

Министерство образования Российской Федерации

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

**Кафедра компьютерных систем в управлении
и проектировании (КСУП)**

М.В. Черкашин

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ

Часть 2

Учебное методическое пособие

2002

Корректор: Красовская Е.Н.

Черкашин М.В.

Моделирование систем: Учебное методическое пособие: В 2-х ч. – Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования, 2002. – Часть 2. – 144 с.

© Черкашин М.В., 2002
© Томский межвузовский центр
дистанционного образования, 2002

СОДЕРЖАНИЕ

1 Введение	6
1.1 Порядок изучения дисциплины.....	6
1.2 Цель преподавания дисциплины	6
1.3 Задачи изучения дисциплины.....	6
1.4 Перечень дисциплин, усвоение которых необходимо для изучения данной дисциплины:	6
2 Программа лекционного курса	7
2.1 Введение. Понятие математической модели	7
2.2 Классификация и методы получения ММ.....	7
2.3 Моделирование на макроуровне	7
2.4 Топологические основы формирования моделей РЭС	7
2.5 Моделирование РЭС в частотной области.....	7
2.6 Моделирование РЭС по постоянному току	8
2.7 Расчет переходных процессов в РЭС.....	8
2.8 Математические модели нелинейных РЭС	8
3 Учебно-методические материалы по дисциплине	9
4 Лабораторные работы.....	10
4.1 Общие указания	10
5 Общие сведения о пакете MicroCAP-3	11
5.1 Функциональные возможности пакета MicroCAP	11
5.2 Состав и конфигурация пакета.....	11
5.3 Работа с программой MicroCap-3.....	13
5.3.1 Запуск программы.....	13
5.3.2 Пользовательский интерфейс программы.....	13
5.3.3 Функциональные клавиши управления.....	14
5.3.4 Организация горизонтального меню	15
5.3.5 Окно команд редактора чертежа схемы и окно компонентов ...	18
5.3.6 Порядок ввода схемы и ее запись на диск	19
5.4 Библиотеки компонентов	24
5.4.1 Библиотека простых элементов и меток (Library labels).....	24
5.4.2 Библиотека устройств (Library devices).....	25
5.4.3 Операционные усилители (OPAMP).....	27
5.4.4 Диоды (Diodes).....	27
5.4.5 Биполярные транзисторы (Bipolar)	28
5.4.6 Полевые МОП-транзисторы (MOSFET).....	31
5.4.7 Полевые транзисторы с управляющим переходом (JFETs)	34
5.4.8 Источники сигналов	35
5.4.9 Источники сигнала с заданной функциональной зависимостью.....	38
5.5 Согласование математической модели и изображения компонентов .	39
5.6 Параметры системы (Options).....	41

5.6.1	Определение цветовой схемы (Options/1:Palette).....	41
5.6.2	Параметры интерфейса (Options/2:Preferences).....	42
5.6.3	Глобальные параметры системы (Options/3:Global setting).....	42
5.6.4	Вывод схемы на графопостроитель (Options/4:Plotter).....	44
5.6.5	Выбор типа модели транзистора (Options/5:Model).....	44
5.6.6	Выходные параметры (Options/6:Output).....	45
5.7	Выполнение моделирования.....	46
5.7.1	Анализ переходных процессов (Run/1:Transient).....	47
5.7.2	Моделирование частотных характеристик (Run/2:AC).....	55
5.7.3	Анализ по постоянному току (Run/3:DC).....	61
5.7.4	Спектральный анализ Фурье (команда меню Run/4:Fourier).....	64
5.7.5	Статистический анализ Монте-Карло.....	65
5.8	Заключение.....	69
6	Лабораторная работа № 1. Анализ усилительного каскада с помощью пакета MicroCAP.....	70
6.1	Запуск программы.....	70
6.2	Порядок ввода схемы и ее запись на диск.....	70
6.3	Моделирование схемы.....	74
6.3.1	Анализ по переменному току (режим Run/2:AC).....	75
6.3.2	Анализ переходных процессов (режим Run/1:Transient).....	81
6.4	Задание к лабораторной работе.....	88
7	Лабораторная работа № 2. Моделирование радиоэлектронного устройства с помощью программы MicroCAP-3.....	92
8	Лабораторная работа № 3. Расчет и моделирование каскада с ОЭ по постоянному току.....	98
8.1	Введение.....	98
8.2	Классификация усилителей и их основные характеристики.....	99
8.3	Классы усиления.....	102
8.4	Расчет каскада по постоянному току.....	104
8.4.1	Статические вольтамперные характеристики биполярного транзистора в схеме включения с ОЭ.....	104
8.4.2	Анализ усилительного каскада по постоянному току. Выбор рабочей точки транзистора.....	106
8.4.3	Динамические характеристики АЭ. Энергетические показатели каскада.....	108
8.4.4	Влияние температуры на характеристики транзистора.....	110
8.4.5	Схемы цепей термостабилизации электрического режима транзисторов.....	112
8.4.6	Выбор схемы термостабилизации режима.....	116
8.5	Расчет передаточных функций цепей по постоянному току (режим DC Analysis).....	117
8.5.1	Задание параметров моделирования и способов отображения результатов (диалоговые окна DC Analysis Limits и DC Options) ..	118

8.5.2	Получение статических ВАХ транзистора.....	121
8.6	Задание к лабораторной работе.....	125
8.7	Пример выполнения лабораторной работы № 3.....	127
8.7.1	Постановка задачи	127
8.7.2	Получение статических ВАХ транзистора.....	127
8.7.3	Расчет режима каскада по постоянному току.....	127
8.7.3	Расчет схем стабилизации положения рабочей точки.....	130
8.7.4	Моделирование каскада с ОЭ.....	131
8.7.5	Выводы по лабораторной работе	135
9	Курсовое проектирование	136
9.1	Вводные указания	136
9.2	Общие требования к содержанию пояснительной записки курсовых проектов по моделированию РЭС	137
9.3	Указания к оформлению ПЗ:	138
	Приложения	139

1 ВВЕДЕНИЕ

1.1 Порядок изучения дисциплины

В ходе изучения дисциплины «Моделирование систем» предусматривается изучение лекционного материала, выполнение компьютерной контрольной работы и трех лабораторных работ. В 9 семестре по результатам изучения дисциплины сдается компьютерный экзамен. В 9 семестре выполняется курсовая работа.

1.2 Цель преподавания дисциплины

Цель курса состоит в изучении общих принципов моделирования и методов построения математических моделей технических объектов в САПР, методов и алгоритмов анализа радиоэлектронных средств и устройств (РЭС), современных средств моделирования и проектирования электронных устройств.

1.3 Задачи изучения дисциплины

В результате изучения дисциплины студенты должны:

- ✓ знать теоретические основы построения математических моделей объектов проектирования в САПР, методов и алгоритмов анализа;
- ✓ уметь получать математические модели различных радиоэлектронных устройств, разрабатывать алгоритмы и программы моделирования и проектирования РЭС;
- ✓ иметь навыки автоматизированного моделирования и проектирования РЭС с помощью специализированных пакетов программ; решения задач моделирования с помощью современных математических пакетов.

1.4 Перечень дисциплин, усвоение которых необходимо для изучения данной дисциплины:

- общеобразовательные дисциплины (высшая математика, физика);
- алгоритмические языки и программирование;
- технологии разработки программного обеспечения;
- лингвистическое обеспечение САПР;
- вычислительные методы;
- электротехника и электроника, схемотехника;
- управление техническими системами.

2 ПРОГРАММА ЛЕКЦИОННОГО КУРСА

2.1 Введение. Понятие математической модели

Предмет дисциплины. Определение проектирования. Принципы проектирования. Блочный-иерархический подход, аспекты и уровни проектирования. Этапы проектирования РЭС. Итерационное проектирование.

Понятие о математических моделях (ММ) технических объектов. Классификация параметров ММ. Типовые проектные процедуры: анализ и синтез. Типичная последовательность проектных процедур. Место моделирования в проектировании.

САПР. Состав и назначение САПР. Основные принципы построения.

2.2 Классификация и методы получения ММ

Иерархия и классификация ММ. Требования к ММ. Особенность математического аппарата для моделирования на микро-, макро- и метауровнях.

Методы получения ММ элементов РЭС. Идентификация структуры и параметров ММ.

2.3 Моделирование на макроуровне

Понятие фазовых переменных. Компонентные и топологические уравнения. Модели простых элементов РЭС. Составление общей ММ сложного радиоэлектронного устройства.

Основные положения операторного метода. Применение операторного метода для решения дифференциально-интегральных уравнений. Использование преобразования Лапласа для анализа радиоэлектронных устройств.

2.4 Топологические основы формирования моделей РЭС

Общие методы формирования системы уравнений ММ РЭС. Основные положения теории графов. Матрица инцидентности. Матрицы главных контуров и главных сечений. Фундаментальные соотношения между матрицами главных сечений и контуров.

2.5 Моделирование РЭС в частотной области

Основные задачи моделирования РЭС. Формирование ММ на основе обобщенного метода узловых потенциалов.

Линейные модели диода, биполярного и полевого транзисторов, операционного усилителя. Эквивалентные схемы сложных РЭС.

Алгоритм анализа линейных цепей в частотной области. Алгоритм формирования ММ. Информационные массивы. Методы решения систем линейных алгебраических уравнений. Метод LU-разложения. Решение СЛАУ с разреженными матрицами.

2.6 Моделирование РЭС по постоянному току

Анализ статических режимов. Формирование нелинейных математических моделей РЭС. Алгоритм Ньютона-Рафсона для решения нелинейных алгебраических систем уравнений. Модификация Бройдена.

2.7 Расчет переходных процессов в РЭС

Основные положения. Формирование системы уравнений ММ РЭС на основе табличного и узлового методов. Анализ переходных процессов. Метод переменных состояния. Метод дискретных элементов.

Методы численного интегрирования обыкновенных дифференциальных уравнений. Явные и неявные методы. Понятие устойчивости методов численного интегрирования. Методы Эйлера и трапеций.

Расчет переходных процессов в линейных электрических цепях. Передаточные функции цепей. Численное обратное преобразование Лапласа.

2.8 Математические модели нелинейных РЭС

Нелинейные модели полупроводниковых приборов. Модель Эберса-Молла диода. Нелинейные модели биполярного транзистора. Нелинейная модель полевого транзистора. Модели цифровых и аналоговых микросхем, макромоделю операционного усилителя.

3 УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Основная литература

1. Корячко В.П., Курейчик В.М., Норенков И.П. Теоретические основы САПР. - М.: Энергоиздат, 1987. - 400 с.
2. Автоматизация схемотехнического проектирования / Под ред. В.Н. Ильина. - М.: Радио и связь, 1987. - 368 с.
3. Влах И., Сингхал К. Машинные методы анализа и проектирования электронных схем. - М.: Радио и связь, 1988. - 560 с.
4. Фидлер Дж. К., Найтингейл К. Машинное проектирование электронных схем. - М.: Высшая школа, 1985. - 216 с.
5. Турчак Л.И. Основы численных методов. - М.: Наука, 1987. - 320 с.
6. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств / Под ред. О.В. Алексеева. - М.: ВШ, 2000. - 479 с.

Дополнительная литература

7. Автоматизация поискового конструирования / Под ред. А.И. Половинкина. - М.: Радио и связь, 1981. - 344 с.
8. Чуа Л.О., Пен-Мин Лин. Машинный анализ электронных схем. - М.: Энергия, 1980. - 638 с.
9. Диалоговые системы схемотехнического проектирования / Под В.И. Анисимова. - М.: Радио и связь, 1988. - 288 с.
10. Калахан Д. Методы машинного расчета электронных схем. - М.: Мир, 1970. - 344 с.
11. Калабеков Б.А., Лapidус В.Ю., Малафеев В.М. Методы автоматизированного расчета электронных схем в технике связи. - М.: Радио и связь, 1990. - 272 с.
12. Нерретер В. Расчет электрических цепей на персональных ЭВМ. - М.: Мир, 1991. - 224 с.

Методические указания и прочие учебно-методические материалы

13. Разевиг В.Д. Моделирование аналоговых электронных устройств на персональных ЭВМ. - М.: Изд-во МЭИ, 1993. - 152 с.
14. Разевиг В.Д. Применение программ PCAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ: в 4 выпусках. - М.: Радио и связь, 1992. - Вып. 2: Модели компонентов аналоговых устройств. - 64 с.
15. Разевиг В.Д. Система схемотехнического моделирования и проектирования печатных плат Design Center (PSpice). - М.: СК Пресс, 1996. - 270 с.
16. Разевиг В.Д. Система схемотехнического моделирования MicroCAP V - М.: Изд-во СОЛОН, 1997. - 273 с.

4 ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

4.1 Общие указания

Целью лабораторных работ является закрепление на практике теоретических знаний, полученных в ходе изучения дисциплины «Моделирование систем», изучение основных принципов моделирования радиоэлектронных устройств, а также освоение программы схемотехнического моделирования MicroCAP.

Курс лабораторных работ начинается с изучения самой программы MicroCAP на примере моделирования усилительного каскада на биполярном транзисторе. Вторая работа посвящена моделированию отдельного функционального блока. Третья лабораторная работа, помимо моделирования, включает в себя расчетную часть, которую студенты должны предварительно выполнить.

Данное методическое пособие также содержит краткое описание программы MicroCAP-3, которая рекомендуется студентам для выполнения данных лабораторных работ. Однако студенты могут использовать и более свежие версии MicroCAP, доступные для скачивания на сайте фирмы Spectrum Software (www.spectrum-soft.com). Хотя эти версии MicroCAP имеют ряд ограничений (так называемые student-версии), они вполне подходят для выполнения лабораторных работ.

По результатам выполнения каждой работы оформляется отчет, который должен содержать:

- вариант и формулировку задания к лабораторной работе;
- результаты моделирования устройства в виде графиков и необходимых пояснений;
- выводы о проделанной работе.

Отчет оформляется согласно требованиям настоящего пособия в печатном, письменном или электронном виде с применением редактора MS Word и присылается на проверку в ТМЦ ДО ТУСУР. На титульном листе отчета студент должен указать свои ФИО, идентификатор, пароль и номер варианта.

Вариант задания к лабораторным работам определяется по формуле

$$N_v = (N \cdot k) \operatorname{div} 100,$$

где N_v – искомый номер варианта;

N – общее число возможных вариантов;

k – две последних цифры пароля (число от 00 до 99);

div – операция целочисленного деления.

Замечание: для вставки графиков из системы MicroCAP в отчет можно использовать функцию Windows для копирования экрана в буфер («горячие» клавиши Alt+PrintScr). Затем картинка из буфера обмена вставляется либо непосредственно в отчет, либо в программу для работы с растровой графикой (PaintBrush или PhotoShop) для корректировки и сохранения в виде графического файла. Для лучшего восприятия при печати рекомендуется преобразовать получаемые графики в черно-белый цвет.

5 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПАКЕТЕ MICROCAP-3

5.1 Функциональные возможности пакета MicroCAP

Пакет программ MicroCap-3 (Microcomputer Circuit Analysis Program) версии 2.01, разработанный фирмой Spectrum Software, предназначен для анализа аналоговых электронных устройств и обладает следующими функциональными возможностями:

- позволяет проводить анализ РЭУ по постоянному току, расчет переходных процессов при воздействии на цепь сигналов различной формы, расчет частотных характеристик в режиме малого сигнала;
- предусмотрен одновременный анализ нескольких схем, многовариантный анализ, расчет шумовых характеристик цепей, статистический анализ Монте-Карло;
- возможно включение моделей устройств пользователя в состав библиотек компонентов, в частности, электрических макромоделей цифровых интегральных схем;
- возможно использование графического редактора изображений компонентов ShapeEditor (sh.exe);
- предусмотрен вывод на графопостроитель;
- возможна трансляция библиотек компонентов и схем в формат программ MicroCap-2, PSpice 4.x-5.x;
- улучшен пользовательский интерфейс в программе за счет введения многооконного диалога и использования манипулятора типа «мышь», введено управление цветовой палитрой.

5.2 Состав и конфигурация пакета

Программе MicroCap-3 требуется доступная область ОЗУ не менее 570 КБайт и около 1,5 МБайт свободного пространства на жестком диске.

Помимо основной программы анализа mc3, в состав пакета MicroCAP-3 входят следующие утилиты:

Per – предназначена для оценки параметров математических моделей диодов, биполярных, полевых, МОП-транзисторов и операционных усилителей по измеренным ВАХ и справочным данным;

ShapeEditor – векторный графический редактор, предназначенный для создания и редактирования изображений компонентов;

Convertf, Convertl – конвертеры файлов схем и библиотек программы MicroCap-2 в формат программы MicroCap-3;

Tospice – конвертор файлов схем из MicroCAP-3 в формат программы PSpice.

Версия 2.01 пакета программ MicroCap-3 имеет следующую структуру:

- а) в основном каталоге находятся основные файлы:
mc3.exe – программа MicroCap-3;

mc3.dat, per.dat – файлы конфигурации программ MicroCAP-3 и Per;
sh.exe – графический редактор изображений компонентов;
per.exe – программа оценки параметров математических моделей полупроводниковых приборов и операционных усилителей;
covertf.exe, convertl.exe – программы преобразования файлов схем и библиотек программы MicroCap-2 в формат программы MicroCap-3;
tospice.exe – конвертор описания схемы в формат входного языка программы PSpice;
qbherc.com – файл настройки монитора типа Hercules;
б) подкаталог SYS содержит системные файлы пакета:
bitmaps.mc3 – описание битовых карт адаптеров CGA, EGA, Hercules и VGA;
compedit.mc3 – системный модуль редактора компонентов;
logo.mc3 – системный модуль пакета;
resource.mc3 – модуль с текстовыми переменными для программы MicroCap-3;
resource.per – модуль с текстовыми переменными для программы Per;
shapedit.mc3 – системный модуль редактора формы компонентов;
font.mc3 – модуль шрифтов пакета;
help.mc3 – модуль интерактивной справки программы MicroCap-3;
help.per – модуль интерактивной справки программы Per;
resstrpt.mc3 – вспомогательный модуль;
values.per – файл установок программы Per;
readme.per – файл с текстовой информацией по использованию программы Per;
в) в подкаталоге DATA находятся файлы:
*.cir – схемы цепей в формате MicroCAP-3;
*.tlm, *.alm, *.dlm – пределы изменения переменных в режимах анализа переходных характеристик, частотных характеристик и анализа по постоянному току соответственно;
*.tno, *.ano, *.dno – результаты расчетов (в виде таблиц) переходных процессов, частотных характеристик и режима по постоянному току соответственно;
*.fno – результат спектрального анализа по Фурье;
*.usr – дискретные отсчеты выборок сигнала (для спектрального анализа по Фурье);
*.tmc, *.amc, *.dmc – результаты статистического анализа по методу Монте-Карло переходных процессов, частотных характеристик и режима по постоянному току соответственно;
std.als, std.bjt, ... – стандартная библиотека компонентов программы MicroCap-3 (пользователь имеет возможность создавать собственные библиотеки и переименовывать существующие);

*.per, *.sur – библиотека компонентов программы Per;
 *.plt – файл для вывода результатов на графопостроитель;
 *.tsa, *.asa, *.dsa – рабочие файлы программы MicroCAP-3 для вывода результатов анализа переходных процессов, частотных характеристик и режима по постоянному току соответственно.

5.3 Работа с программой MicroCap-3

5.3.1 Запуск программы

Перед запуском программы MicroCap-3, утилит ShapeEditor и Per необходимо указать пути доступа к файлам схем *.cir и системным модулям в файлах конфигурации mc3.dat и per.dat, а также имя используемой библиотеки компонентов.

Для запуска программы MicroCap-3 с указанием типа графического адаптера необходимо в командной строке ввести:

```
mc3 /<адаптер>,
```

где <адаптер> - это параметр, который принимает значения C, E или V для подключения адаптера CGA, EGA или VGA. По умолчанию используется адаптер VGA.

При вызове программы можно сразу указать имя файла схемы:

```
mc3 <имя файла схемы>.cir
```

5.3.2 Пользовательский интерфейс программы

Внешний вид экрана редактора схемы представлен на рис. 5.1. Экран дисплея при работе с программой MicroCap-3 в режиме редактора схем разбит на три основных окна. Главное окно (1), в котором изображается чертеж схемы, выводятся результаты расчетов и другая информация, находится в центре экрана. Слева от него располагается окно команд графического редактора (3), справа – окно компонентов схемы (2). В верхней части экрана размещается горизонтальная строка-меню (4). В заголовке главного окна (5) находится название анализируемой цепи (имя файла схемы). Кроме того, в заголовке каждого рабочего окна присутствуют, помимо названия, кнопки управления окном в виде квадратиков (6)-(9). Закрытие активного окна осуществляется подведением курсора к «пустому» квадратику (6) в левом верхнем углу и нажатием левой кнопки манипулятора «мышь» (в дальнейшем просто мышь) или клавишей <Esc>.

Изменение размеров активного окна осуществляется подведением курсора к квадратику в правом верхнем углу (9) и нажатием левой кнопки мыши. Удерживая левую клавишу нажатой и перемещая мышь, можно установить требуемый размер окна и зафиксировать его, отпустив кнопку мыши или нажав клавишу <Enter>. Вообще, в программе MicroCap-3 используется соглашение, по которому нажатие левой кнопки мыши соответствует нажатию клавиши <Enter> на клавиатуре.

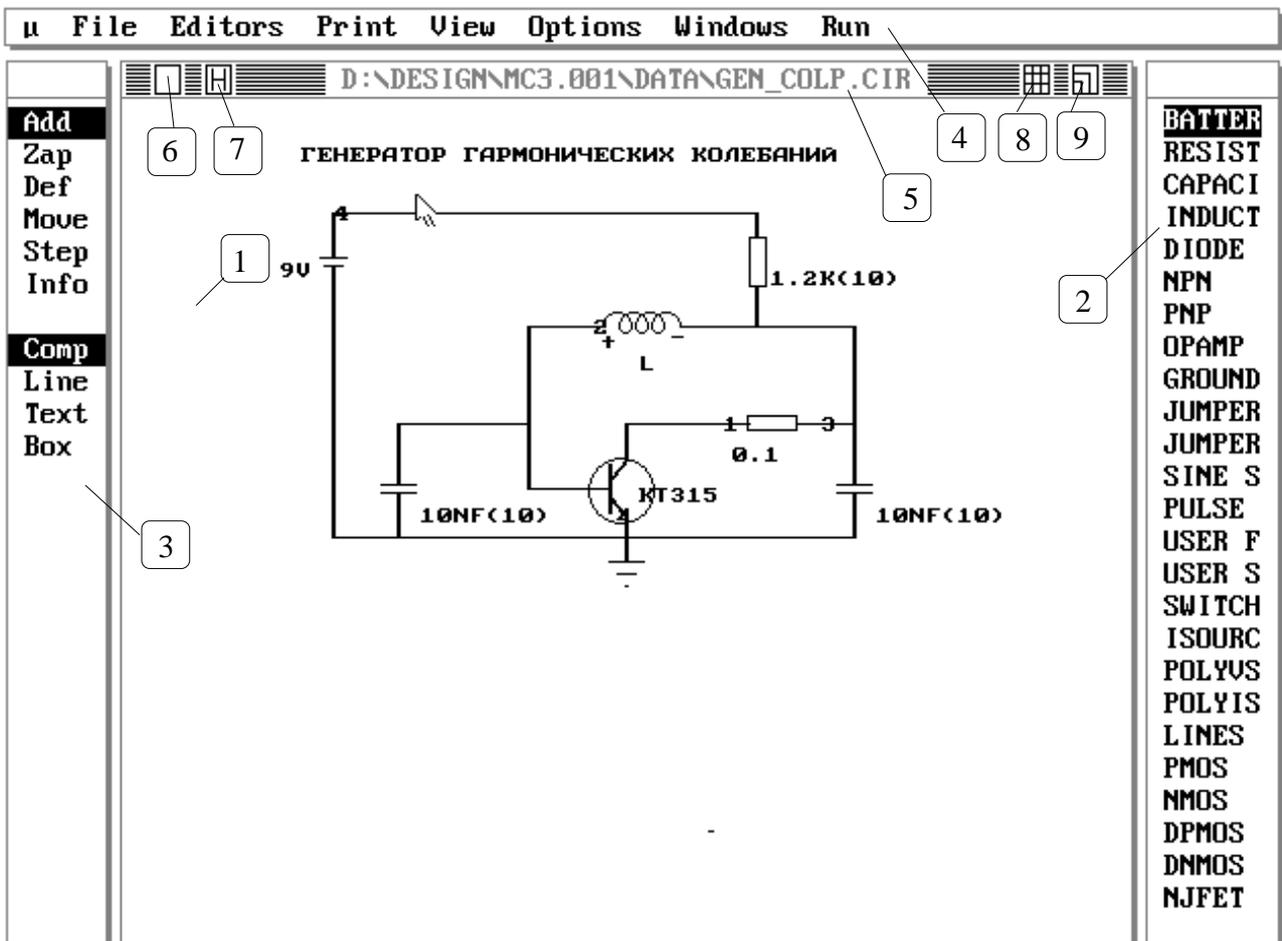


Рисунок 5.1 – Интерфейс программы MicroCAP-3 в режиме редактора схемы

На каждом этапе работы с программой можно вывести на экран текст помощи по активному окну, нажав клавишу <F1> или подведя курсор мыши к квадратику с символом H (7) и нажав левую кнопку мыши.

Кнопка (8) заголовка активного окна редактора схемы служит для перемещения чертежа схемы внутри окна, если он не помещается целиком на экране монитора.

5.3.3 Функциональные клавиши управления

Управление окнами осуществляется с помощью следующих функциональных клавиш:

F1 – вывод экранной помощи для текущего окна;

F2 – начало анализа в режиме Run;

F3 – выход из режима анализа в редактор схемы или в DOS из основной программы;

F4 – переключение между окнами с чертежами схем (всего возможно 4 окна), окном команд редактора и окном компонентов;

F5 – переключение размера активного окна между максимальным (на весь экран) и последним заданным размером;

F6 – переключение между окном с чертежом схемы (1) и окном компонентов (2);

F7 – переключение между окном с чертежом схемы (1) и окном команд графического редактора (3);

F8 – синхронизация режима электронного «курсора» для считывания данных с графиков (при анализе);

F9 – активизация диалогового окна Limits для задания параметров анализа (при анализе) или переключение масштабов активного окна в режиме редактора схемы;

F10 – активация диалогового окна Options для задания опций анализа (при анализе);

F11 – активизация диалогового окна Stepping задания параметров для многовариантного анализа;

F12 – активизация диалогового окна Monitor для определения переменных при анализе переходных процессов;

Alt-F1 – вывод на принтер графической копии экрана.

Для перемещения чертежа схемы по экрану необходимо нажать клавишу <Scroll-Lock> и клавишами управления курсором выбрать требуемое положение схемы на экране.

Ввод и редактирование схемы в окне редактора производится с использованием следующих «горячих» клавиш:

<End> - перемещение курсора в нижний правый угол окна;

<Home> - перемещение курсора в левый верхний угол окна редактора;

<Shift-Backspace> - отмена последнего действия.

5.3.4 Организация горизонтального меню

При запуске программы на экране дисплея появляется горизонтальная строка-меню:

μ File Editors Print View Options Windows Run

1:Micro-Cap III	
2:Notes	
3:Calculator	
4:Help	
5:Quit	F3

Команды горизонтальной строки-меню:

μ - системное меню (вызывается также нажатием комбинации клавиш <Alt-U>). Содержит следующие команды:

1:MicroCap-III – выдача информации о пакете MicroCAP-3 (наименование, номер версии, имена разработчиков, дата создания программы, тип используемого адаптера и др.);

2:Notes – вызов «блокнота» для ввода, просмотра и редактирования текстовых комментариев, которые хранятся в файле *.cir одновременно с изображением схемы;

3:Calculator – вызов встроенного в пакет калькулятора;

4:Help (F1) – выдача общей справочной информации о программе;

5:Quit (F3) - выход из программы в DOS.

1:Create new circuit
2:Load circuit
3:Unload circuit
4:Save circuit
5:Erase circuit
6:Merge circuit
7:Load library
8:Save library as
9:Change data path

File – меню для работы с файлами схем и библиотек:

- 1:Create new circuit – создать новую схему;
- 2:Load circuit - загрузить схему с жесткого диска;
- 3:Unload circuit - выгрузить схему из активного окна редактора;
- 4:Save circuit - сохранить схему на диске;
- 5:Erase circuit - удалить схему с диска (файл уничтожается);

6:Merge circuit – добавление в чертеж в активном окне чертежа схемы из файла на диске; начало координат добавляемой схемы совмещается с положением курсора на экране;

- 7:Load library - загрузить новую библиотеку компонентов;
- 8:Save library as - сохранить текущую библиотеку под другим именем;
- 9:Change data path - изменить путь доступа к файлам схем и библиотеки.

1:Library devices
2:Library labels
3:Library functions

Editor – меню для редактирования библиотек компонентов:

1:Library device – вызов диалогового окна библиотеки устройств (источников сигналов, полупроводниковых приборов и операционных усилителей);

2:Library labels – вызов окна библиотеки простых компонентов (резисторов, индуктивностей, конденсаторов и пр.);

3:Library functions – вызов окна библиотеки функциональных источников сигналов, форма сигнала которых определяется функцией от времени.

1:Graphic: circuit
2:Graphic: front window
3:Graphic: Screen
4:Text: Netlist

Print – печать схемы и результатов моделирования на принтере:

1:Graphic: circuit – вывод чертежа схемы на принтер;

2:Graphic: front window (<Alt-F1>) – вывод на принтер содержимого активного окна;

3:Graphic: screen – печать содержимого экрана дисплея;

4:Text netlist – печать параметров схемы в текстовой форме.

1:Capacity used	
✓2:Scale 1:1	
3:Scale 2:1	
4:Scale 4:1	
.....	
✓5:Show comp text	
✓6:Show grid text	
7:Show node numbers	
.....	
8:Search	
9:Repeat search F8	

View – вызов меню для управления изображением схемы в окне редактора:

1:Capacity used – вывод информации о количестве компонентов схемы и строк текста в активном окне редактора;

2:Scale 1:1 – установка масштаба чертежа схемы 1:1 (по умолчанию);

3:Scale 2:1 – установка масштаба чертежа схемы 2:1;

4:Scale 4:1 – установка масштаба чертежа схемы 4:1;

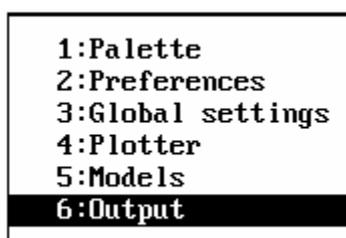
5:Show comp text – на чертеже схемы выводить текстовые метки компонентов;

6:Show grid text – на чертеже схемы выводить текст, введенный пользователем по директиве TEXT;

7:Show node numbers – показать/скрыть номера узлов схемы;

8:Search – вызов диалогового окна для поиска необходимого объекта на чертеже большой схемы;

9:Repeat search (F8) - повторить поиск по заданным условиям поиска.



Options – меню для задания глобальных па-

раметров системы:

1:Palette – вызов диалогового окна для определения цветовой палитры;

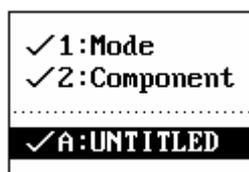
2:Preferences – задание параметров интерфейса пакета;

3:Global settings – задание глобальных параметров вычислительных алгоритмов;

4:Plotter – вывод данных на графопостроитель;

5:Models – выбор типа модели транзистора;

6:Output – диалоговое окно выбора устройства для вывода данных (принтер, файл или дисплей) и установки типа и порта подключения принтера.

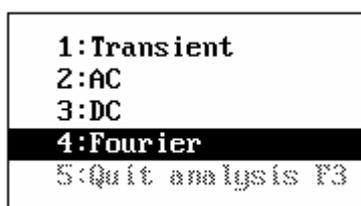


Windows – меню для управления окнами программы:

1:Mode – скрыть/показать окно команд графического редактора;

2:Component – скрыть/показать окно компонентов;

A:< имя схемы > – скрыть/показать окно с чертежом схемы.



Run (F2) – меню для запуска режима анализа

схемы:

1:Transient – расчет переходных процессов;

2:AC – расчет по переменному току (малосигнальный частотный анализ);

3:DC – расчет по постоянному току;

4:Fourier - спектральный анализ по Фурье;

5:Quit analysis (F3) - выход из режима анализа в редактор чертежа схемы.

После запуска режима анализа в горизонтальном меню появляются дополнительные пункты с командами выбранного режима анализа и установками для статистического анализа Monte-Carlo.

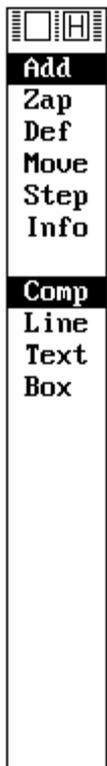
Выбор того или иного пункта горизонтального меню может быть осуществлен двумя способами: с помощью мыши или с использованием клавиатуры. Активизация команд меню мышью выполняется подведением

курсора к нужному пункту главного меню и нажатием левой кнопки мыши. Затем, не отпуская кнопку, курсор мыши подводится к требуемому подпункту (команде) выпадающего меню и левая кнопка отпускается, фиксируя выполнение выбранной команды. Выбор команды с помощью клавиатуры осуществляется нажатием клавиши, соответствующей первому символу из названия пункта горизонтального меню. Далее, с помощью клавиш управления курсором, указатель перемещается к нужной команде выпадающего меню и нажимается клавиша <Enter>. Кроме того, выбор команды выпадающего меню может быть произведен нажатием цифры, соответствующей тому или иному подпункту.

Если команда выпадающего меню «затемнена», то она не может быть выполнена в данный момент. Большинство команд горизонтального меню активны только в режиме редактора чертежа схемы (например, команды пункта **File** или **View**) и не могут быть использованы при анализе.

5.3.5 Окно команд редактора чертежа схемы и окно компонентов

Окно команд редактора (3) (см. рис. 5.1) находится слева от основного окна, в котором рисуется чертеж схемы. Оно содержит две группы пунктов: группу команд (вверху) и группу объектов, к которым эти команды можно применить (внизу). Данное окно доступно только в режиме редактирования схемы.



Выбор необходимой команды и/или объекта осуществляется с помощью левой кнопки мыши. Также можно использовать клавиши управления курсором ↑, ↓ и клавиши PgUp, PgDn для перемещения по пунктам окна команд.

Группа команд (верхняя группа) позволяет определить действие, которое необходимо выполнить с объектом:

Add – добавляет выбранный объект в окно редактора схемы на месте курсора;

Zap – стирает указанный объект на месте курсора;

Def – переопределяет свойства выбранного объекта или определяет прямоугольную область окна редактора типа Box;

Move – перемещает объект в окне редактора схемы или фрагмент схемы, определенный как Box;

Step – копирует фрагмент схемы, определенный как Box,

Info – отображает информацию об объекте, который описан в текущей библиотеке (вызывается диалоговое окно для просмотра и редактирования свойств выбранного объекта, если он содержится в библиотеке).

Возможные объекты (нижняя группа):

Comp – компоненты схемы из окна компонентов (2);

Line – проводник;

Text – строка текста;

Box – прямоугольная область окна редактора.

Окно редактора (1) используется для создания чертежа схемы. Чертеж схемы создается добавлением и соединением между собой элементов схемы, перечисленных в окне компонентов (2). Для соединения элементов схемы используются проводники (линии) и/или набор перемычек SHORT и JUMPER из окна компонентов.

Текст добавляется в окно редактора по команде Add-Text.

Фрагмент экрана Box определяют с помощью левой и правой клавиш мыши по команде Def-Box. Левый верхний угол прямоугольной области задается левой кнопкой, а правый нижний – правой кнопкой мыши.

Область Box может быть перемещена, скопирована или удалена с применением соответствующих команд к объекту Box (Move-Box, Step-Box, Zap-Box).

Текст, элемент схемы (компонент) или линию также можно переместить выбором команды Move или удалить по команде Zap.

В режиме редактирования чертежа схемы определены следующие «горячие» клавиши:

<A> – Add – выдает диалоговое окно для ввода имени компонента или текста (необходимо ввести полное имя компонента из окна компонентов);

<Z> – Zap – удаляет объект в позиции курсора;

<Insert> – добавляет последний выбранный объект без запроса имени;

 – удаляет объект в позиции курсора;

<I> – Info – вызов команды Info для объекта в позиции курсора;

<D> – Def – вызов команды Def для объекта в позиции курсора или определение фрагмента Box.

При добавлении и изменении позиции элементов схемы используйте пробел и клавиши перемещения курсора для выбора нужной ориентации и перемещения объекта по экрану. Нажатие клавиши <Enter> фиксирует текущее положение элемента в окне редактора.

5.3.6 Порядок ввода схемы и ее запись на диск

Перед началом работы со схемой пользователь должен указать путь доступа к файлам схемы и текущей библиотеки. Для этого в строке меню выбирается пункт **File/9:Change data path**. В ответ на активизацию данного пункта меню появляется окно, в котором необходимо указать нужный каталог и нажать клавишу <Enter> или подвести указатель мыши к требуемому каталогу и сделать его текущим командой 1:Change. В случае неправильного ввода имеется возможность отмены неверного пути командой 2:Done. По умолчанию устанавливается путь, указанный в файле конфигурации mc3.dat (Например: C:\MC3\DATA).

Если необходимо загрузить файл, уже существующий на диске, то необходимо выбрать пункт **File/2:Load circuit**. В появившемся окне необходимо выбрать имя нужного файла схемы из списка файлов текущего каталога и либо загрузить его командой 1:Load, либо отменить выбор командой 2:Cancel. В окне загрузки приведена информация о количестве файлов схем в текущем каталоге и их размер.

Если создается новая схема, то необходимо выбрать пункт **File/1:Create new circuit**. При этом окно редактора очищается, и в заголовок его выводится служебное имя Untitled.cir, которое новый файл получает по умолчанию. После этого можно приступить к построению чертежа схемы.

Чертеж схемы создается добавлением и соединением между собой элементов схемы, перечисленных в окне компонентов (2). Для соединения элементов схемы используются проводники (линии) и/или набор переключек SHORT и JUMPER из окна компонентов.

Ввести элемент схемы можно двумя способами: используя манипулятор мышь или с помощью клавиатуры. Добавление элемента в схему с помощью мыши осуществляется следующим образом. Выбирается команда Add-Comp в окне команд (3). В окне компонентов (2) нажимается левая кнопка мыши для активизации этого окна, а затем, путем перемещения курсора по списку компонентов, производится выбор нужного элемента. Вывод его изображения в окне редактора (1) осуществляется нажатием левой клавиши мыши в нужном месте чертежа. Удерживая левую клавишу мыши нажатой, можно перемещать изображение компонента по экрану. Для поворота изображения компонента на 90 градусов необходимо, не отпуская левой клавиши мыши, нажать на правую. Фиксация положения изображения элемента в окне (1) осуществляется отпусканием левой кнопки мыши.

После фиксации изображения компонента пользователь должен выбрать или задать имя (метку) для введенного элемента. Если выбранный элемент является простым компонентом, то появляется окно меток Components labels, в котором выводятся имена меток из текущей библиотеки простых компонентов Library labels (см. рис. 5.2).

Необходимо выбрать метку, которая уже существует в библиотеке, или указать новое имя для введенного элемента (новый компонент изначально не имеет параметров), выбрав служебное слово Own. В появившемся окне нужно ввести имя нового элемента в виде текстовой метки или числового параметра (для простых компонентов – номинал). Для текстовой метки надо также указать числовой параметр в библиотеке меток и простых элементов с помощью диалогового меню библиотеки, вызываемого по команде **Editors/2:Library labels**.

Если же выбранный элемент входит в состав библиотеки устройств или функций, пользователю выводится список имен компонентов выбран-

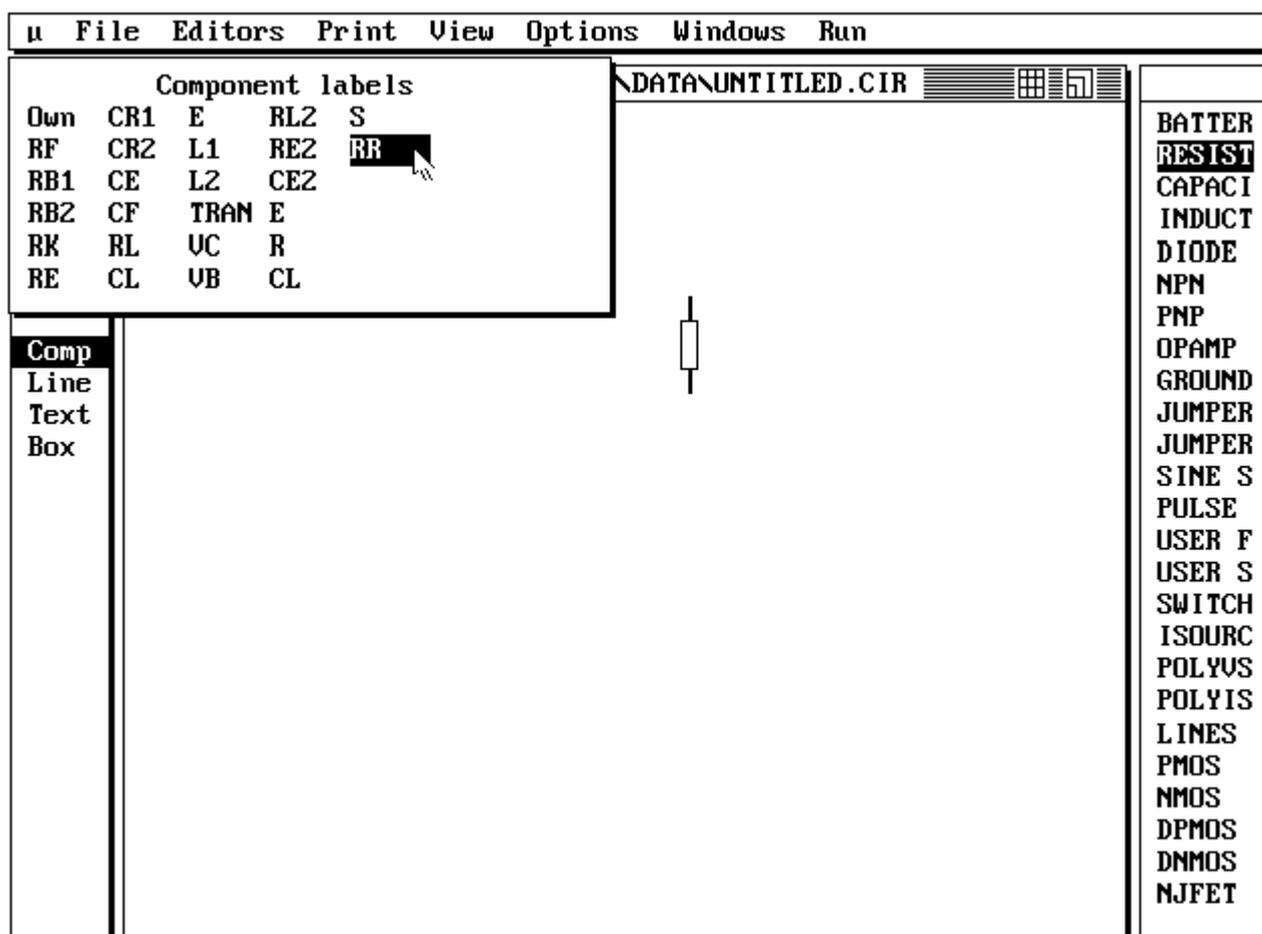


Рисунок 5.2 – Вид экрана при вводе нового элемента схемы

ного типа из текущей библиотеки. Для выбранного компонента нужно выбрать имя из этого списка.

После того как изображению элемента схемы присвоено имя или числовой параметр, автоматически подключается математическая модель данного элемента, которая заносится в общую модель анализируемой схемы.

Для облегчения выбора можно сгруппировать часто используемые компоненты в начале списка имен компонентов в окне (2). Для этого «захватите» имя требуемого компонента, нажав на левую кнопку мыши, и переместите его, не отпуская кнопки, к началу списка.

Перемещение уже существующего объекта в окне редактора осуществляется командой Move в совокупности с типом объекта (компонент (Comp), проводник (Line), текст (Text) или фрагмент чертежа (Box)) из окна команд редактора схем.

Если используется ввод чертежа схемы с клавиатуры, то необходимо с помощью клавиши <F7> перейти в окно команд, выбрать команду Add-Comp, используя клавиши <A> и <C> соответственно. Затем перейти с помощью <F7> обратно в окно компонентов. Клавишами управления курсором подвести указатель к месту, в котором будет выводиться изображение элемента, и нажать клавишу <A>. В появившемся диалоговом окне ввести имя компонента, ориентируясь на список из окна компонентов (2). Пово-

рот изображения компонента на 90 градусов производится клавишей <Space>. Перемещение изображения элемента в окне редактора осуществляется клавишами управления курсором. Для фиксации изображения компонента в нужном месте следует нажать клавишу <Enter>.

Номера узлов система проставляет автоматически при рисовании чертежа схемы. Чтобы вывести номера узлов в окне редактора, необходимо активизировать пункт меню **View/6:Show node numbers**. Любое пересечение проводников типа Line или Short считается соединением (узлом). Чтобы получить пересечение двух проводников без соединения (без узла), необходимо использовать компонент Jumper (перемычка).

Внимание !

Исследуемая цепь должна содержать не менее двух узлов, не считая «земли». Данное условие необходимо для проведения корректных расчетов при анализе схемы. Если начать анализ «незаземленной» цепи, то система выдаст сообщение: «Error ... floating components» («Ошибка ... висящие компоненты»). При этом система покажет «висящую» компоненту, которая должна быть «заземлена», либо соединена с другими элементами схемы с помощью проводников или перемычек.

Параметры компонентов могут быть числами трех форматов: числа с фиксированной точкой (1.0, 6, 12.7), числа с плавающей точкой (1E-12, 1E+3, -7.38e-6) и числа, использующие инженерную систему обозначений (23.4K, 2.232P, 10.0M). Инженерная система обозначений содержит следующие сокращения (см. табл. 5.1).

Таблица 5.1 – Инженерная система обозначений MicroCAP-3

обозначение	название	значение
F	Фемпто	1E-15
P	Пико	1E-12
N	Нано	1E-9
U	Микро	1E-6
M	Милли	1E-3
K	Кило	1E+3
MEG	Мега	1E+6
G	Гига	1E+9
T	Тера	1E+12

При внесении текста в схему выбирается пункт Text (клавиша <T>) в окне команд, курсор устанавливается в то место экрана, в которое будет вводиться текст, и нажимается левая кнопка мыши или клавиша <A> (команда Add-Text). После этого появляется диалоговое окно, в котором пользователь может ввести требуемый текст. Изменение уже существующего текста можно осуществить по команде Def-Text (клавиши <T> и <D>).

Коэффициент связи (коэффициент трансформации) двух индуктив-

ностей задается текстовой переменной *mutual*, помещаемой в произвольном месте на чертеже схемы, по формату: *mutual*: <имя_1-й_индуктивности>/<имя_2-й_индуктивности>/ <коэффициент связи>. *Например*: *MUTUAL*: L1/L2/0.98.

Удалить объект можно, выбрав режим *Zap* в окне команд и нажав левую кнопку мыши на месте удаляемого объекта. Кроме того, объект в позиции курсора можно удалить, используя клавишу <Z> или .

Перемещение объектов производится по команде *Move*, причем связи между элементами при этом разрываются. Для того чтобы переместить компонент, необходимо курсор подвести к передвигаемому объекту и нажать левую кнопку мыши. После этого передвинуть изображение элемента в требуемое место, не отпуская левой клавиши мыши. Если необходимо повернуть изображение элемента на 90 градусов, то нужно нажать еще и на правую кнопку мыши при нажатой левой. При поворотах текстовая метка компонента также поворачивается относительно изображения на 90 градусов.

Перемещение всей схемы производится клавишами управления курсором при нажатой клавише <Scroll-Lock> либо с помощью клавиш *Home*, *End*, *PgUp*, *PgDown*.

Получение информации об объекте производится по команде *Info*. Для этого необходимо подвести курсор к объекту и нажать левую кнопку мыши или клавишу <I>. При этом на дисплей выводится диалоговое окно соответствующей библиотеки с информацией о типе элемента или его параметрах. Эти параметры можно изменить при необходимости.

Кроме того, имеется возможность дополнить схему текстовыми комментариями, которые хранятся вместе со схемой в одном файле. Для открытия «записной книжки» активизируйте пункт **μ/2:Notes** (клавиши <Alt+U>/<2>). Существующие текстовые комментарии можно редактировать или удалять.

Если построенная схема полностью не помещается на экране, то осуществить быстрый переход между отдельными частями схемы можно в режиме поиска **View/8:Search**. При активизации данного пункта меню на экране появляется диалоговое окно, в котором пользователь может выбрать объект поиска (см. рис. 5.3).

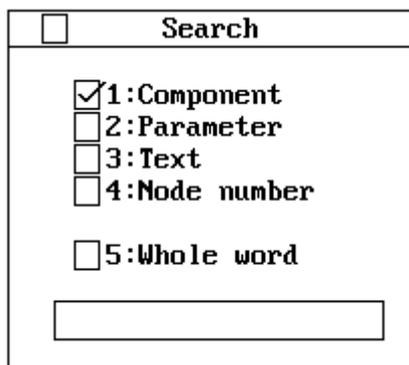


Рисунок 5.3 – Диалоговое окно в режиме Search

После выбора объекта поиска в диалоговом окне можно ввести параметры поиска. Для повторного поиска активизируйте режим **View/9:Repeat search** или нажмите клавишу <F8>.

После создания чертежа схемы его следует записать в файл по команде **File/4:Save circuit**. Программа запрашивает имя файла, который будет помещен

в текущий каталог. Расширение *.cir система присваивает автоматически.

Для того чтобы выгрузить схему из текущего окна без записи ее на диск, используется режим **File/3:Unload circuit**. При этом схема уничтожается из ОЗУ и окно редактора закрывается.

Имеется возможность удаления файла схемы с диска. Для этого необходимо активизировать пункт меню **File/5:Erase circuit** и выбрать имя файла удаляемой схемы.

Кроме того, выпадающее меню File предоставляет пользователю возможность включения в текущий чертеж схемы из других файлов на диске в режиме **File/6:Merge circuit**. При этом начало координат включаемой схемы совпадает с положением курсора на экране. Этот режим удобен при включении в схему часто повторяющихся объектов, которые следует записать в файл и использовать при необходимости.

5.4 Библиотеки компонентов

В пакете предусмотрены три основных библиотеки компонентов: библиотека простых элементов (меток) – Library labels; библиотека устройств – Library devices; библиотека функций – Library functions. Доступ к каждой из этих библиотек осуществляется из горизонтального меню с помощью пункта Editors. По умолчанию система ищет библиотечные файлы в текущем каталоге с чертежами схем.

При вызове библиотеки открывается диалоговое окно для просмотра и редактирования параметров компонентов, входящих в состав библиотеки. Кроме этого, доступ к параметрам компонентов из текущей библиотеки осуществляется по команде Info-Comp из меню команд редактора схемы. Все изменения параметров компонентов автоматически запоминаются в текущей библиотеке компонентов. Изменить имя текущей библиотеки можно командой **File/7:Load library**. Если необходимо сохранить текущую библиотеку под новым именем, то используется команда **File/8:Save library as**.

