 - f_1$ – полоса пропускания на уровне 0,7, соответствующем – 3 дБ, и построить график зависимости $Q(R_4)$.

Для проведения временного анализа ко входу следует подключить источник синусоидального сигнала и отредактировать его, установив частоту $f = f_p$ и амплитуду $A = 50$ мВ. Войти в режим временного анализа и в окне режимов анализа установить время анализа $T_{max} = 10T$, где $T = 1/f_p$, для получения установившегося процесса. В пункте меню ОПЦИИ (Options) установить нулевые начальные условия (Zero) и включить опцию расчета рабочей точки (Operation point). После отображения на экране графика временного процесса и, убедившись в том, что процесс установился, следует, не выходя из режима Transient, установить в окне режимов анализа $T_{max} = 1T$ и в опциях (Options) вместо пункта Zero пункт Leaves, при котором сохраняются значения узловых напряжений и токов индуктивностей, оставшиеся после предыдущего цикла анализа, а также отменить опцию расчета рабочей точки (Operation point). Для проведения анализа Фурье в графе YExpression строки вывода результатов анализа записать функцию HARM (V(6)), а для расчета коэффициента гармоник в той же графе соответствующей строки записать функцию THD(HARM(V(6))). При этом в графе XExpression соответствующих строк указать имя переменной F. Провести временной анализ с выводом графического изображения на принтер. В таблице результатов анализа (F5) просмотреть спектр выходного сигнала и определить коэффициент гармоник. Подготовить отчет.

Таблица 1

Тип транзи- стора	B_{CT}	$\frac{I_{с1}, \text{мкА}}{U_{с1}, \text{В}}$	$\frac{1/h_{22}, \text{кОм}}{I_{с1}, \text{мА}}$	$C_{с1}, \text{пФ}$	$C_{с2}, \text{пФ}$	$\frac{ \beta }{I_{с1}, \text{мА}}$	$f_{\beta}, \text{МГц}$	$\frac{f_{\beta}, \text{МГц}}{I_{с2}, \text{мА}}$	$\tau_K = r_{б} C_K, \text{пс}$
1. КТ315А	20	$\frac{70}{0,65}$	$\frac{70}{1}$	14	7	$\frac{2,5}{1}$	100	-	300
2. КТ339А	25	$\frac{220}{0,85}$	$\frac{80}{1}$	8	2	$\frac{3}{5}$	100	-	25
3. КТ361А	20	$\frac{80}{0,7}$	$\frac{75}{1}$	18	9	$\frac{2,5}{5}$	100	-	300
4. КТ368А	50	$\frac{50}{0,75}$	$\frac{85}{1}$	3	1,7	-	-	$\frac{900}{10}$	15
5. КТ3102А	100	$\frac{80}{0,6}$	$\frac{95}{1}$	12	6	$\frac{1,5}{10}$	100	-	100
6. КТ3107А	70	$\frac{2,5}{0,8}$	$\frac{90}{1}$	14	7	$\frac{2}{10}$	100	$\frac{200}{10}$	100
7. КТ501А	20	$\frac{120}{0,7}$	$\frac{18}{5}$	100	50	-	-	$\frac{5}{10}$	1000
8. КТ503А	40	$\frac{120}{0,7}$	$\frac{18}{5}$	100	50	-	-	$\frac{5}{3}$	1000
9. 2Т632А	50	$\frac{1000}{0,8}$	$\frac{65}{1}$	50	5	$\frac{2}{20}$	100	-	30
10. 2Т638А	50	$\frac{1000}{0,8}$	$\frac{65}{1}$	50	6	$\frac{2}{20}$	100	-	30
11. КТ814А	40	$\frac{2000}{0,8}$	$\frac{16}{5}$	75	60	-	-	$\frac{3}{10}$	1000
12. КТ815А	40	$\frac{2000}{0,8}$	$\frac{16}{5}$	75	60	-	-	$\frac{3}{30}$	1000
13. КТ816А	25	$\frac{1000}{0,7}$	$\frac{14}{5}$	115	60	-	-	$\frac{3}{250}$	1000
14. КТ817А	25	$\frac{1000}{0,7}$	$\frac{14}{5}$	115	60	-	-	$\frac{3}{250}$	1000
15. КТ818А	15	$\frac{30000}{0,8}$	$\frac{12}{5}$	2000	1000	-	-	$\frac{3}{500}$	1000
16. КТ819А	15	$\frac{30000}{0,8}$	$\frac{12}{5}$	2000	1000	-	-	$\frac{3}{500}$	1000