5.4.1 Библиотека простых элементов и меток (Library labels)

В библиотеке меток и простых элементов Library labels описываются компоненты, параметрами которых являются их номинальные значения: резисторы (RESIST), емкости (CAPACI), индуктивности (INDUCT), источники постоянного напряжения (батарея питания) (BATTER) и т.д. Кроме простых компонентов, в этой библиотеке также указываются параметры ключей (компонент SWITCH). При вводе чертежа схемы простые компоненты могут описываться непосредственно своими номинальными значениями (числовыми параметрами) или через текстовые метки (т.е. через библиотеку простых элементов). Если компонент описывается в виде текстовой метки, то необходимо в библиотеке простых элементов задать численное значение параметра этого компонента (его номинальное значение).

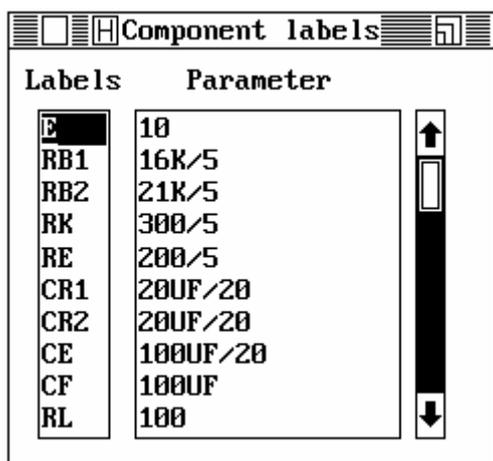


Рисунок 5.4 – Диалоговое окно библиотеки простых компонентов и меток Library labels

Применение текстовых меток для простых компонентов необходимо, если пользователь хочет использовать многовариантный анализ Stepping или статистический анализ Монте-Карло.

5.4.2 Библиотека устройств (Library devices)

Полупроводниковые приборы, источники сигналов и операционные усилители описываются сложными математическими моделями, параметры которых хранятся в библиотеке устройств Library devices. Список

типов моделей из текущей библиотеки для заданного устройства появляется автоматически при вводе нового элемента в окно редактора схемы. Параметры математических моделей можно просмотреть и отредактировать через диалоговое окно библиотеки устройств Library (см. рис. 5.5).

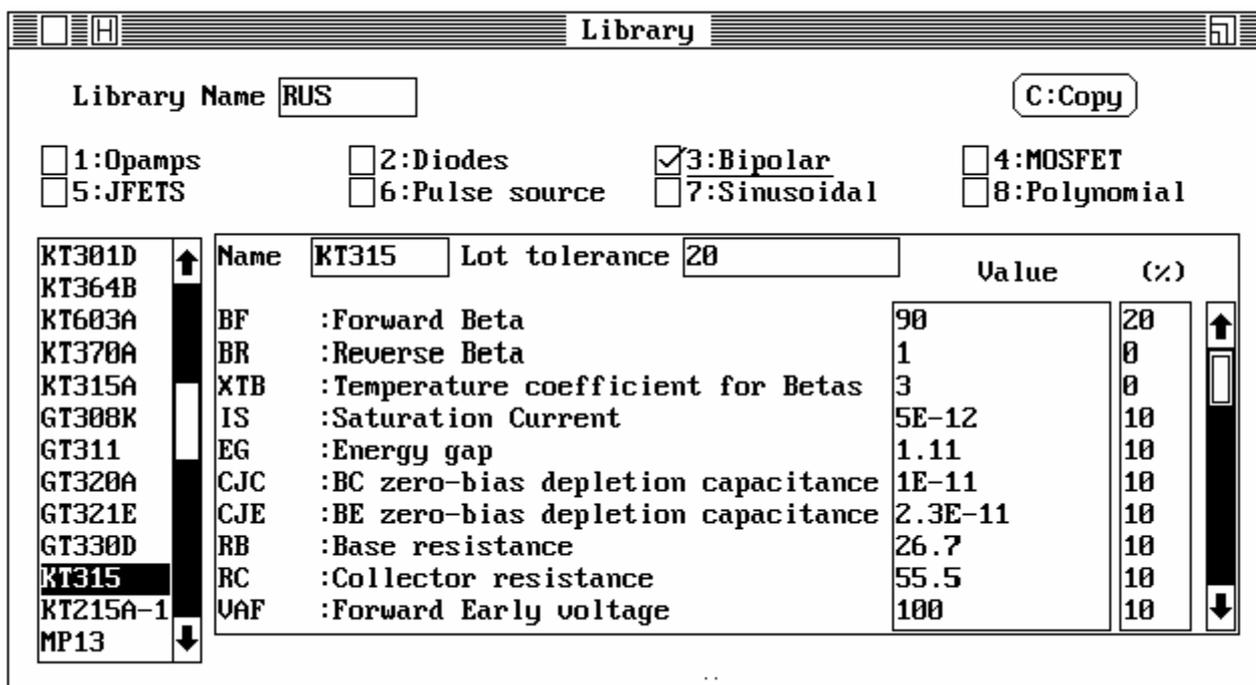


Рисунок 5.5 – Диалоговое окно библиотеки устройств

Библиотека устройств Library devices содержит модели следующих компонентов:

- 1:Opamps - операционных усилителей;
- 2:Diodes - диодов;
- 3:Bipolar - биполярных транзисторов;
- 4:MOSFET - МОП-транзисторов;

- 5:JFETS - полевых транзисторов с управляемым каналом;
- 6:Pulse - источников импульсного напряжения;
- 7:Sinusoidal - источников синусоидального напряжения;
- 8:Polynomial - нелинейных независимых источников.

Для вызова диалогового окна библиотеки устройств необходимо выбрать пункт меню **Editor/1:Library device** либо воспользоваться командой **Info** из окна команд редактора.

Выбор того или иного типа устройства осуществляется подведением курсора к квадратику перед именем типа устройства и нажатием левой кнопки мыши или нажатием комбинации клавиш <Alt-цифра> на клавиатуре.

В нижнем левом углу окна располагается список компонентов выбранного типа. С помощью мыши или клавишами управления курсором можно выбрать компонент с нужным именем. Имя активного в данный момент устройства высвечивается в поле **Name** в центре окна. Ниже находится список параметров математической модели для данного устройства и их численные значения (колонка **Value**). Допуск на параметры модели задается в колонке **%**. Он используется при анализе Монте-Карло и представляет собой процентное отношение допустимого разброса параметра относительно его номинального значения.

Кнопка **Copy**, расположенная в правой верхней части окна, используется для создания дубликата устройства в текущей библиотеке, т.е. для копирования параметров одного устройства в другое. При активизации команды **Copy** на экране появляется окно (см. рис. 5.6), в котором пользователь должен указать порядковый номер исходного устройства и номер дубликата:

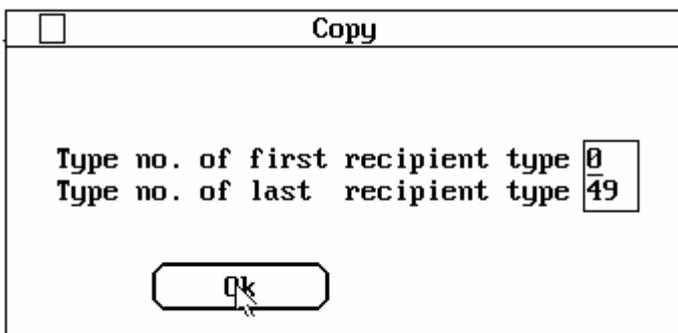


Рисунок 5.6 – Окно для копирования параметров моделей в библиотеке **Library devices**

Type no. of first recipient type - номер исходного устройства;

Type no. of last recipient type - номер дубликата.

Нумерация устройств в списке производится с 0, т.е. номер 0 имеет первое устройство в колонке имен устройств конкретного типа.

Переключение между полями диалогового окна библиотеки осуществляется с помощью мыши или клавишей <Tab>.

Ниже представлены параметры математических моделей устройств и источников сигналов. В пакете **MicroCAP-3** используются математические модели устройств, аналогичные используемым в пакете **Pspice**. Более подробное описание моделей и модели устройств отечественного производства можно найти в приведенной выше литературе [13-15].

5.4.3 Операционные усилители (OPAMP)

Доступ к библиотеке моделей операционных усилителей (ОУ) возможен при выборе пункта **1:Opamps** в окне Library Devices (см. рис 5.5). Математическая модель ОУ представляет собой линейную макромоделю 2-го уровня [13, 14], состоящую из трех каскадов и имитирующую два полюса передаточной характеристики ОУ, ограничение скорости нарастания выходного напряжения, конечный коэффициент усиления по постоянному току и входное и выходное сопротивления. Параметры макромоделей ОУ представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Параметры макромоделей ОУ

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
RIN	входное сопротивление	Ом	1E6
A	коэффициент усиления на постоянном токе		200000
ROUT	выходное сопротивление	Ом	75
VOFF	напряжение смещения нуля	В	0,005
TC	температурный коэффициент		5E-6
F1	частота 1-го полюса	Гц	5
F2	частота 2-го полюса	Гц	1E6
SR	максимальная скорость нарастания выходного напряжения	В/сек	5E5
IOFF	разность входных токов смещения	А	1E-9
IBIAS	входной ток смещения	А	1E-7
DI	температурный интервал удвоения тока смещения		10
VMAX	максимальное выходное напряжение	В	13

5.4.4 Диоды (Diodes)

Доступ к библиотеке моделей диодов возможен при выборе пункта **2:Diodes** в окне Library Devices (см. рис 5.5). Модель диода описывается выражениями Эберса-Молла [13-15] и задается параметрами, перечисленными ниже (см. табл. 5.3)

Таблица 5.3 – Параметры модели Этерса-Молла диода

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
IS	ток насыщения диода при температуре 27 °С	А	1E-14
RS	объемное сопротивление при последовательном включении	Ом	0
N	коэффициент инжекции (эмиссии)		1
TT	время переноса заряда	сек	0
CJO	барьерная емкость перехода при нулевом смещении	Ф	0
VJ	контактная разность потенциалов	В	1
M	коэффициент плавности перехода (лавинного умножения)		0,5
EG	ширина запрещенной зоны	эВ	1,11
XTI	температурный коэффициент тока насыщения		3
KF	коэффициент фликкер-шума		0
AF	показатель степени фликкер-шума		1
FC	коэффициент нелинейности барьерной емкости прямосмещенного перехода		0,5
BV	обратное напряжение пробоя	В	1E6
RL	сопротивление утечки	Ом	1E6

5.4.5 Биполярные транзисторы (Bipolar)

В программе MicroCAP-3 используется схема замещения биполярного транзистора в виде нелинейной модели Гуммеля-Пуна, которая автоматически упрощается до более простой модели Эберса-Молла [13-15], если пустить некоторые параметры. Выбор используемой модели транзистора осуществляется в пункте горизонтального меню **Options/5:Models**. Для точного моделирования переходных процессов в транзисторах следует выбирать модель Гуммеля-Пуна, которая более точно отражает работу транзистора в режимах насыщения и отсечки. Для линейного малосигнального анализа достаточно более простой модели Эберса-Молла. Модель Гуммеля-Пуна содержит большее число параметров, определение которых является достаточно сложной задачей. Переход в библиотеку биполярных транзисторов осуществляется по команде **3:Bipolar** (см. рис. 5.5). В таблице 5.4 представлены параметры модели транзистора (* отмечены параметры, необходимые для модели Гуммеля-Пуна).

Таблица 5.4 – Параметры модели биполярного транзистора

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
BF	коэффициент передачи коллекторного тока в прямом включении без учета тока утечки		100
BR	коэффициент передачи коллекторного тока в обратном включении		1
XTB	температурный коэффициент BF и BR		3
IS	ток насыщения при температуре 27 °C	A	10E-16
EG	ширина запрещенной зоны	эВ	1,11
CJC	барьерная емкость коллекторного перехода при нулевом смещении	Ф	0
CJE	барьерная емкость эмиттерного перехода при нулевом смещении	Ф	0
RB	объемное сопротивление базы	Ом	0
RC	объемное сопротивление коллектора	Ом	0
VAF*	напряжение Эрли в нормальном режиме	B	100
TF	время переноса заряда в нормальном режиме	сек	0
TR	время переноса заряда в инверсном режиме	сек	0
MJC	коэффициент плавности барьерной емкости перехода база-коллектор		0,33
VJC	контактная разность потенциалов перехода база-коллектор	B	0,75
MJE	коэффициент плавности для эмиттерного перехода		0,33
VJE	контактная разность потенциалов перехода база-эмиттер	B	0,75
VAR*	напряжение Эрли в инверсном режиме	B	100
NF	коэффициент неидеальности перехода в нормальном режиме		1

Продолжение табл. 5.4

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
NR	коэффициент неидеальности перехода в инверсном режиме		1
ISE*	ток насыщения перехода база-эмиттер	A	0
ISC*	ток насыщения перехода база-коллектор	A	0
IKF*	точка начала спада зависимости V_F от коллекторного тока в нормальном режиме	A	1
IKR*	точка начала спада зависимости V_R от тока эмиттера в инверсном режиме	A	1
NE*	коэффициент неидеальности эмиттерного перехода		1,5
NC*	коэффициент неидеальности коллекторного перехода		1,5
RE	объемное сопротивление эмиттера	Ом	0
IRB*	ток базы, при котором сопротивление базы равно $(R_B - R_{BM})/2$;	A	1
RBM*	минимальное объемное сопротивление базы при больших токах	Ом	R_B
VTF	напряжение, характеризующее зависимость TF от смещения база-коллектор	B	1000
ITF	ток, характеризующий зависимость TF от тока коллектора	A	0
XTF	коэффициент, определяющий зависимость TF от смещения база-коллектор		0
RSV	резервный параметр		0
XCJC	коэффициент расщепления емкости база-коллектор		1
MJS	коэффициент, учитывающий плавность перехода коллектор-подложка		0,5
XTI	температурный коэффициент для IS		3

Продолжение табл. 5.4

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
KF	коэффициент, определяющий спектральную плотность фликкер-шума		0
AF	показатель степени, определяющий зависимость спектральной плотности шума от тока через переход		1
FC	коэффициент нелинейности барьерных емкостей прямосмещенных переходов		0,5

5.4.6 Полевые МОП-транзисторы (MOSFET)

В программе MicroCAP-3 МОП-транзисторы определяются разными моделями, выбор которых осуществляется параметром LEVEL в пункте меню **Options/5:Models**. Модель первого уровня (LEVEL=0) используется в тех случаях, когда не предъявляются высокие требования к точности моделирования ВАХ транзистора, в частности, при моделировании МОП-транзисторов с коротким или узким каналом.

Модели второго (LEVEL=1) и третьего уровня (LEVEL=2) позволяют учитывать более тонкие физические процессы, протекающие в транзисторе. Модель второго уровня представляет собой полуэмпирическую эквивалентную схему замещения МОП-транзистора. Модель третьего уровня – это более сложная физическая схема замещения, параметры которой находятся с помощью специальной программы идентификации. Вид полной схемы замещения и математические выражения, описывающие системы уравнений для моделей всех трех уровней можно найти в приведенной выше литературе [13-15].

В таблице 5.5 представлены параметры модели МОП-транзистора, которые необходимо задать в библиотеке устройств. Доступ к данной библиотеке возможен из окна Library devices (см. рис. 5.5) при выборе команды **4:MOSFET**.

Таблица 5.5 – Параметры модели МОП-транзистора

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
KP	параметр удельной крутизны	A/B	2E-5
VTO	пороговое напряжение при нулевом смещении	B	1
CGDO	удельная емкость перекрытия затвор-сток	Ф/м ²	4E-11

Продолжение табл. 5.5

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
CGBO	удельная емкость перекрытия затвор-подложка	$\Phi/\text{м}^2$	4E-11
CGSO	удельная емкость перекрытия затвор-исток	$\Phi/\text{м}^2$	2E-10
RD	объемное сопротивление стока	Ом	0
RS	объемное сопротивление истока	Ом	0
L	длина канала	м	1E-4
W	ширина канала	м	1E-4
AD	площадь стока	м^2	0
AS	площадь истока	м^2	0
PD	периметр стока	м	0
PS	периметр истока	м	0
NRD	удельное относительное сопротивление стока		1
NRS	удельное относительное сопротивление истока		1
GAMMA	коэффициент влияния подложки на пороговое напряжение	\sqrt{B}	0,5
LAMBDA	коэффициент модуляции длины канала	1/B	1E-3
PHI	поверхностный потенциал сильной инверсии	В	0,6
IS	ток насыщения перехода сток-подложка (исток-подложка)	А	1E-14
PB	напряжение инверсии приповерхностного слоя подложки	В	0,8
RSH	удельное сопротивление диффузионных областей стока и истока	Ом	0
CJ	удельная емкость р-n-перехода при нулевом смещении (на площадь перехода)	$\Phi/\text{м}^2$	0
MJ	коэффициент, учитывающий плавность перехода подложка-сток		0,5
CJSW	удельная емкость боковой поверхности перехода при нулевом смещении (на длину периметра)	$\Phi/\text{м}$	0
MJSW	коэффициент наклона боковой поверхности перехода подложка-сток (исток)		0,3

Продолжение табл. 5.5

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
JS	плотность тока насыщения	A/m^2	0
TOX	толщина оксида	м	$1E-8$
NSUB	уровень легирования подложки		$1E15$
NSS	эффективная плотность заряда	$1/cm^2$	$1E10$
NFS	эффективная плотность быстрых поверхностных состояний на границе кремний-оксид	$1/cm^2$	$1E10$
XJ	металлургическая глубина перехода	м	0
LD	длина области боковой диффузии	м	0
UO	поверхностная подвижность носителей в инверсном слое	$cm^2/B/сек$	600
VMAX	максимальная скорость дрейфа носителей	м/с	0
DELTA	коэффициент влияния ширины канала на пороговое напряжение		0
THETA	коэффициент модуляции подвижности носителей	$1/B$	0
ETA	коэффициент статической обратной связи, влияющей на пороговое напряжение		0
KAPPA	параметр модуляции длины канала напряжением сток-исток		0,2
KF	коэффициент, определяющий спектральную плотность фликкер-шума		0
AF	показатель степени, определяющий зависимость спектральной плотности фликкер-шума от тока через переход		1
FC	коэффициент нелинейности барьерных емкостей прямосмещенных переходов		0,5
TPG	тип материала затвора (+1 – противоположный материалу подложки; -1 - такой же, как у подложки; 0 - алюминий)	1	
XQC	доля заряда канала, ассоциированного со стоком		0

Окончание табл. 5.5

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
CGD	емкость затвор-сток	Ф	50E-12
CGS	емкость затвор-исток	Ф	50E-12
CGB	емкость затвор-подложка	Ф	1E-12
CDB	емкость сток-подложка	Ф	1E-12

5.4.7 Полевые транзисторы с управляющим переходом (JFETs)

Полевые транзисторы с управляющим переходом (Junction FET) описываются моделью Шихмана-Ходжеса, эквивалентная схема и математические выражения для которой представлены в приведенной выше литературе [13-15]. Доступ к библиотеке JFETs в пакете MicroCAP-3 возможен после выбора команды **5:JFETs** в окне Library devices (см. рис. 5.5). В табл. 5.6 приведем список параметров модели полевого транзистора.

Таблица 5.6 – Параметры модели Шихмана-Ходжеса

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
VTO	пороговое напряжение	В	-2
BETA	коэффициент пропорциональности	A/B	1E-4
LAMBDA	коэффициент модуляции длины канала	1/B	0
RD	объемное сопротивление области стока	Ом	0
RS	объемное сопротивление области истока	Ом	0
CGS	емкость перехода затвор-исток при нулевом смещении	Ф	0
CGD	емкость перехода затвор-сток при нулевом смещении	Ф	0
PB	контактная разность потенциалов p-n перехода затвора	В	1
IS	ток насыщения p-n перехода затвор-канал	А	1E-14
KF	коэффициент, определяющий спектральную плотность фликкер-шума		0
AF	показатель степени, определяющий зависимость спектральной плотности фликкер-шума от тока через переход		1
FC	коэффициент нелинейности барьерных емкостей прямосмещенных переходов		0,5

5.4.8 Источники сигналов

Из окна библиотеки устройств Library devices возможен доступ к трем видам источников сигналов (см. рис. 5.5):

- 6:Pulse source – импульсные периодические источники – компонент PULSE;
- 7:Sinusoidal – источники синусоидального напряжения – компонент SINE S;
- 8:Polinomial – нелинейные управляемые источники напряжения или тока – компоненты POLYIS или POLYVS.

Импульсные источники напряжения (Pulse source)

Доступ к библиотеке импульсных источников напряжения осуществляется при выборе команды **6:Pulse source** в окне библиотеки устройств Library devices. Параметры источника импульсного напряжения приведены ниже (табл. 5.7), а вид импульсного сигнала представлен на рис. 5.7.

Таблица 5.7 – Параметры модели импульсного источника

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
VZERO	постоянное смещение (уровень логического нуля)	В	0
VONE	максимальное напряжение (уровень логической единицы)	В	5
P1	начало переднего фронта импульса	сек	1,0E-7
P2	начало плоской вершины импульса	сек	1,1E-7
P3	конец плоской вершины импульса	сек	5,1E-7
P4	время достижения уровня VZERO	сек	5,2E-7
P5	период повторения импульсов	сек	10E-6

При $P2 < 0$ передний фронт импульсного периодического напряжения (см. рис. 5.7) нарастает по экспоненциальному закону с постоянной времени, равной модулю $P2$ (штриховая линия). Если $P4 < 0$, задний фронт спадает по экспоненциальному закону с постоянной времени, равной модулю $P4$ (штриховая линия). Источник сигнала PULSE используется только в режиме анализа Transient.

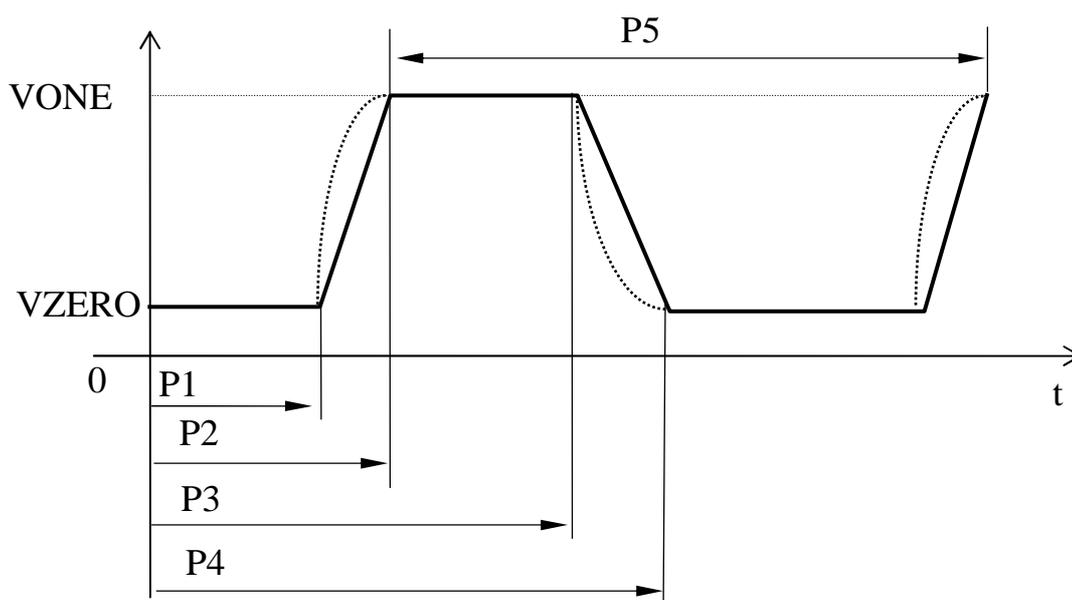


Рисунок 5.7 – Форма импульсного сигнала источника PULSE

Источники синусоидального напряжения (Sinusoidal source)

Доступ к параметрам источника синусоидального напряжения осуществляется из окна библиотеки устройств Library devices при выборе команды **7:Sinusoidal**. Для ввода источника синусоидального напряжения в чертеж схемы необходимо выбрать компонент SINE S в окне компонентов и задать имя источника из текущей библиотеки. Затем следует задать параметры модели этого источника. Любой источник синусоидального напряжения в пакете MicroCAP-3 описывается параметрами, приведенными в таблице 5.8.

Таблица 5.8 – Параметры модели гармонического источника сигналов

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
F	частота сигнала	Гц	1Е6
A	амплитуда	В	1
DC	уровень постоянной составляющей	В	0
PH	начальный сдвиг фазы	град	0
RS	внутреннее сопротивление источника сигнала	Ом	100
RP	период повторения затухающего сигнала	сек	0
TAU	коэффициент затухания (при TAU<0 амплитуда сигнала убывает, при TAU>0 – нарастает по экспоненциальному закону)	сек	0
FS	девиация частоты сигнала с линейной частотной модуляцией	Гц/сек	0

Синусоидальный источник имеет ЭДС, описываемую соотношениями [13-15]:

$$V(t) = \begin{cases} A \cdot \sin(2pF\pi \cdot t + PH + 0,5 \cdot FS \cdot t^2) + DC & \text{при } TAU = 0; \\ A \cdot e^{t/TAU} \cdot \sin(2pF\pi \cdot t + PH + 0,5 \cdot FS \cdot t^2) + DC & \text{при } TAU \neq 0. \end{cases}$$

Зависимые нелинейные источники сигнала (Polinomial source)

В программе MicroCAP-3 используются нелинейные зависимые источники тока и напряжения, описываемые зависимостями: $I=f(V)$, $V=f(V)$, $I=f(I)$, $V=f(I)$. Полином $y=f(x)$ имеет вид [13-15]:

$$y = A + Bx^C + Dx^E + Fx^G$$

и задается коэффициентами А, В, С; D, E; G и параметрами OPER и TYPE. Независимая переменная x может быть либо напряжением, либо током.

Параметр OPER принимает значения 0 (-), 1 (+), 2 (·), 3 (/) и характеризует только зависимый источник, управляемый напряжением. Он определяет характер независимой переменной x , выражаемой через потенциалы узлов управляющей ветви следующим образом:

$$x = \begin{cases} V_{N1} - V_{N2} & OPER = 0; \\ V_{N1} + V_{N2} & OPER = 1; \\ V_{N1} \cdot V_{N2} & OPER = 2; \\ V_{N1}/V_{N2} & OPER = 3, \end{cases}$$

где $N1$ и $N2$ - номера узлов управляющей ветви.

Параметр TYPE определяет тип зависимого источника и способ управления:

TYPE - тип источника (0 - $I(V)$; 1 - $I(I)$; 2 - $V(V)$; 3 - $V(I)$).

Здесь: $I(V)$ - источник тока, управляемый напряжением;

$I(I)$ - источник тока, управляемый током;

$V(V)$ - источник напряжения, управляемый напряжением;

$V(I)$ - источник напряжения, управляемый током,

где V - разность потенциалов между узлами $N1$ и $N2$, I - ток, направленный от узла $N1$ к узлу $N2$ (между этими узлами включается резистор или индуктивность).

Для ввода нелинейных управляемых источников в чертеж схемы используются компоненты POLYIS (источник тока) POLYVS (источник напряжения). Доступ к параметрам модели управляемых источников возможен по команде Info-Comp или через окно библиотеки устройств Library devices при выборе команды **8:Polinomial**.

Все изменения параметров моделей устройств текущей библиотеки сохраняются автоматически при выходе из программы. Для записи файлов библиотеки устройств под другим именем необходимо активизировать

пункт горизонтального меню **File/8:Save library as**, после чего в диалоговом окне задать имя новой библиотеки устройств. При этом все внесенные изменения будут сохранены в библиотеку с новым именем.

5.4.9 Источники сигнала с заданной функциональной зависимостью

Функции пользователя, определяемые в библиотеке функций (**Editor/3:Library functions**), используются для описания зависимых от времени источников. Здесь могут применяться алгебраические функции, включающие в себя переменную T (время) и другие математические операторы.

Для построения выражений возможно использование следующих математических операторов:

а) арифметические: (+) - сложить; (−) - вычесть; (·) - умножить; (/) - разделить; Exp() - экспонента; Ln() - натуральный логарифм; Log() - десятичный логарифм; Sin() - синус; Cos() - косинус; Tan() - тангенс; Ath() - арктангенс; Abs() - абсолютная величина; Sqrt() - извлечение квадратного корня; Sgn() - знаковый оператор; Db() = 20·Log() - Децибелл; ^ - возведение в степень; гиперболические функции (Sinh(), Cosh(), Tanh(), Coth()); DIV() - целочисленное деление; MOD - модуль;

б) операции отношения: = - равно; > - больше, чем; < - меньше, чем; >= - больше или равно; <= - меньше или равно;

в) логические операции: NOT - инверсия (операция НЕ); AND - операция И; OR - операция ИЛИ; XOR - операция исключающее ИЛИ. Логический оператор равен 1, если выражение истинно, и равен 0, если выражение ложно.

Каждая функция есть форма вида: <Имя_функции>=<Выражение>, где <Имя_функции> - имя, состоящее из 8 любых символов, а <Выражение> - алгебраическая функция, состоящая из допустимых операторов.

При вводе функционального источника в чертеж схемы необходимо в окне компонентов выбрать имя USERF и в появившемся окне выбрать имя функции из библиотеки функциональных источников (Library functions). Для того чтобы задать новую или отредактировать уже имеющуюся функцию из текущей библиотеки, необходимо выбрать пункт меню **Editor/3:Library functions**. В открывшемся окне User functions (см. рис. 5.8) найти функцию с требуемым именем (либо создать новое имя) и, используя переменную T и математические выражения, задать требуемую функцию или сделать необходимые изменения в существующем выражении.

Примером устройств, использующих функциональные источники, могут служить нелинейные зависимые источники тока или напряжения, а также источники амплитудно-модулированного или частотно-модулированного сигналов.

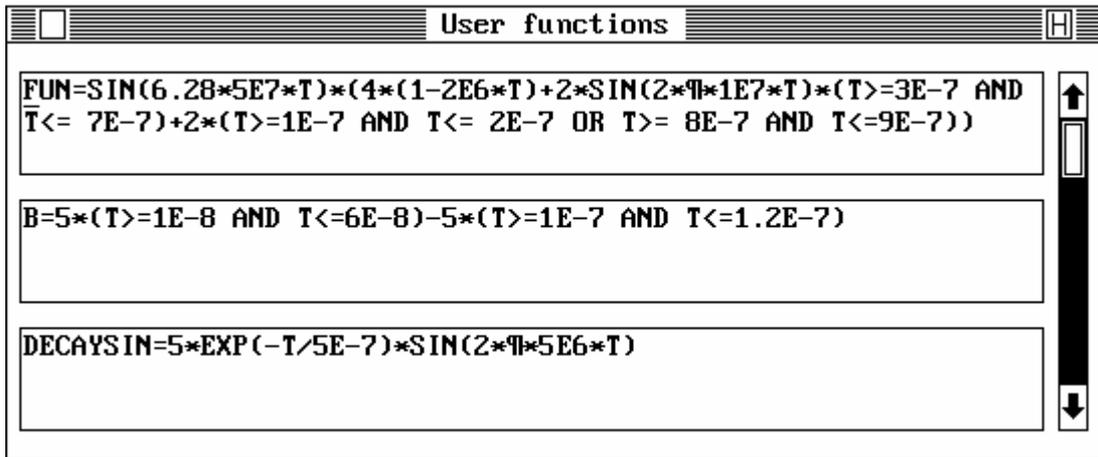


Рисунок 5.8 – Вид диалогового окна библиотеки Library functions

5.5 Согласование математической модели и изображения компонентов

Каждый компонент схемы в пакете MicroCAP-3 характеризуется: 1) *названием* (Name), которое отображается в окне компонентов редактора схемы; 2) *изображением* (Name of shape), которое будет выводиться в окне редактора схемы при формировании чертежа схемы. Изображения элемента можно редактировать с помощью векторного редактора ShapeEditor, входящего в состав пакета MicroCAP-3; 3) *математической моделью* (Definition), которая определяет свойства компонента при моделировании.

Соответствие модели и изображения для каждого компонента, расположение текстовой метки рядом с изображением элемента на схеме можно изменить. Для этого необходимо активизировать редактор свойств компонентов Component editor нажатием правой кнопки мыши на имени компонента в списке из окна компонентов или нажатием на клавишу <Enter>. Вид экрана с окном Component editor редактора компонентов представлен на рис. 5.9.

В центре окна редактора компонентов выводится графическое изображение выбранного компонента, расположенного в горизонтальном (ориентация А) и вертикальном (ориентация В) положении. В верхней правой части экрана располагается список Shape names, содержащий имена используемых компонентов. Ниже находится список Definitions, в котором приведены имена математических моделей компонентов. В левой части экрана располагается список параметров, характеризующих выбранный компонент:

Name – имя выбранного компонента;

Name of shape – имя изображения для выбранного компонента из библиотеки форм. Названия всех изображений элементов из текущей библиотеки форм приведены в списке Shape names;

Definition – имя математической модели для выбранного компонента. Наименования всех моделей, которые есть в пакете MicroCAP-3, отображаются в списке Definitions;

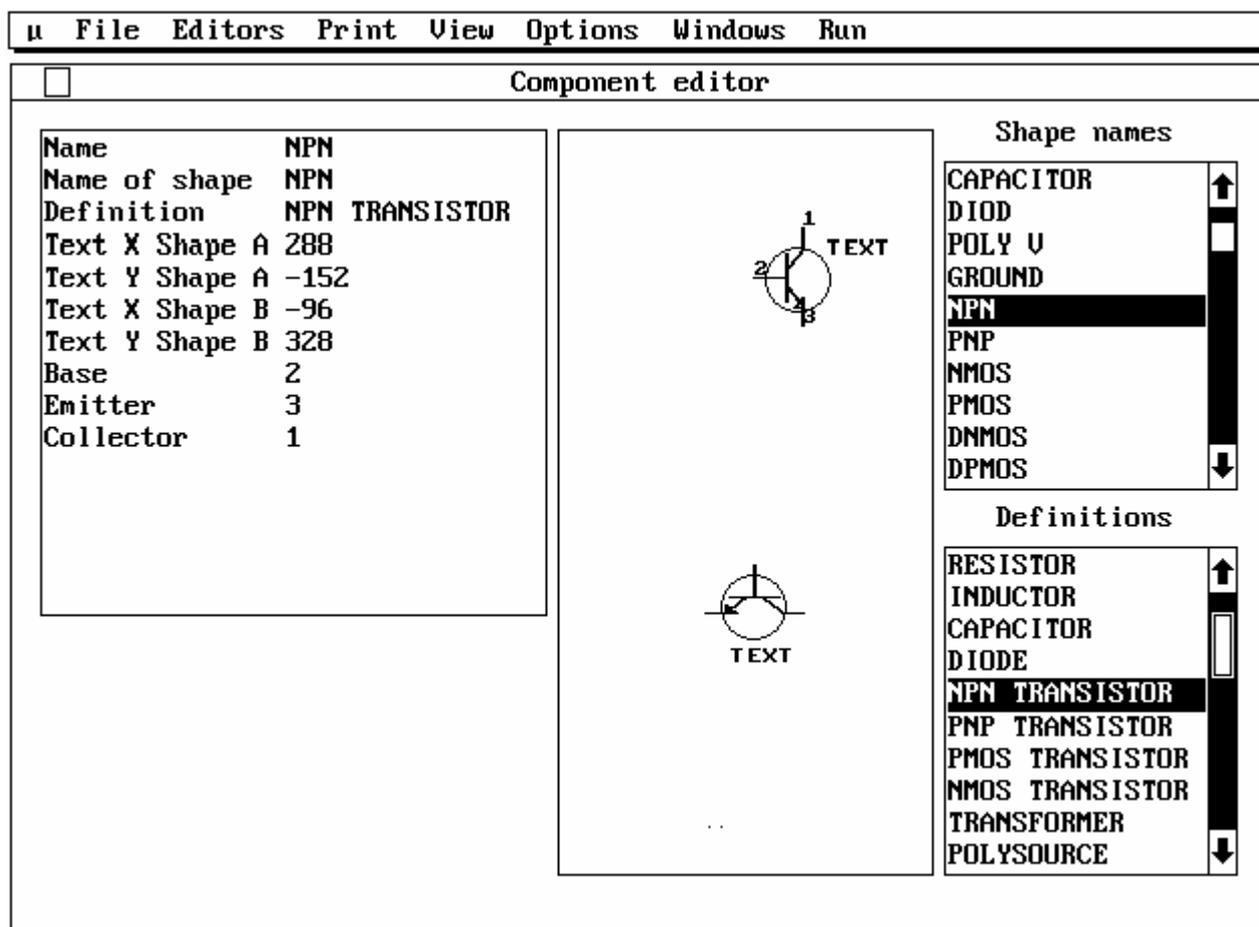


Рисунок 5.9 – Вид экрана в режиме редактора свойств компонентов

Text X Shape A – X-координата текстовой метки компонента при ориентации A;

Text X Shape B – X-координата текстовой метки компонента при ориентации B;

Text Y Shape A – Y-координата текстовой метки компонента при ориентации A;

Text Y Shape B – Y-координата текстовой метки компонента при ориентации B;

Для резисторов, конденсаторов, диодов, транзисторов, источников питания и некоторых других устройств выводятся также поля для обозначения выводов элементов.

Нажатие левой кнопки и перемещение мыши в окне редактора компонентов приводит к перемещению текстовой метки для ориентации A, а нажатие правой кнопки мыши - для ориентации B. Изменение значений полей Text A и Text B автоматически переносится системой в чертеж схемы для всех компонентов данного типа.

Внимание! Необходимо следить, чтобы изображение элемента, его математическая модель и имя в списке компонентов соответствовали друг другу.

5.6 Параметры системы (Options)

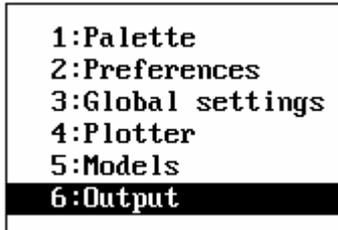


Рисунок 5.10 – Меню Options

Пункт горизонтального меню Options служит для настройки параметров системы MicroCAP-3. При вызове данной команды появляется выпадающее меню, вид которого представлен на рис. 5.10.

5.6.1 Определение цветовой схемы (Options/1:Palette)

В пакете MicroCAP-3 задаются пять цветовых палитр (наборов цветовых схем): одна для редактора схемы и по одной для каждого вида анализа. Команда **Options/1:Palette** вызывает окно для формирования палитры (текущей цветовой схемы) редактора чертежа схемы и главного меню системы. Вид этого окна приводится на рис. 5.11. Аналогичное окно будет вызываться и при создании цветовой схемы в каждом из анализов.

Необходимый цвет объекта интерфейса получают смешиванием трех основных цветов (красного, зеленого и синего). Получаемый в результате смешивания цвет можно увидеть в полоске, расположенной справа от полос интенсивности основных цветов. Выбранный цвет может быть назначен:

- 1:Background (фону основных окон пакета);
- 2:Foreground (границе окон);
- 3:Static (тексту и элементам оформления окон);
- 4:Shapes (изображению элементов схемы и соединительным линиям);
- 5:Text (тексту);
- 6:Desktop (панели экрана).

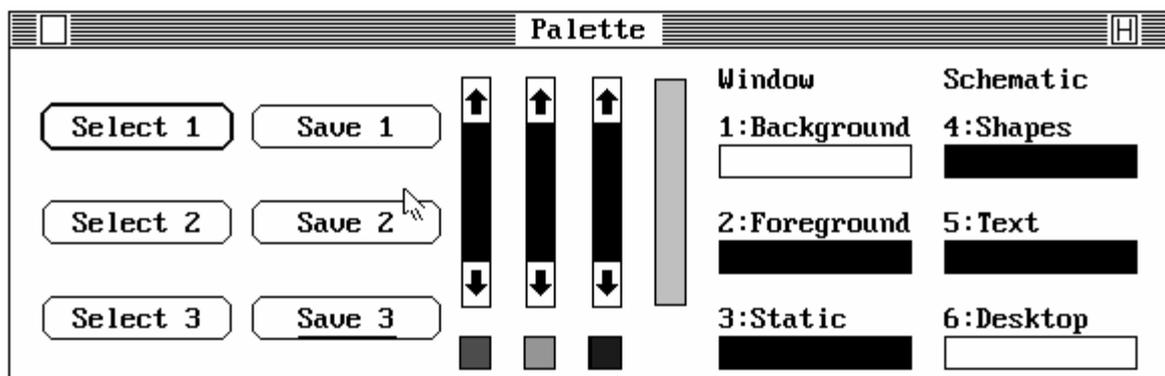
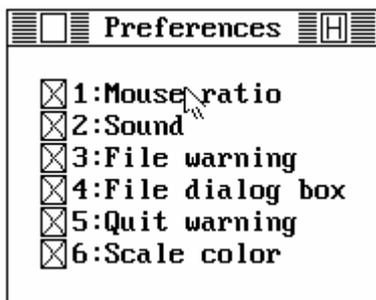


Рисунок 5.11 – Диалоговое окно для формирования цветовой схемы палитры

Назначение выбранного цвета элементам интерфейса осуществляется нажатием клавиши с цифрой, соответствующей объекту интерфейса, или с помощью мыши. Переключение между полями окна Palette осуществляется с помощью клавиши <Tab>, а между полосами интенсивности основных цветов - комбинацией клавиш <Shift-Tab>. Нахождение всех «бегунков» полос интенсивности основных цветов в верхнем положении соответствует черному цвету, а в нижнем - белому.

Для каждой из пяти палитр можно сформировать и запомнить три различных варианта цветовых схем. Для сохранения текущей цветовой схемы используйте кнопки Save 1, Save 2, Save 3, а чтобы выбрать запомненную ранее цветовую схему, нажмите одну из кнопок Select 1, Select 2 или Select 3.

5.6.2. Параметры интерфейса (Options/2:Preferences)



При вызове команды **Options/2:Preferences** появляется диалоговое окно для установки различных режимов функционирования интерфейса программы. Возможны следующие установки:

1: Mouse ratio – переключение скорости перемещения курсора мыши;

2: Speaker – включение/выключение звукового сигнала для исключительных ситуаций;

3: File warning – включение/выключение вывода окна подтверждения действий с файлами;

4: File dialog box – включение/выключение списка файлов схем из текущего каталога при вызове диалогового окна Load circuit. Когда опция включена, в окне выбора файла для вызова новой схемы присутствует список файлов, позволяющий пользователю просматривать содержимое рабочего каталога и загружать файлы. Однако такой режим требует некоторого времени для сканирования рабочего каталога. Если данная опция отключена, список файлов не выводится и пользователю предлагается просто ввести имя файла в строке ввода;

5: Quit warning – включение/выключение вызова сообщения, предупреждающего о выходе из программы. Если опция включена, то система будет требовать подтверждения на выход из программы. В противном случае выход из программы осуществляется без запроса подтверждения.

5.6.3 Глобальные параметры системы (Options/3:Global setting)

Эти параметры относятся только к моделированию по постоянному току.

1: DC Convergence criteria - критерий сходимости для анализа по постоянному току. Он определяет точность анализа схемы по постоянному току. Итерационный процесс должен сходиться в пределах этого значения. Типичное значение – $1E-4 \dots 1E-6$.

Global settings	
Convergence criteria.	.0001
Number of iterations.	100
Relaxation factor.	2
Maximum voltage.	10000
Minimum conductance.	.000000001
Switch on-resistance.	1
Switch off-resistance.	100000000
Std. dev. in tolerance.	2.58

2: Number of iterations - число итераций (приближений). Это число определяет максимальное количество итераций при расчете. Оно влияет на точность и скорость выполнения анализа. Максимальное возможное значение – 200.

3: Relaxation factor - фактор релаксации. Этот фактор

влияет на сходимость итерационных процессов при анализе по постоянному току устройств на полевых транзисторах. Типичное значение – 2.

4: Maximum voltage - максимальное напряжение. Эта опция ограничивает значение напряжения в течении итерации в анализе по постоянному току. Типичное значение - 10000 В.

5: Minimum conductance - минимальная проводимость емкости на постоянном токе. Эта опция аналогична параметру GMIN в программе PSpice. При расчете по постоянному току конденсаторы заменяются на резисторы с сопротивлением $1/\text{Minimum conductance}$ (т.е. значение $1\text{E}-9$ эквивалентно включению резистора с номиналом 1000 МОм вместо конденсатора). Величину данного параметра следует задавать в пределах от $1\text{E}-9$ до $1\text{E}-12$. Ненулевое значение обычно способствует лучшей сходимости итерационного процесса.

6: Switch on-resistance - сопротивление замкнутых ключей. Типичное значение – 1.

7: Switch off-resistance - сопротивление разомкнутых ключей. Типичное значение – $1\text{E}9$.

8: Std. dev. in tolerance - стандартное отклонение (среднеквадратическое отклонение) при задании разброса параметров элементов для статистического анализа Монте-Карло. Этот параметр для нормального закона распределения определяют вероятность попадания случайной величины в заданный интервал допуска. Некоторые типичные значения стандартного отклонения приведены ниже в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Величина стандартного отклонения для анализа Монте-Карло

Стандартное отклонение	Вероятность попадания в интервал допуска (в %)
1,0	68,0
1,96	95,0
2,0	95,5
2,58	99,0
3,0	99,6
3,29	99,9

Например, если используется резистор с допуском на номинальное значение $\pm 10\%$, то для стандартного отклонения, равного 2,58, при статистическом анализе 99 % процентов случайных значений сопротивления резистора попадут в это поле допуска.

5.6.4 Вывод схемы на графопостроитель (Options/4:Plotter)

При выборе команды **Options/4:Plotter** пользователю предоставляется возможность назначить следующие параметры для вывода результатов на графопостроитель.

Paper size options - размер бумаги:

- | | |
|---------------------|---------------------|
| 1: A (8,5x11 дюйм); | 5: C (18x24 дюйм); |
| 2: A4 (210x297 мм); | 6: D (24x36 дюйм); |
| 3: B (11x17 дюйм); | 7: A2 (419x594 мм); |
| 4: A3 (297x420 мм); | 8: A1 (594x841 мм). |

Plotter type - тип графопостроителя:

- A: Hewlett-Packard;
- B: Houston Instrument.

Communication port - имя порта подключения графопостроителя:

- C: Comport 1 - COM1;
- D: Comport 2 - COM2.

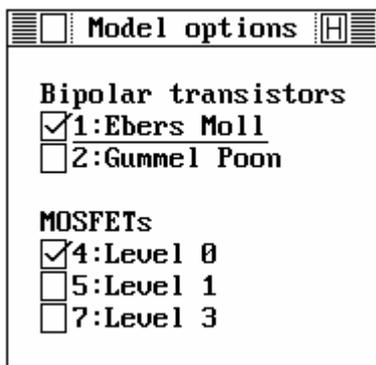
Number of pens for plotting - количество перьев:

- E: 1;
- F: 2;
- G: 6.

H: Prompt for pen change - введите нестандартное число перьев.

5.6.5 Выбор типа модели транзистора (Options/5:Model)

Вызов команды **Options/5:Model** открывает диалоговое окно для определения типа моделей транзисторов.



Для биполярных транзисторов могут быть использованы две модели [13-15]. Первая – это простая и часто используемая модель Эберса-Молла. Вторая – более сложная модель Гуммеля-Пуна, которая лучше описывает сложные эффекты в биполярном транзисторе в режимах отсечки и насыщения. Однако модель Гуммеля-Пуна требует задания большего числа параметров, получить которые достаточно сложно. Для проведения малосигнального частотного анализа (АС) вполне достаточно простой модели Эберса-Молла.

МОП-транзисторы в пакете MicroCAP-3 могут описываться тремя различными моделями устройства [13-15]. Модель первого уровня (LEVEL=0) эквивалентна модели с постоянными емкостями программы Pspice и используется в тех случаях, когда не предъявляются высокие требования к точности моделирования ВАХ транзистора, в частности, при

моделировании МОП-транзисторов с коротким или узким каналом.

Модели второго (LEVEL=1) и третьего уровня (LEVEL=2) позволяют учитывать более тонкие физические процессы, протекающие в транзисторе. Модель второго уровня представляет собой полуэмпирическую эквивалентную схему замещения МОП-транзистора. Модель третьего уровня – это более сложная физическая схема замещения, параметры которой находятся с помощью специальной программы идентификации.

5.6.6 Выходные параметры (Options/6:Output)

Данный пункт меню служит для настройки потока выходной информации и устройств вывода результатов моделирования. При работе в пакете MicroCAP-3 информация может быть направлена в один из параллельных портов (для печати на принтере), в дисковый файл или на экран монитора. Переключение потока информации осуществляется опцией Output to в окне установок для вывода данных, которое вызывается на экран командой **Options/6:Output** (см. рис. 5.12).

Если выходные данные направляются в дисковый файл, то он получит имя <Имя_схемы>.<ext>, где <ext> - расширение, связанное с типом анализа:

- *.tno - файлы результатов при анализе переходных процессов;
- *.ano - файлы результатов при анализе по переменному току;
- *.dno - файлы результатов при анализе по постоянному току;
- *.fno - файлы результатов при анализе Фурье;
- *.tmc - файлы результатов при анализе Монте-Карло переходных процессов;
- *.amc - файлы результатов при анализе Монте-Карло частотных характеристик;
- *.dmc - файлы результатов при анализе Монте-Карло по постоянному току;
- *.tlm - файлы с установками пределов анализа для переходных процессов;
- *.alm - файлы с установками пределов анализа для частотных характеристик;
- *.dlm - файлы с установками пределов анализа по постоянному току.

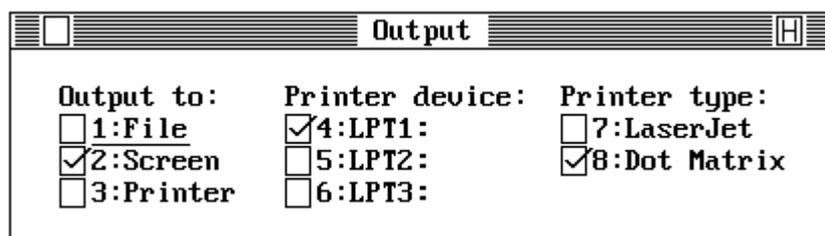


Рисунок 5.12 – Вид окна для настройки вывода данных

Информация на принтер может быть послана с использованием любого из трех возможных параллельных портов (LPT1, LPT2 или LPT3), для этого необходимо указать его в соответствующем поле при выборе опции

Printer device в окне Output.

Опция Printer type определяет тип принтера для печати графиков и текстовых данных:

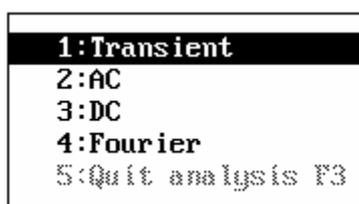
7:LaserJet - лазерный принтер. Предполагается наличие принтера LaserJet фирмы Hewlett-Packard или любого другого PCL-совместимого принтера.

8:Dot matrix - матричный принтер. Предполагается наличие принтера типа Epson или любого IBM-совместимого принтера.

Внимание! При работе с пакетом MicroCAP-3 в операционной системе Windows95/98 рекомендуется переключаться в режим эмуляции MS-DOS для печати графиков на матричном принтере непосредственно из MicroCAP-3. В противном случае возможен некорректный вывод результатов из-за конфликта драйвера принтера системы Windows95/98 и встроенного в MicroCAP-3.

5.7 Выполнение моделирования

После того как создан чертеж схемы и заданы параметры всех компонентов, можно переходить к моделированию, т.е. к расчету характеристик исследуемой цепи. Как уже отмечалось ранее, в пакете MicroCAP-3 возможны четыре вида анализа: расчет переходных процессов в цепи при воздействии сигналов различной формы, малосигнальный частотный анализ (расчет частотных характеристик цепей), расчет по постоянному току и спектральный анализ Фурье. Запуск процесса моделирования осуществляется командой Run из горизонтальной строки меню. При этом появляется выпадающее меню, содержащее следующие команды:



- 1: Transient – расчет переходных процессов;
- 2: AC – расчет частотных характеристик;
- 3: DC – расчет по постоянному току;
- 4: Fourier – спектральный анализ Фурье;
- 5: Quit analysis (F3) – выход из режима анализа.