$$B_{CT} \quad I_{с1}/U_{с1} \quad 1/h_{22}/I_{с1} \quad C_{с1} \quad C_{с2} \quad |\beta|/I_{с1} \quad f_{\beta} \quad f_{\beta}/I_{с2} \quad \tau_K = r_{б} C_K$$

Содержание отчёта

Отчёт должен содержать:

- цель работы;
- задачи экспериментов;
- рассчитанные параметры;
- схему и условия проведения экспериментов;
- таблицы результатов экспериментов и их обработки;
- графики передаточных и выходных характеристик транзистора;
- выводы.

Практическая работа №2. Расчет параметров модели униполярных (полевых) транзисторов с управляющим p - n переходом

Цель работы: Исследование статических характеристик полевого транзистора с управляющим p - n -переходом и определение его основных параметров.

Теоретическая часть

Полевыми транзисторами называют полупроводниковые приборы, работа которых основана на модуляции тонкого полупроводникового канала поперечным электрическим полем. Полевые транзисторы называют также **канальными** или **униполярными**, поскольку в них, в отличие от биполярных транзисторов, в образовании электрического тока участвуют носители заряда только одного типа.

В зависимости от типа проводимости канала полевые транзисторы могут быть **p -канальными** и **n -канальными**.

В зависимости от конструкции полевые транзисторы могут быть

- **с управляющим переходом;**
- **со структурой металл–диэлектрик–полупроводник (МДП–транзисторы).**

В свою очередь полевые транзисторы с управляющим переходом имеют две разновидности:

- **с управляющим p - n -переходом;**
- **с управляющим переходом Шоттки.**

Рассмотрим упрощенную структуру полевого транзистора с управляющим p - n -переходом (рис. 13). Полевой транзистор представляет собой пластину слаболегированного полупроводника n -типа, на верхней и нижней гранях которой сформированы области p -типа, образующие с пластиной p - n -переходы. Поскольку степень легирования пластины n -типа значительно меньше степени легирования p -областей, то область, обеднённая носителями заряда, будет располагаться в основном в пластине n -типа и ток между торцами может протекать только по узкому каналу, заключенному между обеднёнными областями p - n -переходов. На торцах пластины и обеих p -областях выполнены омические контакты для включения транзистора в схему.

Подключим к торцам пластины источник напряжения, при этом по каналу в пластине будет протекать ток. Электрод, от которого начинают движение основные носители заряда, называют **истоком**, а к которому движутся – **стоком**. Объединенные выводы от p -областей управляющий электрод, называемый **затвором**.

Включим между затвором и истоком источник напряжения, смещающий управляющий p - n -переход в обратном направлении. Принцип действия такого транзистора заключается в том, что при изменении напряжения на затворе изменяется толщина обедненного слоя, а следовательно, изменяется сечение канала, проводимость канала и ток стока, т. е. изменением напряжения на затворе можно управлять током стока.

При некотором напряжении затвор-исток обеднённые слои сомкнутся и ток стока станет равным нулю. Это напряжение является параметром транзистора и называется **напряжением отсечки** $U_{зи.отс}$. На практике напряжение отсечки определяют не при нулевом токе стока, а при заданном низком значении тока стока.