При выборе одной из команд меню Run программа проверяет схему на наличие ошибок и при отсутствии таковых переходит в режим анализа. В противном случае выдается сообщение о найденной ошибке, и выполнение команды Run прекращается.

При активизации режима анализа в горизонтальной строке-меню появляются дополнительные пункты, вызывающие выпадающее меню для управления процессом моделирования. Название первой команды соответствует наименованию режима анализа, а вторая носит название MonteCarlo и служит для установки параметров и просмотра результатов статистического анализа Монте-Карло. Также с экрана монитора исчезают окно команд редактора чертежа схемы и окно компонентов. В режиме анализа становятся недоступными часть команд из горизонтальной строки-меню.

Для возврата в режим редактирования чертежа схемы необходимо выбрать команду **Run/5:Quit analysis** или нажать горячую клавишу <F3>.

5.7.1 Анализ переходных процессов (Run/1:Transient)

В этом режиме производится моделирование переходных процессов при воздействии на схему сигналов различной формы. Анализ переходных процессов позволяет наглядно проследить и исследовать временные зависимости токов и напряжений в схеме (от начального до установившегося значения). Он основан на численном решении системы дифференциальных или конечно-разностных уравнений, как правило, с автоматически меняющимся во времени шагом.

При отсутствии ошибок в схеме программа составляет ее топологическое описание, выполняет подготовку к численному расчету переходных процессов (расчет рабочей точки по постоянному току) и открывает окно задания параметров моделирования Analysis limits (см. рис. 5.13). Далее параметры, заданные в этом окне, используются при построении графиков и таблиц, отображающих результаты моделирования.

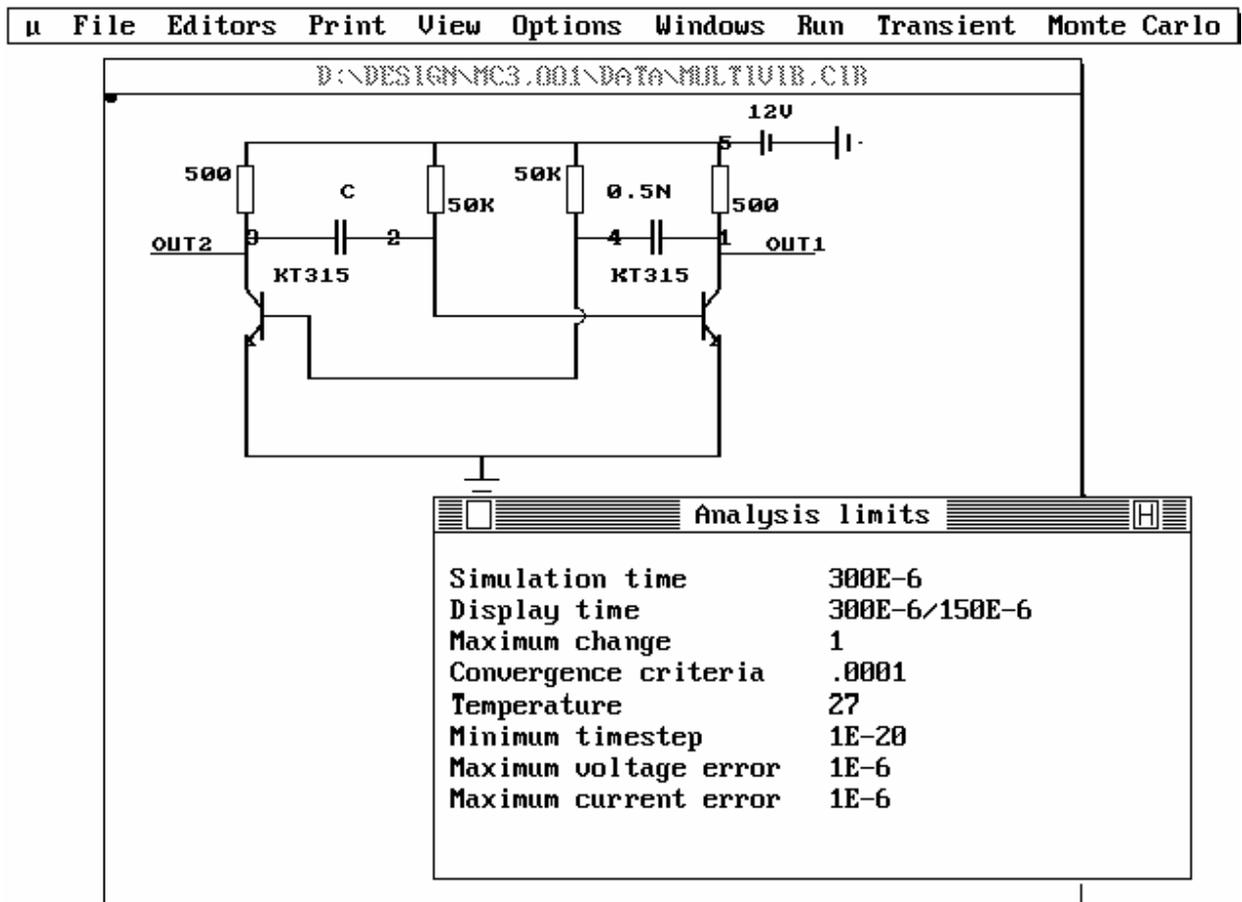


Рисунок 5.13 – Схема симметричного мультивибратора и окно задания параметров моделирования Analysis limits

В качестве примера рассмотрим симметричный мультивибратор на биполярных транзисторах. Принципиальная схема мультивибратора и вид экрана монитора при запуске режима расчета переходных процессов Transient представлены на рис. 5.13.

Дополнительное меню Transient, которое служит для управления параметрами моделирования, содержит следующие команды:

1:Run	F2
2:Limits	F9
3:Options	F10
4:Scope	F8
5:Stepping	F11
6:Palette	
7:Monitor	F12
8:Initial values	

1:Run (F2) – начало моделирования;

2:Limits (F9) - задание пределов анализа;

3:Options (F10) - задание опций анализа Transient;

4:Scope (F8) - считывание координат графиков с помощью двух электронных курсоров;

5:Stepping (F11) - назначение варьируемых параметров при многовариантном анализе;

6:Palette - установка цветовой палитры Transient;

7:Monitor (F12) - определение переменных для построения графиков или таблиц с результатами анализа;

8:Initial values - просмотр и редактирование начальных значений потенциалов узлов и токов через индуктивности при расчете переходных процессов. Данный режим используется для вывода карты режима (рабочей точки) схемы по постоянному току.

Вначале необходимо задать параметры для моделирования, определяющие пределы анализа и точность решения системы уравнений. Данные параметры задаются в окне Analysis limits (см. рис. 5.13). Рассмотрим значения этих переменных подробнее.

Simulation time - время моделирования. Определяются верхняя и нижняя границы временного интервала для выполнения анализа. Параметр имеет следующий синтаксический формат: Tmax[/Tmin[/TimeStep]], где Tmax - верхняя граница, Tmin - нижняя граница, TimeStep - максимально допустимый шаг по времени. Квадратные скобки здесь и далее указывают на необязательные параметры.

Display time - определяет временной интервал, который будет использован для вывода результатов на экран или принтер. Синтаксический формат такой же, как у параметра Simulation time.

Maximum change - определяет максимально допустимое изменение (в процентах) рассматриваемых переменных в пределах одного шага моделирования. Этот параметр желательно задавать малым для получения гладких и точных диаграмм. Типичное значение – 0,5 %...5 %.

Convergence criteria (relative error) - критерий сходимости (относительная ошибка решения системы дифференциальных уравнений). Определяет максимальную относительную ошибку, допускаемую на каждом шаге расчета. Этот критерий эквивалентен количественному параметру RELTOL программы PSpice [13-15]. Типичное значение - 1E-3...1E-6.

Temperature – температура. Параметр определяет температуру окружающей среды при моделировании. Синтаксический формат: High[/Low[/Step]], где Low - начальное значение температуры, High - конечное значение температуры, Step - шаг изменения температуры. По умолчанию задают температуры в 27 градусов.

Minimum timestep – минимальное значение изменения шага по времени. Типичное значение - $1E-15...1E-20$. Влияет на точность и время расчета.

Maximum voltage error - максимально допустимая абсолютная ошибка для напряжения. Параметр эквивалентен количественному параметру VNTOL в программе PSpice. Типичное значение - $1E-6$.

Maximum current error - максимально допустимая абсолютная ошибка для тока. Параметр эквивалентен количественному параметру ABSTOL в программе PSpice. Типичное значение - $1E-6$.

Для того чтобы записать текущие установки окна Analysis limits в текстовый файл, нажмите комбинацию клавиш <Alt-1>. Файл получит имя <имя_схемы>.t1m.

В нашем примере время анализа (Simulation time) равно от 0 до 300 мксек, а временной интервал для вывода графиков (Display time) определен от 150 до 300 мксек. Это сделано специально, т.к. первые 100...130 мксек занимает переходный процесс до начала устойчивой генерации импульсов.

Выбор анализируемых характеристик (переменных) осуществляется в окне Monitor (команда **Transient/7:Monitor (F12)**). В этом окне пользователь определяет, какие переменные будут участвовать в моделировании, т.е. что будет отображаться на графиках, выводиться в виде таблиц или оцениваться при анализе Монте-Карло.

User	Plot	out	MC	T	Waveform	Scale range (high/low)	Format
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	V OUT1	20/-20	5.2
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	V 1/4	-15/15	5.2
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	V 3	20E-3	5.2
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	V 4	10E-3	5.2
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	I 2/5	-10E-3	5.2
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	I 1/5	-30E-3/30E-3	5.2
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	V OUT2	20E-3	5.2
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	V 2/3	15/-15	5.2
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			

Рисунок 5.14 – Окно выбора переменных Monitor для моделирования переходных процессов

При выборе команды **Transient/7:Monitor** («горячая» клавиша <F12>) на экране появляется окно Monitor (см. рис. 5.14), в котором имеются следующие поля:

User – сохранить результаты моделирования в файле <имя_схемы>.use. Указывается переменная, численные значения которой (256 значений) будут сохранены. В дальнейшем этот файл можно будет использовать для получения спектра выбранной характеристики с помощью анализа Фурье.

Plot – вывести на экран в виде графика.

Out – распечатать в виде таблицы или записать в текстовый файл.

MC – определяется переменная, для которой выполняется статистический анализ Монте-Карло.

T – определяет тип анализируемой переменной. Различают пять типов переменных: V - напряжение; I - ток; U - функция пользователя; P - мощность; E - энергия.

Waveform – определяет номера узлов схемы, относительно которых производится моделирование переходного процесса:

NodeA - для напряжения в узле A;

NodeA/NodeB - для напряжения между узлами A и B или тока AB, протекающего через резистор (индуктивность), включенный между узлами A и B;

NodeA/NodeB/NodeC - Мощность=ТокAB·НапряжениеBC или Энергия= \int (ТокAB · НапряжениеBC)dt ;

User function - любая допустимая алгебраическая функция, зависящая от времени и напряжений (токов) в указанных узлах. Узлы, участвующие в описании функции, должны быть обозначены текстовыми метками. Например, для функции $2 \cdot \text{OUT} \cdot \text{SIN}(1\text{E}6 \cdot \text{T})$ переменная OUT имеет смысл напряжения в узле схемы с текстовой меткой «OUT». Для задания в качестве переменной тока необходимо определить два узла, между которыми должен быть включен резистор (индуктивность).

Scale range (high/low) – определяет масштаб по оси Y при построении графиков переходных процессов. Синтаксис: <Max>/[<Min>] - где <Max> - максимальное значение; <Min> - минимальное значение.

Format – определяет формат выводимой в виде таблиц информации. Синтаксис: <Левое_Число>.<Правое_Число>, где: <Левое_Число> - число цифр перед десятичной точкой; <Правое_Число> - число цифр после десятичной точки. Пример: формат 3.3 будет печатать число 1361.7823 как 136.178E1, а формат 5.3 напечатает это же число как 13617.823E-1.

Для перемещения между полями диалогового окна Monitor используйте клавишу <Tab>, а для выбора или отмены переключателя – клавишу <Space>.

Результаты расчетов выводятся на экран в виде графиков и, если включены переключатели в поле out окна Monitor и Numeric Output в окне Options, в виде таблиц. На принтер графики выводятся по команде

Print/2:Front window или **Print/3:Screen** из основного меню. В первом случае будет распечатано только содержимое активного окна, во втором - полностью экран монитора.

При анализе переходных процессов также можно задать ряд опций, определяющих различные режимы анализа и способ отображения результатов. При активизации команды **Transient/3:Options(F10)** на экране появляется окно Transient options (см. рис. 5.15), в котором пользователь может задать следующие параметры:

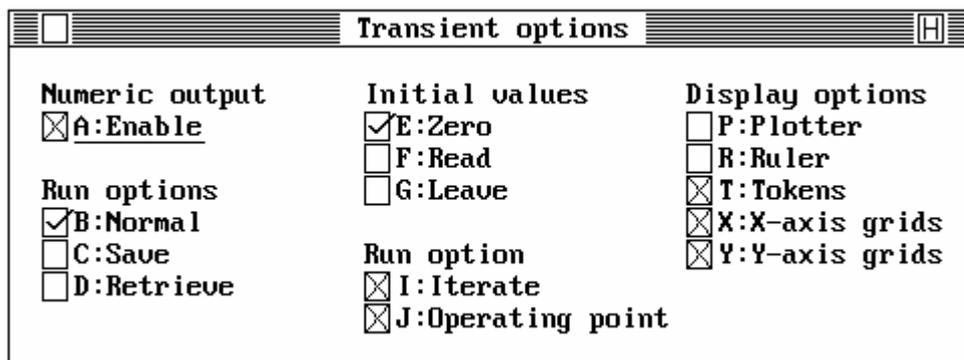


Рисунок 5.15 – Окно для задания опций анализа Transient

Переключатель Numeric output:

- A:Enable - вывод результатов в виде таблицы в файл или непосредственно на экран (в зависимости от положения переключателя Options/6:Output/Output to:).

Группа Run options:

- B: Normal - результаты расчетов не сохраняются;
- C: Save - сохранение результатов расчетов в файле (<имя_схемы>.tsa);
- D: Retrieve - считывание результатов расчетов из файла (<имя_схемы>.tsa).

При установке переключателя Retrieve вместо моделирования происходит считывание результатов расчета переходных процессов из соответствующего файла.

Группа Run option:

- I: Iterate - установка режима моделирования с автоматическим выбором шага по времени. Если эта опция включена, результаты анализа для двух соседних моментов времени будут отличаться друг от друга на величину, не превышающую указанное значение в окне Limits. При анализе большинства нелинейных схем желательно, чтобы эта опция была включена. При анализе линейных схем активизация этой опции не требуется. Для моделирования новых нелинейных схем система будет автоматически включать эту опцию.

- J: Operating point - пересчет режима по постоянному току (рабочей точки) перед каждым шагом моделирования переходного процесса.

Группа Initial values:

- E: Zero - установка нулевых начальных значений напряжений узлов и токов в индуктивностях перед каждым циклом температурного, пошагового, статистического моделирования;

- F: Read - считывание из файла начальных значений напряжений узлов и токов в индуктивностях перед каждым циклом моделирования;

- G: Leave - оставить величины напряжений узлов токов в индуктивностях равной последним полученным значениям, т.е. не изменять их перед каждым циклом моделирования. При желании эти величины могут быть изменены пользователем перед выполнением цикла моделирования в окне Initial values. Это позволяет задавать нужные значения напряжений и токов без записи данных в файле.

Группа Display options:

- P: Plotter - создание файлов для вывода на графопостроитель (*.plt);

- R: Ruller - нанесение разметки осей координат вместо построения координатной сетки;

- T: Tokens - нанесение на график маркеров;

- X: X - axis grids - нанесение разметки по оси X;

- Y: Y - axis grids - нанесение разметки по оси Y.

Переключение опций осуществляется либо нажатием клавиши с соответствующим символом, либо нажатием левой кнопки мыши в пустом квадратике перед переключателем. Для перемещения между группами опций используйте клавишу <Tab>, а для перехода от одного переключателя к другому внутри группы используйте клавиши перемещения курсора (в этом случае опция может быть выбрана с помощью клавиши <Space>).

Главными переменными для программы MicroCap-3 являются напряжения узлов и токи через элементы. Перед началом анализа окно Initial values (команда **Transient/8:Initial value**) позволяет пользователю просмотреть и отредактировать начальные значения этих переменных. Эти значения могут быть также установлены нулевыми, загружены из предварительно сохраненного файла или взятыми равными последним полученным значениям. При активизации режима **Transient/8:Initial value** на экране появляется окно, в котором представлены значения напряжений узлов (Node voltage) и токов через индуктивности (Inductor currents). В зависимости от опции, выбранной в окне Options в группе Initial values, при анализе будут использоваться следующие начальные значения напряжений и токов:

1) текущие значения, отображаемые в данный момент на экране (переключатель G:Leave);

2) нулевые (переключатель E:Zero);

3) находящиеся в файле <имя_схемы>.tsa (переключатель F:Read).

Текущие значения - это переменные, находящиеся в памяти. Если анализ до этого не выполнялся, то обычно они имеют нулевое значение. Если анализ выполнялся, то эти переменные принимают рассчитанные в результате моделирования значения. При редактировании для переключе-

ния между напряжениями и токами используется клавиша <Tab> (горизонтальные поля), а переход от одного значения к другому осуществляется с помощью клавиш управления курсором или с помощью мыши. Имеются три дополнительные команды, которые активизируются при нажатии комбинации клавиш:

- <Alt-1> - установить нулевые начальные значения;
- <Alt-2> - прочитать файл с диска и показать начальные значения;
- <Alt-3> - записать начальные значения в файл.

Для запуска моделирования активизируйте команду **Transient/1:Run(F2)** или нажмите клавишу <F2>. После анализа выводятся диаграммы переходных процессов для выбранных переменных. Чтобы прервать процесс расчета, достаточно нажать клавишу <Esc>. Результаты расчета переходных процессов для мультивибратора (см. рис. 5.13) представлены на рис. 5.16. Здесь показаны напряжения на выходах мультивибратора (узлы OUT1 и OUT2) и форма напряжения на формирующих емкостях (узлы U1/4 и U2/3).

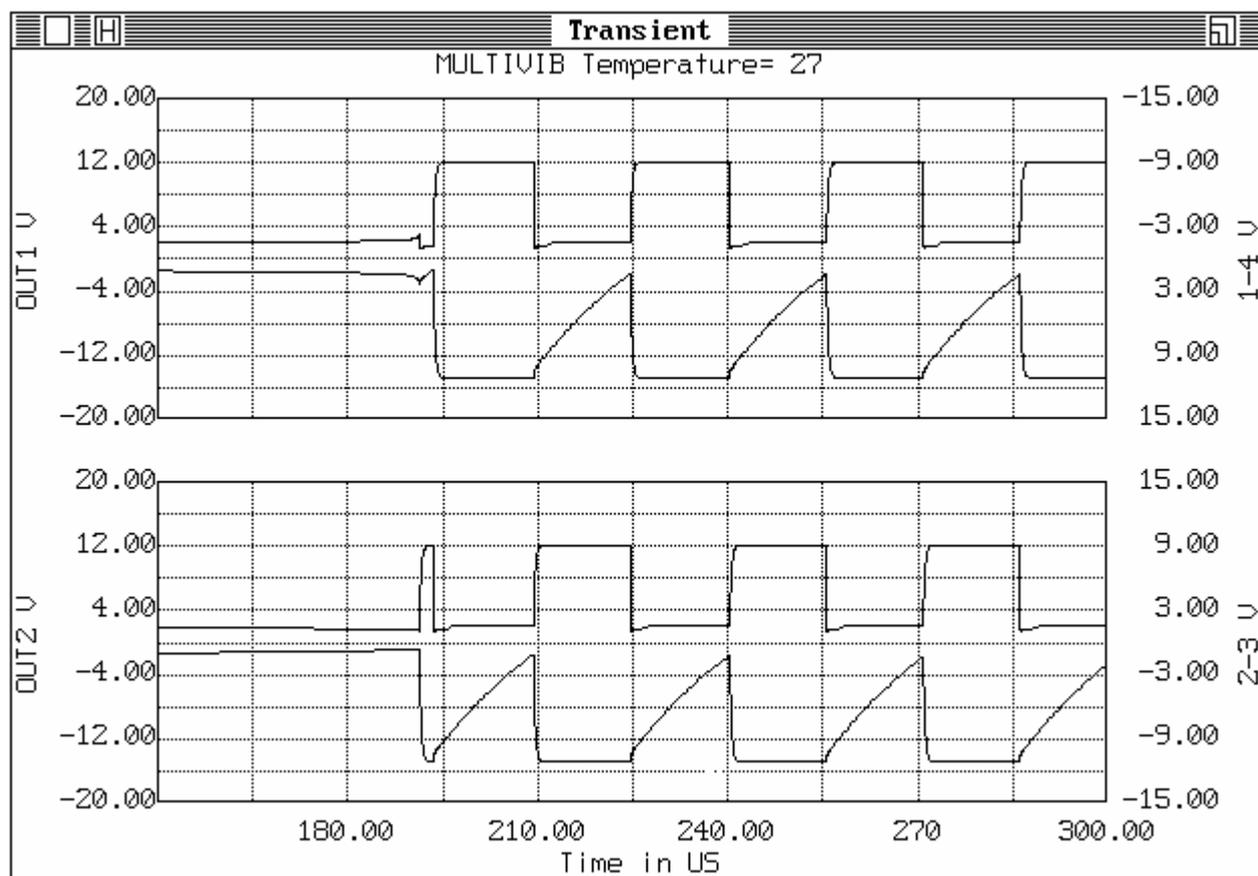


Рисунок 5.16 – Результаты моделирования переходных процессов симметричного мультивибратора

Координаты графиков можно считывать с экрана с помощью двух электронных курсоров в окне Scope (см. рис. 5.17), которое активизируется командой **Transient/4:Scope(F8)**. Для просмотра участков диаграмм в увеличенном виде, выбирается прямоугольный фрагмент на основном графике

(сверху): левый верхний угол фрагмента отмечается левой кнопкой мыши, а правый нижний угол - правой кнопкой. Можно также использовать клавиши <+> и <-> для изменения размеров выделенной области. Положение электронных курсоров на графике в нижнем окне определяется нажатием левой клавиши мыши - для одного курсора, и правой - для второго.

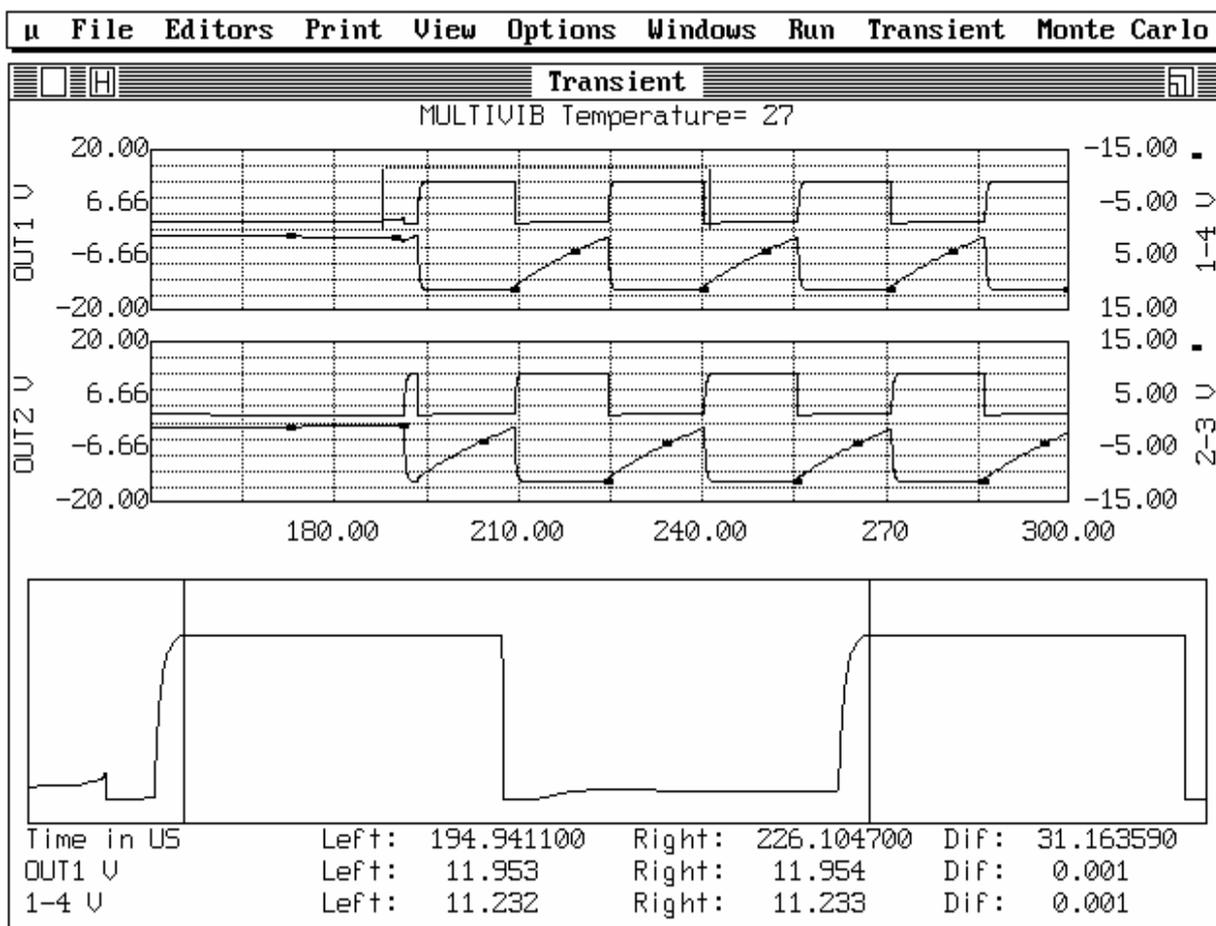


Рисунок 5.17 – Окно Score для считывания координат графиков в режиме Transient

Снизу отображаются значения независимой переменной (время, частота или напряжение), а также положение на диаграмме левого курсора, правого курсора и разность между координатами обоих курсоров. Использование клавиши <Tab> позволяет переключаться с одного курсора на другой при управлении с клавиатуры.

С помощью данного графика можно определить время переходного процесса, амплитуду и период повторения импульсов мультивибратора. Для нашего примера (рис. 5.17) видно, что период повторения импульсов составляет примерно 31,16 мксек (разность показаний курсоров Diff для строки Time in US).

В режиме моделирования переходных процессов может быть задан цвет для следующих объектов (команда **Transient/6:Palette**):

- Grid (сетка окна с графиками);
- Background (фон окна с графиками);
- First (первый график);

- Second (второй график).

Диалоговое окно для установки цветов Palette в режиме Transient такое же, как и для формирования цветовой палитры редактора чертежа схемы.

5.7.2 Моделирование частотных характеристик (Run/2:AC)

В этом режиме производится расчет частотных характеристик цепи. Анализ характеристик в частотной области включает в себя расчеты амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) $K(f)$, фазо-частотной характеристики (ФЧХ) $\Phi(f)$, группового времени запаздывания (ГВЗ) $t=d\Phi/d\omega$, зависимости входного $Z_{in}(f)$ и выходного сопротивлений $Z_{out}(f)$ от частоты f ; $\omega=2\pi f$.

Выпадающее меню режима AC имеет вид, похожий на меню для режима Transient, за исключением команд Monitor и Initial values.

1:Run	F2
2:Limits	F9
3:Options	F10
4:Scope	F8
5:Stepping	F11
6:Palette	

При расчете частотных характеристик в окне Analysis limits (см. рис. 5.18) задаются параметры, определяющие пределы анализа и точность моделирования (команда AC/2:Limits(F9)). Ниже рассмотрим значения этих параметров более подробно.

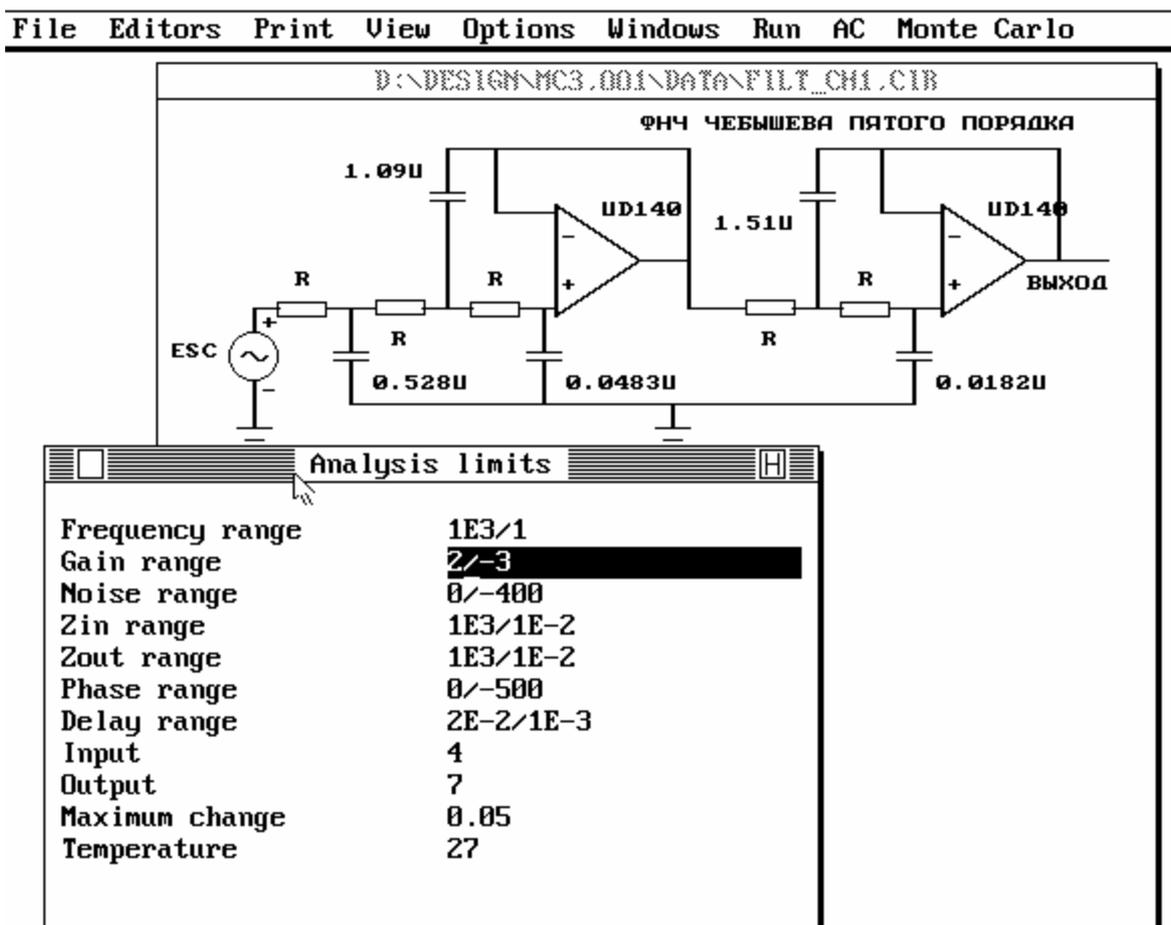


Рисунок 5.18 – Принципиальная схема ФНЧ и окно Analysis limits (экран монитора MicroCAP-3 в режиме анализа частотных характеристик AC)

Frequency range - частотный диапазон, в котором осуществляется моделирование схемы, задаются верхняя и нижняя граничные частоты диапазона (в Герцах). Синтаксис: <High>/<Low>, где <High> - верхняя граничная частота, <Low> - нижняя граничная частота диапазона.

Gain range - максимальное и минимальное значения коэффициента передачи для построения графика АЧХ. Единицы измерения - децибеллы.

Noise range - максимальное и минимальное значения шумовой характеристики (нормированная спектральная плотность шума) для построения графика.

Zin range - максимальное и минимальное значения модуля входного сопротивления (в Ом) для построения графика.

Zout range - максимальное и минимальное значения модуля выходного сопротивления (в Ом) для построения графика.

Phase range - максимальное и минимальное значения фазового угла для построения графика ФЧХ (в градусах).

Delay range - максимальное и минимальное значения группового времени запаздывания (в секундах);

Input - определение узлов подключения источника гармонического сигнала при малосигнальном частотном анализе. Синтаксис: <+узел>/<-узел>].

Output - определение выходных узлов. Здесь указываются номера узлов для вычисления выходных частотных характеристик цепи. Синтаксис: <+узел>/<-узел>].

Maximum change, % - определяет максимальное изменение значения характеристики на каждом шаге расчета по частоте в процентах (типовое значение 0,5...5 %).

Temperature - диапазон изменения температуры. Синтаксис: <Tmax>/<Tmin>/<Step>], где <Tmax> - верхний предел, <Tmin> - нижний предел, <Step> - шаг изменения температуры. По умолчанию считают температуру равной 27 градусов.

Для записи пределов частотного анализа в текстовый файл нажмите комбинацию клавиш <Alt-1>. Файл получит имя <имя_схемы>.alm.

Выходными переменными могут быть коэффициент передачи по напряжению, входное сопротивление или проводимость, выходные сопротивление или проводимость и корень квадратный из спектральной плотности шумового напряжения (коэффициент шума).

В окне Options (см. рис. 5.19), которое активизируется командой **AC/3:Options(F8)**, задаются параметры, определяющие форму вывода результатов моделирования частотных характеристик.

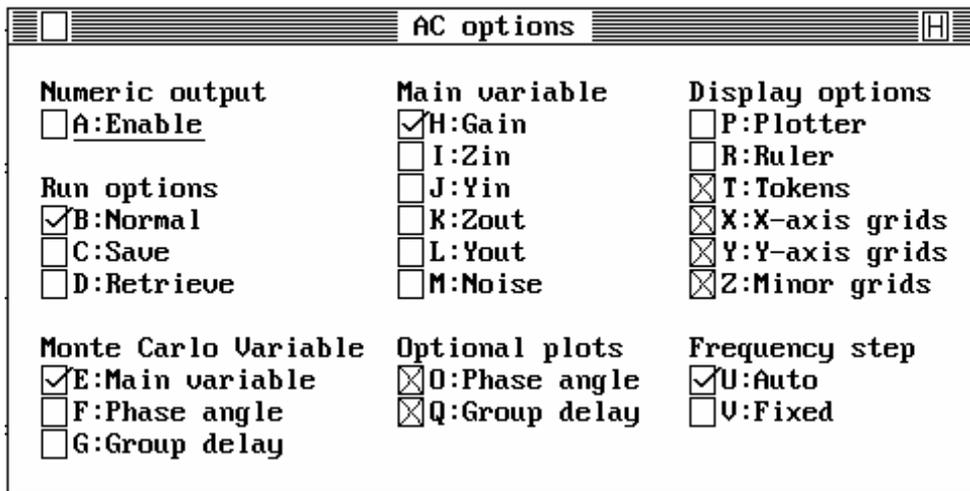


Рисунок 5.19 – Окно Options для режима анализа АС

Группы Numeric output и Run options аналогичны соответствующим группам в окне Transient options из режима анализа переходных процессов (см. п. 5.7.1).

Группа Monte-Carlo variable – выбор переменной для статистического анализа Монте-Карло:

- E: Main variable - выбор модуля частотной характеристики (см. ниже) для статистического анализа;
- F: Phase angle - выбор фазового угла для статистического анализа;
- G: Group delay - выбор ГВЗ для статистического анализа.

Группа Main variable – выбор главной переменной для анализа:

- H: Gain - коэффициент передачи по напряжению;
- I: Zin - входное сопротивление;
- J: Yin - входная проводимость;
- K: Zout - выходное сопротивление;
- L: Yout - выходная проводимость;
- M: Noise - уровень шума.

Группа Optional plots – дополнительные графики для основной переменной, указанной в группе Main variable:

- O: Phase angle - вывод графика фазочастотной характеристики;
- Q: Group delay - вывод графика частотной зависимости ГВЗ.

Группа Frequency step – установка способа изменения шага по частоте при анализе:

- U: Auto - шаг по частоте будет автоматически вычисляться программой;
- V: Fixed - установка фиксированного шага по частоте, величина которого определена в окне Analysis limits.

Группа Display options - аналогична соответствующей группе в окне Transient options в режиме анализа переходных процессов (см. п. 5.7.1).

Выбор команды меню **AC/6:Palette** используется для вызова диало-

гового окна для задания цвета следующим объектам:

- Grid (сетки окна с графиками);
- Background (фона окна с графиками);
- Main (графика главной переменной);
- Phase (графика фазового угла);
- Delay (графика группового времени задержки).

Вид диалогового окна *Palette* и принцип работы с ним был рассмотрен ранее в п. 5.6.1.

Для демонстрации возможностей программы рассмотрим расчет частотных характеристик для фильтра нижних частот (ФНЧ) Чебышева с частотой среза 100 Гц. Принципиальная схема ФНЧ представлена на рис. 5.18. Величина резисторов, обозначенных на схеме как R , равна 10 кОм. Номинальные значения остальных элементов схемы видно из рис. 5.18. Параметры пределов моделирования для данного примера, которые необходимо задать в окне *Analysis limits*, также видно на рис. 5.18.

Для запуска моделирования активизируйте команду **AC/1:Run(F2)** или нажмите клавишу <F2>. После расчета выводятся диаграммы частотных характеристик (АЧХ, ФЧХ и ГВЗ) для выбранной главной переменной. Чтобы прервать процесс расчета, достаточно нажать клавишу <Esc>. Результаты расчета частотной характеристики для ФНЧ Чебышева представлены на рис. 5.20.

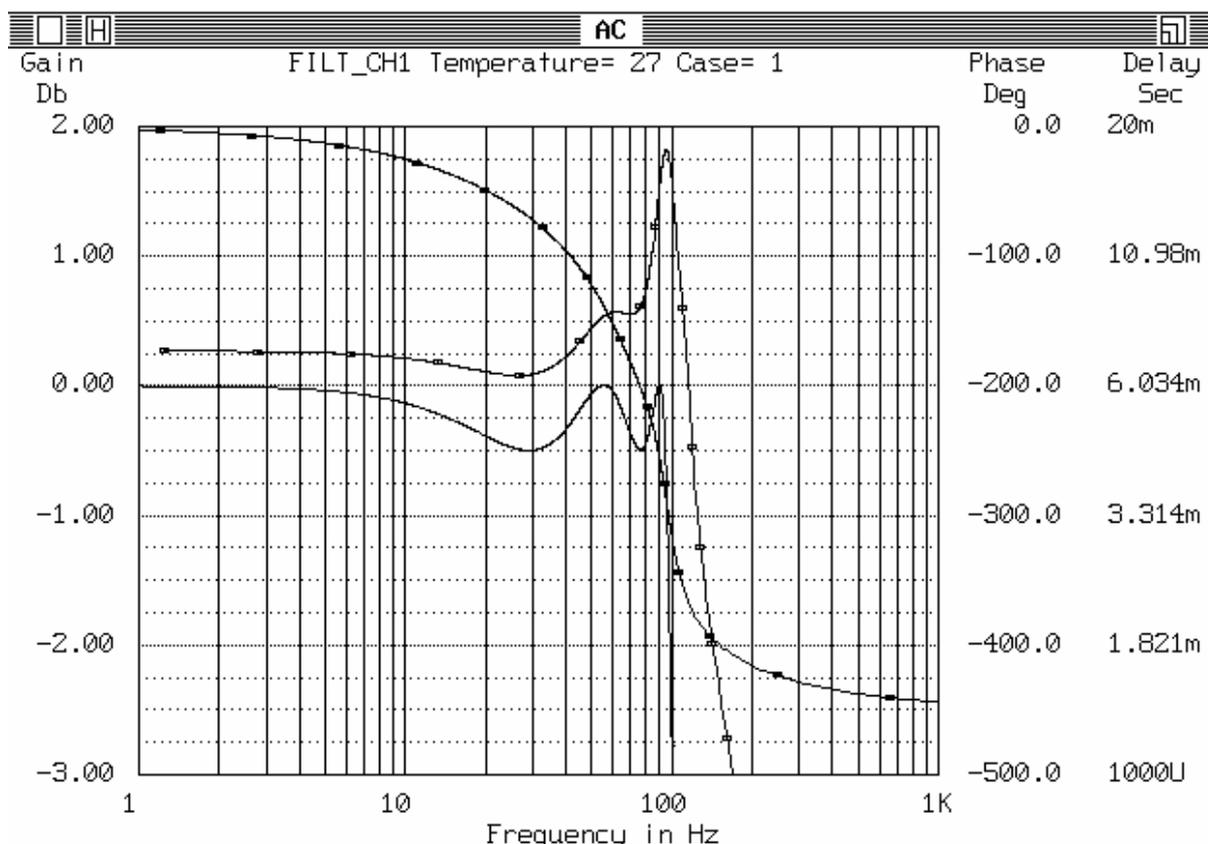
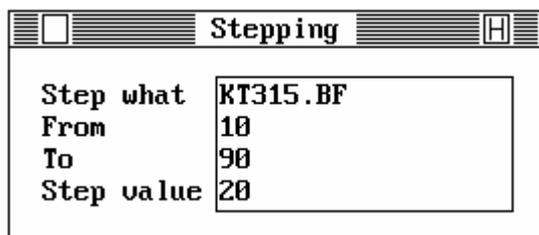


Рисунок 5.20 – Частотные характеристики ФНЧ

По АЧХ ФНЧ можно определить частоту среза (на уровне -3 дБ от максимального значения коэффициента усиления), а также величину неравномерности АЧХ в полосе пропускания. Для определения точных значений координат графиков можно также использовать режим **AC/4:Scope(F8)**.



В программе MicroCAP-3 предусмотрена возможность выполнения анализа при автоматическом изменении параметров одного из элементов схемы (многовариантный анализ). Это позволяет исследовать влияние этого элемента на характеристики моделируемого устройства.

Для включения данного режима активизируйте пункт **Transient/5:Stepping(F11)**. На экране появляется окно Stepping, позволяющее задать пределы пошагового изменения параметра одного из элементов схемы. Например:

Step what: KT315.BF – варьировать параметр BF для транзистора KT315;
 From: 10 - от 10 (начальное значение);
 To: 90 - до: 90 (конечное значение);
 Step value: 20 - с шагом 20.

В первом поле окна Stepping задается имя компонента схемы и варьируемый параметр этого компонента по определенному формату.

Для полупроводниковых приборов и источников сигналов, входящих в библиотеку устройств (транзисторы, диоды и т.д.), существует формат: <Имя_компонента>.<Имя_параметра>, где <Имя_компонента> - имя элемента схемы (для транзистора KT315) из текущей библиотеки компонентов Library devices, <Имя_параметра> - сокращенное имя параметра модели в библиотеке (изменять BF - Beta forward). Таким образом, запись KT315.BF будет соответствовать коэффициенту усиления по току (Beta forward) в прямом включении для биполярного транзистора KT315.

Для простых компонентов <Имя_параметра> - это текстовая метка, используемая для обозначения элемента в схеме. Элемент схемы (простой компонент), который будет варьироваться в режиме Stepping, должен быть описан в текущей библиотеке меток Library labels. Например, R1 будет соответствовать сопротивлению всех резисторов, обозначенных в схеме как R1.

Второе, третье и четвертое поля содержат соответственно начальное значение, конечное значение и шаг изменения варьируемого параметра. Не рекомендуется задавать нулевых значений, т.к. возможно деление на ноль при вычислениях.

Внимание! В окне Stepping система не воспринимает инженерную систему сокращений, т.е. для резистора с сопротивлением 100 КОм необходимо указывать значение параметра не 100К, а 100E3 или 100000.

При активизированном режиме многовариантного анализа Stepping номинальное значение варьируемого параметра игнорируется. Для выключения режима достаточно очистить первое поле Step what окна Stepping.

Для нашего примера рассмотрим влияние величины резисторов R на вид АЧХ и ФЧХ ФНЧ. Параметры изменения величины R в окне Stepping указаны на рис. 5.21. Таким образом, на каждом этапе расчета АЧХ и ФЧХ величина резисторов R будет меняться от 1000 Ом до 10000 Ом с шагом 5000 Ом, т.е. будет сделано три итерации моделирования для R равных 1000, 6000 и 11000 Ом.

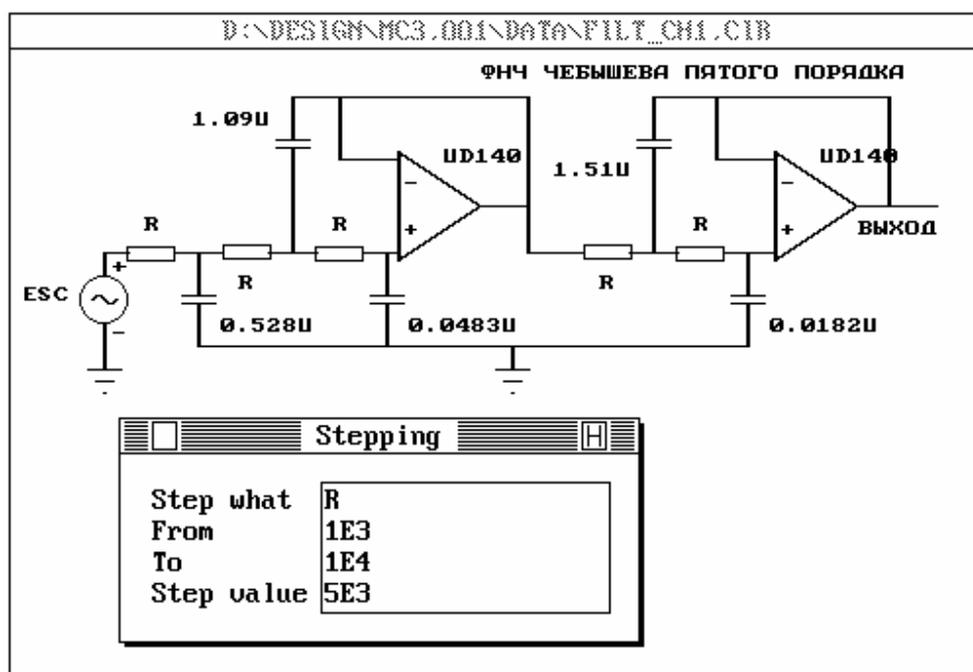


Рисунок 5.21 – Задание параметров резистора R для многовариантного анализа Stepping

Результаты многовариантного анализа частотных характеристик ФНЧ Чебышева при изменении величины резисторов R представлен на рис. 5.22. Видно, что изменение R приводит к сдвигу полосы среза ФНЧ. При увеличении величины R происходит смещение полосы среза ФНЧ в область низких частот.

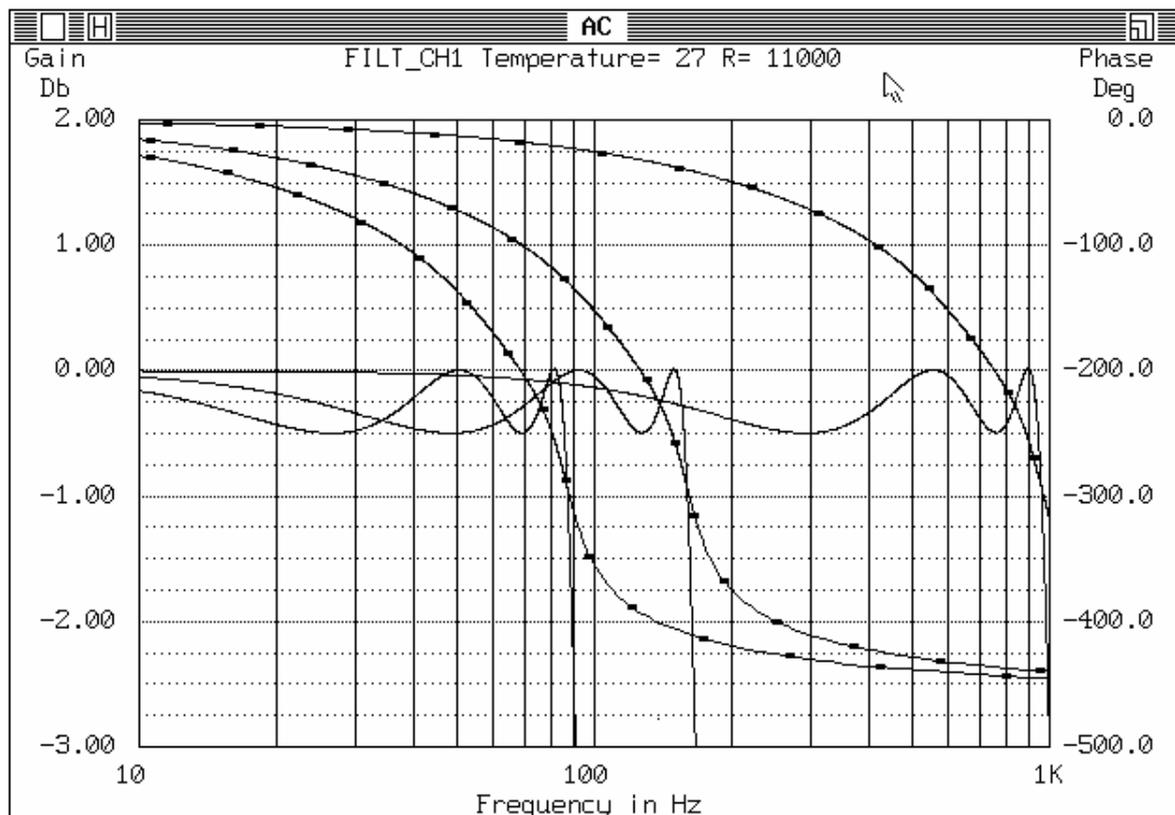


Рисунок 5.22 – Результаты многовариантного анализа АЧХ и ФЧХ ФНЧ Чебышева

5.7.3 Анализ по постоянному току (Run/3:DC)

В этом режиме программа рассчитывает передаточную характеристику схемы по постоянному току - зависимость выходного напряжения (тока) от входного напряжения (тока), изменяемого в указанных пользователем пределах. Нелинейные схемы по постоянному току рассчитываются итерационным способом для каждого фиксированного значения входного напряжения.

Для удобства исследования схемы предусмотрена возможность подключения двух варьируемых источников напряжения или тока - основного (первого) и дополнительного (второго). При этом пределы изменения основного источника отображаются на графике по оси X (т.е. его напряжение (ток) выступает в качестве независимой переменной), а напряжение (ток) второго источника выступает в качестве параметра.

При анализе по постоянному току задаются следующие параметры (команда **DC/2:Limits(F9)**):

Input 2 range - пределы изменения напряжения или тока второго варьируемого источника. Синтаксис: <High>[/<Low>], где <High> - верхний предел, <Low> - нижний предел. Если используется только один источник, то необходимо установить NONE.

Input 2 step - шаг изменения напряжения или тока второго источника.

Input 2 - узлы подключения и тип второго источника. Синтаксис:

<+узел>/[<-узел>]/[<I> или <V>]. Если источник один, то NONE.

Input 1 range - пределы изменения напряжения или тока основного (первого) источника. Синтаксис: <High>[/<Low>], где <High> - верхний предел, <Low> - нижний предел.