Основными статическими характеристиками полевого транзистора являются **выходная**, или **стоковая**, и **передаточная**, или **стокозатворная**.

Под выходной характеристикой понимают зависимость тока стока I_C от напряжения сток-исток $U_{си}$ при постоянном напряжении затвор-исток $U_{зи}$, являющимся параметром:

$$I_C = f(U_{си}); \quad U_{зи} = \text{const.}$$

Под передаточной характеристикой понимают зависимость тока стока I_C от напряжения затвор-исток $U_{зи}$ при постоянном напряжении сток-исток $U_{си}$:

$$I_C = f(U_{зи}); \quad U_{си} = \text{const.}$$

Рассмотрим выходные статические характеристики (рис. 14). Пусть $U_{зи} = 0$. При небольших напряжениях сток-исток $U_{си}$ канал ведет себя как линейное сопротивление. По мере роста напряжения сток-исток $U_{си}$ обеднённые слои будут расширяться, причем около стока в большей степени, чем около истока. Сечение канала будет уменьшаться, и рост тока замедлится. При напряжении

$U_{си} = U_{зи.отс}$ обеднённые слои сомкнутся в области стока. Однако это не приведет к отсечке тока, как в случае $U_{зи} = U_{зи.отс}$, так как само смыкание обеднённых областей есть следствие увеличения тока.

Начиная с напряжения $U_{си} = U_{зи.отс}$, в транзисторе будет наблюдаться **режим насыщения**, при котором рост напряжения сток-исток $U_{си}$ сопровождается лишь незначительным ростом тока стока I_C . Стабилизация тока стока в режиме насыщения объясняется тем, что рост напряжения сток-исток компенсируется увеличением длины перекрытия канала. Этот эффект называют **эффектом модуляции длины канала**.

При значительном увеличении напряжения сток-исток наблюдается пробой p - n -перехода в области стока.

При подаче на затвор отрицательного напряжения исходное сечение канала уменьшается и насыщение наступает раньше, при напряжении $U_{си.нас} = U_{зи.отс} - U_{зи}$.

При увеличении напряжения затвор-исток (по модулю) на соответствующую величину уменьшается пробивное напряжение сток-исток.

Одним из основных параметров полевого транзистора с управляющим переходом является **начальный ток стока** $I_{C.нач}$, под которым понимают ток стока в режиме насыщения при напряжении затвор-исток $U_{зи}$, равном нулю.

Рассмотрим передаточные статические характеристики, снятые для режима насыщения (рис. 15). При напряжениях затвор-исток, близких к нулю, передаточная характеристика практически линейна, а при напряжениях затвор-исток, близких к напряжению отсечки, имеет квадратичный характер.

В рабочем режиме в цепи затвора протекает ток обратносмещенного p - n -перехода, который составляет единицы наноампер.

Отсюда следует, что полевой транзистор с управляющим переходом имеет высокое входное сопротивление, что является одним из основных его достоинств.

В общем случае полевой транзистор является нелинейным элементом, однако при небольших значениях переменных составляющих напряжений и токов полевой транзистор можно считать линейным элементом.

Методические указания

Вызовите пакет анализа электронных схем Electronics Workbench (EWB). Соберите схему для исследования полевого транзистора (схему и тип транзистора предоставит преподаватель).

Источники напряжения и символ заземления находятся в группе «Sources», миллиамперметры – в группе «Indicators», транзисторы - в группе «Transistors». Все типы транзисторов можно найти в библиотеке «Motorola» или «National» на закладке «Models».

После выбора транзистора нажмите кнопку «Edit» и выпишите значение напряжения отсечки $U_{\text{зи.отс}}$, параметр (VTO).

Заготовить данные для первой строки таблицы 1. Для этого значение напряжения отсечки поделить на восемь. Полученные значения округлить до сотых долей вольта кратных пяти, если напряжение отсечки менее двух вольт. Если напряжение отсечки более двух вольт, то округлить до десятых долей кратных пяти.