Maximum input 1 step - максимальный шаг изменения напряжения или тока основного источника.

Input 1 - узлы подключения и тип основного источника тока или напряжения. Синтаксис: <+узел>/[<-узел>]/[<I> или <V>].

Output range - пределы изменения выходного напряжения или тока для построения графика передаточной функции.

Output - номера выходных узлов и тип выходной переменной. Синтаксис: <+узел>/[<-узел>]/[<I> или <V>].

Maximum change, % - максимально допустимое изменение выходной переменной (в процентах) в пределах одного шага моделирования при изменении напряжения и тока варьируемых источников.

Temperature - диапазон изменения температуры.

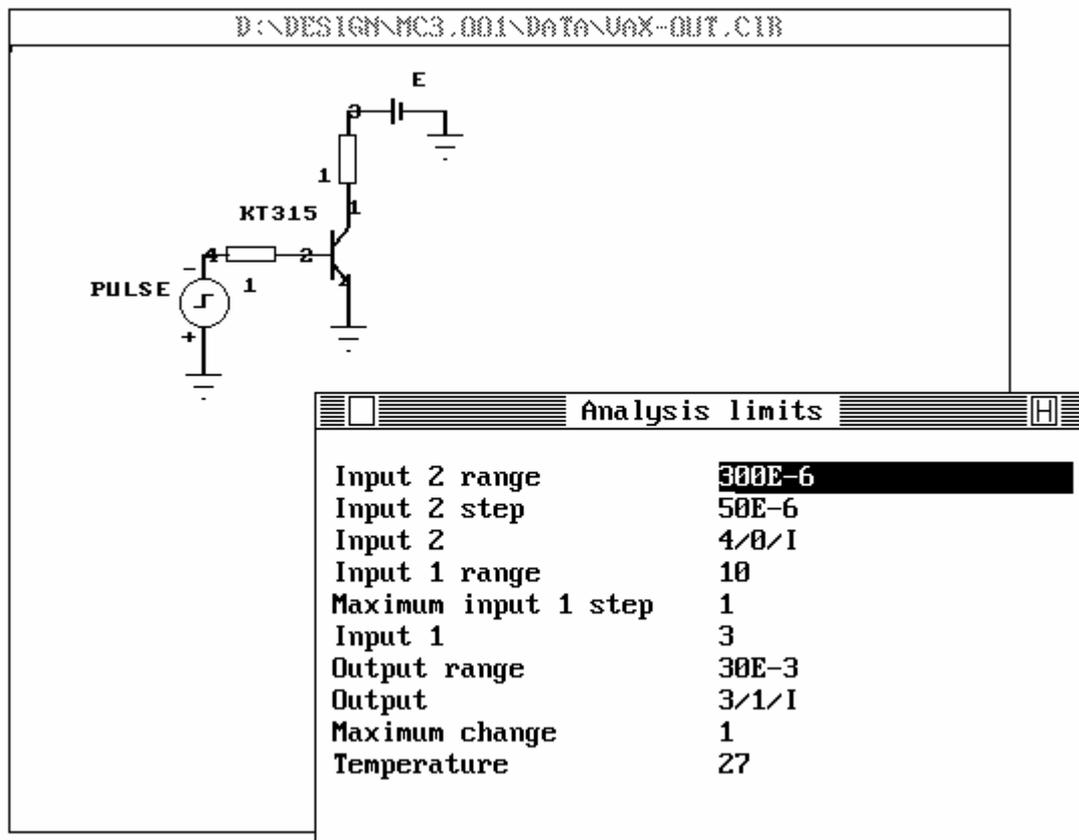


Рисунок 5.23 – Схема и пределы анализа для получения выходной ВАХ транзистора

Замечание: Если не указан тип источника (V или I), то по умолчанию используется источник напряжения V. Для записи пределов анализа Analysis limits в текстовый файл нажмите комбинацию клавиш <Alt-1>. Файл получит имя <имя_схемы>.d1m.

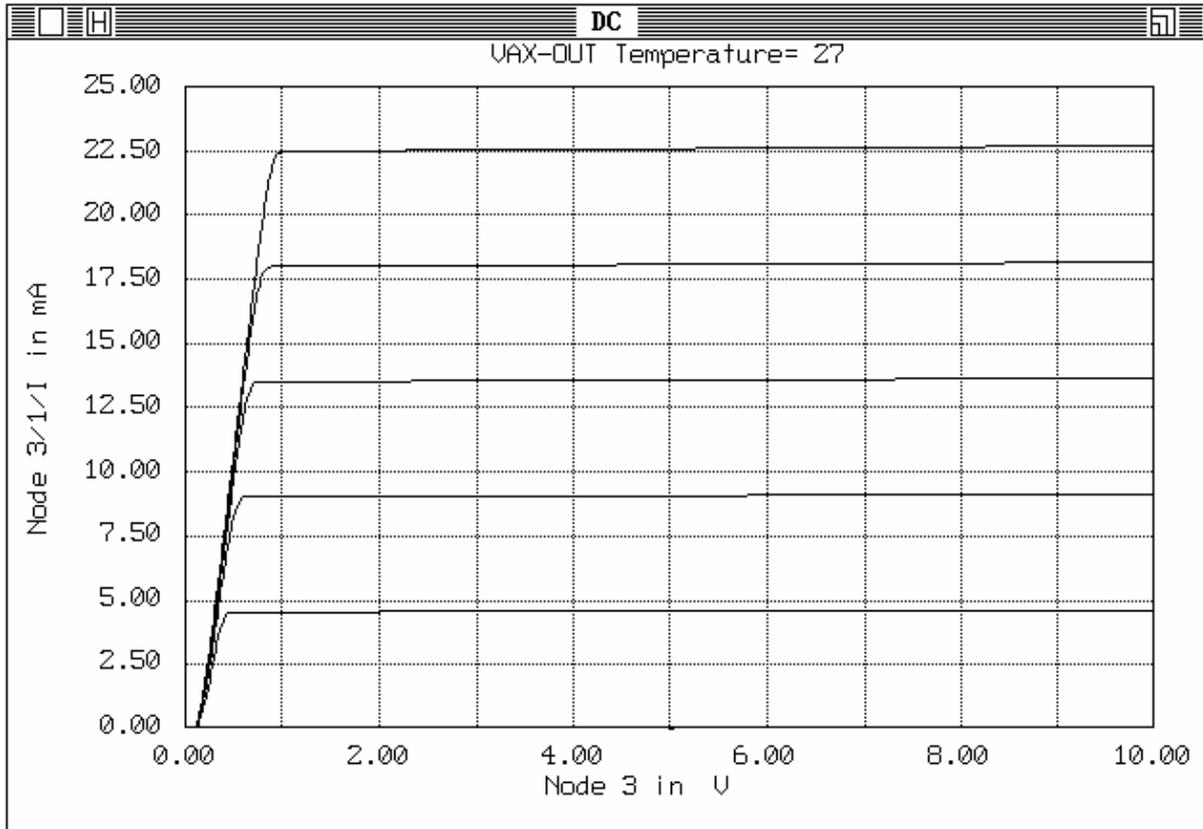


Рисунок 5.24 – Выходная ВАХ транзистора КТ315, полученная в режиме расчета по постоянному току DC

Диалоговые окна, управляющие формой вывода результатов моделирования (команда **DC/3:Options**) и цветом графиков (команда **DC/6:Palette**), аналогичны используемым в режиме анализа переходных процессов Transient (см. п. 5.7.1).

В качестве примера рассмотрим получение семейства выходных статических вольт-амперных характеристик (ВАХ) транзистора КТ315. Схема для получения ВАХ и требуемые пределы анализа Analysis limits представлены на рис. 5.23. Чтобы посмотреть величину тока, в цепь базы и коллектора включены резисторы с маленьким сопротивлением (1 Ом). Батарейка E определяют требуемый потенциал на коллекторе транзистора (в нашем случае 0 В). Источник PULSE позволяет подключать к базе варьируемый источник тока для получения семейства ВАХ.

Результаты моделирования схемы в виде статической выходной ВАХ представлены на рис. 5.24. С помощью этой же схемы можно получить входную и сквозную (проходную) ВАХ транзистора, если соответствующим образом задать варьируемые источники и выходную переменную.

5.7.4 Спектральный анализ Фурье (команда меню Run/4:Fourier)

В этом режиме анализа (команда **Run/4:Fourier**) мы можем получить спектр заданного сигнала, т.е. представить сигнал сложной формы в виде суммы гармонических сигналов (синусоид) с разной амплитудой и фазой.

Анализ Фурье использует файл, который получается при анализе переходных процессов. Этот файл содержит N равноотстоящих друг от друга значений (отсчетов) колебания за один период. Данный файл может быть сгенерирован также внешними аппаратными или программными средствами. В режиме анализа Фурье программа считывает информацию из файла и определяет гармонический спектр колебания. При этом запрашивается имя файла <имя_схемы>.usr, в котором находятся 256 выборок сигнала, подлежащего спектральному анализу. После указания числа рассчитываемых гармоник (2, 4, 8, 16, 32, 64, 128) на экран выводятся графики спектров.

Результаты спектрального анализа могут быть выведены на экран, принтер или в файл. Направление вывода данных может быть задано в режиме **Fourier/2:Hardcopy**:

1: Text Output - вывод спектральных характеристик на принтер в табличной форме;

2: Plotter Output - вывод результатов на графопостроитель;

3: Palette – вызов диалогового окна Palette для задания цвета графиков результатов:

- C:Magnitude (спектра амплитуд);

- F:Angle (спектра фаз);

- J:Wave (формы сигнала);

- I:Cosine (косинусной составляющей спектра);

- K:Sin (синусной составляющей спектра).

Вид окна Fourier для просмотра спектров выходного сигнала мультивибратора, полученного при анализе схемы (рис. 5.13) в режиме Transient, показан на рис. 5.25.

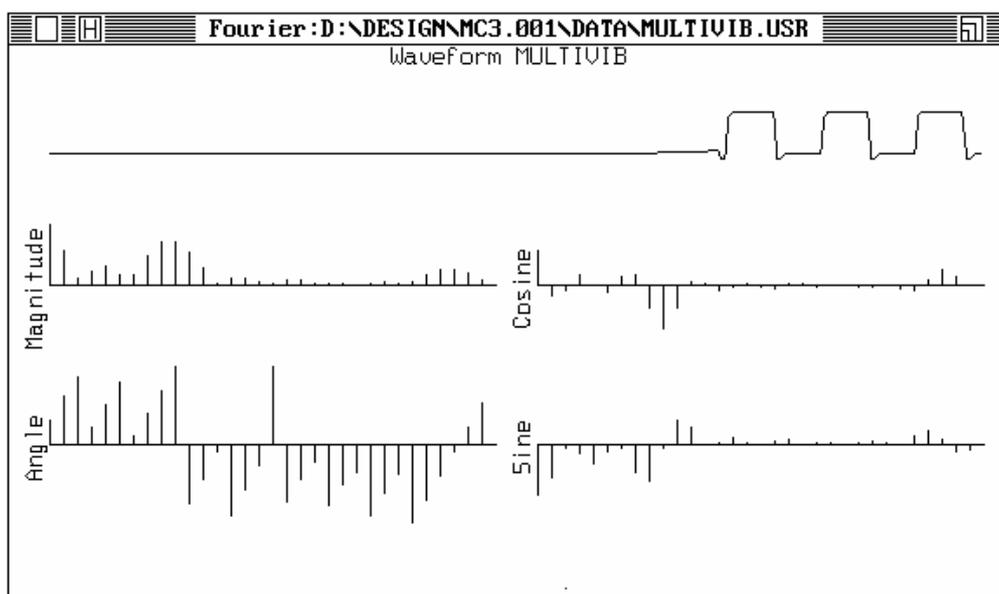


Рисунок 5.25 – Спектр сигнала на выходе мультивибратора (анализ Фурье)

5.7.5 Статистический анализ Монте-Карло

При проведении моделирования в режимах Transient, AC или DC доступен режим Monte-Carlo для расчета характеристик схемы при случайном разбросе параметров элементов. Статистический анализ может выполняться лишь в том случае, когда в режиме Stepping не предусмотрено отдельного пошагового изменения параметра компонента схемы. Разброс параметров компонентов TOLERANCE задается в библиотеке компонентов или указывается в явном виде при включении компонента в чертеж схемы. Кроме того, в библиотеке устройств Library devices можно задавать относительный разброс в процентах (Lot tolerance) всех параметров моделей компонентов, с помощью которого моделируют устройства с коррелированными параметрами.

В качестве примера рассмотрим переходный процесс в RLC-цепи при разбросе параметров элементов цепи. Схема и установки Analysis limits для проведения расчета представлены на рис. 5.26. Разброс элементов указан вместе с номинальным значением в виде текстовой метки, например: метка 50/20 для резистора означает, что этот компонент имеет номинальное сопротивление 50 Ом с возможным разбросом $\pm 20\%$.

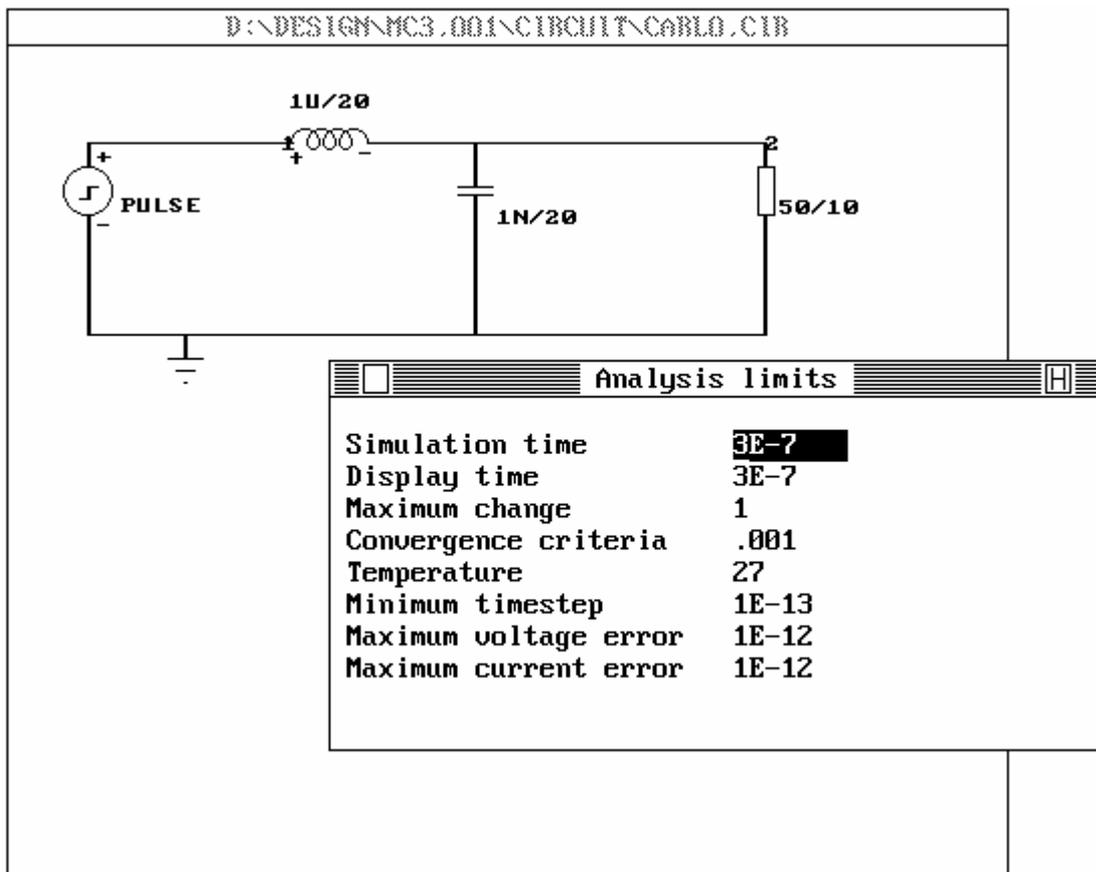


Рисунок 5.26 – Схема и установки анализа для исследования переходных процессов в RLC-цепи

Пункт меню режима анализа Monte-Carlo имеет два подпункта: Options и Statistics. С помощью команды Options вызывается диалоговое окно Monte Carlo options, в котором задается количество статистических испытаний, пределы изменения независимых и зависимых параметров и характер закона распределения случайных параметров, как показано на рис. 5.27.

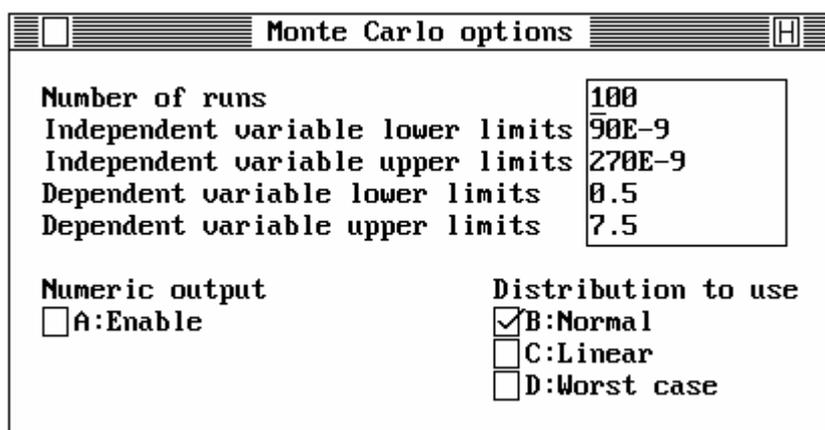


Рисунок 5.27 – Настройка параметров метода Монте-Карло

Допустим, что в режимах Transient, AC или DC анализируется некоторая функция цепи $y=f(x)$, где x – независимая переменная (время, частота, напряжение или ток), y – зависимая переменная (узловой потенциал, модуль коэффициента передачи и пр.). Для каждой ре-

ализации процесса $y(x)$ рассчитывается глобальная характеристика (функционал) F , например максимальное значение реализации $F=\max\{y(x)\}$, для которой затем строится гистограмма по ансамблю реализаций.

Поясним смысл параметров окна Monte Carlo options (см. рис. 5.27):

Number of runs - количество статистических испытаний. В первом испытании случайные величины принимают свои номинальные значения, в последующих – в соответствии с выбранным законом распределения.

Independent variable lower limits - минимальное значение независимой переменной.

Independent variable upper limits - максимальное значение независимой переменной.

Dependent variable lower limits - минимальное значение зависимой переменной.

Dependent variable upper limits - максимальное значение зависимой переменной.

Далее выбирается закон распределения случайных величин:

Distribution to use - закон распределения;

B:Normal – нормальный;

C:Linear – равномерный;

D:Worst case - наихудший случай.

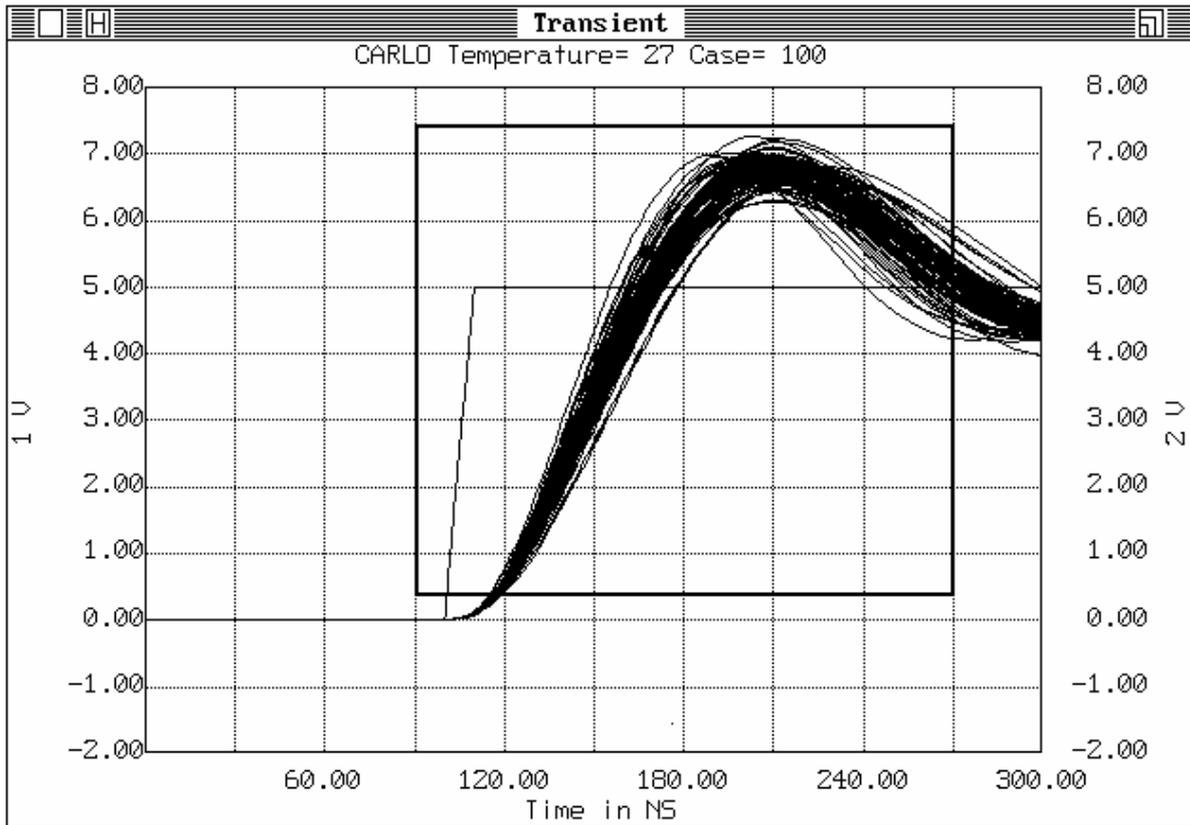


Рисунок 5.28 – Семейство реализаций переходного процесса при случайном разбросе элементов RLC-цепи

При расчете на наихудший случай испытываются наборы параметров, в которых каждый параметр принимает наибольшее или наименьшее значение в пределах указанной области разброса.

Переключатель **Numeric output** включает/выключает вывод в табличной форме результатов статистического анализа. Если переключатель включен, эти данные могут быть выведены на экран, в файл или на принтер, в зависимости от установок в окне **Output** в главном меню (команда **Options/6:Output**). Файл с результатами получит имя <имя_схемы> и расширение **tmc**, **amc** или **dmc** в зависимости от вида анализа (**Transient**, **AC** или **DC**).

После установки параметров анализа начинают моделирование выбором пункта меню **Run** или нажатием клавиши <F2>. Реализации характеристик цепи $y(x)$ выводятся на экран в виде семейства графиков, как показано на рис. 5.28 при расчете переходных процессов в RLC-цепи. Обратите внимание на выделенную рамкой прямоугольную область, в пределах которой и будет производиться статистическая обработка данных. Границы области задаются в окне **MonteCarlo options** (см. рис. 5.27).

Статистическая обработка результатов моделирования производится по команде **MonteCarlo/2:Statistics**. При активизации этой команды на экран выводится окно построения гистограмм (см. рис. 5.29). В нижней части

окна пользователю предлагается выбрать одну из шести доступных характеристик F , рассчитываемую для каждой реализации анализируемой функции $y(x)$:

- 1:VMin - минимальное значение функции $y(x)$;
- 2:VMax - максимальное значение функции $y(x)$;
- 3:VAve - среднее значение функции $y(x)$;
- 4:VRange - разность между максимальным и минимальным значениями функции $y(x)$;
- 5:IMin - значение независимой переменной x (время, частота, напряжение или ток), для которой функция $y(x)$ имеет минимальное значение;
- 6:IMax - значение независимой переменной x (время, частота, напряжение или ток), для которой функция $y(x)$ имеет максимальное значение;
- 7:IRange - величина диапазона изменения независимой переменной x (время, частота, напряжение или ток), в пределах которого находятся значения функции $y(x)$.

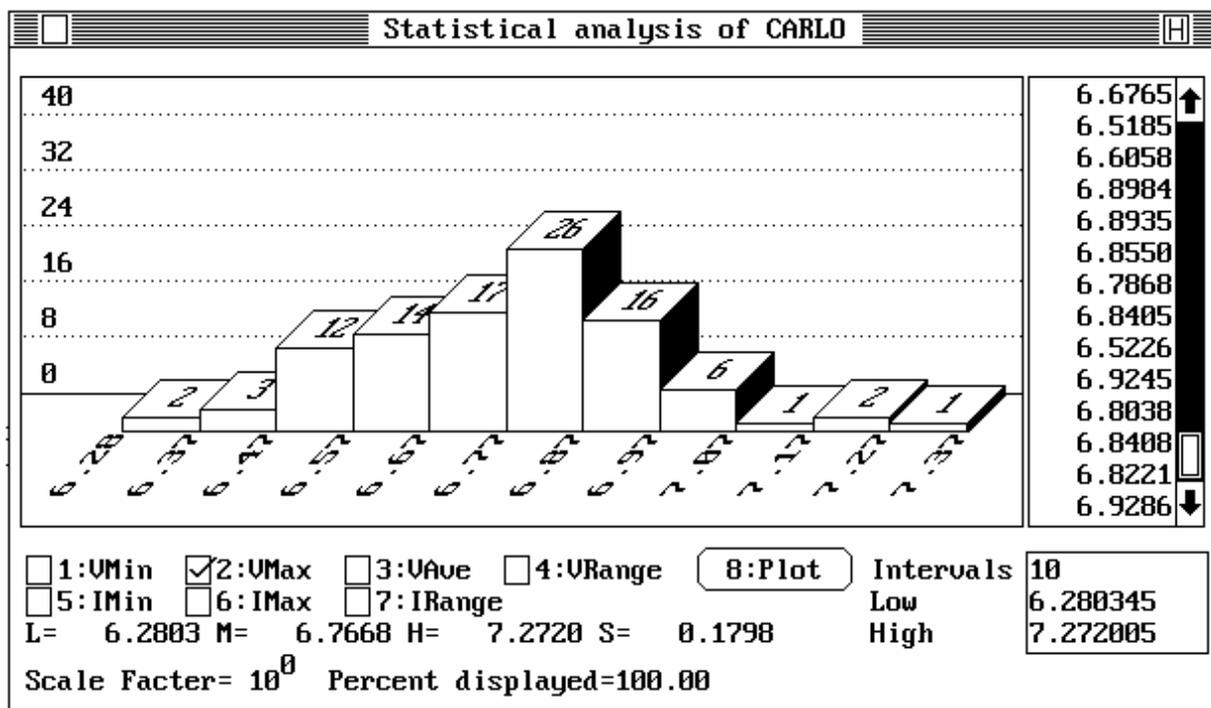


Рисунок 5.29 – Окно для вывода результатов анализа Монте-Карло в виде гистограмм

Построение гистограммы выбранной характеристики F производится сразу после ее выбора. Для выбора нужной функции используйте мышью или клавиши $\langle \text{Alt} + \text{цифра} \rangle$. На графике гистограммы по горизонтальной оси откладываются нормированные значения характеристики F , по вертикальной - вероятности в процентах.

Значения выбранной характеристики F во всех реализациях выведены в правой части окна. Ниже находится окно, в котором можно задать количество интервалов разбиения области определения анализируемой ха-

рактические характеристики F (Intervals) и значения ее границ (Low и High).

В нижней части окна Statistical analysis of Carlo помещается следующая статистическая информация:

L - минимальное значение характеристики;

M - ее среднее значение (математическое ожидание);

H - максимальное значение;

S - среднеквадратическое отклонение (ошибка) F .

Кроме того, указано значение нормировочного масштабного коэффициента Scale Factor, на который разделены значения характеристики F при выводе на экран статистической информации.

При активизации кнопки **8:Plot** или нажатии комбинации клавиш <Alt-8> гистограмма выводится на графопостроитель или принтер.

5.8 Заключение

Фирма Spectrum Software в настоящее время выпустила новые версии программы схемотехнического моделирования MicroCAP. Основные изменения коснулись внешнего вида – программы MicroCAP-5, MicroCAP-6 и MicroCAP-7 реализованы в операционной среде Windows со всеми ее достоинствами: удобный интерфейс, прекрасная графика, управление печатью и т. д. Также улучшены вычислительные алгоритмы и расширены библиотеки устройств. Кроме того, в последней версии пакета MicroCAP-7 присутствуют алгоритмы синтеза пассивных фильтров и фильтров на операционных усилителях.

По своим функциональным возможностям система MicroCAP приближается к профессиональной системе сквозного проектирования радиоэлектронных устройств DesignLab корпорации MicroSim, которая является продолжением развития системы PSpice.

6 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. АНАЛИЗ УСИЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА MICROCAP

Целью данной лабораторной работы является знакомство с пакетом схемотехнического моделирования MicroCAP-3, освоение графического редактора для ввода электрической схемы и исследование частотных и переходных характеристик усилительного каскада на биполярном транзисторе.

6.1 Запуск программы

Перед запуском программы Micro.Cap-3 необходимо указать пути доступа к файлам схем *.cir и системным файлам в файле mc3.dat. По умолчанию схемы хранятся в каталоге C:\MC3\DATA, а системные файлы – в каталоге C:\MC3\SYS.

Для запуска программы Micro.Cap-3 с указанием типа графического адаптера необходимо в командной строке ввести:

```
mc3/<адаптер>
```

здесь <адаптер> – это параметр, который принимает значения C, E или V для подключения соответствующей битовой карты адаптеров CGA, EGA или VGA.

При вызове программы можно указать имя файла схемы в командной строке:

```
mc3 <имя файла схемы>.cir
```

Когда Вы в первый раз запустили программу, система может запросить новый путь к директориям SYS и DATA. Для этого в любом текстовом редакторе исправьте файлы конфигурации mc3.dat и rep.dat, введя путь доступа для каждого системного каталога.

6.2 Порядок ввода схемы и ее запись на диск

Перед началом работы со схемой пользователь должен указать путь доступа к файлам схемы. Для этого в строке меню выбирается пункт **File/9:Change data path**. В ответ на активизацию данного пункта меню появляется окно, в котором необходимо указать нужный каталог и нажать клавишу **Enter** или подвести указатель мыши к требуемому каталогу и сделать его текущим командой **1:Change**. В случае неправильного ввода имеется возможность отмены неверного пути командой **2:Done**. По умолчанию устанавливается путь, указанный в файле конфигурации системы (например, C:\MC3\DATA).

Если необходимо загрузить файл, уже существующий на диске, то необходимо активизировать пункт **File/2:Load circuit**. В этом пункте пользователю предоставляется возможность самому выбрать файл схемы из списка файлов текущего каталога и либо загрузить его командой **1:Load**, либо отменить выбор командой **2:Cancel**.

Если создается новый файл, то необходимо выбрать пункт

File/1:Create new circuit. При этом главное окно очищается и в заголовке его выводится служебное слово Untitled.cir, которое новый файл получает по умолчанию. После этого можно приступить к построению схемы.

Чертежи схем создаются добавлением в схему компонентов из окна компонентов и их объединением между собой с помощью проводников и других элементов.

В качестве примера рассмотрим построение и анализ схемы усилительного каскада на биполярном транзисторе (см. рис. 6.1).

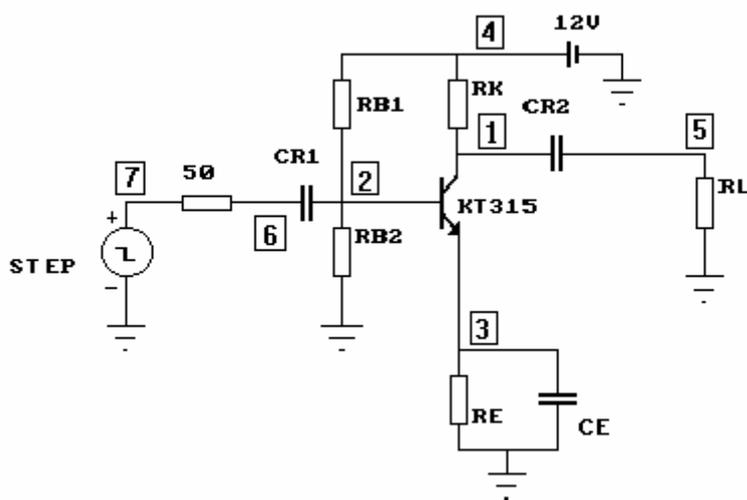


Рисунок 6.1 – Усилительный каскад на биполярном транзисторе

Для построения схемы усилителя понадобятся следующие компоненты:

- биполярный транзистор (КТ315);
- шесть резисторов;
- батарея питания;
- три конденсатора;
- импульсный источник напряжения STEP.

В режиме **Add/Comp** выведите изображения этих компонентов на экран, задав компонентам соответствующие имена или параметры (номинальные значения), так как это показано на рис. 6.1. Для этого необходимо выполнить следующие действия:

1. Перейдите в окно выбора компонентов с помощью мыши или нажав на клавишу **F6** и выберите компонент с именем **NPN** (биполярный транзистор n-p-n). Затем перенесите изображение транзистора в окно редактора, нажав левую кнопку мыши в центре окна редактора схемы. Не отпуская левой кнопки можно перемещать изображение транзистора в окне редактора. Для изменения ориентации положения изображения компо-

ненты, не отпуская левой кнопки мыши, нажмите правую. Это приводит к повороту изображения на 90 градусов. Зафиксируйте изображение транзистора, отпустив левую кнопку мыши. В появившемся окне из списка доступных моделей транзисторов выберите КТ315.

Проверьте параметры модели транзистора и, если необходимо, отредактируйте их в соответствии с данными, приведенными в Приложении 6.1. Для этого необходимо «войти» в библиотеку, активизировав пункт меню **Editors/1:Library devices**. В открывшемся окне библиотеки устройств выбрать тип устройства **3:Bipolar** (комбинация клавиш **Alt-3**). Из списка находящихся в библиотеке транзисторов (в левом окне) выбрать транзистор КТ315 и сравнить параметры модели с параметрами, приведенными в Приложении Б.

2. В окне компонентов выберите элемент с именем **RESIST** (резистор), перенесите его в окно графического редактора и спозиционируйте относительно транзистора в соответствии со схемой, приведенной на рис. 6.1.

Возможны два способа задания номинальных значений простых элементов (таких как сопротивление, емкость, индуктивность и пр.): непосредственно через номинальное значение или через имя компонента (метку). В первом случае в появившемся окне параметров компонента выберите служебное слово **OWN** и введите в открывшемся окне номинальное значение резистора, например 21К (21 кОм). Если Вы хотите задать элементы схемы через их наименования (метки), то сначала необходимо создать список имен (меток) этих элементов.

Для этого выберите пункт меню **Editors /2: Library labels** и в открывшемся окне введите необходимые имена (метки) компонентов (например: RB1, CR1 и др.) и соответствующие им номиналы: 21К (21кОм), 1UF (1 мкФ) и т.д., согласно схеме и списку параметров компонентов (см. рис 6.1 и приложение 6.1). В этом случае при вводе нового элемента в окне для ввода его параметров выбирается имя (метка), например RB1.

3. Аналогично введите остальные резисторы, расположив их относительно транзистора в соответствии со схемой. Для того чтобы в дальнейшем при анализе схемы воспользоваться процедурой **Stepping**, те компоненты, влияние которых на характеристики усилителя необходимо исследовать, задайте с помощью меток (как описано ранее в пункте 2).

4. Далее выберите конденсатор (компонент **CAPACI**) и разместите его в окне редактора. Присвойте номинальное значение согласно схеме либо выберите соответствующее имя из списка простых компонентов (**Editors/2: Library labels**). Необходимо иметь в виду, что емкость конденсаторов задается в Фарадах, поэтому необходимо использовать соответствующие префиксы, обозначающие десятичные множители, т.е. N или E-9 (нФ), U или E-6 (мкФ), P или E-12 (пФ) и т.д.

5. Выведите и расположите в соответствии со схемой в окне редактора остальные конденсаторы.

6. Выведите в окно редактора изображение батареи питания, выбрав компонент **BATTERY** с параметром 12 – величиной напряжения (12В).

7. Соедините компоненты так, как это показано на рис. 6.1, установив режим рисования проводников **Add/Line (Shift+L, Shift+A)**.

Для проведения в схеме соединительных линий в окне команд выбирается пункт **Line**. Курсор устанавливается в точку экрана, с которой будет начинаться линия, и нажимается левая кнопка мыши. Затем курсор устанавливается в точку экрана, в которой будет заканчиваться линия, и нажимается правая кнопка мыши. Кроме этого, в данном режиме имеется возможность рисования линии клавишами управления курсором. Для этого необходимо нажать клавишу **A** при выбранном характере объекта рисования **L (Line)**.

8. Заземлите схему, введя изображение «земли» (компонент **GROUND**).

Если начать анализ незаземленной цепи, то система выдаст сообщение: «Error... floating components» («Ошибка... висящие компоненты»). При этом система покажет «висящую» компоненту, которая должна быть заземлена, либо соединена с другими элементами схемы.

9. Подключите ко входу усилителя источник импульсного сигнала STEP (компонент **PULSE**). Параметры источника задайте в соответствии с вариантом задания (Таблица 6.1). Для этого выберите пункт меню **Editors/1:Library devices**. В открывшемся окне выберите поле **6:Pulse** (или нажмите клавиши **Alt-6**). Из списка имеющихся источников (слева) выберите (либо задайте сами в поле NAME) источник STEP и в окне параметров (поле ввода VALUE) задайте требуемые значения (см. рис. 6.2) в соответствии с вариантом.

При внесении текста в схему выбирается объект **Text**, курсор устанавливается в то место экрана, где будет выводиться текст, и нажимается левая кнопка мыши или клавиша **T**. После этого появляется окно, в котором пользователь может ввести текст.

Удалить объект можно, выбрав режим **Zap** в окне команд и нажав левую кнопку мыши в позиции удаляемого объекта. Кроме того, объект в позиции курсора можно удалить, используя клавишу **Z** или **Del**.

Перемещение объектов производится по команде **Move**, причем связи между элементами при этом разрываются. Для того чтобы переместить компонент по схеме, необходимо курсор подвести к передвигаемому объекту и нажать левую кнопку мыши, после чего передвинуть компонент (не отпуская левой кнопки) в новое место на экране.

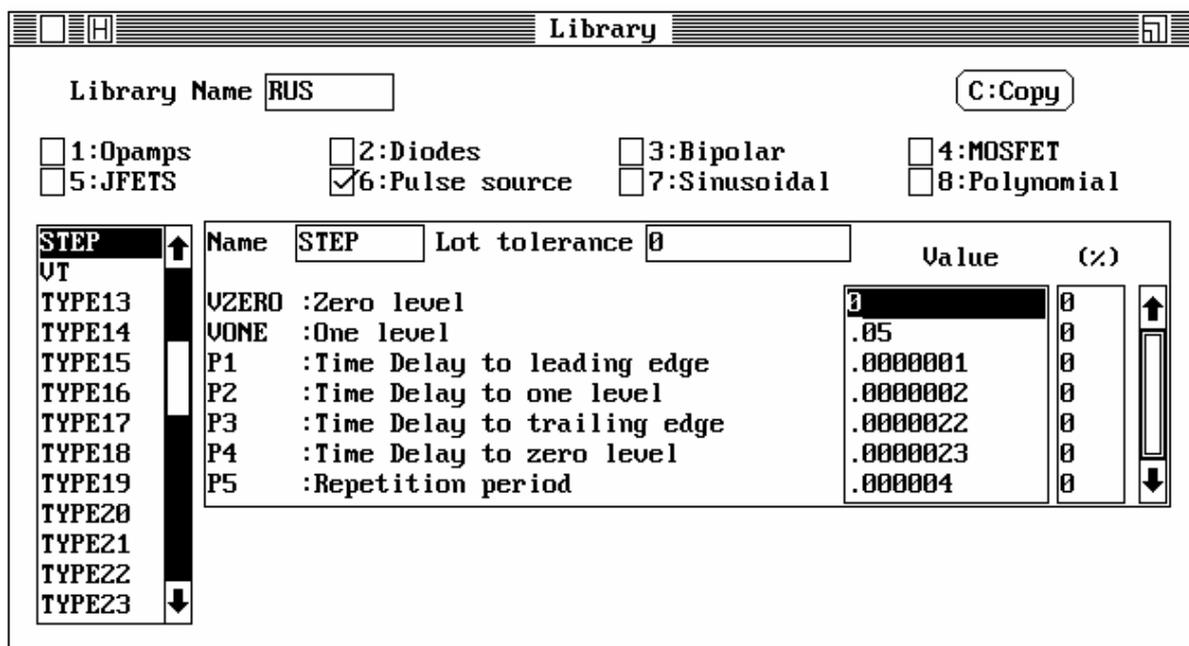


Рисунок 6.2 – Диалоговое окно для задания параметров импульсного источника STEP

Команда **Def** используется для переопределения параметров элементов или текста. Для этого нужно подвести курсор к редактируемому объекту и нажать левую кнопку мыши. В появившемся окне ввести новые значения параметров или исправить текст.

После создания чертежа схемы его следует записать в файл, используя пункт горизонтального меню **File/4:Save circuit**. Программа запрашивает имя файла, который при сохранении будет помещен в текущий каталог. Расширение *.cir система присваивает автоматически. Если необходимо получить описание схемы в текстовом виде, то необходимо выполнить команду **Print/4: Text: Netlist**. При этом формируется текстовое описание схемы и направляется для печати на дисплей, непосредственно на принтер или в текстовый файл с расширением <имя_схемы>.doc (в зависимости от установок в пункте меню **Options/ Output: Output to...**). Пример текстового описания схемы усилителя для нашего примера приведен в Приложении 6.1.

6.3 Моделирование схемы

Тот или иной вид моделирования (анализа) доступен при активизации пункта горизонтального меню **Run** с выбором соответствующего режима моделирования. В этом случае программа переходит в режим моделирования, и редактирование схемы уже невозможно. В горизонтальном меню появляются дополнительные команды для управления процессом моделирования. Каждый режим моделирования имеет дополнительное меню команд. Для возврата в режим рисования схемы необходимо выйти из анализа с помощью команды горизонтального меню **Run/Quit analysis** или

нажатием клавиши **F3**. Мы проведем только два типа моделирования схемы усилителя: анализ переходных процессов (**Transient**) и анализ по переменному току (**AC**).

6.3.1 Анализ по переменному току (режим *Run/2:AC*)

В этом режиме моделирования производится расчет частотных характеристик исследуемой цепи. Анализ характеристик в частотной области включает в себя расчет амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) $K(f)$, фазочастотной характеристики (ФЧХ) $\Phi(f)$, группового времени задержки (ГВЗ) $t = -d\Phi/df$ - данная характеристика показывает скорость изменения ФЧХ (для линейной зависимости фазы от частоты график ГВЗ представляет собой прямую линию), зависимости входного $Z_{in}(f)$ и выходного сопротивлений $Z_{out}(f)$ от частоты, а также шумовой характеристики схемы ($Noise(f)$).

При частотном анализе задаются следующие исходные параметры моделирования (пункт меню **AC/2: Limits F9**):

Frequency range - частотный интервал (в герцах), определяющий верхний и нижний частотные пределы моделирования.

Синтаксис: High/Low, где High - верхний предел, Low - нижний предел.

Gain range - максимальное и минимальное значения коэффициента передачи при выводе АЧХ на дисплей в виде графика. Единицы измерения - децибеллы (dB).

Noise range - максимальное и минимальное значения шумового интервала для построения диаграммы. Единицы измерения - $B/\sqrt{\Gamma_{ц}}$.

Zin range - максимальное и минимальное значения модуля входного сопротивления в Омах для вывода графика $Z_{in}(f)$;

Zout range - максимальное и минимальное значения модуля выходного сопротивления в Омах для вывода графика $Z_{out}(f)$;

Phase range - максимальное и минимальное значения фазового сдвига в градусах для вывода графика ФЧХ;

Delay range - максимальное и минимальное значения ГВЗ в секундах при выводе графика;

Input - определение номеров узлов подключения источника гармонического сигнала (входа схемы).

Синтаксис: <+узел>[/<-узел>].

Для примера, значение 5/9 будет определять точки включения входного источника плюсом к узлу 5 и минусом к узлу 9. Если параметр <-узел> не указывается, то по умолчанию за второй узел принимается 0 - т.е. «земля».

Output - определение номеров выходных узлов (выхода схемы).

Синтаксис: <+узел> [/<-узел>].

Maximum change - определяет максимально возможное изменение величины вычисляемой переменной на каждом шаге по частоте в процен-

тах. Чем меньше это значение, тем более точно рассчитывается исследуемая характеристика. Однако слишком малое значение этого параметра может привести к переполнению памяти и прекращению вычислений. Типовое значение этого параметра лежит в пределах 0,5 ... 5 %.

Temperature – задает диапазон изменения температуры для моделирования схемы. Расчет исследуемой характеристики будет выполняться для всех заданных значений температуры.

Синтаксис: High [/Low/Step], где High - верхний предел, Low - нижний предел, а Step - шаг изменения температуры. По умолчанию стоит комнатная температура 27 °С.

На рисунке 6.3 показано диалоговое окно Analysis limits для ввода параметров режима анализа по переменному току для нашего примера.

Для записи заданных параметров моделирования в текстовый файл нажмите клавиши **Alt+1**. Файл получит имя <имя_схемы>.alm.

Выходными переменными при расчете частотных характеристик могут быть:

- 1) коэффициент передачи по напряжению (переменная Gain);
- 2) входное сопротивление (переменная Zin) или проводимость (переменная Yin) исследуемой схемы;
- 3) выходное сопротивление (переменная Zout) или проводимость (переменная Yout) исследуемой схемы;
- 4) корень квадратный из спектральной плотности выходного напряжения шума (переменная Noise).

Для всех комплексных переменных строятся графики модуля, фазы и ГВЗ от частоты.

Выбор анализируемой переменной и управление способом отображения результатов моделирования осуществляется в диалоговом окне AC Options (команда меню **AC/3:Options F10**), вид которого показан на рис. 6.4.

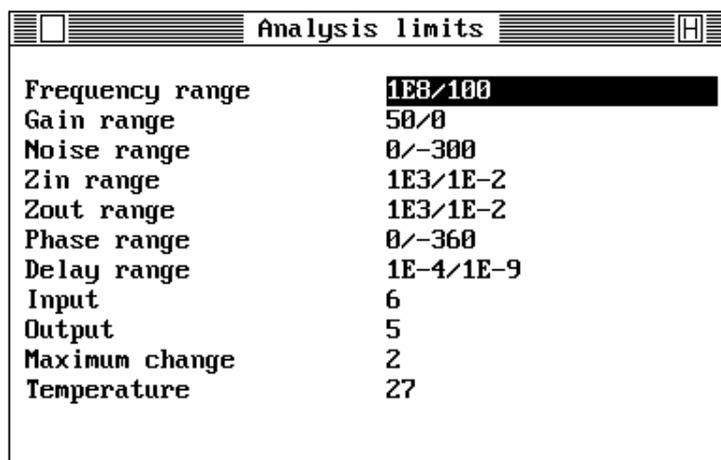


Рисунок 6.3 – Параметры режима моделирования АС

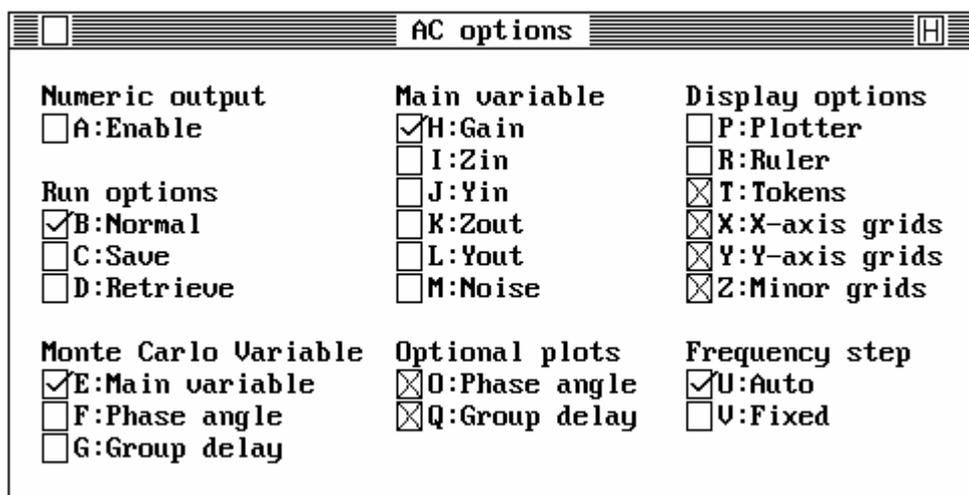


Рисунок 6.4 – Вид диалогового окна AC Options для выбора переменной для анализа

Здесь задаются следующие параметры, определяющие вид результатов моделирования:

Группа **Numeric output** – включение/выключение вывода результатов в виде таблицы значений.

- A: Enable - вывод результатов в виде таблицы.

Группа **Run options** – переключение режима сохранения результатов анализа во внешнем файле.

- B: Normal - результаты расчетов не сохраняются;

- C: Save - сохранение результатов расчетов в файле <имя_схемы>.asa;

- D: Retrieve - считывание результатов расчетов из файла <имя_схемы>.asa.

Группа **Monte-Carlo variable** - выбор переменной для статистического анализа Monte Carlo.

- E: Main variable - выбор основной переменной для статистического анализа Монте-Карло;

- F: Phase angle - выбор фазового угла для статистического анализа;

- G: Group delay - выбор ГВЗ для статистического анализа.

Группа **Main variable** – выбор главной переменной для частотного анализа (по умолчанию рассчитывается коэффициент передачи по напряжению Gain).

- H: Gain - коэффициент передачи (модуль отношения выходного и входного напряжений);

- I: Zin - входное сопротивление;

- J: Yin - входная проводимость;

- K: Zout - выходное сопротивление;

- L: Yout - выходная проводимость;
- M: Noise - шумовая характеристика.

Группа **Optional plots** – включение/выключение дополнительных графиков (ФЧХ и ГВЗ) для комплексных переменных.

- O: Phase angle - построение фазовой характеристики для выбранной главной переменной;
- Q: Group delay – построение графика ГВЗ для выбранной главной переменной.

Группа **Frequency step** – выбор способа определения шага по частоте.

- U: Auto - шаг по частоте будет автоматически вычисляться программой;
- V: Fixed - установка фиксированного частотного шага.

Группа **Display options** – дополнительные возможности для вывода результатов моделирования в виде графиков.

- P: Plotter - создание файлов результатов моделирования для вывода на графопостроитель (<имя_схемы>.plt);
- R: Ruller - нанесение разметки осей координат вместо построения координатной сетки;
- T: Tokens - нанесение на графики специальных значков (маркеров), позволяющих отличить один график от другого при черно-белой печати;
- X: X-axis grids - нанесение разметки по оси X;
- Y: Y-axis grids - нанесение разметки по оси Y.

Выбор той или иной опции осуществляется нажатием клавиши, соответствующей символу перед выбираемой опцией, или нажатием левой кнопки мыши в «пустом квадратике» перед названием опции.

Для перемещения между группами используется клавиша **Tab**, для перемещения в группе опций используются клавиши \uparrow и \downarrow , выбор опции осуществляется с помощью клавиши **Space bar**.

В процессе анализа параметры (номинальные значения) элементов схемы могут изменяться пользователем. В программе MicroCAP-3 имеется возможность пошагового выполнения режима анализа для исследования влияния выбранного элемента схемы на моделируемые характеристики.

Для исследования влияния одного из компонентов на исследуемую характеристику цепи необходимо вызвать команду горизонтального меню **AC\5:Stepping F11**.