Полученные значения напряжений внесите в первую строку таблицы 1.

Установите напряжение сток-исток $U_{\text{си}} = 25 \text{ В}$ (V2) и напряжении затвор-исток $U_{\text{зи}} = 0 \text{ В}$ (V1 = 0 В).

Включите процесс моделирования нажатием клавиши «O/I» в правом верхнем углу окна программы.

Убедитесь, что на электродах транзистора имеется напряжение и течет ток стока.

Если амперметр M2 показывает ток со знаком минус, то следует выключить амперметр из цепи, развернуть его на 180° и снова включить в схему.

Проведение измерений

1 Снимите передаточную характеристику $I_{\text{с}} = f(U_{\text{зи}})$. Напряжение затвор-исток $U_{\text{зи}}$ изменяйте от нуля до напряжения отсечки $U_{\text{зи.отс}}$, задавая напряжения согласно таблицы 1.

Уменьшите напряжение сток-исток до $U_{\text{си}} = 5 \text{ В}$. Повторите измерения.

2 Измерьте ток затвора транзистора $I_{\text{з}}$ (M1) при напряжении затвор-исток, равном напряжению отсечки $U_{\text{зи.отс}}$. Рассчитайте входное статическое сопротивление транзистора $R_{\text{зи}} = U_{\text{зи.отс}} / I_{\text{з}}$.

Табл. 1.

$U_{\text{зи}} \text{ В (V1)}$	0	0.25 ... $U_{\text{зи.отс}}$
$U_{\text{си}} = 25 \text{ В. } I_{\text{с}}$	мА (M2)	$I_{\text{с}}$ НАЧ
$U_{\text{си}} = 5 \text{ В. } I_{\text{с}}$	мА	$I_{\text{с}}$ НАЧ

3 Снимите семейство выходных статических характеристик транзистора $I_{\text{с}} = f(U_{\text{си}})$ при **четырёх значениях** напряжения затвор-исток $U_{\text{зи}}$. Одно значение равно нулю, а остальные три выбрать из ближайших к значению $U_{\text{зи.отс}}/4$, имеющихся в таблице 1.

Для этого устанавливается напряжение V1 = 0 ($U_{\text{зи}} = 0 \text{ В}$) и изменяется напряжение на стоке (V2) от нуля до 25 В, причем до напряжения 5 В с шагом 1 В, а далее – с шагом 5 В. Заполняется вторая строка таблицы 2.

Далее устанавливается напряжение V1 равным $U_{\text{зи.отс}}/4$ и повторяется измерение.

4 Установить температуру транзистора 57°C и снять одну характеристику для режима $U_{\text{зи.отс}}/4$.

Для установки температуры выбрать опцию *Analysis options* меню **Analysis**. В открывшемся окне выделить вкладку *Global* и установить значение переменной в окне *Simulation temperature (TEMP)* равное 57 degrees C (57°C).

Результаты измерений внесите в таблицу 2.

Табл. 2.

$U_{СИ}$ В (V2)	0	1	2	...	10	...	25
$U_{ЗИ} = 0$ В.	I_C мА (M2)						
$U_{ЗИ.отс}/4$	I_C мА						
$U_{ЗИ.отс}/2$	I_C мА						
$U_{ЗИ.отс}/1$	I_C мА						
$U_{ЗИ.отс}/4.$							
I_C мА							
$t = 57^0C$							

Обработка результатов измерений

1 Построение характеристик

По данным таблиц 1 и 2 построить передаточную и стоковую характеристики нужного транзистора

На характеристиках построить характеристические прямоугольные треугольники, определить приращения токов и напряжений.

2 Определение параметров транзистора по передаточным характеристикам

- Определите крутизну транзистора при напряжении сток-исток $U_{СИ} = 25$ В и токе стока $I_C \approx I_{C \text{ нач}}/4$. Вершины треугольника расположить так, чтобы они совпали с табличными значениями характеристики

$$S = \Delta I_C / \Delta U_{ЗИ} [\text{мА/В}].$$

- Определите коэффициент усиления транзистора M . Горизонтальный катет треугольника спроецировать на ось напряжения затвора и получить приращение напряжения $\Delta U_{ЗИ}$. При этом изменение напряжения на стоке $\Delta U_{СИ} = (25\text{В} - 5\text{В}) = 20\text{В}$

$$M = \Delta U_{СИ} / \Delta U_{ЗИ}.$$

- Определите дифференциальное сопротивление сток-исток. Вертикальный катет треугольника спроецировать на ось тока стока и определить изменение ΔI_C . $\Delta U_{СИ} = 20\text{В}$.

$$r_{СИ} = \Delta U_{СИ} / \Delta I_C = [\text{В/мА}] [\text{кОм}].$$

- Проверить связь между параметрами $M = S \cdot r_{СИ}$.

3 Определите параметры транзистора по выходным характеристикам. Методика определения аналогична рассмотренной в пункте 2.

Содержание отчёта

Отчёт должен содержать:

- цель работы;
- задачи экспериментов;
- рассчитанные параметры;
- схему и условия проведения экспериментов;
- таблицы результатов экспериментов и их обработки;
- графики передаточных и выходных характеристик транзистора;
- выводы.

Практическая работа №3. Расчет параметров макромодели операционного усилителя

Цель работы: ознакомиться с методикой расчета параметров макромодели операционного усилителя

Теоретическая часть

Под макромоделью ОУ понимают схему устройства, значения параметров которого частично или полностью совпадают со справочными данными. Полная макромодель ОУ приведена на рис.1.

Для нее необходимо определить следующие параметры:

- тип транзисторов во входном дифференциальном каскаде, ток источника IEE и сопротивление резистора RP;
- сопротивление в цепях коллектора и эмиттера RC1, RE1, RE2, RE дифференциального каскада, являющегося первым каскадом ОУ;
- крутизну управляемого источника тока GA и сопротивления нагрузки R2 второго каскада усиления;
- крутизну управляемого источника тока GCM, моделирующего прохождение синфазного сигнала;
- крутизну управляемого источника тока GB и сопротивление нагрузки R02 третьего каскада усиления;
- емкость конденсатора C1, определяющего частоту первого полюса;
- уточненное значение RC2, определяющее $U_{см}$;
- напряжение источников VC и VE, определяющих максимальное выходное напряжение.