При выборе данного пункта на экране появляется окно **Stepping**, (см. рис.6.5), имеющее следующие поля:

- Step what: RE (Исследовать что: RE);
- From: 50 (От: 50 Ом);
- To: 500 (До: 500 Ом);
- Step value: 50 (С шагом: 50 Ом).

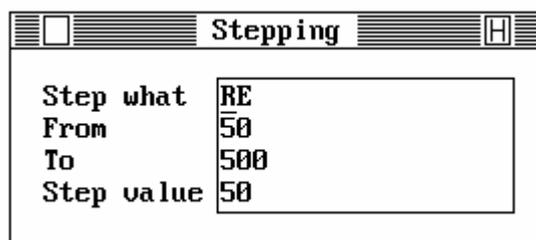


Рисунок 6.5 – Вид диалогового окна Stepping при изменении резистора RE от 50 до 500 Ом с шагом 50 Ом

В первом поле задается имя компонента и исследуемый параметр по определенному формату. Для компонентов, входящих в библиотеку устройств (транзисторов, диодов, источников сигнала и т.д.), формат следующий: <Имя_компонента>.<Имя_параметра>, где <Имя_компонента> - наименование, используемое для компонента в схеме (например, КТ315), <Имя_параметра> - сокращенное имя параметра в библиотеке устройств (например, BF – коэффициент передачи тока базы для биполярного транзистора).

Таким образом, КТ315.BF будет соответствовать параметру BF (коэффициенту передачи по току в прямом включении биполярного транзистора КТ315).

Для простых компонентов <Имя_параметра> задается как метка, используемая для обозначения компонента в схеме. Например, RE будет соответствовать сопротивлению всех резисторов, обозначенных в схеме как RE.

Второе поле диалогового окна **Stepping** содержит номинальное значение параметра, с которого необходимо начать расчет характеристик. Не задавайте нулевых значений, так как при вычислении характеристик данный параметр может стоять в знаменателе выражения и вызвать переполнение разрядной сетки ЭВМ.

Третье поле содержит номинальное значение параметра, при достижении которого процесс расчета характеристик будет закончен.

Четвертое поле содержит величину шага изменения номинала исследуемого параметра.

Замечание: в окне Stepping не работают префиксы, означающие десятичные множители, т.е. для емкости конденсатора следует указывать 10E-12 вместо 10P или для резистора в 10 кОм следует вводить 10000 или 10E3, а не 10K, как это можно было делать в окне редактора схемы.

Для нашего примера для пошагового изменения был выбран резистор цепи ОС RE, величина которого будет меняться от 50 до 500 Ом с шагом 50 Ом. Таким образом, процесс моделирования будет запущен 10 раз (пока величина сопротивления RE не станет больше 500 Ом), и на экране

будет построено 10 графиков исследуемой переменной (в данном случае – коэффициента передачи Gain) с разными значениями сопротивления резистора RE. При этом можно наглядно увидеть влияние резистора RE на АЧХ, ФЧХ и ГВЗ усилительного каскада (см. рис. 6.7).

Для запуска анализа активизируйте команду **AC/Run** или нажмите клавишу **F2**.

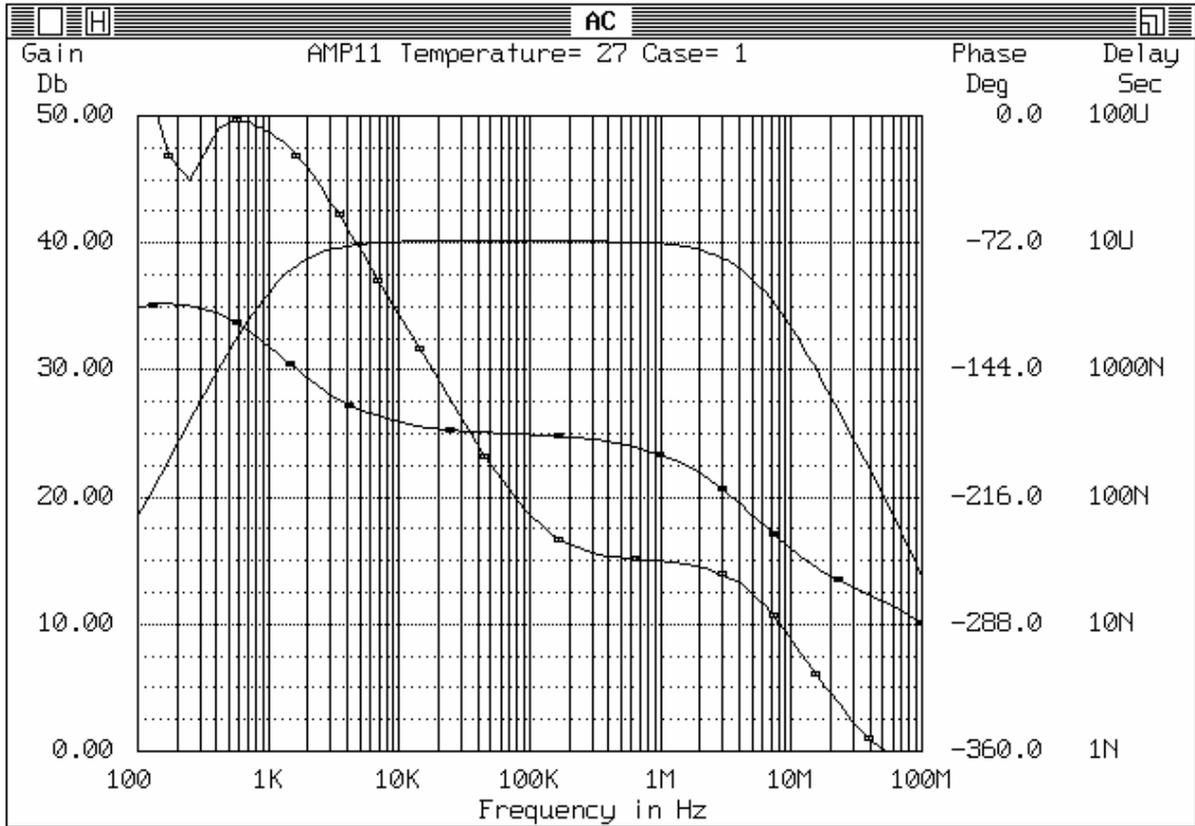


Рисунок 6.6 – Частотные характеристики усилительного каскада

Графики зависимости коэффициента усиления, фазового угла и ГВЗ от частоты приведены на рис. 6.6 (сплошная линия соответствует зависимости коэффициента передачи от частоты (АЧХ), линия с закрашенными прямоугольниками – ФЧХ, линия с «пустыми» прямоугольниками - зависимости ГВЗ от частоты).

Графики АЧХ, ФЧХ и ГВЗ при изменении номинала резистора обратной связи RE представлены на рис. 6.7. Данный анализ выполнен с помощью процедуры **Stepping**.

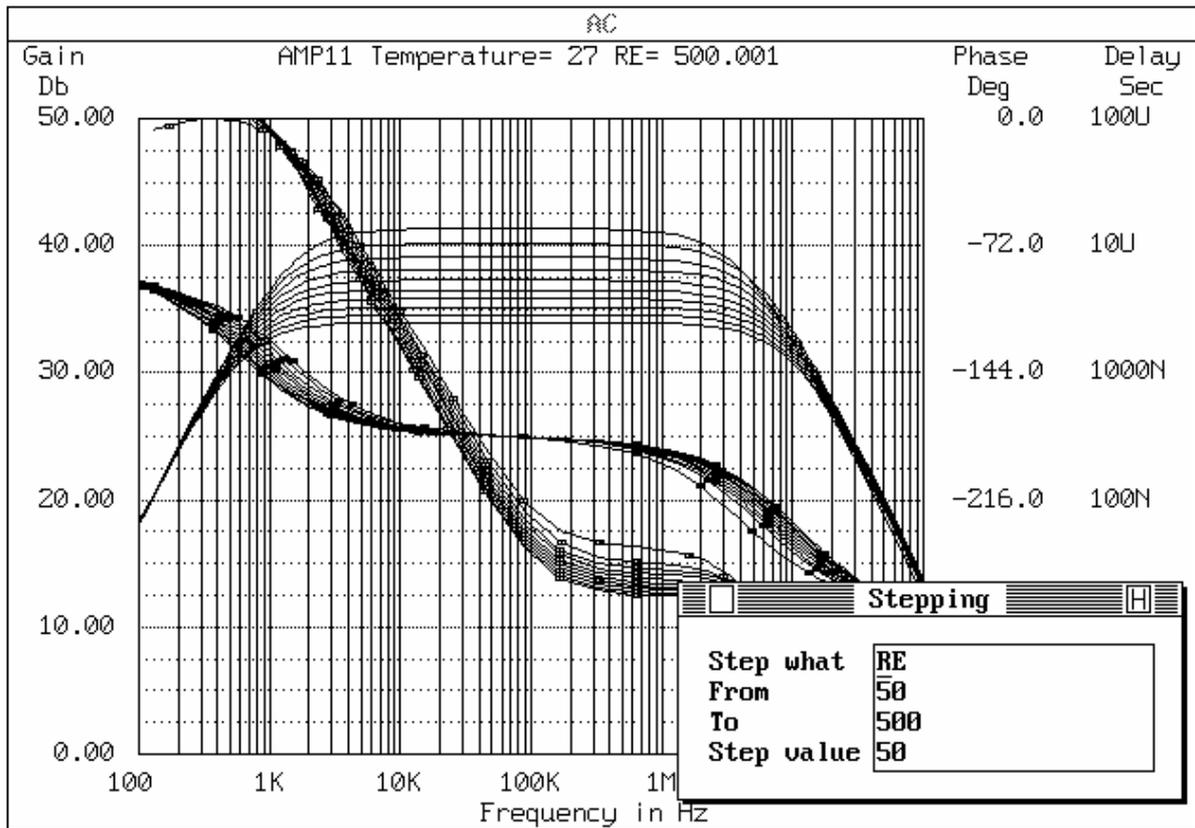


Рисунок 6.7 – Частотные характеристики усилительного каскада при изменении резистора RE от 50 до 500 Ом с шагом 50 Ом

По графику АЧХ усилителя можно определить максимальное значение коэффициента усиления, полосу пропускания (на уровне -3dB от плоской вершины АЧХ), неравномерность АЧХ в заданной полосе частот. По графику ФЧХ и ГВЗ определяется нелинейность фазы в заданном интервале частот (отклонение от линейной зависимости).

6.3.2 Анализ переходных процессов (режим *Run/1:Transient*)

В этом режиме производится анализ переходных процессов при воздействии на схему сигналов различной формы.

Анализ переходных процессов позволяет наглядно проследить и исследовать физические процессы, происходящие в схеме (от начального до установившегося значения). Он основан на численном решении системы дифференциальных или конечноразностных уравнений, как правило, с автоматически меняющимся шагом во времени.

В качестве расчетных переменных принимаются напряжение в узлах (либо между двумя узлами), ток, текущий через ветвь между двумя узлами, мощность или энергия в заданной ветви схемы.

Перед началом моделирования необходимо задать входной источник сигнала, в нашем примере это генератор прямоугольных импульсов STEP. Параметры источника задаются в библиотеки устройств (Device library) в

соответствии с вариантом. Для вызова процедуры расчета переходных процессов необходимо вызвать команду горизонтального меню **Run/1:Transient**.

При входе в режим анализа переходных процессов на экран выводится список параметров, устанавливающих режим моделирования. Вид диалогового окна Analysis limits показан на рис. 6.8.

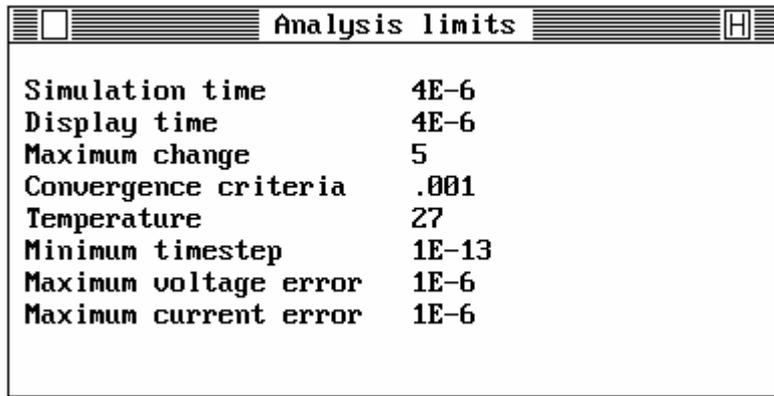


Рисунок 6.8 – Диалоговое окно Analysis limits для установок параметров моделирования переходных процессов

При расчете переходных процессов задаются следующие параметры (команда **Transient/2:Limits F9**):

Simulation time - время моделирования в секундах. Определяются верхний и нижний предел времени для выполнения анализа. Имеет следующий синтаксический формат: Tmax[,Tmin[,Timestep]], где Tmax - верхний предел, Tmin - нижний предел, Timestep определяет максимально допустимый шаг моделирования. Квадратные скобки указывают на необязательные параметры.

Display time – определяет временной интервал, который будет использован для вывода результатов на экран монитора или принтер (масштаб графика переходного процесса по оси абсцисс).

Замечание: По умолчанию параметры Simulation time и Display time следует делать одинаковыми.

Maximum change - определяет максимальное изменение шага моделирования в процентах. Его полезно задавать маленьким для гладких, точных диаграмм. Типичное значение 0,5...5 %.

Convergence criteria (relative error) - критерий сходимости по времени (относительная ошибка вычислений). Определяет максимальную относительную ошибку, допускаемую на каждом шаге расчета. Типичный интервал - 1E-3 ... 1E-6.

Temperature – температура в градусах. Определяет температуру окружающей среды при моделировании. Синтаксический формат: Final[,Initial[,Step]], где Initial - начальное значение температуры, Final -

конечное значение температуры, Step - шаг изменения температуры.

Minimum time_step - наименьшее значение шага по времени. Типичный интервал - от $1E-12$ до $1E-15$.

Maximum voltage error – максимальная ошибка для напряжений, эквивалентно количественному параметру VNTOL в программе PSpice. Типичное значение $1E-6$.

Maximum current error – максимальная ошибка для тока, эквивалентно количественному параметру ABSTOL в программе PSpice. Типичное значение - $1E-6$.

Для записи заданных переменных анализа в текстовый файл нажмите комбинацию клавиш **Alt+1**. Файл получит имя <имя_схемы>.t1m.

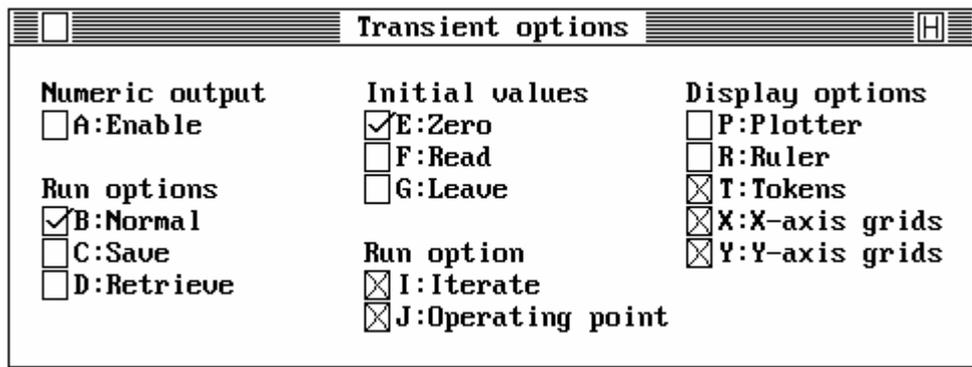


Рисунок 6.9 – Диалоговое окно для установки дополнительных параметров моделирования переходных процессов

При анализе переходных процессов задается ряд параметров, определяющих форму представления результатов моделирования. При активизации пункта **Transient/3:Options** на экране открывается диалоговое окно (см. рис. 6.9), в котором пользователь может задать следующие параметры:

группа **Numeric output** – включение\выключение режима вывода результатов расчетов в виде текстовой таблицы:

- A: Enable - вывод результатов в виде таблицы;

группа **Run options** – переключение режима сохранения результатов анализа во внешнем файле:

- B: Normal - результаты расчетов не сохраняются;
- C: Save - сохранение результатов расчетов в файле (<имя_схемы>.tsa);
- D: Retrieve - считывание результатов расчетов из файла;

группа **Run option** – выбор режима расчета дифференциальных уравнений для анализа переходных процессов:

- I: Iterate - установка режима моделирования с автоматическим выбором шага по времени. Если эта опция включена, результаты анализа для двух соседних моментов времени будут отличаться на величину, не пре-

вышающую указанное значение в окне **Limits**. При анализе большинства нелинейных схем требуется, чтобы этот режим был включен, при этом увеличивается время моделирования в 2...5 раз. Для линейных схем и некоторых нелинейных активизации этого режима не требуется. Для новых нелинейных схем система будет автоматически включать эту опцию.

- J: Operating point - расчет режима по постоянному току (рабочей точки) перед каждым шагом моделирования во времени;

группа **Initial values** – установка начальных значений переменных состояния (напряжений узлов и токов через катушки индуктивности):

- E: Zero - устанавливает нулевые начальные значения напряжений всех узлов и начальных токов в катушках индуктивности перед каждым циклом температурного, пошагового или статистического моделирования;

- F: Read - считывание начальных напряжений узлов и токов в катушках индуктивности из текстового файла перед каждым циклом моделирования;

- G: Leave - оставляет величину напряжений узлов и токов в индуктивностях равными последним полученным значениям на предыдущем цикле расчета. Эти значения могут быть изменены пользователем (при выборе пункта меню **Transient/8: Initial Values**) перед выполнением цикла расчета. Это позволяет редактировать значения и выполнять расчет схемы без записи данных в файл;

группа **Display options** – дополнительные возможности для вывода результатов моделирования в виде графиков. Данные параметры аналогичны такой же группе в анализе АС (см. п. 6.3.1).

Результаты расчетов выводятся на дисплей в виде графиков и, если включена опция Enable группы Numeric output (см. рис. 6.9), в виде таблиц значений.

User	Plot	out	MC	T	Waveform	Scale range (high/low)	Format
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	V 7	0.1/-0.025	5.2
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	I 4/1	30E-3	5.2
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	V 2	5/3	5.2
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	I 4/2	30E-3	9.5
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	V 5	-3 /2	5.2
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	I 5/0	1E-3/-1E-3	5.2
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	V 2/3	15/-15	5.2
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	I 3/0	20E-3/-20E-3	5.2

Рисунок 6.10 – Диалоговое окно Monitor для выбора переменных для расчета переходных процессов

Для назначения переменных для моделирования, задания требуемой формы вывода результатов моделирования на экран или принтер (в файл) и установки масштаба для осей ординат при построении диаграмм используется диалоговое окно **Monitor**, которое вызывается командой **Transient/7:Monitor F12**. При вызове данной команды на экране появляется окно (см. рис. 6.10), в котором имеются следующие поля ввода:

USER: записать данные в текстовый файл для спектрального анализа сигнала с помощью преобразования Фурье; указывается та переменная, которую нужно представить в числовом виде (256 значений). Значения записываются в файл <имя_схемы>.use.

PLOT: вывести результаты анализа на экран дисплея в виде графика;

OUT: распечатать или записать результаты в текстовый файл в виде таблицы значений (работает при включенной опции Numeric output);

MC: провести для выбранной переменной статистический анализ Монте-Карло.

T (TYPE): определяет тип переменной для моделирования. Можно задать пять типов исследуемой переменной:

V - напряжение;

I - ток;

U - функция пользователя;

P - мощность;

E - энергия.

WAVEFORM: в зависимости от выбранного типа переменной здесь указываются номера узлов схемы для расчета переходного процесса. Параметр waveform может быть следующим:

NodeA - для напряжения в узле A относительно «земли».

NodeA/NodeB - для напряжения между узлами A и B или тока AB, протекающего через ветвь между узлами A и B.

NodeA/NodeB/NodeC – определяет $\text{Мощность} = \text{ТокAB} \cdot \text{НапряжениеBC}$ или $\text{Энергия} = \int \text{ТокAB} \cdot \text{НапряжениеBC} dt$.

User function - любая допустимая алгебраическая функция от напряжений в узлах и времени. Напряжение в узле может ссылаться на текстовую метку. Например, для функции: $2 \cdot \text{OUT} \cdot \text{SIN}(1\text{E}6 \cdot \text{T})$ переменная OUT - напряжение в узле с текстовой меткой OUT.

SCALE RANGE: определяет масштаб по оси ординат графика для указанной переменной на экране дисплея.

Синтаксис: <Верхнее значение>/<Нижнее значение>.

Пример: для приведенной схемы каскада при выводе графика зависимости напряжения в узле 7 (вход каскада) от времени задан масштаб 0,1/– 0,01.

FORMAT: определяет формат вывода результатов расчета выбранной переменной в виде таблицы.

Синтаксис: <Левое_Число>.<Правое_Число>, где: <Левое_Число> - число цифр перед десятичной точкой; <Правое_Число> - число цифр после десятичной точки.

Пример: формат 3.3 будет печатать число 1361.78213 как 136.178E1, а формат 5.3 напечатает это же число как 13617.823E-1.

Для перемещения между полями окна **Monitor** используйте клавишу **Tab**, включение/выключение опции производится клавишей **Space bar**.

Для запуска моделирования переходных процессов активизируйте команду **Transient/1:Run F2** горизонтального меню или нажмите клавишу **F2**. Для нашего примера рассмотрим переходные процессы, проходящие в усилителе, при подключении на вход источника импульсных сигналов STEP. Нам необходимо указать входной (7) и выходной (5) узлы усилительного каскада. Масштаб по оси ординат можно оценить по исходным данным: амплитуде импульсных сигналов источника STEP и коэффициенту усиления каскада, известному после расчета АЧХ в режиме АС.

Результаты моделирования представлены на рис. 6.11, сплошная линия соответствует напряжению в узле 7 (вход каскада), линия с закрашенными прямоугольниками - напряжению в узле 5 (выход каскада).

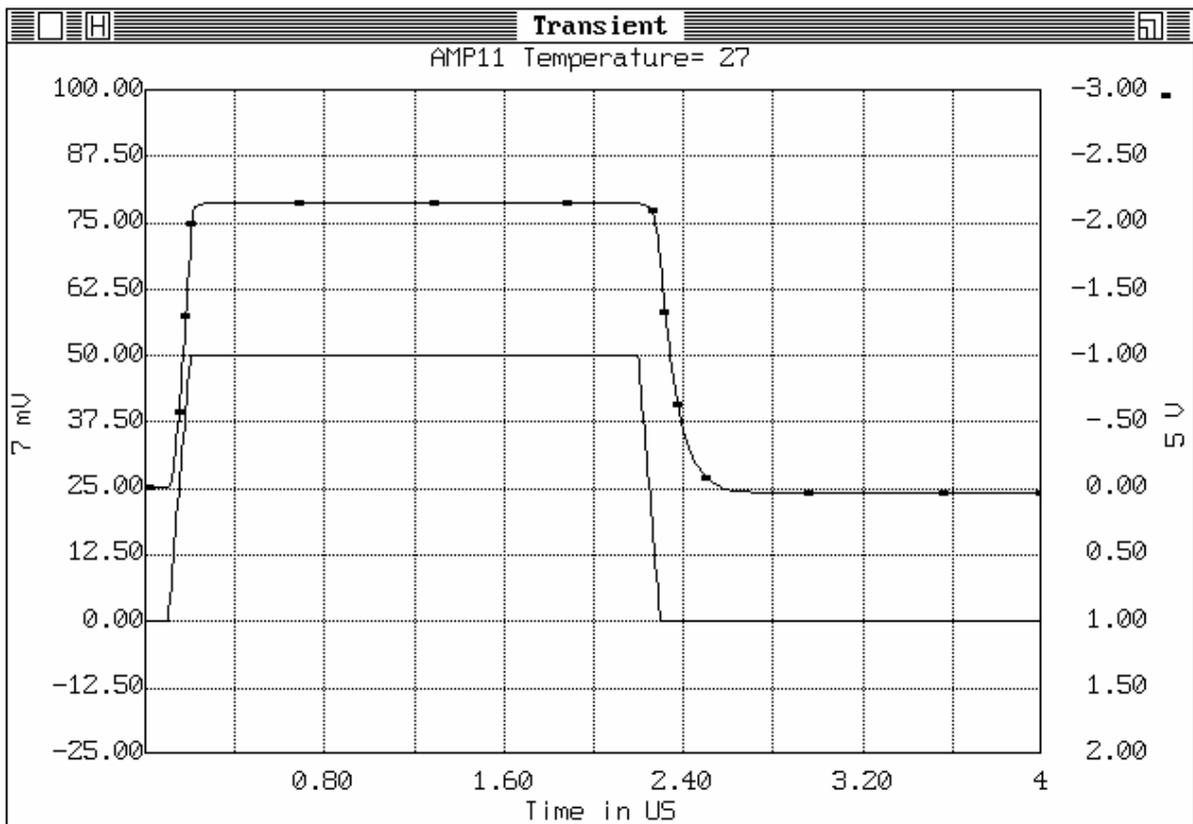


Рисунок 6.11 – Вид переходного процесса в усилительном каскаде при подключении ко входу импульсного источника напряжения STEP

По графику временных характеристик можно определить время нарастания переходного процесса (обычно от уровня 0,1 до 0,9 относительно установившегося значения), число и величину выбросов (переколебаний), время затухания выбросов и др.

Вид переходного процесса при включенной процедуре Stepping (варьируемый элемент – резистор ОС RE) показан на рис. 6.12.

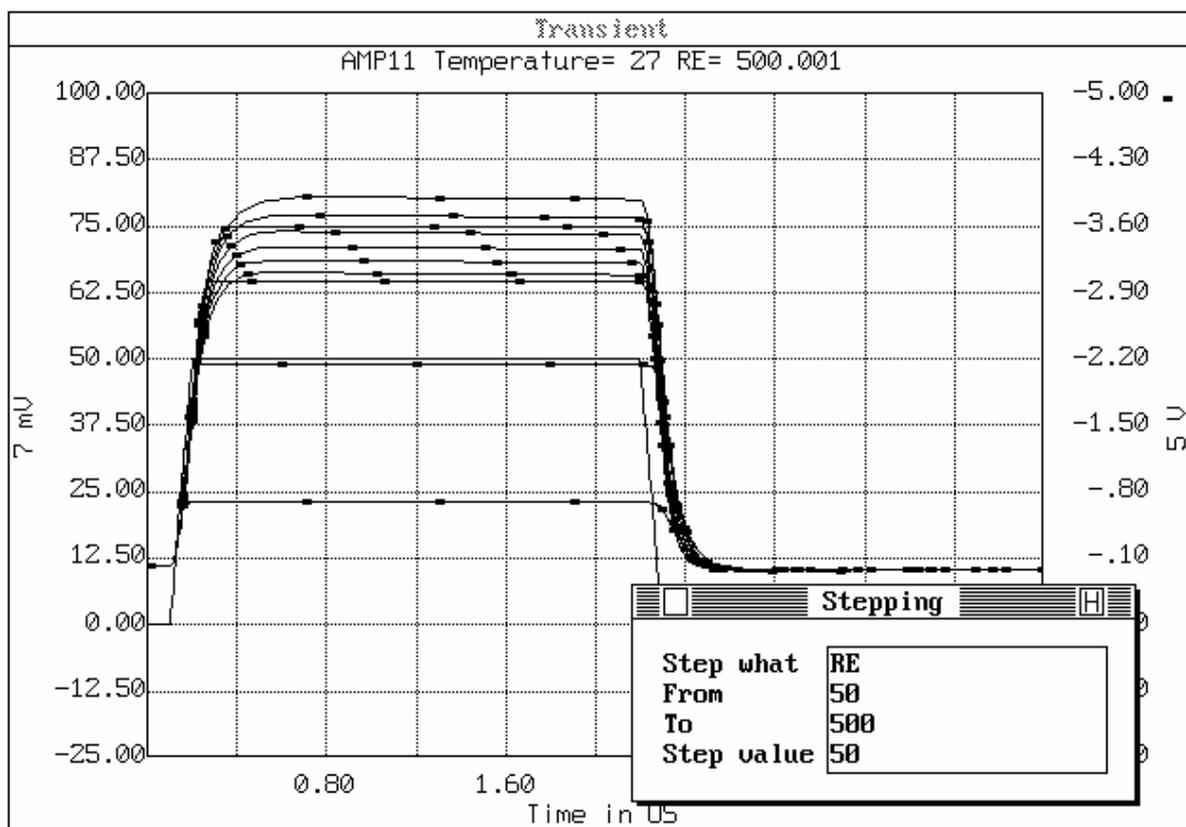


Рисунок 6.12 – Вид переходного процесса в усилительном каскаде при подключении ко входу импульсного источника напряжения STEP при изменении резистора RE от 50 до 500 Ом с шагом 50 Ом

6.4 Задание к лабораторной работе

1. Ввести в графическом редакторе Micro-CAP3 схему усилительного каскада (принципиальная схема которого представлена на рис. 6.1, а параметры компонентов приведены в Приложении Б).

2. Выполнить анализ усилительного каскада по переменному току (режим AC) и исследовать переходный процесс (режим Transient) при подключении ко входу источника импульсных сигналов (параметры источника задаются в соответствии с вариантом из Таблицы 6.1 Приложения А). Определить величину коэффициента усиления и полосу пропускания каскада по графику АЧХ.

3. Исследовать влияние отдельных элементов схемы на характеристики усилительного каскада (АЧХ и вид переходного процесса), используя процедуру Stepping (варианты смотри по Таблице 6.2 Приложения А). По графикам качественно оценить влияние этого элемента на моделируемую характеристику.

4. Оформить отчет.

Содержание отчета по лабораторной работе:

- цель работы, вариант задания;
- краткая информация о пакете схемотехнического моделирования MicroCAP-3 и режимах моделирования AC и Transient;
- принципиальная схема исследуемого устройства;
- результаты моделирования в виде графиков;
- выводы по результатам моделирования.

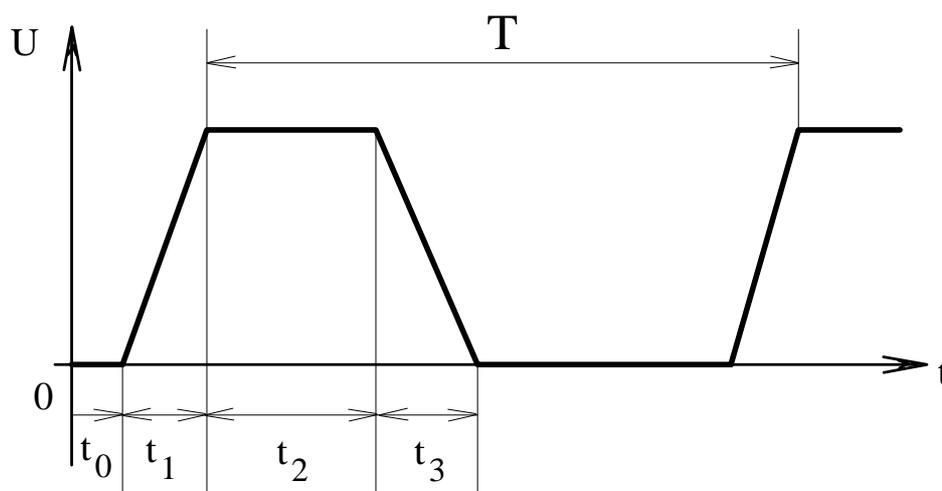


Рисунок – Форма напряжения импульсного источника STEP (компонент PULSE)

Таблица 6.1– Параметры источника импульсных сигналов STEP

Вариант задания	Задержка начала импульсов t_0 , (мкс)	Длительность переднего фронта t_1 , (мкс)	Длительность плоской вершины импульса t_2 , (мкс)	Длительность заднего фронта t_3 , (мкс)	Период повторения импульсов T , (мкс)	Амплитуда импульсного сигнала, В
0	1	0,03	1	0,03	3	0,01
1	2	0,02	2	0,02	5	0,02
2	3	0,01	3	0,01	7	0,04
3	0,5	0,05	4	0,05	9	0,05
4	1	0,04	3	0,04	8	0,03
5	2	0,03	2	0,03	5	0,02
6	3	0,02	1	0,02	3	0,01
7	0,5	0,01	2	0,01	6	0,03
8	1	0,05	3	0,05	7	0,02
9	2	0,03	4	0,03	9	0,04

Замечание: В таблице 6.1 параметры импульсного сигнала заданы в виде длительностей. Для ввода параметров импульсного источника STEP в библиотеке устройств Library devices необходимо пересчитать их в соответствующие задержки от начала импульсов:

$P_1 = t_0$ – задержка до начала переднего фронта импульса;

$P_2 = t_0 + t_1$ – задержка до конца переднего фронта импульса;

$P_3 = t_0 + t_1 + t_2$ – задержка до конца плоской вершины импульса (начало заднего фронта);

$P_4 = t_0 + t_1 + t_2 + t_3$ – задержка до конца заднего фронта;

$P_5 = T$.

Приложение Б

Таблица 6.2 – Варьируемый элемент усилительного каскада

Вариант задания	Варьируемый элемент схемы	Начальное значение	Конечное значение	Шаг
0	CR1	1E-9	1E-6	50E-9
	CE	1E-6	50E-6	5E-6
1	CR2	1E-9	1E-6	50E-9
	CE	1E-6	50E-6	5E-6
2	RK	50	1000	50
	CE	1E-6	50E-6	5E-6
3	RK	50	1000	50
	CR1	1E-9	1E-6	50E-9
4	RK	50	1000	50
	CR2	1E-9	1E-6	50E-9
5	RE	10	1000	50
	CR1	1E-9	1E-6	50E-9
6	RE	10	1000	50
	CR1	1E-9	1E-6	50E-9
7	RE	10	1000	50
	CE	1E-6	50E-6	5E-6
8	CR1	1E-9	1E-6	50E-9
	RL	100	2000	200
9	RL	100	2000	200
	CE	1E-6	50E-6	5E-6

Приложение В**Параметры элементов схемы и модели транзистора**

AMP11 NETLIST

№. Component	A	B	C	D	Parameter
1 NPN	1	2	3		KT315
2 RESISTOR	1	4			RK
3 RESISTOR	2	4			RB1
4 RESISTOR	0	2			RB2
5 CAPACITOR	1	5			CR2
6 CAPACITOR	6	2			CR1
7 CAPACITOR	3	0			CE
10 RESISTOR	3	0			RE
17 RESISTOR	0	5			RL
19 BATTERY	0	4			12V
21 RESISTOR	6	7			50
23 PULSE SOURCE	0	7			STEP

LIBRARY ELEMENTS USED

KT315

BF = 90	BR = 2.5	XTB = 3	IS = 5.000E-12
EG = 1.11	CJC = 1.000E-11	CJE = 2.300E-11	RB = 26.7
RC = 55.5	VAF = 100	TF = 6.36E-10	TR = 5.000E-9
MJC = 0.33	VJC = 0.75	MJE = 0.33	VJE = .8
CJS = 2.000E-12	VAR = 45	NF = 1.24	NR = 1
ISE = 1.000E-16	ISC = 1.000E-16	IKF = 1	IKR = 1
NE = 1.5	NC = 2	RE = 0	IRB = 1
RBM = 1	VTF = 1000	ITF = 0	XTF = 0
RSV = 0	XCJC = 1	VJS = 0.75	MJS = 0.5
XTI = 3	KF = 0	AF = 1	FC = .5

RK	300
RB1	21K
RB2	16K
CR2	10U
CR1	10U
CE	50U
RE	100
RL	5K

STEP	VZERO = 0
	VONE = 0.05
	P1 = 0.0000001
	P2 = 0.0000002
	P3 = 0.0000022
	P4 = 0.0000023
	P5 = 0.000004

7 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОГО УСТРОЙСТВА С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММЫ MICROCAP-3

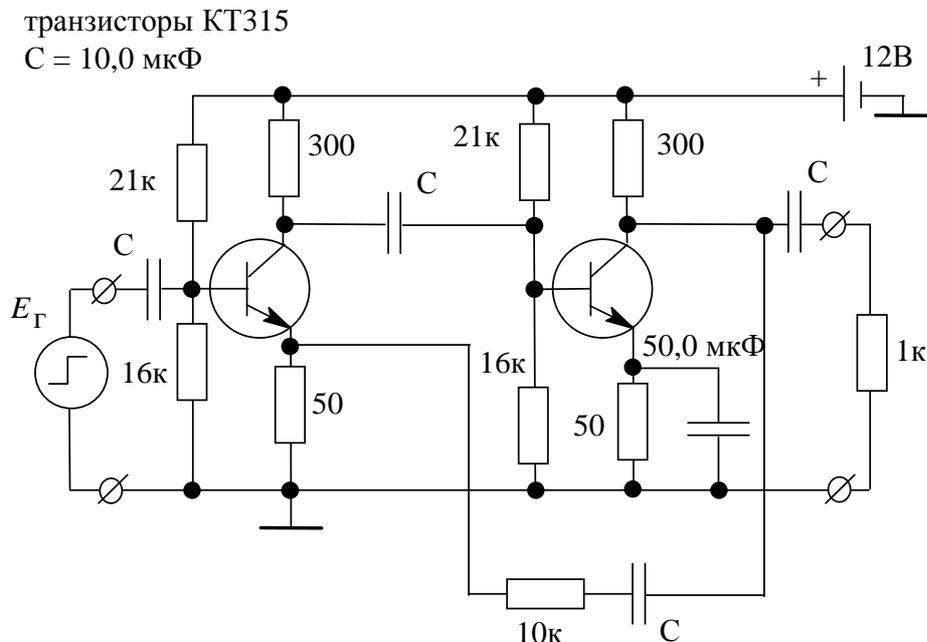
Данная лабораторная работа преследует своей целью закрепление навыков моделирования радиоэлектронных устройств с помощью пакета схемотехнического моделирования MicroCAP-3. Студенты должны самостоятельно выполнить установки параметров различных режимов моделирования в программе MicroCAP для получения требуемых характеристик. Кроме того, следует исследовать влияние отдельных элементов схемы на рабочие характеристики устройства. Выбор варьируемых элементов (2-3 элемента) также остается за студентом. Следует остановить свой выбор на тех элементах, варьирование параметров которых оказывает наибольшее изменение характеристик моделируемого устройства.

По результатам работы оформляется отчет, который должен содержать следующие пункты:

- цель работы, вариант задания;
- принципиальная схема исследуемого устройства;
- результаты моделирования в виде графиков;
- выводы по результатам моделирования.

Варианты заданий к лабораторной работе

Вариант № 1. Усилитель импульсных сигналов

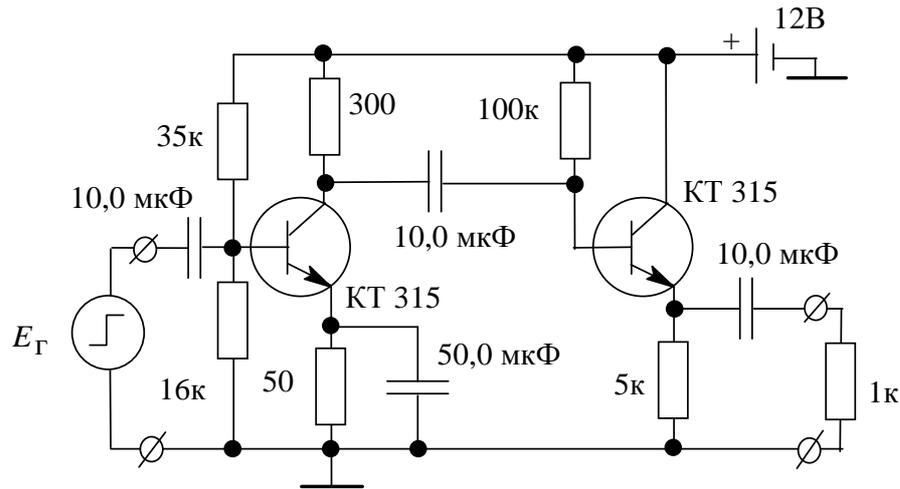


Параметры импульсного источника: задержка до начала импульса 1 мксек; длительность импульса $\tau_{\text{имп}} = 2$ мксек; период повторения

$T = 5$ мксек; длительность фронтов $\tau_{\phi 1,2} = 0,1$ мксек; амплитуда импульса $U_{\text{имп}} = 0,5$ В; уровень постоянной составляющей $U_0 = 0$ В.

Задача моделирования: получить частотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) каскада и вид переходных процессов при подключении на вход источника импульсных сигналов. По АЧХ определить коэффициент усиления и полосу пропускания.

Вариант № 2. Усилитель импульсных сигналов ОЭ-ОК

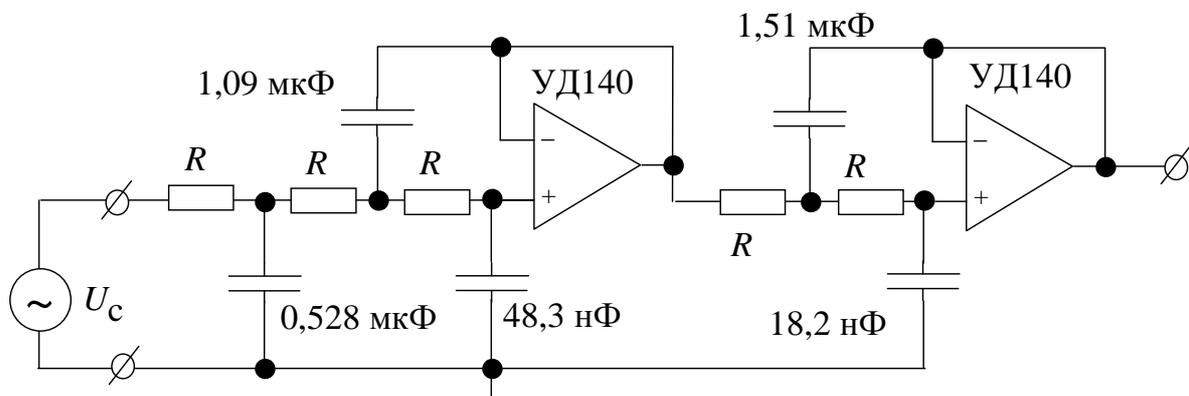


Параметры импульсного источника: задержка до начала импульса 1 мксек; длительность импульса $\tau_{\text{имп}} = 3$ мксек; период повторения $T = 7$ мксек; длительность фронтов $\tau_{\phi 1,2} = 0,2$ мксек; амплитуда импульса $U_{\text{имп}} = 0,1$ В; уровень постоянной составляющей $U_0 = 0$ В.

Задача моделирования: получить частотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) каскада и вид переходных процессов при подключении на вход источника импульсных сигналов. По АЧХ определить коэффициент усиления и полосу пропускания.

Вариант № 3. Фильтр нижних частот Чебышева на ОУ

$$R = 10\text{к}$$

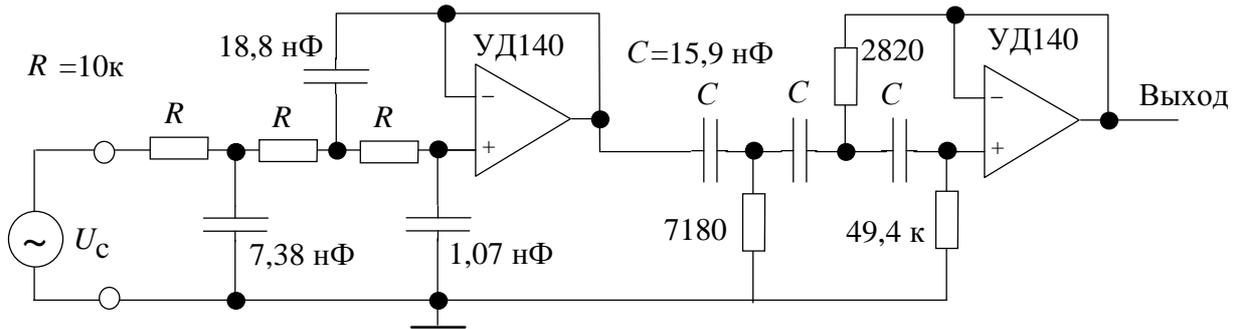


Параметры ФНЧ: частота среза 100 Гц.

Параметры гармонического источника: амплитуда $U_m = 1$ В; уровень постоянной составляющей $U_m = 0$ В.

Задача моделирования: получить частотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) ФНЧ и вид переходных процессов при подключении на вход источника гармонических сигналов с частотой 50 Гц и 200 Гц.

Вариант № 4. Полосовой фильтр Баттерворта на ОУ

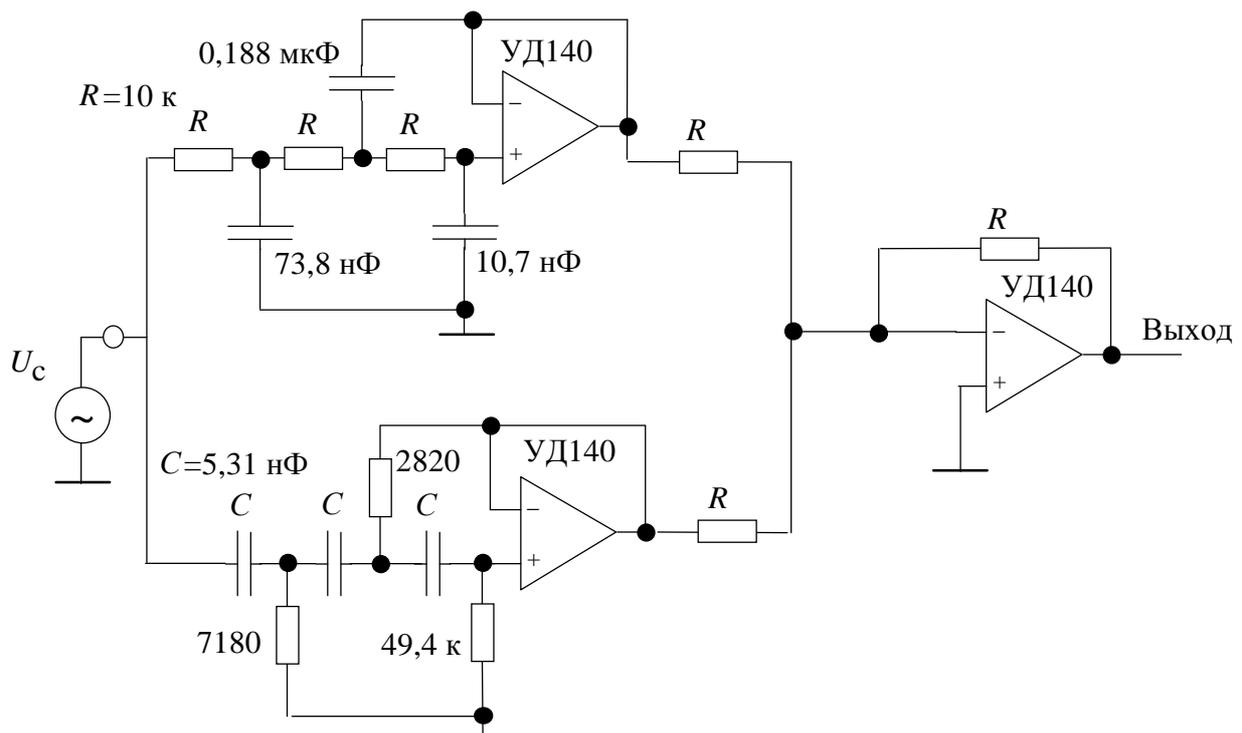


Параметры ПФ: центральная частота 2 кГц, полоса пропускания 2 кГц.

Параметры гармонического источника: амплитуда $U_m = 0,5$ В; уровень постоянной составляющей $U_m = 0$ В.

Задача моделирования: получить частотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) ПФ и вид переходных процессов при подключении на вход источника гармонических сигналов с частотой 1 кГц и 5 кГц.

Вариант № 5. Широкополосный режекторный фильтр на ОУ

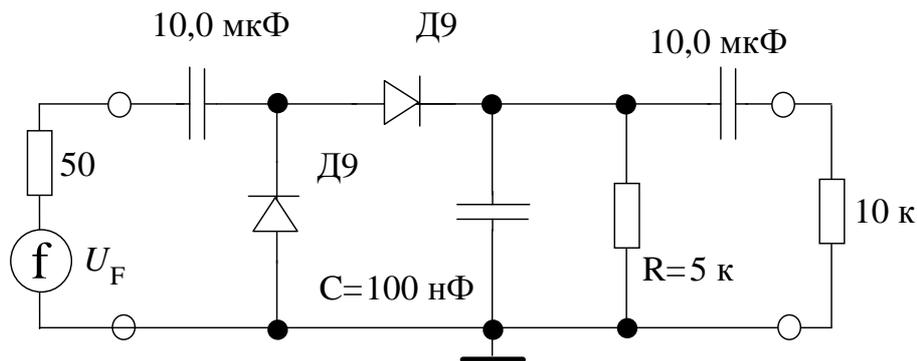


Параметры РФ: центральная частота ~ 1 кГц, полоса задержания ~ 2 кГц.

Параметры гармонического источника: амплитуда $U_m = 0,5$ В; уровень постоянной составляющей $U_m = 0$ В.

Задача моделирования: получить частотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) режекторного фильтра и вид переходных процессов при подключении на вход источника гармонических сигналов с частотой 1 кГц и 5 кГц.

Вариант № 6. Амплитудный детектор на диодах

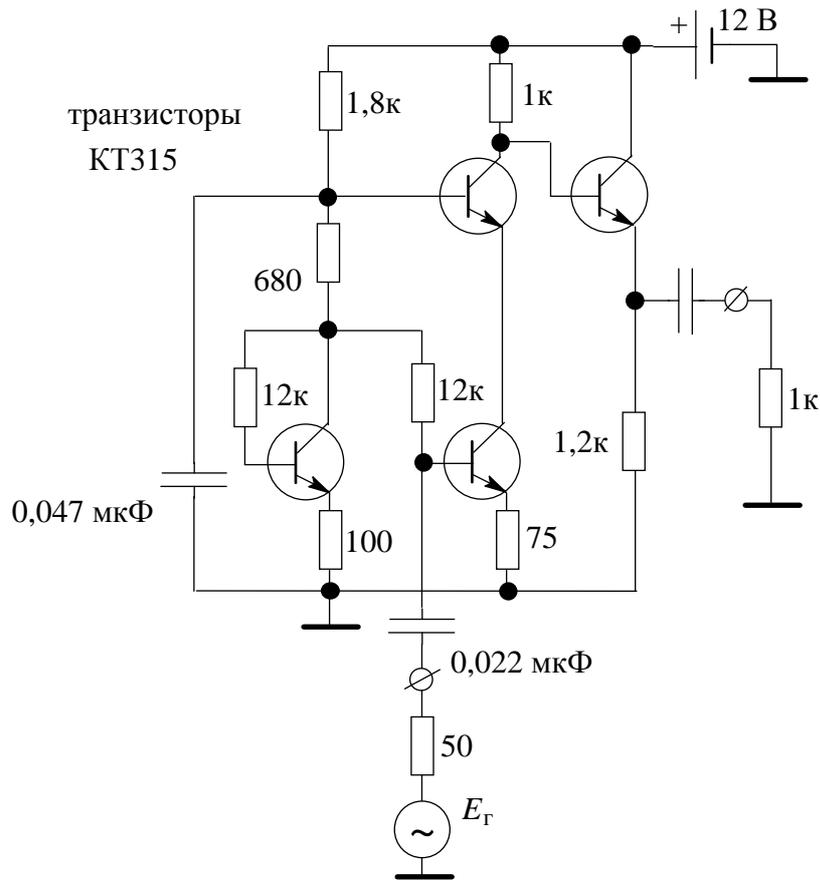


Задать амплитудно-модулированное (АМ) колебание с помощью функционального источника $U_F = U_m (1 + m \cdot \sin(2\pi F t)) \cos(2\pi f t)$, где $U_m = 3$ В, глубина модуляции $m = 0,8$, $F = 1000$ Гц - частота модулирующего сигнала, $f = 100000$ Гц - частота несущего сигнала.

Задача моделирования: получить на выходе детектора огибающую АМ-сигнала (продетектированный сигнал). Анализ выполняется в режиме Transient.

Исследовать влияние емкости C и сопротивления R нагрузки на качество детектирования.

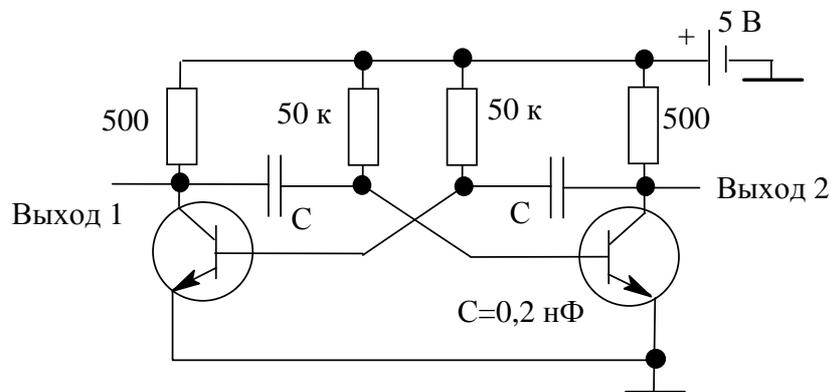
Вариант № 7. Усилитель звуковой частоты



Параметры гармонического источника: амплитуда $U_m = 0,01$ В; уровень постоянной составляющей $U_m = 0$ В; частота $f = 2$ кГц.

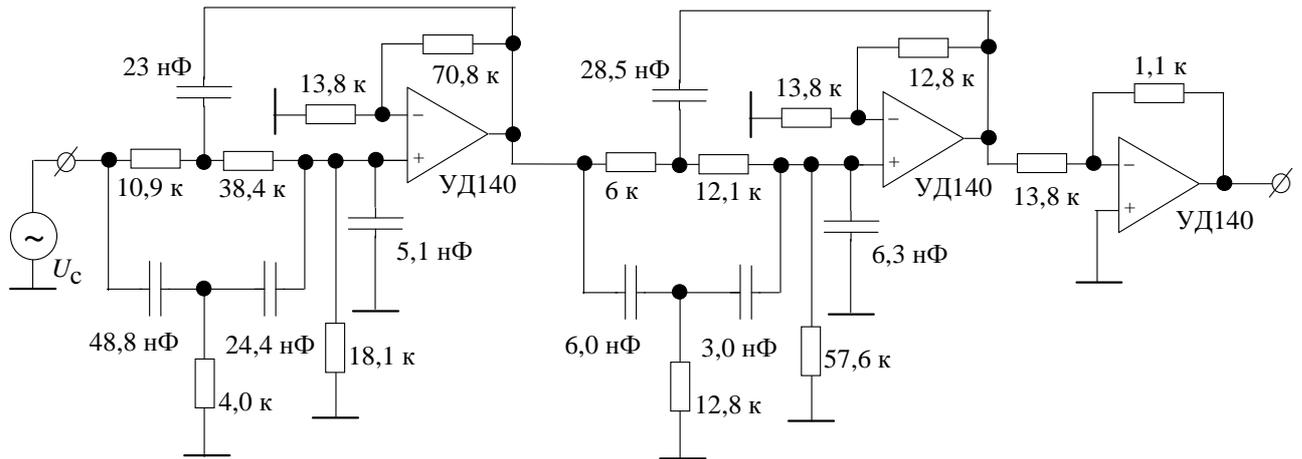
Задача моделирования: получить частотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) усилителя и вид переходных процессов при подключении на вход источника гармонических сигналов. По АЧХ определить коэффициент усиления и полосу пропускания усилителя.

Вариант № 8. Мультивибратор на транзисторах



Задача моделирования: получить вид переходных процессов на выходах мультивибратора (прямоугольные импульсы $\tau_{\text{имп}} \approx 4$ мксек и скважностью $Q = 2$). Моделирование выполняется в режиме Transient. Исследовать влияние емкости C и сопротивления в цепи коллекторов транзисторов на длительность генерируемых мультивибратором импульсов.

Вариант № 9. Эллиптический полосовой фильтр 2-го порядка



Параметры ПФ: центральная частота 1 кГц, полоса пропускания 1 кГц.

Параметры гармонического источника: амплитуда $U_m = 0,01$ В; уровень постоянной составляющей $U_m = 0$ В.

Задача моделирования: получить частотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) ПФ и вид переходных процессов при подключении на вход источника гармонических сигналов с частотой 1 кГц и 3 кГц.

8 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ КАСКАДА С ОЭ ПО ПОСТОЯННОМУ ТОКУ

8.1 Введение

В процессе преобразования и обработки информации, заложенной в электрических колебаниях, часто оказывается, что уровень мощности этих колебаний недостаточен для работы потребителя, и возникает необходимость его увеличения. С этой целью используются электронные усилители.

Усилителем электрических колебаний называется устройство, которое позволяет при наличии на входе колебаний с некоторым уровнем мощности получить на выходной нагрузке колебания той же формы, но с большим уровнем мощности. Любой усилитель содержит в себе активный усилительный элемент, источник питания и пассивные цепи. Усиление происходит за счет того, что схема усилителя преобразует энергию источника питания в энергию полезных колебаний.

Наибольшее распространение в качестве активных усилительных элементов (АЭ) при построении электронных усилителей нашли транзисторы. Вопросам проектирования электронных усилителей на транзисторах посвящено огромное количество литературы. Основой для большинства типов усилителей на биполярных транзисторах служит усилительный каскад с общим эмиттером. Расчет режима АЭ по постоянному току является первым этапом при проектировании усилительного устройства. Выбор и расчет схемы обеспечения стабилизации электрического режима транзистора по постоянному току являются достаточно важными, так как от качества стабилизации режима АЭ зависят важнейшие рабочие характеристики усилителя - коэффициент усиления, частотные и нелинейные искажения полезного сигнала.

Применение систем моделирования радиоэлектронных устройств (РЭУ) с помощью ЭВМ позволяет посмотреть характеристики проектируемого устройства без проведения дорогостоящих экспериментов на реальных образцах. Это позволяет избежать ошибок на ранних стадиях проектирования РЭУ, сокращает время и затраты на проектирование и изготовление. Основным недостатком моделирования РЭУ с помощью ЭВМ является ограниченная точность машинного эксперимента, так как используются приближенные математические модели компонентов и объектов, из которых строится полная модель РЭУ. В связи с бурным развитием вычислительной техники и компьютерных технологий современные системы автоматизированного проектирования и моделирования большинства классов РЭУ обладают достаточной для реального применения точностью. Проектирование же некоторых типов РЭУ (например, интегральных и цифровых микросхем) вообще не может обойтись без машинного моделирования.

Целью лабораторной работы является изучение работы усилитель-

ного каскада на биполярном транзисторе в схеме включения с общим эмиттером. В качестве инструмента для моделирования характеристик как АЭ, так и усилителя в целом используется пакет схемотехнического моделирования Micro-CAP фирмы Spectrum Software.

8.2 Классификация усилителей и их основные характеристики

Классификацию усилительных устройств (УУ) можно проводить по различным признакам. Рассмотрим наиболее распространенные типы УУ. Усилители могут быть:

- *по виду используемого АЭ* - ламповые, транзисторные усилители, на туннельных или параметрических диодах, на операционных усилителях и т.д.;
- *по диапазону усиливаемых частот* - усилители постоянного тока (УПТ), звуковой частоты (УЗЧ), низкой частоты (УНЧ), радио- или промежуточной частоты (УРЧ, УПЧ), высокой частоты (УВЧ), сверхвысокой частоты (СВЧ);
- *по ширине полосы усиливаемых частот* - узкополосные (до октавы), широкополосные, сверхширокополосные (более 10 октав) усилители;
- *по характеру усиливаемого сигнала* - усилители непрерывных и импульсных сигналов;
- *по усиливаемой электрической величине* - усилители напряжения, тока, мощности;
- *по типу нагрузки* - резистивные (апериодические) и резонансные (избирательные) усилители.

Работу УУ принято оценивать рядом характеристик и показателей:

1) Коэффициент усиления

Коэффициентом усиления называется отношение выходной величины, характеризующей уровень сигнала, к входной. В качестве таких величин могут употребляться напряжение, ток или мощность. В соответствии с этим различают коэффициенты усиления по напряжению \dot{K}_U , по току \dot{K}_I или по мощности K_P .

Коэффициентом усиления по напряжению (току) называется отношение выходного напряжения $\dot{U}_{m\text{ВЫХ}}$ (тока $\dot{I}_{m\text{ВЫХ}}$) к входному напряжению $\dot{U}_{m\text{ВХ}}$ (току $\dot{I}_{m\text{ВХ}}$): $\dot{K}_U = \dot{U}_{m\text{ВЫХ}} / \dot{U}_{m\text{ВХ}}$, $\dot{K}_I = \dot{I}_{m\text{ВЫХ}} / \dot{I}_{m\text{ВХ}}$.

Из-за наличия в схеме УУ реактивных элементов (L , C) коэффициенты \dot{K}_U и \dot{K}_I являются комплексными величинами и зависят от частоты усиливаемого сигнала.

Коэффициент усиления по мощности K_P показывает, во сколько раз

активная мощность $P_{\text{ВЫХ}}$, отдаваемая усилителем в нагрузку, больше активной мощности $P_{\text{ВХ}}$ подводимой ко входным зажимам: $K_P = P_{\text{ВЫХ}}/P_{\text{ВХ}}$. Коэффициент усиления по мощности часто выражают в логарифмических единицах - децибелах: $K_P, \text{дБ} = 10 \lg K_P$.

Наиболее часто УУ характеризуется коэффициентом усиления по напряжению, поэтому в дальнейшем для коэффициента \dot{K}_U индекс U будем опускать и писать просто K .

2) Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики

Усиление сигнала в УУ сопровождается искажениями его формы. Поэтому усилитель характеризуют не только коэффициентом усиления, но и мерой искажений выходного сигнала по сравнению со входным. Искажения могут быть линейными и нелинейными.

Линейные искажения обусловлены наличием в УУ реактивных элементов, сопротивление которых зависит от частоты. Отдельные гармонические составляющие сложного сигнала усиливаются неодинаково, нарушается их взаимный фазовый сдвиг относительно друг друга, и следовательно, форма сигнала на выходе УУ искажается. Линейные искажения оценивают по амплитудно-частотной, фазочастотной и переходной характеристикам.

Поскольку коэффициент усиления по напряжению (току) в общем случае является комплексной величиной, то можно записать

$$\dot{K}(j\omega) = |\dot{K}(\omega)| e^{j\varphi(\omega)},$$

где $|\dot{K}(\omega)|$ - модуль коэффициента усиления, $\varphi(\omega)$ - аргумент коэффициента усиления (фаза).

Под *амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ)* УУ понимается зависимость модуля коэффициента усиления от частоты усиливаемого сигнала. При анализе усилителей часто пользуются нормированной АЧХ:

$k(\omega) = |\dot{K}(\omega)|/K_0$, где K_0 - максимальный коэффициент усиления.

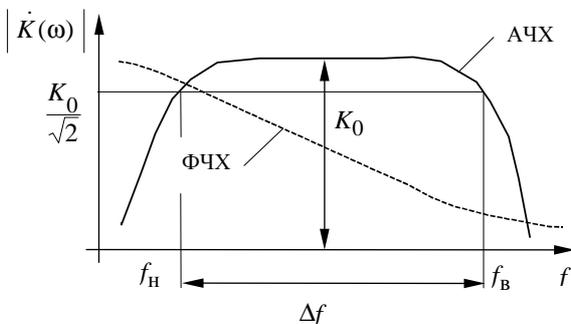


Рисунок 8.1 – Амплитудно-частотная характеристика УУ

Фазочастотной характеристикой (ФЧХ) усилителя называется зависимость фазового сдвига выходного гармонического сигнала относительно входного при изменении частоты. Примерный вид АЧХ и ФЧХ усилителей показан на рис. 8.1. В логарифмическом масштабе коэффициент усиления

определяется как $|\dot{K}(\omega)|$, $\text{дБ} = 20 \lg |\dot{K}(\omega)|$.

Диапазон частот, в котором величина коэффициента усиления не уменьшается ниже определенного уровня, называют *полосой рабочих частот* или *полосой пропускания* УУ. Обычно используется уровень $1/\sqrt{2} \approx 0,707 K_0$ от максимального значения коэффициента усиления в полосе. В логарифмическом масштабе этот уровень соответствует уменьшению коэффициента усиления на 3 дБ.

3) Переходная характеристика

Переходной характеристикой усилителя называется зависимость мгновенного значения выходного напряжения от времени $U_{\text{ВЫХ}}(t)$ при единичном скачкообразном изменении входного сигнала (т.е. реакция цепи на единичный «скачок» напряжения на входе). Эта характеристика отражает переходные процессы в схеме и позволяет судить об искажении усиливаемого импульсного сигнала. На практике чаще используется нормированная переходная характеристика $h(t)$: $h(t) = U_{\text{ВЫХ}}(t)/K_0$.

Выходной импульс реального УУ по форме всегда отличается от входного. Можно оценить искажения, вносимые усилителем, сравнивая выходной импульс с идеальным прямоугольным импульсом, амплитудой $U_0 = K_0 U_{\text{ВХ}}$, где $U_{\text{ВХ}}$ - амплитуда прямоугольного входного импульса. Количественно искажения импульсного сигнала (см. рис 8.2) оцениваются временем нарастания фронта $t_{\text{ф}}$, выбросом δU , временем запаздывания t_3 и величиной спада (скола) плоской вершины импульса ΔU .

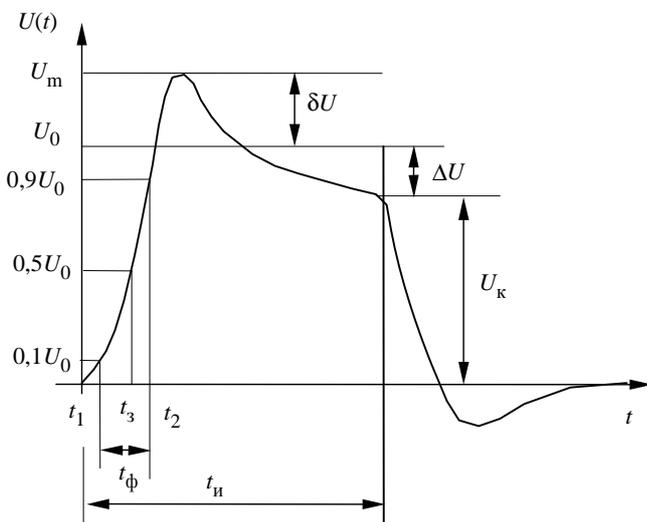


Рисунок 8.2 – Искажения прямоугольного сигнала в УУ

Временем нарастания (установления) переднего фронта $t_{\text{ф}}$ называется отрезок времени, в течение которого выходное напряжение изменяется от $0,1U_0$ до $0,9U_0$, т.е. $t_{\text{ф}} = t_2 - t_1$. Под *выбросом* δU понимается разность $U_m - U_0$, где U_m - максимальное значение импульса в моменты времени, близкие к началу входного импульса. *Временем запаздывания* t_3 считается время, в течение которого передний фронт импульса достигает величины $0,5U_0$. *Спадом плоской вершины импульса* ΔU называется разность $U_0 - U_{\text{к}}$, где $U_{\text{к}}$ - значение амплитуды выходного сигнала в момент окончания входного импульса.

Временем нарастания (установления) переднего фронта $t_{\text{ф}}$ называется отрезок времени, в течение которого выходное напряжение изменяется от $0,1U_0$ до $0,9U_0$, т.е. $t_{\text{ф}} = t_2 - t_1$. Под *выбросом* δU понимается разность $U_m - U_0$, где U_m - максимальное значение импульса в моменты времени, близкие к началу входного импульса. *Временем запаздывания* t_3 считается время, в течение которого передний фронт импульса

4) Нелинейные искажения

Нелинейными искажениями называются искажения формы выходного сигнала, вызванные нелинейностью вольт-амперных характеристик АЭ, используемых в усилителе. Нелинейные искажения приводят к появлению на выходе усилителя напряжений (токов) с частотами, являющимися высшими гармониками составляющих входного сигнала, которых не было в спектре входного колебания. При усилении гармонического сигнала нелинейные искажения принято оценивать *коэффициентом гармоник (нелинейных искажений)* K_{Γ} . Этот коэффициент определяется на выходе УУ при подаче на вход гармонического сигнала и определяется соотношением

$$K_{\Gamma} = \frac{P_2 + P_3 + \dots + P_n}{P_1} \cdot 100 \% ,$$

где P_i , $i = \overline{1, n}$ - мощности второй, третьей и т.д. гармоник выходного сигнала.

При чисто резистивной нагрузке усилителя отношение мощностей можно заменить отношением квадратов амплитуд напряжений или токов, тогда

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{U_{m2}^2 + U_{m3}^2 + \dots + U_{mn}^2}}{U_{m1}} \cdot 100 \% .$$

Допустимый уровень нелинейных искажений определяется назначением усилителя. Например, для высококачественных усилителей звуковой частоты *Hi-Fi*-класса K_{Γ} не превышает 0,01 %.

5) Коэффициент полезного действия

При оценке мощных выходных усилителей существенную роль играет коэффициент полезного действия (КПД) η , который определяется как отношение мощности полезного сигнала $P_{\text{ВЫХ}\sim}$ в нагрузке усилителя к мощности P_0 потребляемого от источника питания:

$$\eta = \frac{P_{\text{ВЫХ}\sim}}{P_0} .$$

Помимо названных, существует и ряд других характеристик УУ: устойчивость, входная и выходная проводимость (или сопротивление), стабильность, коэффициент шума, шумовая температура, амплитудная характеристика, конструктивные и эксплуатационные параметры и др.

8.3 Классы усиления

Режимы работы УУ принято делить на следующие классы: А, В, АВ, С и D. Все эти режимы рассмотрим, опираясь на проходную ВАХ биполярного транзистора.

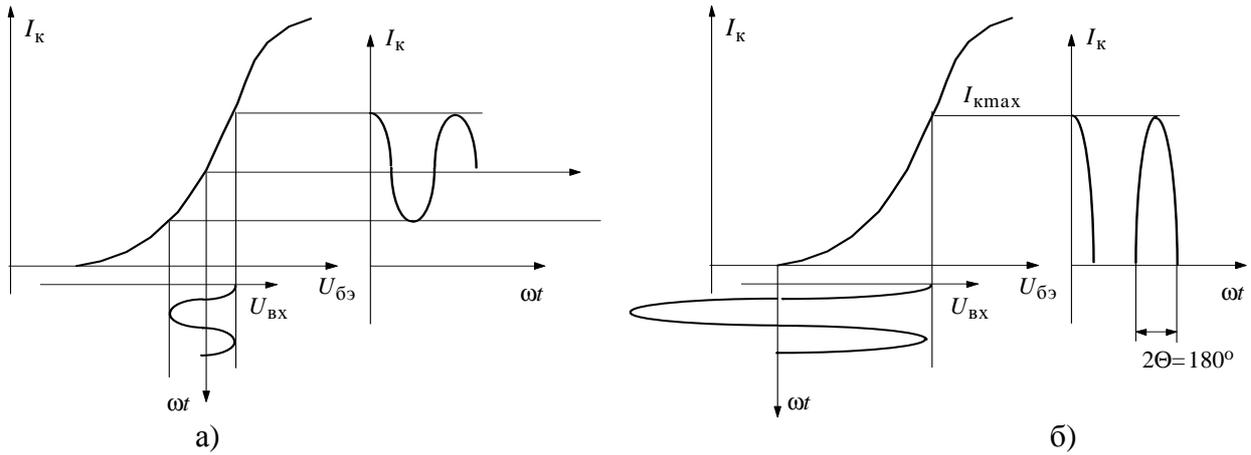


Рисунок 8.3 – Положение РТ на сквозной ВАХ для УУ разных классов усиления: а) УУ класса А; б) УУ класса В

При работе транзистора в режиме А (рис. 8.3, а) переменный ток протекает в выходной цепи УУ в течение всего периода, т.е. в процессе работы не происходит запирающие АЭ («отсечки» выходного тока). От источника питания непрерывно, независимо от уровня входного сигнала, потребляется примерно одна и та же мощность, пропорциональная току в рабочей точке (току покоя) АЭ. Поскольку КПД при этом невелик (не превышает 25 %), то режим А используется, как правило, в маломощных линейных усилителях.

При работе УУ в режимах В, АВ, С и D ток покоя мал, АЭ работает с отсечкой выходного тока, т.е. в некоторые промежутки времени транзистор закрывается. Выходной ток протекает в течение части периода, равной 2Θ (Θ - угол отсечки). В режиме А отсечка тока отсутствует, что соответствует углу $\Theta=180^\circ$.

Режим В характерен тем, что ток покоя равен нулю, угол отсечки $\Theta=90^\circ$, выходной ток протекает в течение одного полупериода входного сигнала (рис. 8.3, б). При отсутствии сигнала на входе усилитель не потребляет мощности от источника питания. При наличии входного сигнала потребляемая от источника питания мощность пропорциональна среднему значению выходного тока. Режим В характеризуется более высоким КПД и применяется в мощных усилителях.

Режиму АВ соответствует угол отсечки $90^\circ < \Theta < 180^\circ$ (рис. 8.4, а). Энергетические показатели режима АВ уступают показателям режима В, но значительно лучше, чем показатели режима А. Режимы В и АВ приводят к сильному искажению формы сигнала, поэтому они обычно используются в двухтактных усилителях, в которых уменьшение тока одного АЭ компенсируется увеличением тока другого. Уменьшение нелинейных искажений в двухтактных усилителях происходит в режиме АВ, близком к режиму В. Малые нелинейные искажения и экономичность послужили причиной широкого применения режима АВ в выходных двухтактных каскадах даже при относительно малых уровнях выходной мощности.

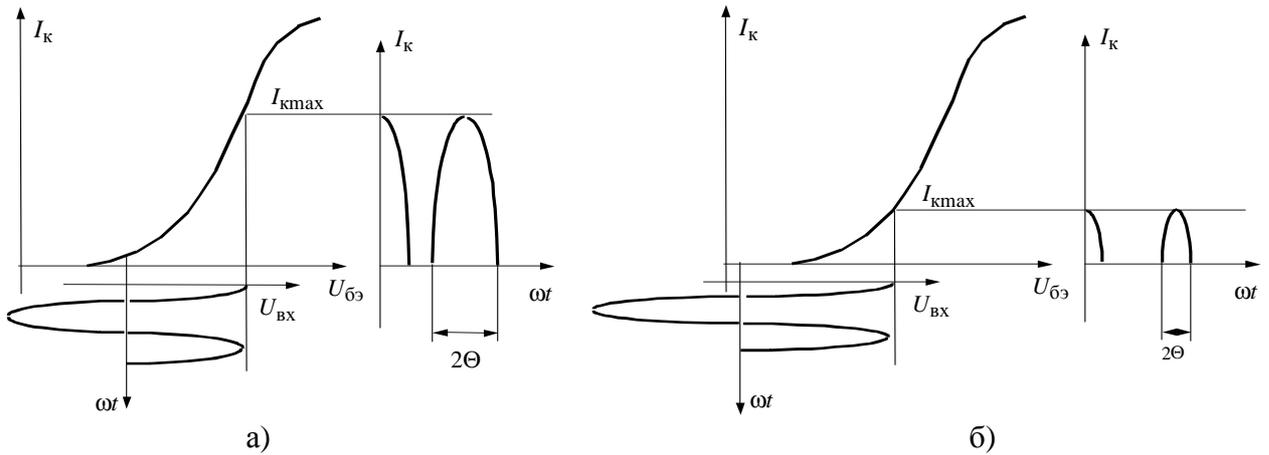


Рисунок 8.4 – Положение РТ на сквозной ВАХ для УУ разных классов усиления: а) УУ класса АВ; б) УУ класса С

Режим С еще более экономичен, так как $\Theta < 90^\circ$ (рис. 8.4, б), но применяется только в случае, когда нелинейные искажения сигнала не играют существенной роли.

В режиме D АЭ поочередно или открыт и находится в насыщении, или полностью закрыт. Усилители класса D в настоящее время почти не используются из-за значительной сложности схемы. Однако они весьма перспективны для построения мощных УУ, выполняемых на маломощных АЭ.

8.4 Расчет каскада по постоянному току

8.4.1 Статические вольтамперные характеристики биполярного транзистора в схеме включения с ОЭ

При включении биполярного транзистора по схеме с ОЭ входными являются ток базы $i_б$ и напряжение база-эмиттер $U_{бэ}$, а выходными – ток коллектора $i_к$ и напряжение коллектор-эмиттер $U_{кэ}$. При этом АЭ описывается следующими статическими (в предположении, что сигнал изменяется бесконечно медленно) вольтамперными характеристиками (ВАХ):

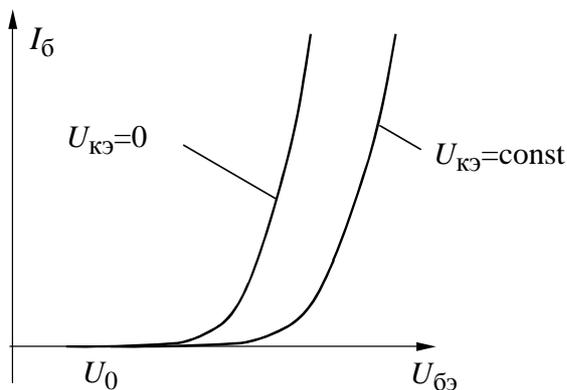


Рисунок 8.5 – Входная ВАХ транзистора

сигнированном напряжении на выходе $U_{кэ}=\text{const}$ (рис. 8.5), т.е.

$$i_б = f(U_{бэ}) \Big|_{U_{кэ}=\text{const}}$$

1. *Входная ВАХ.* Под входной ВАХ транзистора понимают зависимость входного тока $i_б$ от входного напряжения $U_{бэ}$ при фиксированном напряжении на выходе $U_{кэ}=\text{const}$ (рис. 8.5), т.е.

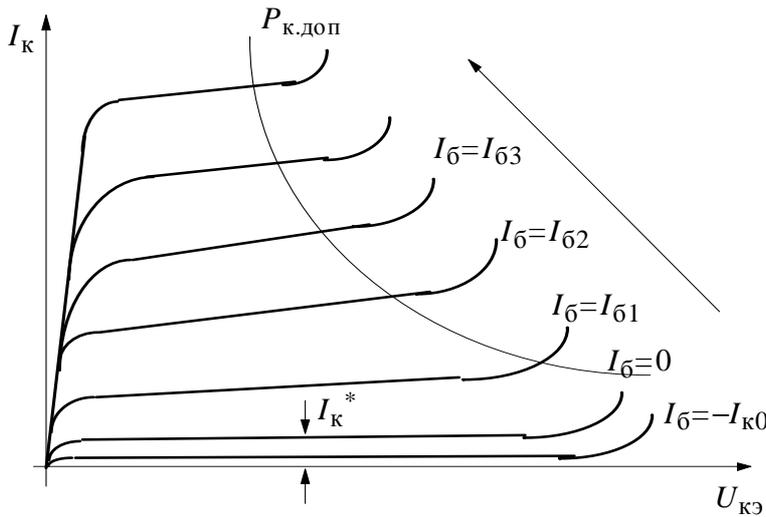


Рисунок 8.6 – Семейство выходных ВАХ транзистора

Величина $i_{\text{б}}$ уменьшается при $U_{\text{кэ}} = \text{const} > 0$, так как переход база-коллектор смещен в обратном направлении (т.е. закрыт) и его ток уменьшается до величины $I_{\text{к0}}$ ($I_{\text{к0}}$ - неуправляемый ток закрытого перехода). При этом прямой ток базы $i_{\text{б}}$ обусловлен только процессами рекомбинации носителей в базе. С увеличением напряжения $U_{\text{кэ}}$ ширина закрытого перехода база-коллектор растет, и следовательно, уменьшается ширина активной области базы. При этом количество актов рекомбинации носителей в ней также уменьшается.

2. *Выходная ВАХ.* Выходной ВАХ транзистора называют зависимость выходного тока $i_{\text{к}}$ от выходного напряжения $U_{\text{кэ}}$ при фиксированном значении входного тока $i_{\text{б}} = \text{const}$, т.е. $i_{\text{к}} = f(U_{\text{кэ}}) \Big|_{i_{\text{б}} = \text{const}}$. Изменяя входной ток $i_{\text{б}}$ с некоторым шагом, можно получить семейство выходных ВАХ (рис. 8.6).

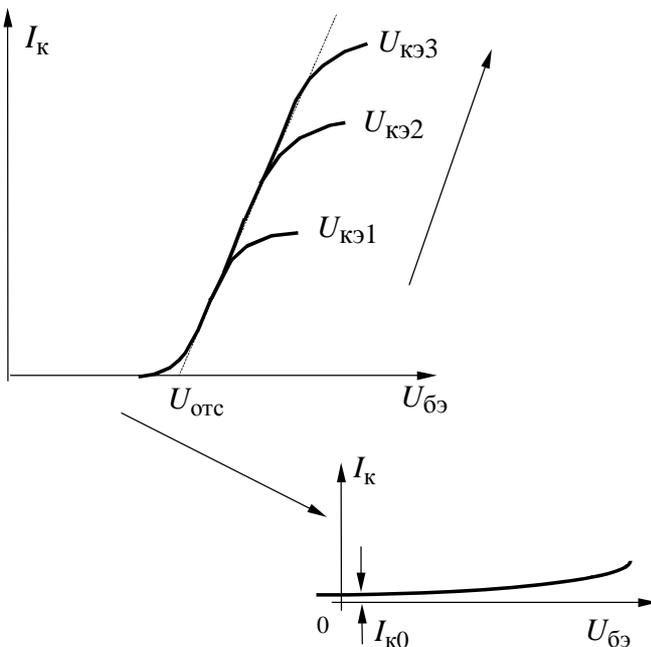


Рисунок 8.7 – Сквозная (проходная) ВАХ транзистора

При $i_{\text{б}} = 0$ и $U_{\text{кэ}} > 0$ величина тока коллектора равна $I_{\text{к}}^* = (1 + \beta)I_{\text{к0}}$, где β - статический коэффициент усиления тока базы в схеме включения транзистора с ОЭ. При $U_{\text{бэ}} < 0$, $i_{\text{б}} = -I_{\text{к0}}$ оба перехода АЭ смещены в обратном направлении (транзистор закрыт и находится в режиме отсечки) и ток коллектора равен $I_{\text{к}} = I_{\text{к0}}$. Превышение величины допустимой рассеиваемой на транзисторе мощности $P_{\text{к.доп}}$ приводит к электрическому, а затем и к тепловому пробую перехода.

3. *Пролодная ВАХ.* Пролодной (сквозной) ВАХ транзистора называют зависимость выходного тока i_k от входного напряжения $U_{бэ}$ при фиксированном значении выходного напряжения $U_{кэ} = \text{const}$ (рис. 8.7), т.е.

$$i_k = f(U_{бэ}) \Big|_{U_{кэ} = \text{const}}.$$

Величина $U_{отс}$, при котором происходит открывание АЭ, равна $0,6 \div 0,7$ В для кремниевых транзисторов и $0,4 \div 0,6$ В – для германиевых. По пролодной ВАХ для заданного режима можно оценить величину выходного тока при котором АЭ является линейным прибором. В справочниках по транзисторам чаще всего приводятся выходная и входная ВАХ, по которым можно построить пролодную (сквозную) ВАХ.

8.4.2 Анализ усилительного каскада по постоянному току. Выбор рабочей точки транзистора

В режиме А работают УУ, на вход которых поступают сигналы с достаточно малыми амплитудами. В этом случае усилитель можно считать линейным устройством и представлять его в виде линейного активного четырехполюсника. В режиме А исходная рабочая точка (РТ) должна находиться в активной (рабочей) области ВАХ транзистора. Активная область на семействе выходных ВАХ биполярного транзистора, включенного по схеме с ОЭ, ограничена кривыми, определяющими области насыщения, отсечки, и линиями допустимых значений коллекторного тока $I_{к,доп}$, коллекторного напряжения $U_{к,доп}$ и допустимой рассеиваемой мощности $P_{к,доп}$ (см. рис. 8.8). В областях насыщения и отсечки транзистор теряет усилительные свойства, превышение значений $U_{к,доп}$ и $P_{к,доп}$ приводит к выходу транзистора из строя (электрическому или тепловому пробую), а превышения значения $I_{к,доп}$ значительно ухудшает усилительные свойства.

Для того чтобы выбрать положение РТ для биполярного транзистора, нужно задать величины $I_{0к}$, $U_{0кэ}$, $I_{0б}$ и $U_{0бэ}$. Значения токов $I_{0б}$, $I_{0к}$ и напряжения $U_{0бэ}$ однозначно взаимосвязаны, как это следует из входной и пролодной ВАХ.

Выбор РТ начинают с задания тока коллектора $I_{0к}$, так как от него зависят практически все параметры транзистора. Обычно следует ориентироваться на режим, рекомендованный в справочниках, хотя в ряде случаев отступления от этого режима не только допустимы, но и необходимы. Положение РТ выбирается исходя из заданных величин сопротивления нагрузки R_n , выходного напряжения $U_{вых}$ и связанного с ним тока $I_{вых} = U_{вых} / (R_n \parallel R_k)$ в нагрузке. Для линейного каскада выбор РТ осуществляется исходя из следующих соотношений:

$$U_{0к} > U_{вых}, \quad I_{0к} > I_{вых}.$$

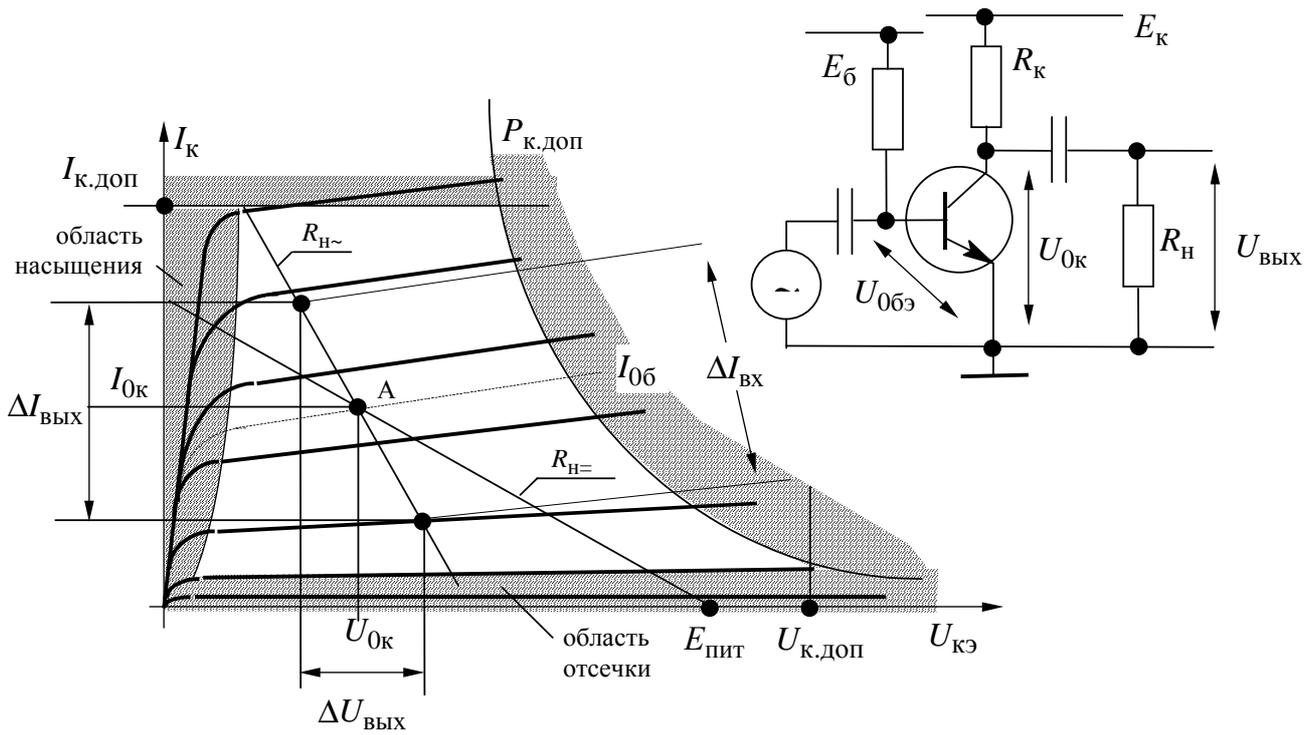


Рисунок 8.8 – Выбор рабочей точки УУ класса А

Эти неравенства должны выполняться достаточно сильно, чтобы параметры транзистора могли считаться постоянными даже для максимального сигнала. Кроме того, РТ должна удовлетворять условиям $U_{0К} + U_{ВЫХ} < U_{К.ДОП}$ и $U_{0К} I_{0К} < P_{К.ДОП}$, т.е. РТ должна лежать левее значения $U_{К.ДОП}$ и ниже гиперболы допустимой рассеиваемой мощности $P_{К.ДОП}$.

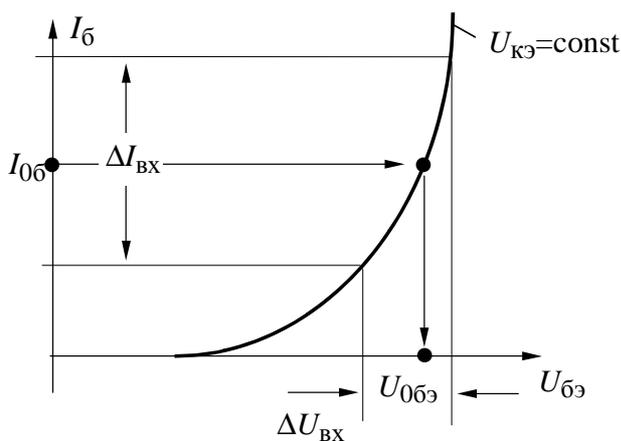


Рисунок 8.9 – Положение рабочей точки на входной ВАХ

Обычно рекомендуется 20-40% запас по напряжению и 20-30% запас по току коллектора при выборе положения РТ.

С помощью входной (или проходной) ВАХ определяют значение $U_{0БЭ}$ (см. рис. 8.9). После того как РТ выбрана, нужно обеспечить ее в реальной схеме с помощью источников питания, смещения и режимных резисторов.

8.4.3 Динамические характеристики АЭ. Энергетические показатели каскада

Анализ работы АЭ в схеме проводят с помощью динамических характеристик. *Динамической характеристикой* (ДХ) называют зависимость между током и напряжением на электродах АЭ, с учетом реакции внешней нагрузки при постоянном напряжении питания. Различают динамические характеристики по постоянному и переменному токам.

Выходная ДХ по постоянному току. Простейшая схема, позволяющая установить выбранный режим транзистора, показана на рис. 8.8. Для коллекторной цепи этой схемы справедливо уравнение

$$E_{\text{пит}} = U_{0к} + I_{0к} R_{к} \quad \text{или} \quad I_{0к} = \frac{E_{\text{пит}} - U_{0к}}{R_{к}}.$$

На плоскости семейства выходных статических ВАХ это уравнение представляет собой прямую линию, проходящую через точки $E_{\text{пит}}$ на оси напряжений и $E_{\text{пит}}/R_{к}$ на оси токов под углом $\alpha = \arctg(1/R_{к})$ к оси напряжений (см. рис. 8.8). Эта линия называется нагрузочной прямой по постоянному току (обозначается $R_{н=}$). Нагрузочная прямая $R_{н=}$ проходит через рабочую точку А. При изменении температуры (или при наличии других дестабилизирующих факторов) РТ может смещаться вдоль нагрузочной прямой $R_{н=}$ вверх или вниз.

Выходная ДХ по переменному току. В качестве сопротивления нагрузки по переменному току для АЭ выступает $R_{н\sim} = R_{н} || R_{к} = (R_{н} R_{к}) / (R_{н} + R_{к})$. Уравнение выходной ДХ по переменному току имеет следующий вид: $\Delta I_{к} = -\Delta U_{к} R_{н\sim}$. На плоскости семейства выходных статических ВАХ оно представляет собой прямую, проходящую через РТ А под углом $\alpha_{\sim} = \arctg(1/R_{н\sim})$ к оси напряжений. Данная прямая носит название нагрузочной прямой по переменному току (обозначается $R_{н\sim}$).

При построении нагрузочной прямой $R_{н\sim}$ используется метод приращений (рис. 8.10): а) задается произвольная величина приращения тока коллектора $\Delta I_{к}$ и откладывается вверх от РТ А, в результате получаем точку Б; б) определяется соответствующее приращение напряжения $\Delta U_{к} = \Delta I_{к} / R_{н\sim}$, которое откладывается влево от точки Б; в) в результате построений на плоскости выходных статических ВАХ получим точку В. Прямая, проходящая через точки А и В является нагрузочной прямой по переменному току $R_{н\sim}$. С помощью нагрузочной прямой $R_{н\sim}$ (см. рис. 8.8) можно определить размах выходного тока $\Delta I_{\text{вых}}$ и оценить требуемый размах входного тока $\Delta I_{\text{вх}}$: $\Delta I_{\text{вх}} = \Delta U_{\text{вых}} / R_{н\sim}$. При изменении (в результате влияния различных дестабилизирующих факторов) положения РТ А, проис-

ходит соответствующее смещение нагрузочной прямой по переменному току $R_{H\sim}$ относительно нагрузочной прямой по постоянному току $R_{H=}$.

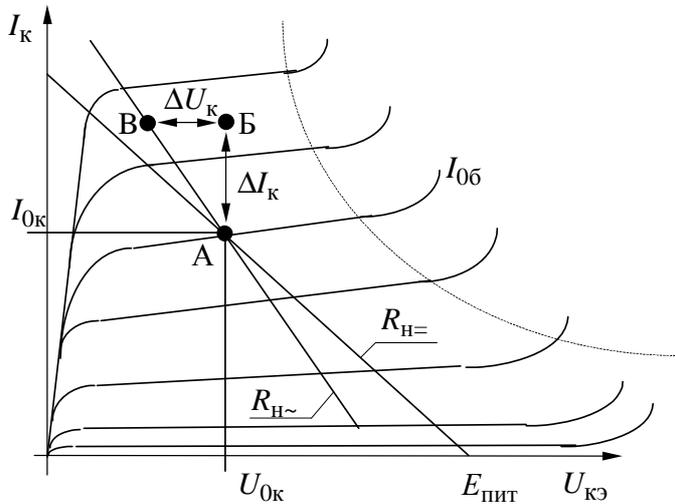


Рисунок 8.10 – Построение нагрузочной прямой по переменному току на выходной ВАХ

выходного тока АЭ от входного напряжения. По сквозной ДХ можно оценить диапазон линейности АЭ и определить уровень нелинейных искажений сигнала. Обычно сквозную ДХ строят с использованием нагрузочной прямой по переменному току $R_{H\sim}$ и входной ДХ. В качестве сквозной ДХ можно использовать проходную статическую ВАХ транзистора (при $U_{кэ}=U_{0к}$), если ограничиться уровнем входного сигнала при котором транзистор можно считать линейным элементом. По проходной ВАХ (рис. 8.11) можно определить величину входного сигнала $\Delta U_{вх}$, необходимого для получения на выходе требуемой величины выходного тока $\Delta I_{вых}$.

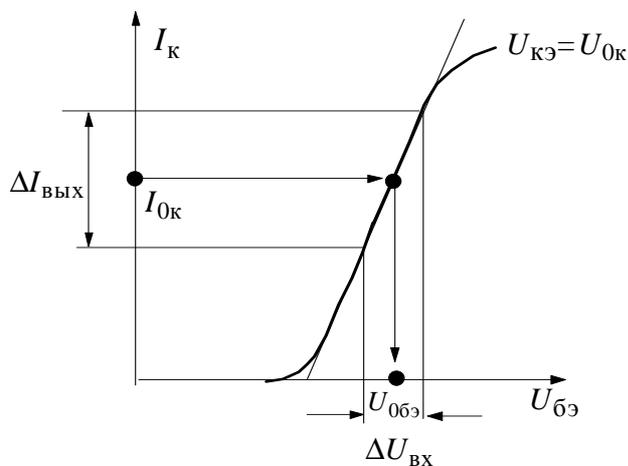


Рисунок 8.11 – Определение размаха входного сигнала по сквозной ВАХ

Входная ДХ по переменному току. По входной ДХ определяют раствор входного управляющего сигнала $\Delta U_{вх}$, соответствующий максимальному линейному раствору выходного сигнала $\Delta U_{вых}$. В качестве входной ДХ можно использовать входную статическую ВАХ транзистора при $U_{кэ}=\text{const}$.

Сквозная ДХ по переменному току. Сквозная ДХ показывает зависимость

Используя, полученные с помощью ДХ, значения растворов входного напряжения $\Delta U_{вх}$, выходного тока $\Delta I_{вых}$ и параметры РТ, можно определить следующие характеристики усилительного каскада:

- потребляемую от источника питания мощность $P_0 = E_{пит} I_{0к}$;

- рассеиваемую на АЭ мощность по постоянному току $P_k = I_{0к} U_{0к}$, при этом необхо-

димому учесть условие $P_k < (0,7 \div 0,8) P_{k, \text{доп}}$;

- полезную мощность сигнала, отдаваемую в нагрузку $P_{\sim} = \frac{1}{8} \Delta U_{\text{ВЫХ}} \Delta I_{\text{ВЫХ}}$;

- коэффициент полезного действия АЭ $\eta = \frac{P_{\sim}}{P_0} \cdot 100 \%$;

- максимальный коэффициент усиления сигнала $K_0 = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}}$.

8.4.4 Влияние температуры на характеристики транзистора

При изменении температуры кристалла транзистора изменяются его характеристики и электрический режим. Изменение электрического режима АЭ проявляется в смещении РТ по нагрузочной прямой постоянного тока $R_{\text{Н=}}$. Смещение рабочей точки приводит к нелинейным искажениям сигналов при работе усилителя. При изменении электрического режима АЭ меняется коэффициент усиления и полоса рабочих частот УУ, так как коэффициент усиления и граничная частота транзистора зависят от величины постоянного тока коллектора. В многокаскадном усилителе увеличение усиления в промежуточных каскадах может вызвать нелинейные искажения в оконечных каскадах, где уровень сигнала достаточно велик.

Влияние изменений температуры на характеристики транзисторов вызвано зависимостью электрических свойств полупроводниковых материалов и р-п-переходов от температуры: подвижности носителей заряда, контактной разности потенциалов, величины неуправляемого тока переходов.

Температура р-п-переходов биполярных транзисторов зависит от температуры окружающей среды, от мощности, рассеиваемой на переходах, от эффективности теплопередачи (теплового сопротивления) от переходов транзистора к окружающей среде. При включенном питании на переходах возникает падение напряжения и протекает постоянный ток, т.е. на переходах рассеивается определенная мощность. В результате температура переходов оказывается больше температуры окружающей среды. Разница между температурами переходов транзистора и окружающей среды тем больше, чем больше мощность, рассеиваемая на транзисторе, и чем больше тепловое сопротивление (хуже передача тепла переход - окружающая среда).

Температуру перехода можно определить по формуле $T_{\text{П}} = T_{\text{ср}} + P_k R_{\text{Т}}$, где $T_{\text{П}}$ - температура перехода; $T_{\text{ср}}$ - температура окружающей среды; P_k - мощность, рассеиваемая на переходе коллектор-база транзистора; $R_{\text{Т}}$ - тепловое сопротивление переход - окружающая среда.

Величину теплового сопротивления обычно указывают в справочнике.

Изменение температуры переходов вызывает температурную нестабильность ВАХ, ДХ и электрического режима транзистора. Различают три основных фактора температурной нестабильности биполярных транзисторов:

- зависимость неуправляемого тока коллекторного перехода $I_{к0}$ от температуры;
- зависимость контактной разности потенциалов $U_{бэ}$ на переходе база-эмиттер от температуры;
- зависимость статического коэффициента усиления тока транзистора $\beta = I_{к}/I_{б}$ от температуры.

Неуправляемый ток коллекторного перехода $I_{к0}$ возникает вследствие генерации неосновных носителей в области перехода и утечки по поверхности кристалла транзистора. Величина тока $I_{к0}$ зависит от типа полупроводника, от степени легирования (количества примесей), от площади перехода (мощности транзистора) и равна при нормальной температуре $10^{-12} - 10^{-2}$ мА. Зависимость неуправляемого тока перехода $I_{к0}$ от температуры перехода можно аппроксимировать формулой вида:

$$I_{к0T} = I_{к0} e^{a\Delta T},$$

где $\Delta T_{п} = T_{п} - T_0$ - разность температур;

T_0 - нормальная температура (27°C);

a - температурный коэффициент, равный 0,063-0,091 для германия и 0,083-0,12 для кремния.

Контактная разность потенциалов $U_{бэ}$, образующаяся на границе p-n-перехода при отсутствии внешнего смещения, изменяется на 2,2 мВ/°С для германия и на 3 мВ/°С для кремния. Изменение контактной разности потенциалов $U_{бэ}$ с температурой влияет на электрический режим эмиттерного перехода. Это проявляется в смещении входной ВАХ к началу координат и увеличению входной проводимости транзистора по постоянному току.

При изменении температуры переходов транзистора изменяется подвижность носителей заряда (электронов и дырок). Следствием этого является изменение статического коэффициента усиления тока β . Величина коэффициента усиления β изменяется на 0,003-0,01 1/°С.

Рассмотренные выше факторы температурной нестабильности приводят к увеличению тока коллектора при повышении температуры переходов транзистора (смещению РТ вверх по нагрузочной прямой $R_{н=}$) и к уменьшению тока коллектора (смещению РТ вниз) - при уменьшении температуры.

8.4.5 Схемы цепей термостабилизации электрического режима транзисторов

Электрический режим транзистора в усилительном каскаде устанавливается при помощи специальных цепей, обеспечивающих необходимый ток базы и коллектора. Однако обеспечить стабильность электрического режима в интервале температур оказывается труднее, чем установить электрический режим при фиксированной температуре. Поэтому схемы цепей термостабилизации (ТС) электрического режима сложнее. Принцип действия цепей ТС режима основан на применении отрицательной обратной связи (ООС) по постоянному току или напряжению. Задача расчета цепи ТС усилителя заключается в выборе оптимальной схемы, т.е. такой, которая обеспечивает заданное качество ТС при минимальной потребляемой от источника питания мощности.

Существует несколько схем ТС, различных по стабилизирующему действию. Стабилизирующее действие цепи ТС тем больше, чем больше элементов она содержит. Для одинаковых схем ТС стабилизирующее действие зависит от величины сопротивлений элементов цепи.

Рассмотрим наиболее часто используемые на практике схемы ТС режима биполярного транзистора: схему стабилизации тока базы (рис. 8.12); схему коллекторной стабилизации (рис. 8.13); схему эмиттерной стабилизации (рис. 8.14).