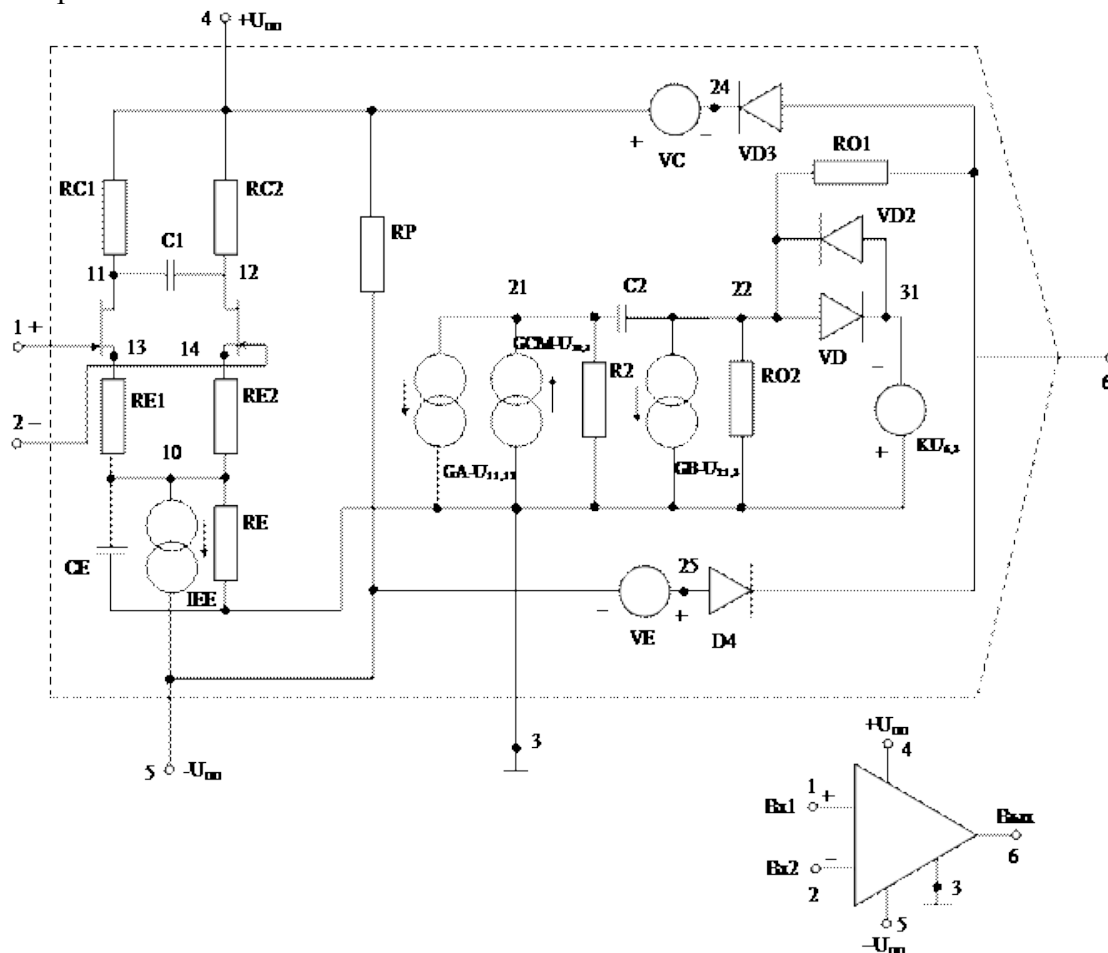


Рис. 1. Полная макромодель ОУ

Методические указания

Проведем оценку и расчет перечисленных выше параметров.

1. Тип транзисторов во входном дифференциальном каскаде, ток источника и сопротивление потерь R_P .

Для типовых ОУ ток источника тока задается равным $I_{EE} = 1\text{ мА}$. Принимая для биполярных транзисторов $\beta_{ст} = 100$, рассчитываем ток базы входного каскада

$$I_B = I_{EE} / 2\beta_{ст} = 5\text{ мкА}.$$

Если $I_{вх} > I_B$, то во входном каскаде макромодели выбираются биполярные транзисторы, в противном случае - полевые.

В макромодели ОУ задается только ток источника тока I_{EE} в цепи эмиттера дифференциального каскада. Потери в остальных цепях ОУ моделируются с помощью сопротивления потерь R_P

$$R_P = \frac{2U_{ПП}}{I_{ПП} - I_{EE}}.$$

2. Сопротивление резисторов R_{C1} , R_{E1} , R_{E2} , R_E .

Для устойчивой работы дифференциального каскада необходимо в цепи эмиттеров плеч дифференциального каскада ввести достаточно глубокую отрицательную обратную связь по напряжению последовательного типа. Чтобы обеспечить это условие, падение напряжения U_E на резисторах R_{E1} , R_{E2} должно быть не менее 1В. Примем $U_E = 1\text{ В}$, тогда сопротивления резисторов R_{E1} , R_{E2} определяется выражением

$$R_{E1} = R_{E2} = \frac{2U_E}{I_{EE}} = 2\text{ кОм}.$$

Из теории дифференциального каскада известно, что при глубокой ООС, обеспечиваемой резисторами R_{E1} , R_{E2} , коэффициент усиления первого каскада K_1 определяется выражением

$$K_1 = \frac{R_{C1}}{R_{E1}} + \frac{R_{C2}}{R_{E2}}.$$

Для типовых ОУ коэффициент усиления дифференциального каскада обычно не превышает нескольких единиц. Из соображений удобства расчетов примем его значение $K_1 = 2$.

Предварительно принимая $R_{C1} = R_{C2}$, находим

$$\frac{R_{C1}}{R_{E1}} = \frac{K_1}{2} = 1,$$

откуда следует, что

$$R_{C1} = R_{C2} = R_{E1} = R_{E2} = 2\text{ кОм}.$$

Значение R_{C2} получено предварительно и будет уточнено в дальнейшем в соответствии с заданным напряжением смещения $U_{см}$ из-за несимметричности плеч дифференциального каскада.

Сопротивление R_E соединяет узел 10 с землей (средней точкой источника питания), обеспечивает нулевое относительно земли напряжение U_{10} и лежит в пределах (2 – 4) мОм.

3. Крутизна управляемого источника G_A и сопротивления нагрузки R_2 .

Коэффициент передачи второго каскада K_2 определяется по формуле

$$K_2 = G_A * R_2,$$

в которой две величины из трех могут задаваться произвольно. Выбираем значение K_2 , лежащим в пределах (4...8), G_A – в пределах $(10^{-5} \dots 10^{-4})\text{ А/В}$.

Величину R_2 получаем из соотношения

$$R_2 = \frac{K_2}{G_A}$$

$$R2 = GA.$$

4. Крутизна управляемого источника GCM.

Источник тока с крутизной GCM, управляемый напряжением U10 в узле 10 относительно земли, вводится для моделирования прохождения синфазного сигнала. По определению, ослабление синфазного сигнала Qc равно отношению противофазного и синфазного сигналов на выходе ОУ.

Источник тока с крутизной GA, моделирующий второй каскад усиления ОУ имеет коэффициент передачи $K2 = GA \cdot R2$, в то же время коэффициент передачи синфазного сигнала $K2c = GCM \cdot R2$, отсюда

$$Q_c = \frac{U_{пф}}{U_{сф}} = \frac{K_2}{K_{2c}} = \frac{GA}{GCM} \quad \text{и} \quad GCM = \frac{GA}{Q_c}.$$

При расчете, коэффициент подавления синфазной помехи, выраженной в децибелах, следует переводить в относительные единицы, исходя из соотношения

$$Q_{c(р\text{э})} = 10^{Q_c(дБ)/20}.$$

5. Крутизна GB и сопротивление резистора RO2.

С целью обеспечения малого выходного сопротивления ОУ, резистор RO2 выбирается в пределах $RO2 = (30 \dots 75)$ Ом. Коэффициент усиления третьего каскада определяется соотношением

$$K3 = \frac{K_{yu}}{GB \cdot RO2} = K1 \cdot K2,$$

отсюда

$$GB = \frac{K_{yu}}{K1 \cdot K2 \cdot RO2}.$$

6. Емкость конденсатора C1.

Предполагается, что моделируется ОУ с одним полюсом АЧХ, причем емкость конденсатора C1 определяет его положение на оси частот. Крутизна спада АЧХ, имеющей

$$\frac{\partial B}{\partial \omega}$$

один полюс, равна $20 \frac{дБ}{д\text{ек}}$. Аппроксимируем реальную характеристику АЧХ линейно-ломаной линией и отметим количество декад между частотой первого полюса и частотой единичного усиления, как показано на рис.2.