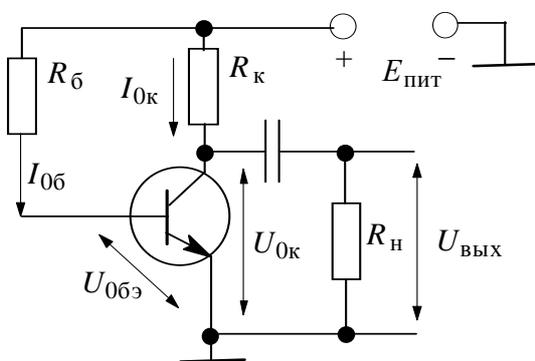


Рисунок 8.12 – Базовая схема стабилизации режима по постоянному току

Схема стабилизации тока базы. Для установления выбранного электрического режима транзистора достаточно двух элементов $R_б$ и $R_к$ (схема на рис. 8.12). При помощи резистора $R_б$ устанавливается требуемый ток базы и, следовательно, ток коллектора транзистора. Резистор $R_к$ определяет напряжение $U_{ок}$ при заданном токе коллектора. Данная схема не обеспечивает высокую стабильность коллекторного тока при изменении температуры переходов транзистора, т.к. ослабляет влияние только одного фактора нестабильности коллекторного тока - температурной зависимости контактной разности потенциалов эмиттерного перехода. Величины резисторов на схеме рис. 8.12 рассчитываются по формулам:

переходов транзистора, т.к. ослабляет влияние только одного фактора нестабильности коллекторного тока - температурной зависимости контактной разности потенциалов эмиттерного перехода. Величины резисторов на схеме рис. 8.12 рассчитываются по формулам:

$$R_к = \frac{E_{пит} - U_{ок}}{I_{ок}}, \quad R_б = \frac{E_{пит} - U_{обэ}}{I_{об}}. \quad (8.1)$$

Схема коллекторной стабилизации. Принцип действия коллекторной стабилизации (рис. 8.13) основан на применении ООС по напряжению.

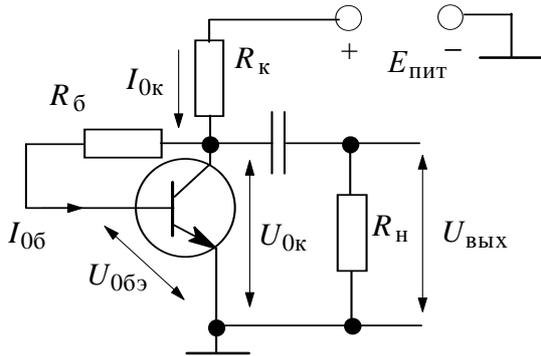


Рисунок 8.13 – Коллекторная схема стабилизации режима по постоянному току

Напряжение обратной связи снимается с R_k и подается через резистор R_b на базу транзистора. При увеличении тока коллектора транзистора с повышением температуры переходов возрастает падение напряжения на R_k и, следовательно, уменьшается напряжение смещения на базе $U_{0бэ}$, препятствуя росту тока транзистора. Для повышения уровня стабилизации необходимо увеличивать значение R_k и уменьшать величину R_b . Однако в реальной схеме должно выполняться условие $R_b \gg R_k$, что ограничивает степень достигаемой ТС. Величина сопротивления резистора R_k также рассчитывается по формуле (8.1), а значение R_b на схеме рис. 8.13 можно определить по формуле

$$R_b = \frac{U_{0к} - U_{0бэ}}{I_{0б}}. \quad (8.2)$$

Схема эмиттерной стабилизации. Наибольшее распространение при проектировании реальных УУ на биполярных транзисторах нашла схема эмиттерной стабилизации режима АЭ (рис. 8.14), обладающая наилучшими стабилизирующими свойствами из рассмотренных выше схем ТС. Высокая стабильность режима обеспечивается применением последовательной ООС по постоянному току.

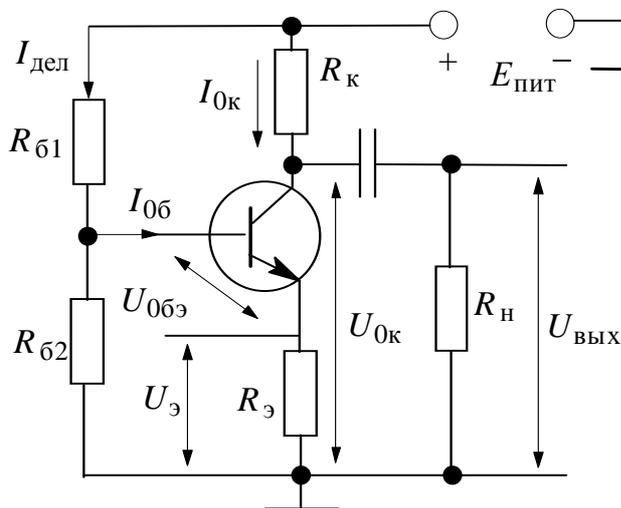


Рисунок 8.14 – Эмиттерная схема стабилизации режима по постоянному току

Напряжение обратной связи образуется на резисторе $R_э$, включенном в цепь эмиттера. Изменение тока эмиттера $\Delta I_э$, вызванное ростом температуры переходов АЭ, вызывает на резисторе $R_э$ приращение напряжения $\Delta U_э = \Delta I_э R_э$, которое меняет потенциал эмиттера относительно «земли». Если потенциал базы будет фиксированным (сопротивление $R_{б2}$ не зависит от температуры), то появление $\Delta U_э$ вызовет приращение напряжения смещения между базой и эмиттером на

резисторе $R_э$ приращение напряжения $\Delta U_э = \Delta I_э R_э$, которое меняет потенциал эмиттера относительно «земли». Если потенциал базы будет фиксированным (сопротивление $R_{б2}$ не зависит от температуры), то появление $\Delta U_э$ вызовет приращение напряжения смещения между базой и эмиттером на

величину $\Delta U_{\text{бэ}} = -\Delta U_{\text{э}}$. Причем это напряжение изменяется так, что противодействует первоначальной причине, вызвавшей изменение коллекторного тока, т.е. при увеличении тока $I_{\text{э}}$ напряжение смещения $U_{0\text{бэ}}$ уменьшается, при увеличении тока - увеличивается (принцип ООС). В результате реальное изменение тока коллектора $I_{0\text{к}}$ оказывается значительно меньше, чем для случая $R_{\text{э}}=0$. Чем больше сопротивление $R_{\text{э}}$ (больше глубина ООС), тем выше стабильность коллекторного тока.

Потенциал базы фиксируется с помощью делителя напряжения $R_{\text{б1}}$, $R_{\text{б2}}$, по которому протекает ток $I_{\text{дел}} = E_{\text{пит}} / (R_{\text{б1}} + R_{\text{б2}})$. Чем меньше сопротивление резисторов $R_{\text{б1}}$ и $R_{\text{б2}}$, тем больше ток делителя и тем меньше сказывается изменение тока базы $I_{0\text{б}}$ на потенциал базы и, следовательно, выше стабильность установленного режима. Однако чрезмерное снижение сопротивлений $R_{\text{б1}}$ и $R_{\text{б2}}$ уменьшает входное сопротивление каскада, так как оба резистора включены параллельно входу усилителя по переменному току. Кроме того, уменьшение $R_{\text{б1}}$, $R_{\text{б2}}$ увеличивает потребление тока от источника питания, т.е. уменьшает КПД каскада. Обычно величину тока делителя выбирают в пределах $I_{\text{дел}} = (2 \dots 12) I_{0\text{б}}$.

Последовательность расчета схемы эмиттерной ТС. Схему эмиттерной ТС см. на рис. 8.14. Исходными данными для расчета являются параметры РТ:

- постоянные токи коллектора $I_{0\text{к}}$ и базы $I_{0\text{б}}$, постоянное напряжение смещения база-эмиттер $U_{0\text{бэ}}$ и коллектор-эмиттер $U_{0\text{к}}$;
- величина неуправляемого тока коллекторного перехода $I_{\text{кб0}}$;
- статический коэффициент усиления тока базы $\beta = I_{\text{к}} / I_{\text{б}}$;
- тепловое сопротивление перехода транзистор - окружающая среда $R_{\text{т}}$.

Порядок расчета:

1) выбирается величина падения напряжения на сопротивлении в цепи эмиттера как l -я часть напряжения на транзисторе. Величину l рекомендуется выбирать в пределах $0,02 \div 0,2$ для транзисторов большой мощности и $0,1 \div 1,0$ для транзисторов малой мощности (т.е. $U_{\text{э}} = l U_{0\text{к}}$);

2) выбирается величина тока делителя $I_{\text{дел}} = k I_{0\text{б}}$, где коэффициент k рекомендуется брать в пределах $1 \div 3$ для транзисторов большой мощности и $3 \div 10$ для транзисторов малой мощности;

3) вычисляются величины сопротивлений цепи эмиттера и базового делителя по формулам

$$R_{\text{э}} = \frac{U_{\text{э}}}{I_{\text{э}}} = \frac{l \cdot U_{0\text{к}}}{I_{0\text{к}} + I_{0\text{б}}}, \quad (8.3)$$

$$R_{\bar{6}2} = \frac{U_{\bar{э}} + U_{0\bar{бэ}}}{I_{\text{дел}}} = \frac{l \cdot U_{0\bar{к}} + U_{0\bar{бэ}}}{kI_{0\bar{б}}}, \quad (8.4)$$

$$R_{\bar{6}1} = \frac{E_{\text{пит}} - (U_{\bar{э}} + U_{0\bar{бэ}})}{I_{\text{дел}} + I_{0\bar{б}}} = \frac{U_{0\bar{к}} + U_{R_{\bar{э}}} - U_{0\bar{бэ}}}{(1+k)I_{0\bar{б}}}, \quad (8.5)$$

где $E_{\text{пит}} = (1+l)U_{0\bar{к}} + U_{R_{\bar{к}}}$ - напряжение электропитания усилительного каскада. Для резонансных усилителей $U_{R_{\bar{к}}} = 0$, для резисторного каскада $U_{R_{\bar{к}}} = I_{0\bar{к}}R_{\bar{к}}$, величина $R_{\bar{к}}$ определяется по формуле (8.1);

4) определяется величина отклонения температуры переходов транзистора от нормальной $\Delta T = T_{\text{ср.мах}} - T_0 + R_T P_{\bar{к}}$, здесь $T_{\text{ср.мах}}$ - максимальное (минимальное) значение температуры окружающей среды, T_0 - нормальная температура (27 °C);

5) определяют параметры транзистора при изменении температуры на ΔT :

а) входное сопротивление АЭ будет равно величине

$$R_{\text{вх.Т}} = (U_{0\bar{бэ}} - \delta U_{\bar{бэ}} \Delta T) / I_{0\bar{б}}, \quad (8.6)$$

где величина $\delta U_{\bar{бэ}}$ равна 2,2 мВ/°C для германия и 3 мВ/°C для кремния;

б) значение β_T определяется по справочным данным транзистора или по эмпирической формуле

$$\beta_T = \beta(1 + \delta\beta \cdot \Delta T), \quad (8.7)$$

где $\delta\beta_T$ - равно 0,008÷0,01 1/°C;

в) величину неуправляемого тока коллекторного перехода $I_{\bar{к60Т}}$ при изменении температуры на ΔT для маломощных транзисторов можно рассчитать по формуле

$$I_{\bar{к60Т}} = I_{\bar{к60}} \cdot e^{a\Delta T}, \quad (8.8)$$

где коэффициент a равен 0,08 для германиевых транзисторов и 0,12 - для кремниевых.

Замечание: значение $I_{\bar{к60Т}}$ транзисторов средней и большой мощности следует определять по справочным данным, а при расчете по формуле

(8.8) следует брать значение $I_{кб0}$, равное $I_{кб0\text{min.справ}}$, т.к. большую часть неуправляемого тока коллекторного перехода составляет ток утечки по поверхности кристалла, который не зависит от температуры;

б) полный постоянный ток коллектора транзистора при изменении температуры на величину ΔT можно определить по формуле:

$$I_{0кT} = \frac{E_{\text{пит}} \beta_T}{D_T} + I_{к0T} \left(1 + \frac{R_{\text{вх.}T} (\beta_T + R_{б1}/R_{б2}) + R_{б1} \beta_T}{D_T} \right), \quad (8.9)$$

$$D_T = (1 + R_{б1}/R_{б2}) (R_{\text{вх.}T} + (1 + \beta_T) R_э) + R_{б1};$$

7) если $I_{0кT} > I_{0к.\text{доп}}$, то следует увеличить l и вновь выполнить расчет по формулам (8.3)-(8.5), (8.9). Процедура расчета заканчивается при достижении необходимой стабильности ($I_{0кT} < I_{0к.\text{доп}}$). Величину $I_{0к.\text{доп}}$ можно определить по выходным ДХ или для маломощных каскадов по эмпирической формуле $I_{0к.\text{доп}} = (U_{0к} - 2...4 - U_{\text{вых}}) / (R_к + R_э)$.

Для жесткой ТС электрического режима транзисторов при изменении температуры в широких пределах применяется также термокомпенсация. Основная идея термокомпенсации состоит в том, что в цепь базы или эмиттера включается термозависимый элемент (терморезистор, р-п-переход и пр.). Этот элемент включается таким образом, чтобы при его нагреве уменьшалось напряжение база-эмиттер. Термозависимый элемент с положительным температурным коэффициентом включается вместо резистора $R_{б1}$, с отрицательным - вместо $R_{б2}$ (рис. 8.14).

8.4.6 Выбор схемы термостабилизации режима

Электрическому расчету предшествует выбор схемы ТС. Чем больше интервал изменений температуры и чем меньше допустимое отклонение тока транзистора $I_{0к.\text{доп}}$, тем более сложную схему ТС следует выбирать.

При выборе схемы ТС следует учитывать, что чем лучше стабилизация, тем больше рассеивание мощности источника электропитания в пассивных цепях ТС. В мощных усилителях в результате рассеивания значительной мощности в цепях ТС повышается температура в корпусе УУ и сдвигается интервал изменений температуры. Потери мощности в цепях ТС зависят не только от выбранной схемы, но и от величины сопротивлений цепи. Поэтому нецелесообразно обеспечивать более жесткую ТС электрического режима транзисторов, чем это требуется условиями работы УУ. Правильно рассчитанная цепь ТС должна обеспечивать требуемую стабильность режима АЭ в заданном интервале температур при минимально возможной рассеиваемой мощности.

8.5 Расчет передаточных функций цепей по постоянному току (режим DC Analysis)

В режиме DC в Micro-CAP рассчитываются передаточные функции цепей по постоянному току. К схеме подключаются один или два независимых виртуальных источника постоянного напряжения или тока. В качестве выходного сигнала может рассматриваться разность узловых потенциалов (напряжение в узле) или ток через ветвь, в которую включен резистор или индуктивность. При расчете режима DC программа «закорачивает» индуктивности, исключает конденсаторы и затем рассчитывает режим по постоянному току при пошаговом изменении значений входных сигналов. Таким образом, при подключении одного источника постоянного напряжения (тока) рассчитывается передаточная функция схемы по постоянному току, при подключении двух источников - семейство передаточных характеристик, где значения напряжения (тока) второго источника выступают в качестве параметра. Обычно режим анализа DC используют для расчета статических ВАХ различных полупроводниковых приборов (диодов, транзисторов и пр.).

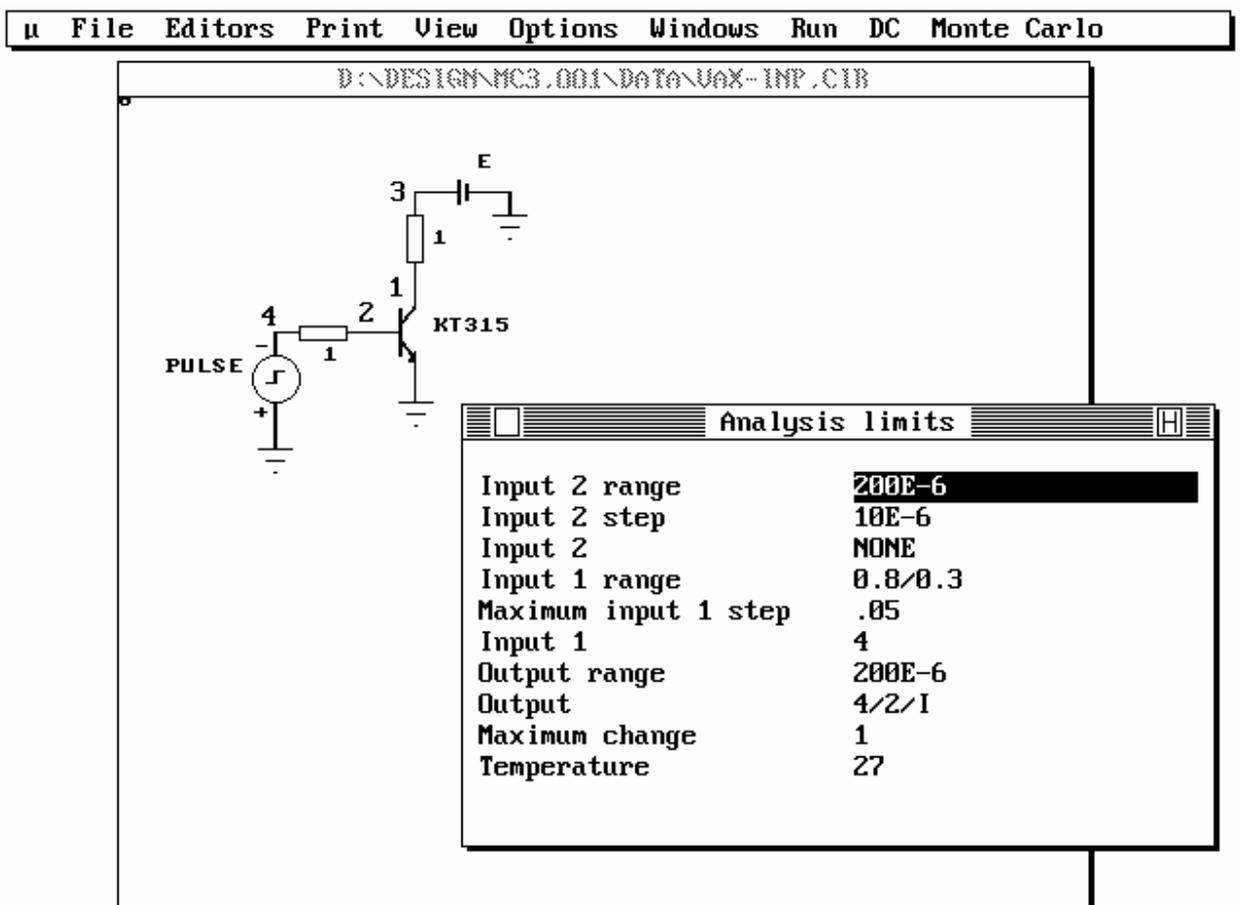


Рисунок 8.15 – Вид экрана при запуске анализа DC для расчета ВАХ транзистора

Для запуска анализа цепи по постоянному току необходимо выбрать команду **Run/3:DC** горизонтального меню. Перед запуском анализа DC программа Micro-CAP проверяет схему на наличие ошибок. При отсутствии таковых программа составляет ее топологическое описание, выполняет подготовку к численному расчету нелинейных уравнений итерационным методом Ньютона-Рафсона и открывает окно задания параметров моделирования **DC Analysis Limits**. Кроме этого, в горизонтальном меню появляются две дополнительные команды **DC** и **Monte-Carlo**. Вид окна компьютера при запуске режима DC показан на рис. 8.15.

✓1:Run	F2
2:Limits	F9
3:Options	F10
4:Scope	F8
5:Stepping	F11
6:Palette	

Рисунок 8.16 – Вид выпадающего меню команд режима DC

Команда горизонтального меню **DC** служит для вызова выпадающего меню (рис. 8.16) команд режима анализа по постоянному току. Команды этого меню дублируются «горячими» клавишами, список которых указан рядом с названием команд:

- Команда **1:Run (F2)** (вызывается нажатием на клавишу F2) - предназначена для запуска процесса моделирования. Этот процесс может быть прерван в любой момент нажатием на клавишу Esc.
- Команда **2:Limits (F9)** – вызывает на экран диалоговое окно **DC Analysis Limits** для ввода параметров процесса моделирования на постоянном токе.
- Команда **3:Options (F10)** – вызывает на экран диалоговое окно **DC Options**, которое служит для задания различных параметров моделирования и способов вывода результатов.
- Команда **4:Scope (F8)** – включает режим Scope для считывания численных данных с получаемых графиков с помощью двух электронных курсоров.
- Команда **5:Stepping (F11)** вызывает диалоговое окно для ввода наименования элемента и пределов изменения его параметров для выполнения многовариантного анализа. Это позволяет исследовать влияние этого элемента на характеристики моделируемой цепи.
- Команда **6:Palette** – вызывает диалоговое окно **Palette** для управления цветом графиков с результатами моделирования.
- Команда горизонтального меню **Monte Carlo** служит для вызова выпадающего меню с настройками для статистического анализа цепи по методу Монте-Карло.

8.5.1 Задание параметров моделирования и способов отображения результатов (диалоговые окна DC Analysis Limits и DC Options)

Рассмотрим диалоговые окна **DC Analysis Limits** и **DC Options**, в которых задаются основные параметры процесса моделирования по постоянному току и форма выдачи результатов анализа.

Диалоговое окно ввода параметров моделирования **DC Analysis Limits** появляется на экране сразу же при входе в режим анализа DC. В нем указываются номера узлов подключения и пределы изменения виртуальных источников напряжения (или тока), определяется тип выходной характеристики и задается температура, при которой происходит процесс моделирования. Общий вид окна **DC Analysis Limits** показан на рис. 8.15, поля ввода данных здесь имеют следующие значения:

- **Input 2 range** - задание пределов изменения второго варьируемого источника напряжения или тока, формат: Final[/Initial] (в квадратных скобках даны необязательные параметры). Если значение Initial не задано, то оно принимается равным нулю. Если в анализе используется только один варьируемый источник, то эту строку можно оставить пустой или указать параметр None.

Например, запись вида 10/2 означает, что параметры (напряжение или ток) второго варьируемого источника будет изменяться от 2 до 10.

- **Input 2 step** - поле для ввода шага изменения параметров второго источника.

- **Input 2** – указываются узлы подключения второго (дополнительного) варьируемого источника напряжения (тока).

Формат ввода данных: +узел[/-узел[/I или V]], здесь +узел[/-узел] – номера узлов включения источника в схему; I или V – тип источника.

По умолчанию, если тип источника не указан, подключается источник напряжения. Если необходимо подключить источник тока, то следует указать параметр I.

Например, запись вида 3 означает, что подключен источник напряжения к узлу номер 3 (эквивалентно 3/0/V). Для подключения источника тока необходимо ввести 3/0/I.

Пределы и шаг изменения этого источника задаются выше в полях **Input 2 range** и **Input 2 step**. Если при анализе используется только один варьируемый источник, то следует в данном поле ввода записать параметр None.

- **Input 1 range** - задание пределов изменения первого (основного) варьируемого источника напряжения или тока. Формат: Final[/Initial]. В данном поле определяется масштаб независимой переменной (по оси абсцисс) при построении графика передаточной характеристики.

- **Maximum input 1 step** – здесь вводится величина максимального шага изменения параметров первого источника. Чем меньше это значение, тем более точный (гладкий) график мы получим, но время расчета увеличивается.

- **Input 1** – указываются узлы подключения первого варьируемого источника напряжения (тока). Правила ввода данных такие же, как для

второго источника (поле **Input 2**).

- **Output range** - пределы изменения выходного напряжения или тока для построения графика передаточной функции. Данное поле определяет масштаб выходного графика по оси ординат.

- **Output** - номера выходных узлов и тип выходной переменной. Формат: +узел[/-узел>[/I или V]].

- **Maximum change** - максимально допустимое изменение выходной переменной (в процентах) в пределах одного шага моделирования при изменении напряжения (или тока) варьируемых источников. Данный параметр определяет «гладкость» графика, т.е. точность расчета. Уменьшение параметра **Maximum change** приводит к увеличению точности и времени расчета. Типовое значение величины **Maximum change** принимается равной от 0,5 до 5 %.

- **Temperature** – диапазон изменения температуры при моделировании, формат записи: High[/Low[/Step]] (температура задается в градусах Цельсия). При изменении температуры изменяются параметры компонентов, имеющие ненулевой температурный коэффициент ТС, а также ряд параметров полупроводниковых приборов. Если параметр Step (шаг) опущен, то анализ выполняется для двух значений температуры High и Low. Если также опущен и параметр Low, то расчет производится только при температуре, равной High. За исходное значение принимается величина 27°C.

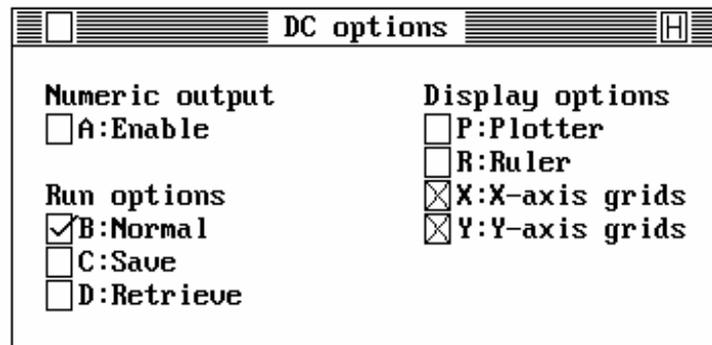


Рисунок 8.17 – Вид диалогового окна DC Options

Диалоговое окно **DC Options** (см. рис. 8.17) служит для управления форматом вывода результатов моделирования:

- Группа переключателей **Run Options** управляет выдачей результатов расчетов:

B:Normal - результаты расчетов не сохраняются,

C:Save - сохранение результатов расчетов в бинарном файле в текущем каталоге <имя схемы>.DSA,

D:Retrieve - считывание последних результатов расчетов из файла <имя схемы>.DSA, созданного ранее. При этом производится построение графиков и таблиц, как после обычного расчета, но моделирование цепи не выполняется.

- Переключатель **Numeric output / A:Enable** - при установке этого переключателя в текстовый выходной файл заносится таблица отсчетов рассчитываемой передаточной функции. Запись производится в файл <имя схемы>.DNO. Таблица выводится на экран компьютера в специальном окне **Numeric Output**, если установлен переключатель **Output to / 2:Screen** в диалоговом окне **Output**, которое вызывается командой **Options / 6:Output** из горизонтального меню программы.

- Группа переключателей **Display options** управляет отображением результатов моделирования в виде графика передаточной функции:

P: Plotter - создание файлов для вывода на графопостроитель (<имя_схемы>.PLT);

R: Ruller - нанесение разметки осей координат вместо построения координатной сетки;

T: Tokens - нанесение на график маркеров для печати в черно-белом виде;

X: X-axis grids – вкл./выкл. разметки по оси X;

Y: Y-axis grids – вкл./выкл. разметки по оси Y.

8.5.2 Получение статических ВАХ транзистора

Для получения ВАХ транзистора необходимо «собрать» схему, показанную на рис. 8.18. В зависимости от места включения источников линейно изменяющегося напряжения (тока) и вида выходной зависимости можно получить все три статических ВАХ: входную, выходную и сквозную.

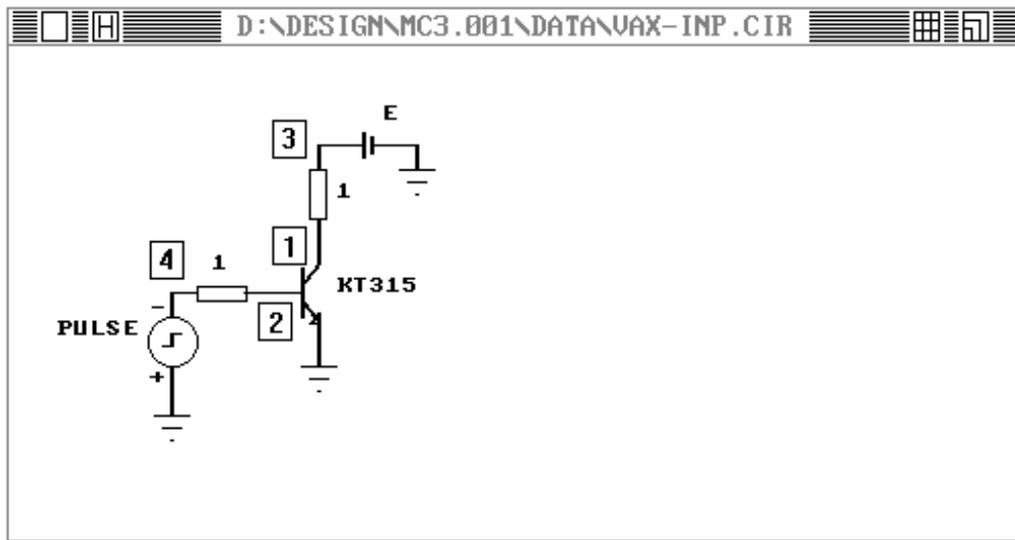


Рисунок 8.18 – Схема для получения ВАХ транзистора (номера узлов указаны в квадратных рамках)

Величину напряжения батарейки E следует задать 0 В в библиотеке меток (**Editors\2:Library labels**). Резисторы величиной 1 Ом, подключенные к базовому и коллекторному выводам транзистора, служат для вывода токов (т.к. в MicroCap-III мы можем смотреть ток только через резистор или индуктивность).

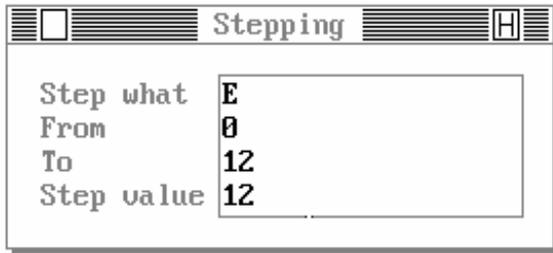


Рисунок 8.19 – Изменение напряжения E для входной ВАХ

дает диапазон шкалы по оси OX для входной ВАХ). Выходной характеристикой **OUTPUT** является ток через резистор между узлами 4 и 2, подключенный к базе транзистора. Для того чтобы получить входную ВАХ при разных напряжениях коллектор-эмиттер, будем изменять напряжение батареи E с помощью процедуры **Stepping** (см. рис. 8.19). Второй виртуальный источник INPUT 2 здесь отключен. Результат моделирования представлен на рис. 8.21. Левая кривая соответствует напряжению E=0 В, а правая – E=12 В.

Приведем пример расчета выходной ВАХ транзистора. Параметры, которые необходимо установить в окне **DC\Analysis limits**, для показанной на рис. 8.18. схемы приведены ниже на рис. 8.20. Здесь виртуальный источник напряжения **INPUT 1** подключен ко входу транзистора (узел 4) и имеет пределы изменения от 0,3 до 0,8 В (задает диапазон шкалы по оси OX для входной ВАХ). Выходной характеристикой **OUTPUT** является ток через резистор между узлами 4 и 2, подключенный к базе транзистора. Для того чтобы получить входную ВАХ при разных напряжениях коллектор-эмиттер, будем изменять напряжение батареи E с помощью процедуры **Stepping** (см. рис. 8.19). Второй виртуальный источник INPUT 2 здесь отключен. Результат моделирования представлен на рис. 8.21. Левая кривая соответствует напряжению E=0 В, а правая – E=12 В.

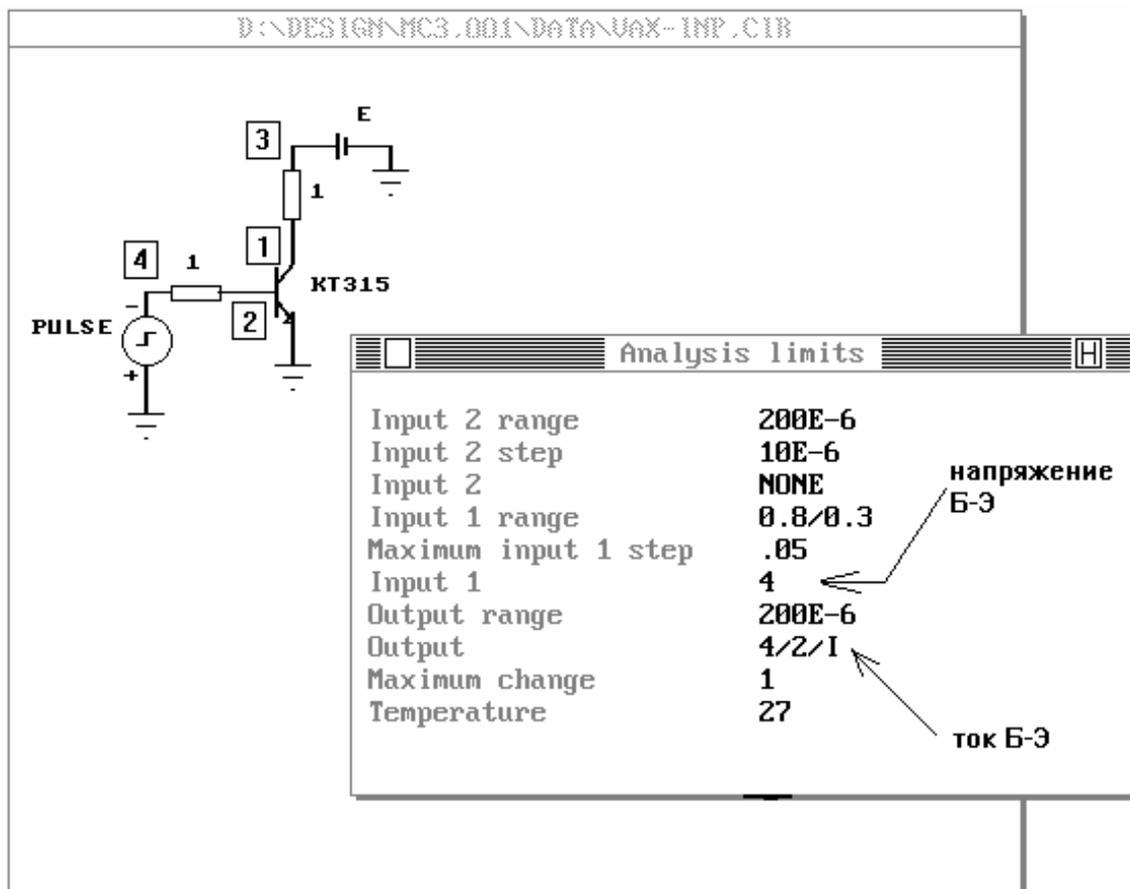


Рисунок 8.20 – Параметры моделирования в режиме DC для получения входной ВАХ

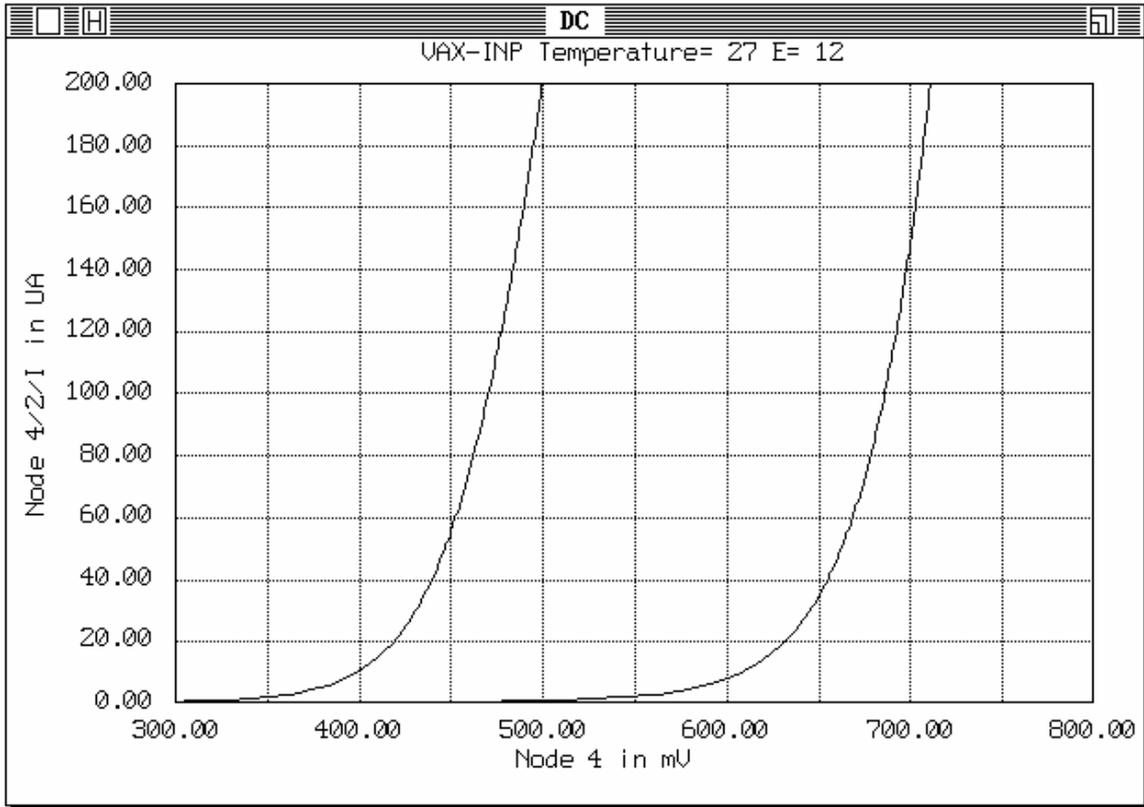


Рисунок 8.21 – Входная ВАХ транзистора, полученная в режиме DC

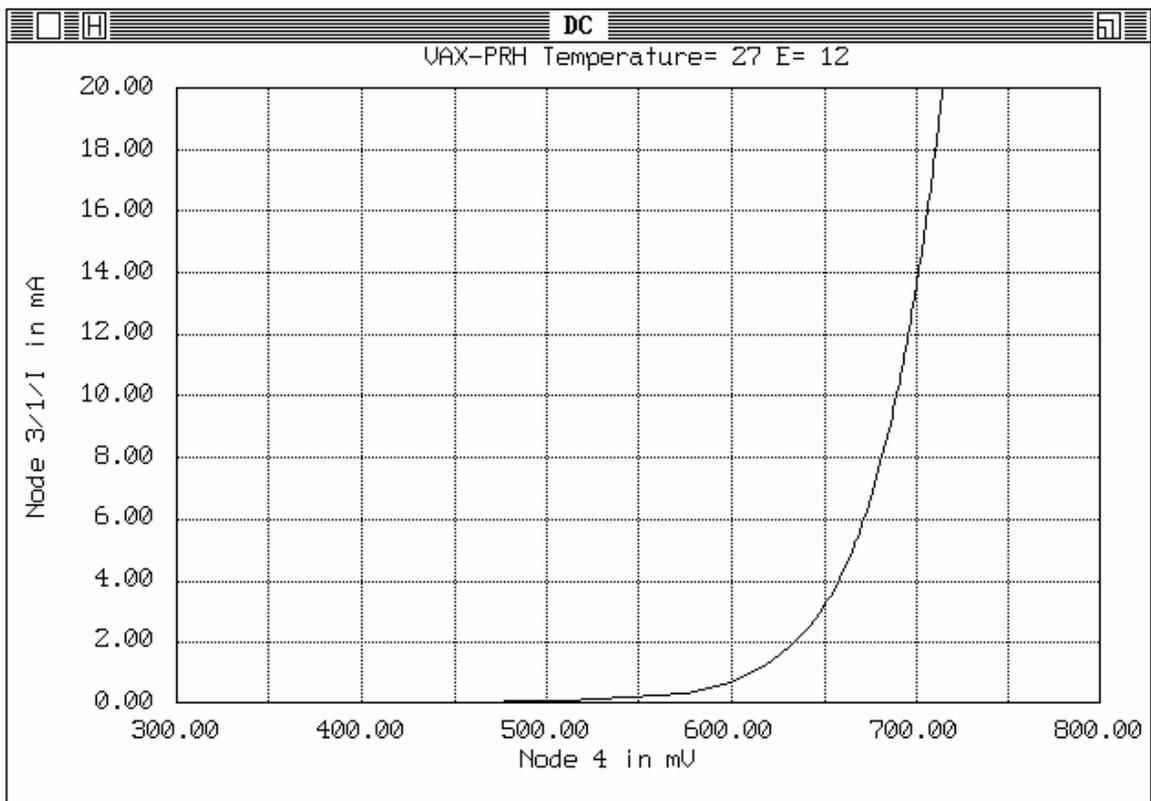


Рисунок 8.22 – Сквозная ВАХ для транзистора КТ 315, полученная в режиме DC

Для получения сквозной ВАХ нужно в качестве выходной характеристики **OUTPUT** рассматривать ток через резистор между узлами 1 и 3, подключенный к коллектору транзистора. При этом следует также увеличить пределы изменения выходной величины до 10-20 мА (поле **OUTPUT RANGE** окна **Analysis limits**). Входное воздействие (источник **INPUT 1**) остается прежним. Сквозная ВАХ, построенная для нашей схемы, показана на рис. 8.22

Замечание. Для вывода рассчитанных ВАХ на принтер следует выбрать команду главного горизонтального меню **Print \ 2 : Graphic : front window**. Система MicroCAP-III имеет встроенный драйвер печати в графическом режиме для матричных принтеров, который может конфликтовать с установленным драйвером печати в самой ОС Windows. Поэтому при работе с печатью непосредственно из системы MicroCAP-III следует либо убрать драйвер принтера Windows либо работать в режиме эмуляции MS-DOS. Также графические экраны можно копировать в буфер обмена с помощью клавиш Alt-PrintScreen (при работе в ОС Windows) и затем вставлять их в другие приложения, такие как Paint или MS-Word и т.д.

Для получения семейства выходных ВАХ необходимо подключать оба виртуальных источника **INPUT 1** и **INPUT 2**. Первый будет задавать напряжение на коллекторе транзистора, а второй – ток базы для получения семейства характеристик. Установки для проведения расчета выходных ВАХ для нашей схемы (см. рис. 8.18) приведены ниже на рис. 8.23.

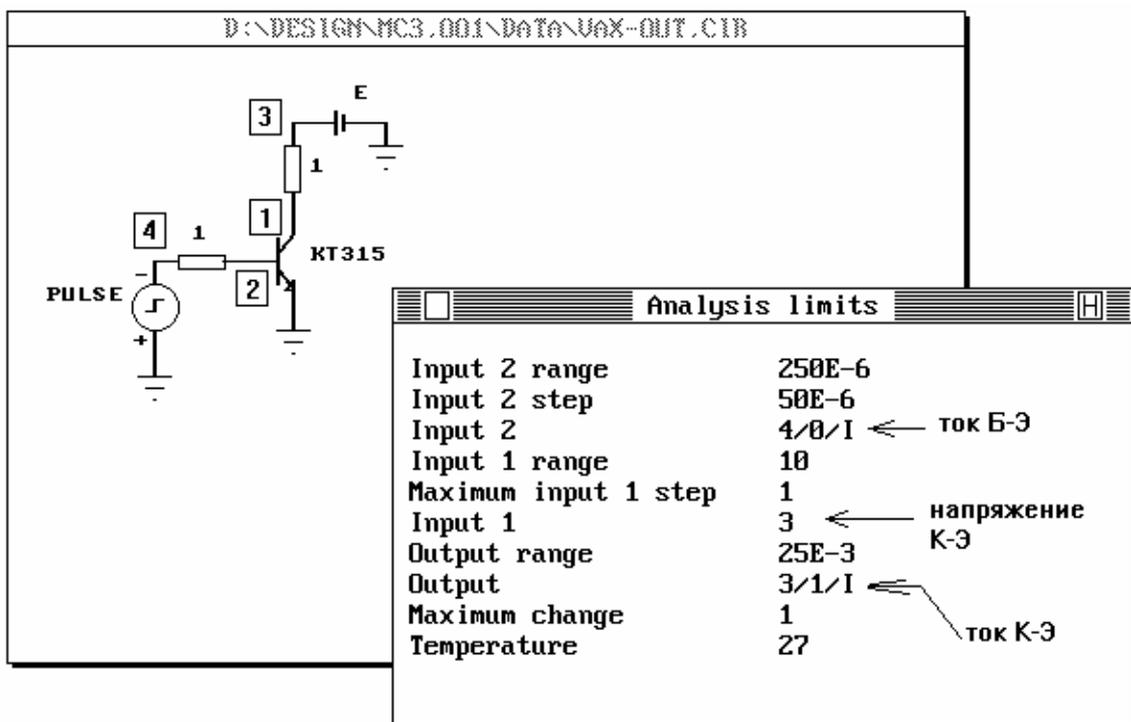


Рисунок 8.23 – Установки параметров анализа для расчета выходных ВАХ

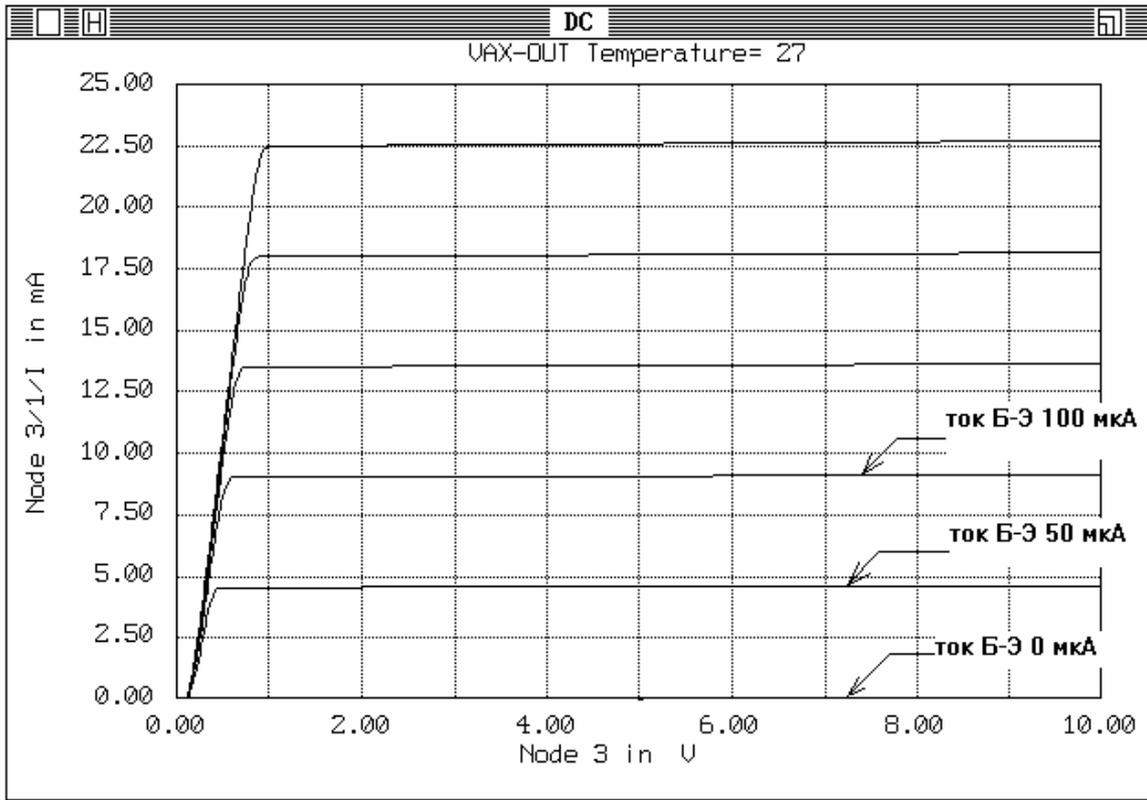


Рисунок 8.24 – Вид семейства выходных ВАХ, полученный в режиме DC

Здесь (рис. 8.23) второй виртуальный источник **INPUT 2** подключен ко входу транзистора (между узлами 4 и 0) и задает входной ток базы. Величину батарейки E при этом следует установить равной 0 В. Результат расчета семейства выходных ВАХ показан на рис. 8.24.

8.6 Задание к лабораторной работе

В ходе выполнения данной лабораторной работы студентам необходимо выполнить следующие пункты:

1. Для заданного транзистора получить входную, сквозную и выходную ВАХ, используя режим DC пакета MicroCAP-III.
2. Для указанного варианта выходных параметров по полученным ВАХ выполнить расчет рабочей точки и рабочих характеристик усилительного каскада с ОЭ.
3. Рассчитать три схемы (базовую, коллекторную и эмиттерную) стабилизации положения рабочей точки.
4. Провести моделирование частотных характеристик рассчитанных схем (в режиме AC), сравнить расчетный коэффициент усиления с результатами, полученными в ходе моделирования.
5. Оценить смещение тока коллектора при изменении температуры для каждой рассчитанной схемы стабилизации режима. Для этого следует провести моделирование схем в режиме Transient при разной температуре.
6. Сделать выводы по полученным результатам – указать схему тер-

мостабилизации, имеющую лучшие свойства.

7. Оформить отчет по лабораторной работе.

Отчет должен содержать следующие обязательные разделы:

- постановку задачи (исходные данные, цель проведения работы);
- результаты расчета транзистора в режиме DC в виде графиков ВАХ;
- расчет положения рабочей точки и рабочих параметров выбранного режима (коэффициент усиления и КПД);

Замечание: при расчете рабочей точки использовать полученные ВАХ – на них необходимо указать положение рабочей точки, размахи входного и выходного сигналов, нагрузочные прямые по постоянному и переменному току;

- расчет трех схем термостабилизации (базовой, коллекторной и эмиттерной) для выбранного режима;
- результаты моделирования рассчитанных схем в режиме AC в виде графиков частотных характеристик – по АЧХ определить коэффициент усиления и полосу пропускания каждого каскада;
- результаты моделирования рассчитанных схем в режиме Transient при разной температуре – необходимо оценить смещение тока коллектора для каждой схемы;
- выводы по полученным результатам.

Таблица 8.1 – Варианты заданий к лабораторной работе

Вариант	Транзистор	Выходное напряжение $\Delta U_{\text{вых}}$	Сопrotивление нагрузки R_n	Температура среды $T, ^\circ\text{C}$
1	КТ315	2 В	2 кОм	-10...40
2	КТ315	4 В	2,5 кОм	0...50
3	КТ315	3 В	1,7 кОм	-20...40
4	КТ315	5 В	3 кОм	-10...60
5	КТ315	6 В	4 кОм	0...45
6	КТ315	2 В	1,5 кОм	-20...20
7	КТ315	5 В	3,3 кОм	0...80
8	КТ315	7 В	5 кОм	-40...40
9	КТ315	3 В	2,7 кОм	0...90
10	КТ315	4 В	4,5 кОм	-50...50

Вариант задания определяется по формуле

$$N_{\text{в}} = (N \cdot k) \text{ div } 100,$$

где $N_{\text{в}}$ – искомый номер варианта;

N – общее число возможных вариантов (здесь $N=10$);

k – две последних цифры пароля (число от 00 до 99);

div – операция целочисленного деления.

8.7 Пример выполнения лабораторной работы № 3

8.7.1 Постановка задачи

Целью данной лабораторной работы является расчет режима усиительного каскада по постоянному току в схеме включения с ОЭ.

Исходные данные к расчету: $R_H = 2,2 \text{ кОм}$; $\Delta U_{\text{ВЫХ}} = 5 \text{ В}$; $\Delta T = -20 \dots 60 \text{ }^\circ\text{С}$.

8.7.2 Получение статических ВАХ транзистора

Для расчета режима транзистора нам потребуются входная, сквозная и выходная ВАХ. Используем режим DC пакета MicroCAP-III для получения данных характеристик. Процесс получения ВАХ подробно описан в п. 8.5.2 данного руководства.

8.7.3 Расчет режима каскада по постоянному току

Выполним расчет рабочей точки каскада с ОЭ в режиме класса А, используя графоаналитическую методику.