Отношение частоты единичного усиления к частоте первого полюса равно

$$\frac{f_1}{f_{PI}} = 10^n,$$

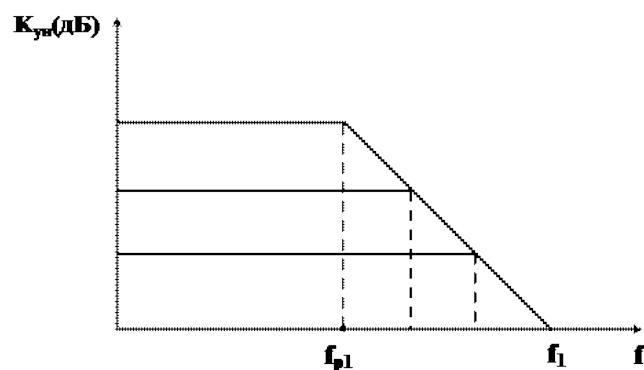


Рис.2. Линейная аппроксимация АЧХ ОУ

где n – количество декад

$$n = \frac{K_{yu}(\text{дБ})}{20} = \frac{20 \lg K_{yu}}{20} = \lg K_{yu}.$$

Отсюда

$$\frac{f_1}{f_{pi}} = 10^{\lg K_{yu}} = K_{yu} \quad \text{и} \quad f_{pi} = \frac{f_1}{K_{yu}}.$$

С другой стороны из выражения, справедливого для дифференциального каскада

$$f_{pi} = \frac{1}{4\pi \cdot RC1 \cdot C_1}, \quad \text{откуда}$$

$$C_1 = \frac{1}{4\pi \cdot RC1 \cdot f_{pi}}.$$

7. Уточненное значение RC2.

Первоначально сопротивление RC2 было выбрано равным сопротивлению RC1, исходя из соображений симметрии плеч дифференциального каскада. Его необходимо уточнить с целью моделирования напряжения смещения $U_{см}$, возникающего в ОУ из-за разбаланса дифференциального каскада. Напряжение $U_{см}$ есть приведенное ко входу напряжение ΔU на выходе дифференциального каскада из-за различия в сопротивлениях RC1 и RC2.

Пусть $\delta = RC2/RC1$, тогда ΔU находится по формуле

$$\Delta U = \frac{IEE}{2} RC1 (\delta - 1)$$

Из определения соотношения для $U_{см}$, следует

$$U_{см} = \frac{\Delta U}{K_1} = \frac{IEE}{2K_1} RC1 (\delta - 1), \quad \text{откуда}$$

$$\delta = \frac{2K_1 U_{см}}{(IEE \cdot RC1)} + 1$$

Расчетная формула для определения уточненного значения RC2 имеет вид

$$RC2 = RC1 \left(1 + \frac{2K_1 U_{см}}{(IEE + RC1)} \right)$$

8. Напряжение источников VC и VE.

Для моделирования эффекта ограничения выходного сигнала по уровню $U_{вых}$ выход ОУ в схеме макромодели соединен с полюсами двуполярного источника питания через диоды D3, D4 и источники постоянного напряжения VC и VE. При появлении сигнала на выходе ОУ любой полярности со значением $U_{вых}$, открывается соответствующий диод и это значение напряжения фиксируется при дальнейшем повышении входного сигнала. Принимая падение напряжения на открытом диоде равным 0,7В, расчетная формула для определения величин VC и VE имеет вид

$$VC = VE = U_{пп} - U_{вых} - 0,7.$$

Содержание отчёта

Отчёт должен содержать:

- цель работы;
- задачи экспериментов;
- рассчитанные параметры;

- схему и условия проведения экспериментов;
- таблицы результатов экспериментов и их обработки;
- графики передаточных и выходных характеристик транзистора;
- выводы.

Список литературы

Основная литература

1. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств : учеб. пособие для вузов / ред. О. В. Алексеев. - Москва : Высш. шк., 2000. - 479 с.

Дополнительная литература

2. Ф. Г. Зограф Основы компьютерного проектирования и моделирования РЭС : Лабораторный практикум // <http://ikit.edu.sfu-kras.ru/files/18/lab.pdf>

Программное обеспечение

1. Операционная система Windows.
2. MicroCAP (Student version)
3. Electronic Workbench