На выходной ВАХ выберем положение рабочей точки (РТ). Примерно положение РТ можно оценить по формулам

$$U_{0к} \geq U_{\min} + \Delta U_{\text{ВЫХ}}/2 + (0,2 \dots 0,5) \Delta U_{\text{ВЫХ}}/2;$$

$$I_{0к} \geq I_{\min} + \Delta U_{\text{ВЫХ}}/R_H + (0,1 \dots 0,3) \Delta U_{\text{ВЫХ}}/R_H;$$

$$E \geq U_{\min} + \Delta U_{\text{ВЫХ}} + (0,3 \dots 0,7) \Delta U_{\text{ВЫХ}},$$

где $U_{\min} = 0,2 \dots 2 \text{ В}$ – запас по напряжению;

$I_{\min} = 0,2 \dots 1,5 \text{ мА}$ – запас по току.

Выбор удачного расположения РТ во многом зависит от опыта разработчика. Указанные выше выражения не являются универсальными, но в нашем случае являются достаточно удобными для начальной оценки положения РТ.

Выберем: $U_{\min} = 1 \text{ В}$; $I_{\min} = 1 \text{ мА}$;

$$U_{0к} \geq 1 + 5/2 + 0,5 \cdot 5/2 = 4,75 \text{ В} \rightarrow 5 \text{ В};$$

$$I_{0к} \geq 1 + 5/2,2 + 0,2 \cdot 5/2,2 = 3,73 \text{ мА} \rightarrow 4 \text{ мА};$$

$$E \geq 1 + 5 + 0,5 \cdot 5 = 8,5 \text{ В} \rightarrow 9 \text{ В}.$$

Нанесем положение РТ на выходную ВАХ и построим нагрузочную прямую по постоянному току $R_{H=}$: она проходит через рабочую точку А ($U_{0к}$, $I_{0к}$) и напряжение питания E – точка ($E, 0$).

Рассчитаем величину сопротивления нагрузки по постоянному току:

$$R_k = R_{H=} = \frac{E - U_{0к}}{I_{0к}} = \frac{9 - 5}{4 \cdot 10^{-3}} = 1 \text{ кОм}.$$

Далее рассчитываем сопротивление по переменному току:

$$R_{H\sim} = R_k \parallel R_H = R_k \cdot R_H / (R_k + R_H) = 1 \cdot 2,2 / (1 + 2,2) = 687,5 \text{ Ом}.$$

Строим нагрузочную прямую по переменному току $R_{H\sim}$. Для этого рассчитаем размах выходного тока:

$$\Delta I_{\text{ВЫХ}} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{Н}\sim}} = \frac{5}{687,5} = 7,27 \text{ мА}.$$

Размах выходного напряжения $\Delta U_{\text{ВЫХ}}=5 \text{ В}$ отложим симметрично относительно значения $U_{0\text{К}}$, а размах тока $\Delta I_{\text{ВЫХ}}=7,3 \text{ мА}$ – относительно значения $I_{0\text{К}}$. В результате получим две точки А1 ($U_{0\text{К}}-\Delta U_{\text{ВЫХ}}/2, I_{0\text{К}}+\Delta I_{\text{ВЫХ}}/2$) и А2 ($U_{0\text{К}}+\Delta U_{\text{ВЫХ}}/2, I_{0\text{К}}-\Delta I_{\text{ВЫХ}}/2$), через которые проходит нагрузочная прямая по переменному току $R_{\text{Н}\sim}$. Результат выполненных построений показан на рис. 8.25.

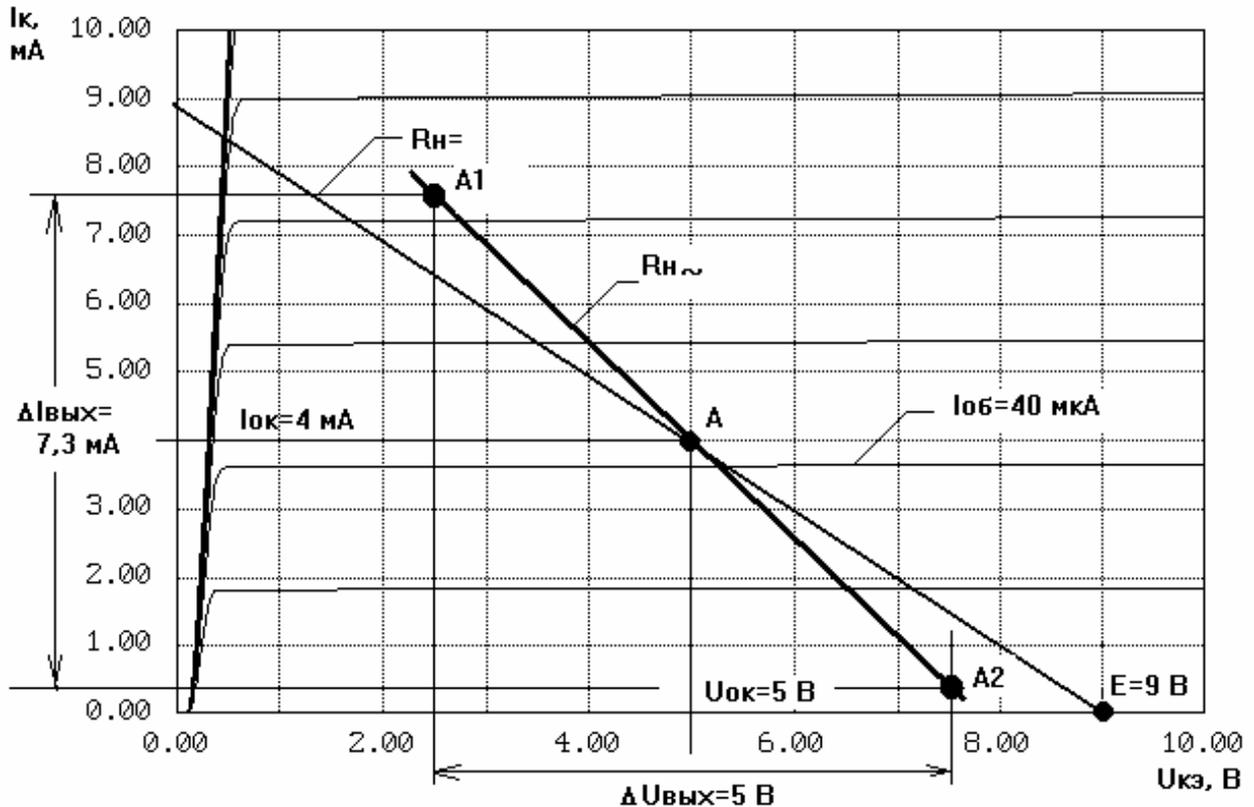


Рисунок 8.25 – Выбор положения рабочей точки на выходной ВАХ

Теперь можно рассчитать КПД выбранного режима. Полезная мощность, отдаваемая в нагрузку, будет равна $P_{\sim} = \frac{1}{8} \Delta U_{\text{ВЫХ}} \Delta I_{\text{ВЫХ}} = 0,125 \cdot 5 \cdot 7,3 \approx 4,56 \text{ мВт}$. Мощность, потребляемую от источника питания, можно определить по выражению $P_0 = E \cdot I_{0\text{К}} = 9 \cdot 7,3 \approx 65,7 \text{ мВт}$. Коэффициент полезного действия АЭ будет $\eta = \frac{P_{\sim}}{P_0} \cdot 100 \% = \frac{4,56}{65,7} 100 = 6,94\% \approx 7\%$.

Нанесем положение РТ на сквозную ВАХ. Кроме того, по сквозной ВАХ можно определить значение входного напряжения $\Delta U_{\text{ВХ}}$, соответствующего заданному размаху напряжения на выходе $\Delta U_{\text{ВЫХ}}=5 \text{ В}$. Выполненные построения показаны ниже на рис. 8.26.

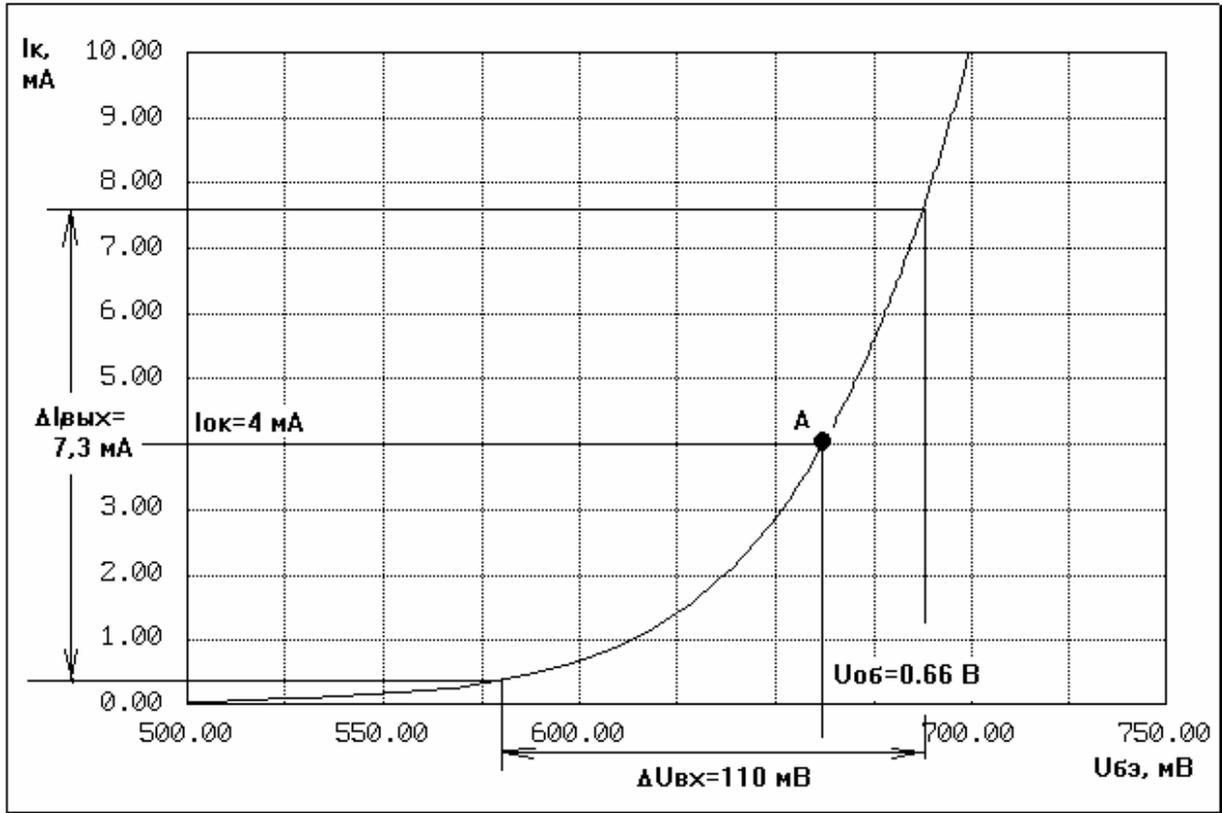


Рисунок 8.26 – Расположение РТ на сквозной ВАХ

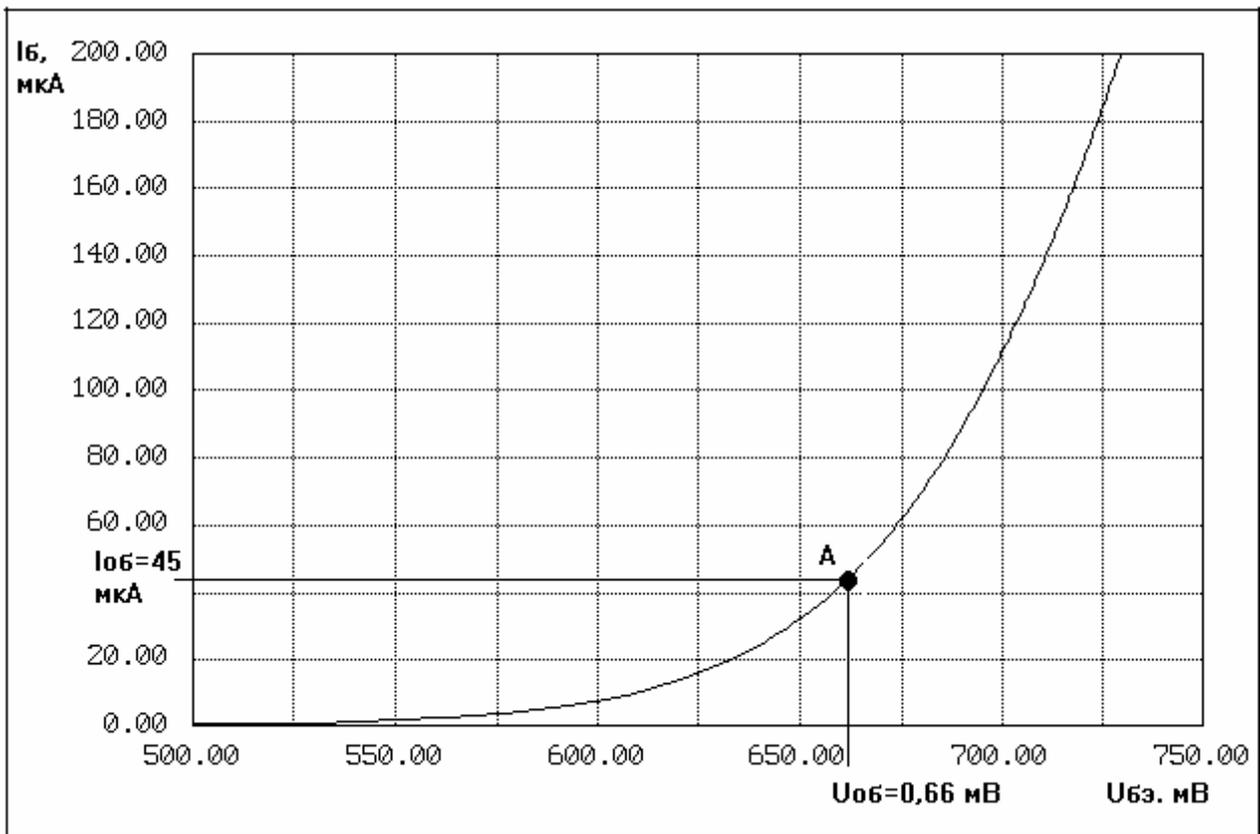


Рисунок 8.27 – Положение РТ на входной ВАХ транзистора

По найденному значению входного напряжения $\Delta U_{\text{вх}}=110$ мВ можно оценить коэффициент усиления каскада в полосе рабочих частот по формуле $K_0 = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}}} = \frac{5}{110 \cdot 10^{-3}} = 45,5$ или $K_0, \text{ дБ} \approx 33,2$ дБ.

Осталось отметить положение РТ на входной ВАХ и определить значение входного тока в РТ $I_{0б}$. Результат показан на рис. 8.27. Как видно из рисунка, величина тока базы в рабочей точке равна $I_{0б} = 45$ мкА.

На этом расчет режима каскада по постоянному току можно считать законченным.

8.7.3 Расчет схем стабилизации положения рабочей точки

Выполним расчет трех схем стабилизации режима каскада по постоянному току. Подробно об этих схемах рассказано в п. 8.4.5 данного руководства. Здесь же приведем только основные формулы.

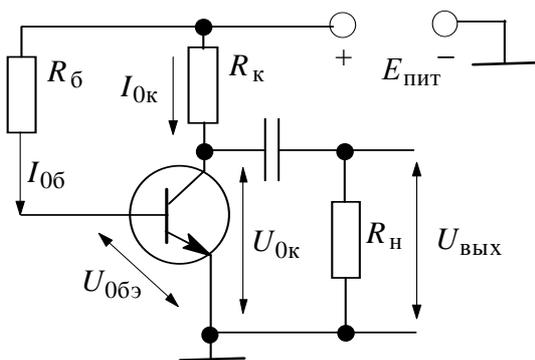


Рисунок 8.28 – Схема базовой стабилизации положения РТ

Схема базовой стабилизации режима. Схема базовой стабилизации показана на рис. 8.28. Величина резистора в цепи базы рассчитывается по формуле

$$R_{\text{б}} = \frac{E_{\text{пит}} - U_{0\text{бэ}}}{I_{0\text{б}}} = \frac{9 - 0,66}{45 \cdot 10^{-6}} = 185,3 \text{ кОм.}$$

Величину разделительных емкостей возьмем равной 20 мкФ.

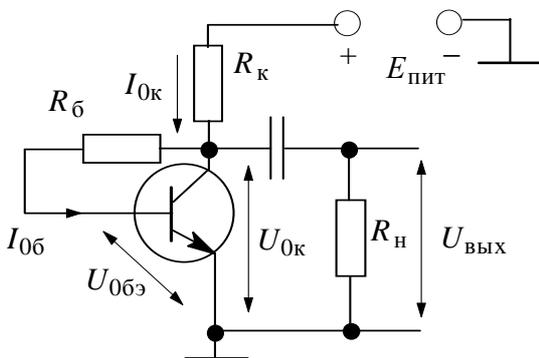


Рисунок 8.29 – Схема коллекторной стабилизации положения РТ

Схема коллекторной стабилизации режима. Схема коллекторной стабилизации представлена на рис. 8.29. Величину резистора ООС можно найти по формуле

$$R_{\text{б}} = \frac{U_{0\text{к}} - U_{0\text{бэ}}}{I_{0\text{б}}} = \frac{5 - 0,66}{45 \cdot 10^{-6}} = 96,4 \text{ кОм.}$$

Схема эмиттерной стабилизации режима. Схема каскада с эмиттерной стабилизацией представлена на рис. 8.30. Существуют разные ме-

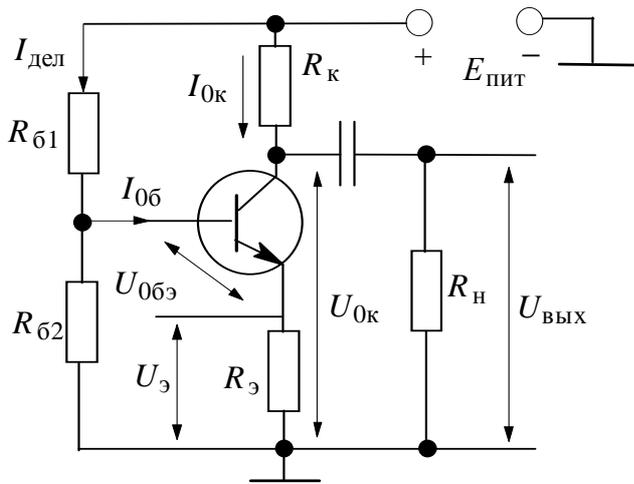


Рисунок 8.30 – Схема эмиттерной стабилизации режима

тодики расчета элементов данной схемы. Одна из них была приведена ранее в п. 8.4.5. Здесь же мы выполним упрощенный расчет схемы эмиттерной стабилизации режима (без учета температурного отклонения РТ).

Порядок расчета:

1) выбирается величина падения напряжения на сопротивлении в цепи эмиттера как l -я часть напряжения на транзисторе. Величину l рекомендуется выбирать в пределах $0,02 \div 0,2$ для транзисторов

большой мощности и $0,1 \div 1,0$ для транзисторов малой мощности. Зададим $l=0,5$. Получим $U_э = lU_{0к} = 0,5 U_{0к} = 2,5$ В;

2) выбирается величина тока делителя $I_{дел} = kI_{0б}$, где коэффициент k рекомендуется брать в пределах $1 \div 3$ для транзисторов большой мощности и $3 \div 10$ для транзисторов малой мощности. Возьмем $k=10$. Получим $I_{дел} = kI_{0б} = 10 \cdot I_{0б} = 10 \cdot 45 \text{ мкА} = 450 \text{ мкА}$;

3) вычисляются величины сопротивлений цепи эмиттера и базового делителя по формулам

$$R_э = \frac{U_э}{I_э} = \frac{l \cdot U_{0к}}{I_{0к} + I_{0б}} = \frac{2,5}{4 + 0,045} = 618 \text{ Ом};$$

$$R_{62} = \frac{U_э + U_{0бэ}}{I_{дел}} = \frac{l \cdot U_{0к} + U_{0бэ}}{kI_{0б}} = \frac{2,5 + 0,66}{450 \cdot 10^{-6}} = 7,02 \text{ кОм};$$

$$R_{61} = \frac{E - (U_э + U_{0бэ})}{I_{дел} + I_{0б}} = \frac{9 - (2,5 + 0,66)}{(450 + 45) \cdot 10^{-6}} = 11,8 \text{ кОм}.$$

Емкость $C_э$, шунтирующую сопротивление ООС $R_э$, возьмем равной 50 мкФ.

8.7.4 Моделирование каскада с ОЭ

Далее необходимо выполнить моделирование каскада с целью определения рабочих характеристик. Выполним построение схем в редакторе пакета MicroCAP-3. Общий вид окна редактора с «собранными» схемами показан на рис. 8.31.

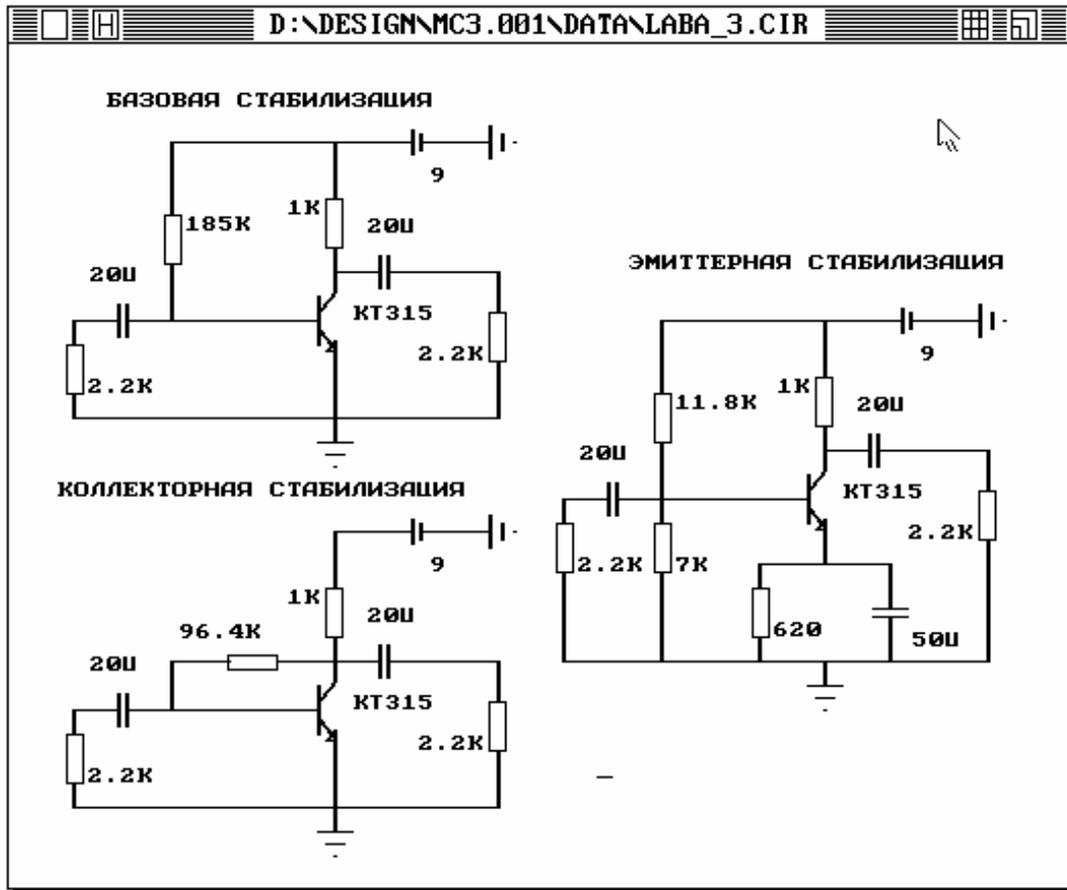


Рисунок 8.31 – Каскад с ОЭ
(три схемы обеспечения режима по постоянному току)

Частотные характеристики каскада с ОЭ

Выполним моделирование частотных характеристик рассчитанных схем с помощью режима АС пакета MicroCAP-3. Результат моделирования каскада с эмиттерной стабилизацией представлен на рис. 8.32. Для считывания показания с графика АЧХ используется режим **Scope** (команда меню **АС\4:Scope F8**). Используя два курсора, можно считывать показания с графиков. Нас интересует величина коэффициента усиления в полосе пропускания и значения нижней граничной частоты f_H и верхней граничной частоты f_B . Граничные частоты измеряются на уровне -3 дБ.

Выполним измерение коэффициента усиления и полосы пропускания для всех трех схем и результаты сведем в таблицу 8.2.

Таблица 8.2 – Частотные характеристики схемы с ОЭ

Схема стабилизации	Коэффициент усиления K_0 , дБ	Нижняя граничная частота f_H , Гц	Верхняя граничная частота f_B , МГц
Базовая	37,4	10,2	6,71
Коллекторная	37,3	15,6	6,803
Эмиттерная	37,3	358	6,808

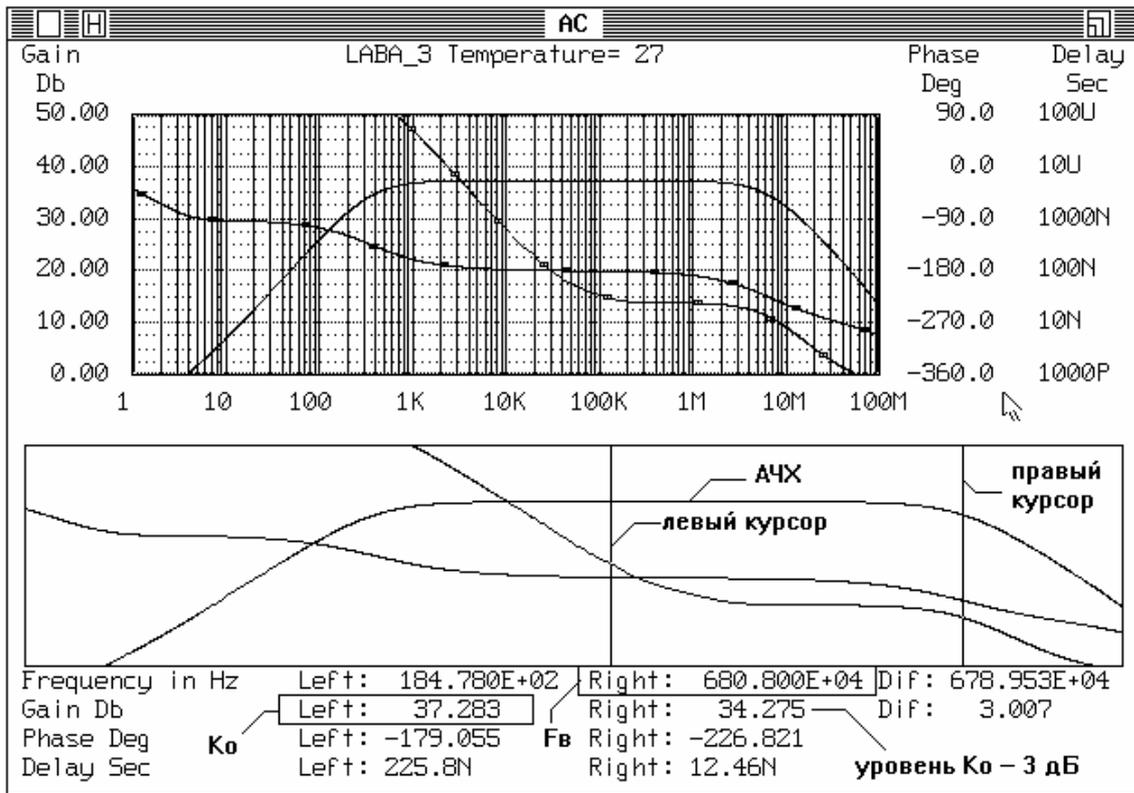


Рисунок 8.31 - Измерение коэффициента усиления и верхней граничной частоты схемы по АЧХ с помощью режима Score анализа AC

Определение температурного смещения рабочей точки

Для определения смещения рабочей точки при изменении температуры необходимо использовать режим TRANSIENT пакета MicroCAP-3. При этом в качестве выходной характеристики нужно взять ток через резистор, включенный в цепь коллектора транзистора (см. рис.8.32-8.33), и выполнять моделирование при разной температуре. Для считывания показания с графиков также можно использовать режим Score режима TRANSIENT.

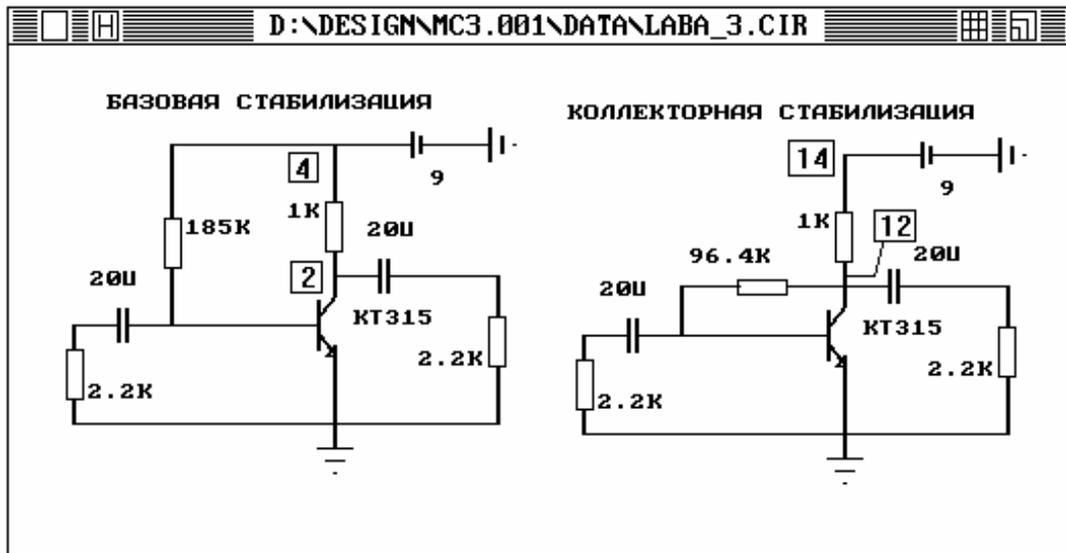


Рисунок 8.32 – Схемы каскада с ОЭ (указаны узлы включения резистора R_K)

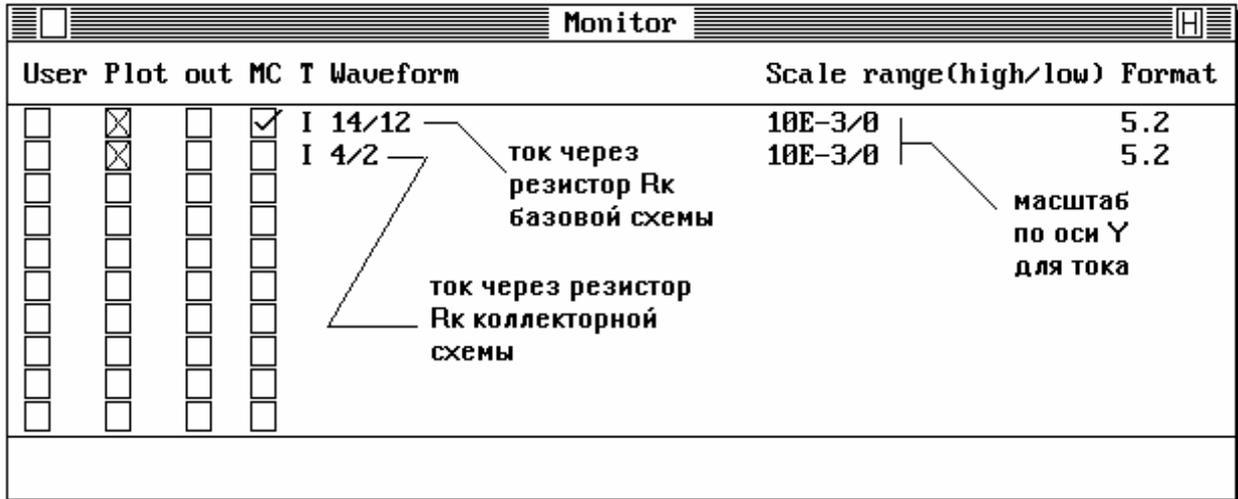


Рисунок 8.33 – Задание тока коллектора в качестве выходной характеристики при определении температурного смещения РТ

Вид окна для указания параметров моделирования **Analysis limits** в режиме TRANSIENT показан на рис. 8.34.

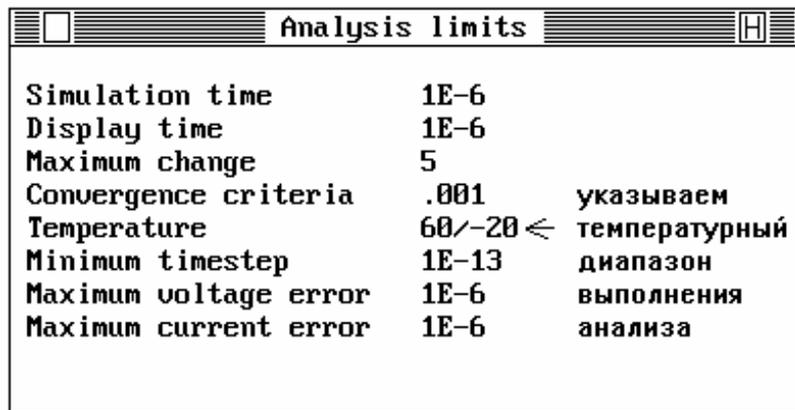


Рисунок 8.34 – Установки для выполнения анализа Transient при изменении температуры от -20 до 60 °C

Результаты моделирования каскада с ОЭ в режиме TRANSIENT с учетом изменения температуры показаны на рис. 8.35 и в таблице 8.3.

Таблица 8.2 – Температурный уход рабочей точки

Схема стабилизации	Ток коллектора при $T = 60$ °C, мА	Ток коллектора при $T = -20$ °C, мА	Величина смещения тока $\Delta I_{ок}$, мА
Базовая	6,67	3,01	3,66
Коллекторная	5,03	3,45	1,58
Эмиттерная	3,96	3,01	0,95

Из таблицы 8.2 видно, что уход рабочей точки (величина смещения тока коллектора $\Delta I_{0к}$) меньше у схемы с эмиттерной стабилизацией.

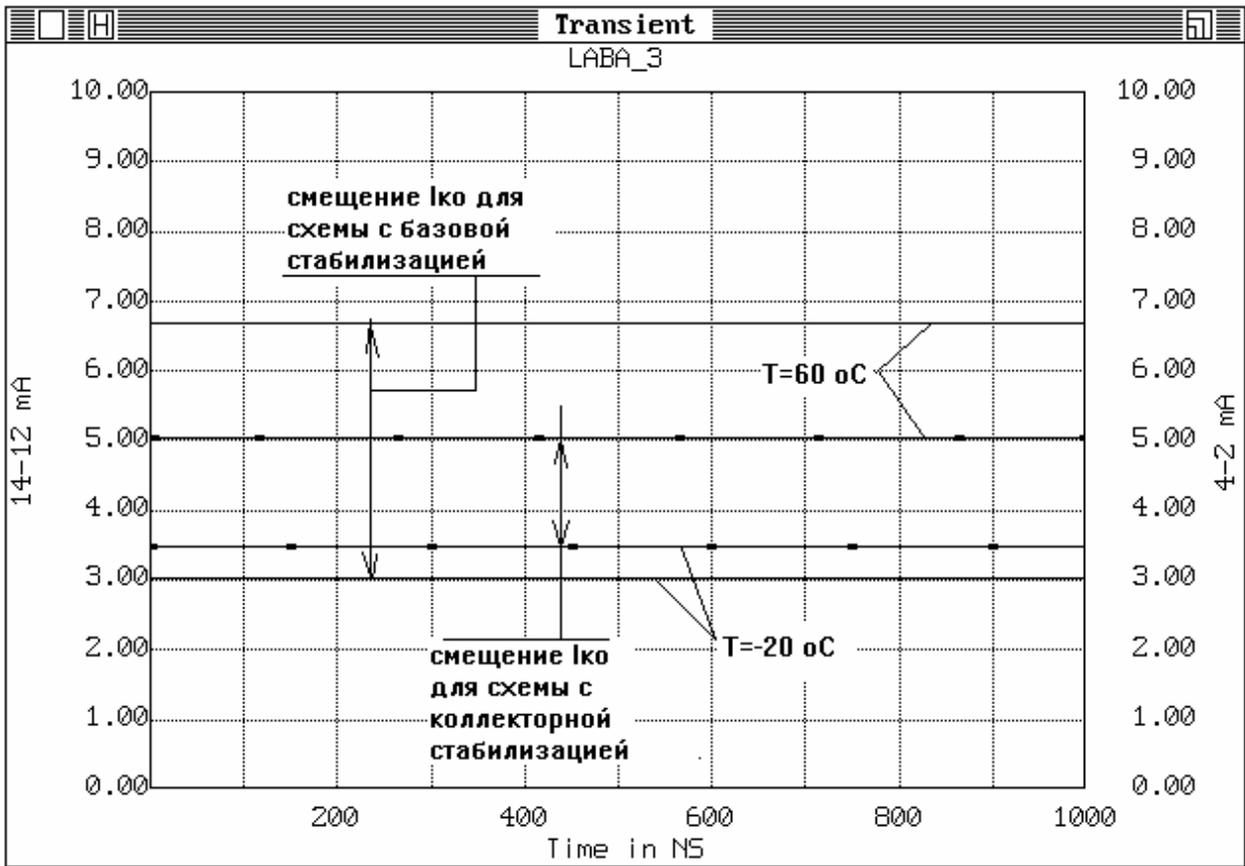


Рисунок 8.35 – Определение температурного ухода тока коллектора

8.7.5 Выводы по лабораторной работе

В результате данной лабораторной работы был выполнен анализ усилительного каскада с ОЭ (режим класса А) по постоянному току. В ходе работы были исследованы три схемы обеспечения температурной стабилизации режима: базовая, коллекторная и эмиттерная.

Были получены следующие результаты (см. таблицы 8.2 и 8.3):

1. Коэффициент усиления каскада K_0 , дБ $\approx 37,3$ дБ близок к расчетному $K_{0расч}$, дБ $\approx 33,2$ дБ. Полоса пропускания каскада с эмиттерной стабилизацией несколько уже, чем у двух других схем, что определяется влиянием ООС по току в области нижних частот.

2. Температурный уход тока коллектора меньше всего у схемы с эмиттерной стабилизацией. Худшие стабилизирующие свойства имеет схема с базовой стабилизацией режима.

9 КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Целью курсового проектирования является углубленное изучение методов и алгоритмов автоматизированного проектирования и моделирования радиоэлектронных устройств, освоение современных пакетов схемотехнического моделирования.

9.1 Вводные указания

Задача курсовой работы заключается в проведении моделирования радиоэлектронного устройства (функционального узла) с помощью программы схемотехнического моделирования. Студенты самостоятельно подбирают схему устройства. Принципиальная схема функционального узла должна содержать не менее 2-3 активных элементов (транзисторов, операционных усилителей и т.д.). Выбор программы для моделирования также остается за студентами. Рекомендуются использовать широко распространенные пакеты программ, такие как WorkBench, MicroCAP, PSpice, DesignCenter, APLAC и другие. В любом случае необходимо выполнить основные виды анализа радиоэлектронного устройства: моделирование частотных характеристик, исследование переходных процессов при подключении стандартных тестовых сигналов (синусоидальное колебание, прямоугольные импульсы и пр.).

Отчет по курсовой работе должен включать в себя следующие обязательные разделы:

- краткое описание используемой для моделирования программы: назначение и ее основные возможности;
- описание моделируемого устройства: принципиальная схема, назначение и основные рабочие характеристики;
- описание процесса моделирования: схема устройства (или текстовое описание на входном языке программы), установки для выбранного режима анализа и т.д.;
- результаты моделирования в виде графиков и таблиц;
- исследование влияния отдельных элементов схемы на ее рабочие характеристики;
- качественное сравнение полученных результатов с исходными требованиями к моделируемому устройству;
- выводы о проделанной работе.

Пояснительная записка к курсовой работе оформляется согласно требованиям ГОСТ и СТП ТУСУР в письменном или электронном виде с использованием текстового редактора MS Word и присылается на проверку в ТМЦ ДО ТУСУР.

9.2 Общие требования к содержанию пояснительной записки курсовых проектов по моделированию РЭС

Пояснительная записка (ПЗ) к курсовому проекту (работе) должна включать в себя следующие разделы:

1. **Титульный лист** – пример оформления титульного листа представлен в приложении А.

2. **Аннотация (Реферат)** – содержит краткое описание (реферат) выполненной работы (2-3 предложения). Перечисляются ключевые слова, указывается количество страниц и приложений. Реферат размещают на отдельной странице. Заголовком служит слово «Реферат», написанное прописными буквами по центру страницы.

3. **Задание на проектирование** – содержит постановку задачи для курсового проекта. Пример оформления задания на проектирования представлен ниже в приложении Б.

4. **Содержание ПЗ** – нумерованный по страницам список разделов ПЗ. Нумерация страниц ПЗ – сквозная: титульный лист имеет первый номер. На листе с содержанием обычно рисуется рамка для текстовых документов (см. приложение В).

Замечание: по последним требованиям СТП ТУСУР рамки может и не быть, если курсовой проект не связан с разработкой какого-то конкретного устройства или блока.

5. **Введение** – содержит общую информацию по проекту: краткую характеристику решаемой задачи, назначение и возможности выбранной программы для моделирования. Также введение обычно содержит состояние проблемной области на момент начала работы: обзор существующих программ для анализа РЭУ, их достоинства и недостатки.

6. **Постановка задачи.** В данном разделе подробно рассматривается схема моделируемого устройства: назначение, особенности принципиальной схемы, основные рабочие характеристики, назначение отдельных узлов и блоков, варьируемые элементы схемы и их влияние на характеристики устройства т.д. Принципиальная схема устройства оформляется согласно ГОСТ.

7. **Основной раздел ПЗ** – содержит описание процесса моделирования устройства с помощью выбранной программы. Раздел может состоять из нескольких подразделов. Желательно отразить следующие моменты:

а) описание моделируемого устройства внутри программы (схема или текстовое описание);

б) описание используемых моделей активных элементов;

в) описание выбранных режимов и установок параметров моделирования;

г) исследование влияния отдельных элементов схемы (варьируемых элементов) на рабочие характеристики устройства;

д) результаты моделирования в виде графиков и таблиц (если это необходимо);

е) описание результатов моделирования, сравнение полученных в ходе моделирования характеристик устройства с исходными требованиями к устройству, определение точности моделирования и пр.

9. **Заключение** – в данном разделе формулируем основные итоги работы: сопоставление желаемых и полученных результатов, встретившиеся проблемы и т.д.

10. **Список литературы** – список источников, используемых при работе над проектом. Может содержать не только литературные источники, но и ссылки на различные ресурсы в сети ИНТЕРНЕТ. Пример оформления списка литературы представлен в Приложении Г.

11. **Приложение** – обычно в приложение выносят: принципиальную схему устройства, оформленную в соответствии с требованиями ГОСТ; перечень элементов принципиальной схемы, оформленный в соответствии с требованиями ГОСТ; результаты моделирования устройства в виде графиков (если их больше 3-4 и они не входят в основной раздел ПЗ).

9.3 Указания к оформлению ПЗ

ПЗ пишется в редакторе MS Word шрифтом Times New Roman, размером не менее 12 пунктов, на листе формата А4. Нумерация страниц должна быть сквозной, первой страницей является титульный лист (номер страницы на титульном листе не ставится). Номер страницы проставляется вверху справа. Заголовки разделов пишутся прописными буквами по середине текста. Заголовки подразделов пишутся с абзаца строчными буквами, кроме первой прописной. В заголовке не допускаются переносы слов. Точку в конце заголовка не ставят. Если заголовок состоит из двух предложений, то их разделяют точкой.

Необходимо обратить внимание на следующее:

1) наличие нумерации и подписей к рисункам, нумерации и заголовков таблиц;

2) наличие заголовков приложений и их сквозная нумерация;

3) выполнение принципиальных схем и перечня элементов к ним в соответствии с требованиями ГОСТа (или СТП ТУСУР), пример см. в Приложении Д;

4) оформление списка литературы в соответствии с требованиями ГОСТа;

5) наличие в тексте ссылок на используемую литературу (в тексте ПЗ в квадратных скобках пишется номер источника).

Оценка за курсовой проект выставляется с учетом качества выполнения пояснительной записки.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Пример оформления титульного листа ПЗ

Министерство образования Российской Федерации

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

ТМЦ ДО ТУСУР

РАСЧЕТ ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ
С ЧЕБЫШЕВСКОЙ И БАТТЕРВОРТОВСКОЙ АЧХ

Пояснительная записка к курсовой работе по дисциплине
«Моделирование систем»

Выполнил:
студентка гр.587-1
И.В. Никитина
16.05.2002 г.

Домашний адрес
Имя и пароль
Вариант

Приложение Б**Пример оформления задания к курсовому проекту (работе)**

Министерство образования РФ

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И
РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП)

Утверждаю
Директор ТМЦ ДО
Бондарь В.А. _____
«_____» _____ 2002 г.

ЗАДАНИЕ

на курсовую работу по дисциплине «Моделирование систем»

Студентке гр. 587-1 _____ Никитиной Ирине Владимировне

Тема: Расчет фильтра нижних частот с чебышевской и баттервортовской АЧХ

Исходные данные к работе:

1. Разработать программу расчета элементов фильтра нижних частот (ФНЧ) с чебышевской и баттервортовской амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ).
2. Расчет каждого типа фильтров должен быть реализован в виде самостоятельной подпрограммы с подключением к общей управляющей программе.
3. Входными данными для расчета являются:
 - а) сопротивления нагрузки R_n и сопротивление источника сигнала R_r ;
 - б) частота среза фильтра f_B ;
 - в) требуемая неравномерность АЧХ в полосе рабочих частот (для ФНЧ с Чебышевской АЧХ);
 - г) уровень требуемого затухания L на частоте $2f_B$.
4. Результатом работы программы является схема ФНЧ и график нормированной АЧХ в полосе частот от 0 до $5f_B$.
5. Выбор среды программирования осуществляется разработчиком.

Литература:

1. Хьюлсман Л.П., Аллен Ф.Е. Введение в теорию и расчет активных фильтров. – Москва.: Радио и связь, 1984. – 324 с.
2. Лэм Г. Аналоговые и цифровые фильтры. – М.: Мир, 1982. – 592 с.
3. Кайчень Вай Теория и проектирование широкополосных согласующих цепей. – М.:Связь,1979. – 288 с.

Задание принял к исполнению

Никитина И.В.

Приложение В**Пример оформления содержания****Содержание**

1 Введение	5
2 Основы теории фильтров нижних частот	6
2.1 Аппроксимация передаточной характеристики ФНЧ	6
2.1.1 Полиномы Чебышева	7
2.1.2 Чебышевская равноволновая характеристика АЧХ ФНЧ	9
2.1.3 Чебышевские LC-лестничные цепи	12
2.1.4 Равномерная Баттервортовская характеристика АЧХ ФНЧ	15
2.1.5 Баттервортовские LC-лестничные цепи	18
3 Разработка программы расчета ФНЧ	21
3.1 Основные расчетные соотношения	21
3.2 Выбор средства реализации	26
3.3 Структурная схема программы ФИЛЬТР	32
3.4 Описание программы для пользователя	42
4 Описание программы ФИЛЬТР для пользователя	45
5 Тестирование программы ФИЛЬТР	51
6 Заключение	55
Список использованных источников	56
Приложение А - Листинг программы ФИЛЬТР	57
Приложение Б - Блок-схема алгоритма расчета ФНЧ с Чебышевкой АЧХ	60
Приложение В - Блок-схема алгоритма расчета ФНЧ с Баттервортовской АЧХ	62

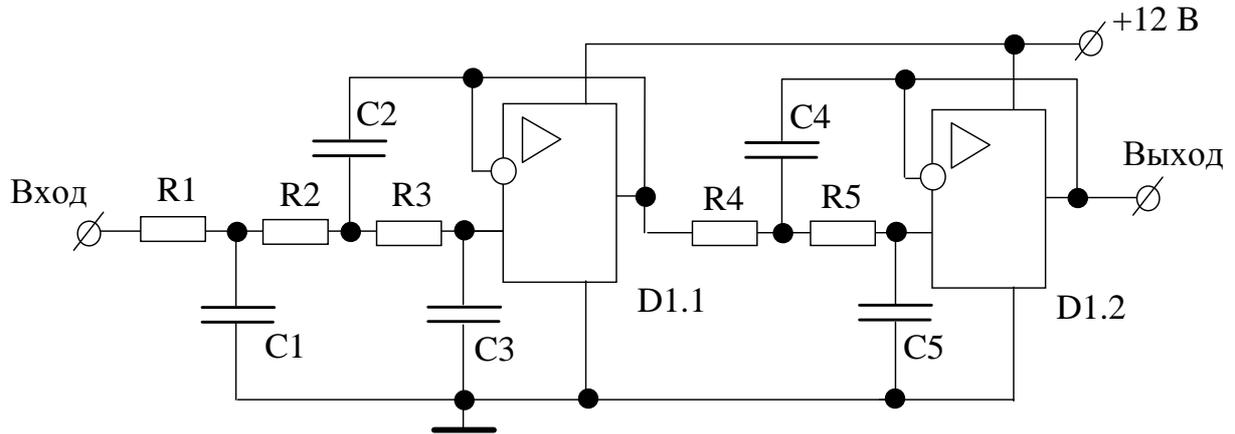
					587.100.000 ДР ПЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	РАСЧЕТ ФИЛЬТРА НИЖНИХ ЧАСТОТ С ЧЕБЫШЕВСКОЙ И БАТТЕРВОРТОВСКОЙ АЧХ	<i>Лит.</i>	<i>Масса</i>	<i>Масштаб</i>
Разраб.		Никитина И.В.				1	1 : 1	
Провер.		Черкашин М.В.				<i>Лист</i> 1	<i>Листов</i> 1	
Н. Контр.					Пояснительная записка к курсо- вой работе по дисциплине "Мо- делирование систем"	ФВС ТУСУР ар.587-1		
Утверд.								

Приложение Г**Пример оформления списка литературы****Список использованных источников**

1. Хьюлсман Л.П., Аллен Ф.Е. Введение в теорию и расчет активных фильтров. – М.: Радио и связь, 1984. – 384 с.
2. Лэм Г. Аналоговые и цифровые фильтры. - М.: Мир, 1982. – 592 с.
3. Вай Кайчень Теория и проектирование широкополосных согласующих цепей.- М.: Связь, 1979. - 288 с.
4. Тейксейра С., Паченко К. Delphi 4. Руководство разработчика. - СПб.: Вильямс, 1999. – 912 с.
5. Фаронов В.В. Delphi 4. Учебный курс.- М.: Нолидж, 1998. – 464 с.
6. [http:// www.metka.cbuilder.ru](http://www.metka.cbuilder.ru)

Приложение Д

Пример оформления принципиальной схемы и перечня элементов радиоэлектронного устройства



					587.100.000 ЭЗ			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	ФИЛЬТР НИЖНИХ ЧАСТОТ С ЧЕБЫШЕВСКОЙ АЧХ	Лит.	Масса	Масштаб
Разраб.		Никитина И.В.					1	1 : 1
Провер.		Черкашин М.В.						
						Листов 1	Листов 1	
Н. Контр.					Схема принципиальная электрическая	ФВС ТУСУР гр.587-1		
Утверд.								

