

ФГБОУВПО «Воронежский государственный технический университет»

Кафедра системного анализа
и управления в медицинских системах

242-2011

**РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПАКЕТА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

МЕТОДИЧЕСКОЕ РУКОВОДСТВО

по выполнению курсового проекта по дисциплине
«Основы САПР»
для студентов специальности 200401
«Биотехнические и медицинские аппараты и системы»
очной формы обучения



Воронеж 2011

Составители: д-р. техн. наук О.В. Родионов,
канд. техн. наук Е.И. Новикова
д-р. техн. наук Е.Н. Коровин

УДК 681.3

Разработка и анализ принципиальной электрической схемы с использованием пакета автоматизированного проектирования: методическое руководство по выполнению курсового проекта по дисциплине «Основы САПР» для студентов специальности 200401 «Биотехнические и медицинские аппараты и системы» очной формы обучения / ФГБОУВПО «Воронежский государственный технический университет»; сост. О.В. Родионов, Е.И. Новикова, Е.Н. Коровин. Воронеж, 2011. 22 с.

Методическое руководство предназначено для организации курсового проекта по дисциплине «Основы САПР» по проектированию электрических систем.

Табл. 2. Ил. 11. Библиогр.: 3 назв.

Рецензент д-р. техн. наук, проф. О.Н. Чопоров

Ответственный за выпуск зав. кафедрой
д-р техн. наук, проф. О.В. Родионов

Печатается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета

© ФГБОУВПО «Воронежский
государственный технический
университет», 2011

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАКЕТА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1 Цель курсового проекта

Целью курсового проекта является исследование принципиальных электрических систем и приобретения навыков анализа и корректировки таких систем.

2 Особенности выполнения курсового проекта

Используемые программно-аппаратные средства: ПЭВМ класса IBM стандартной конфигурации.

3 Задание на курсовой проект

1. С помощью программы MODEL рассчитать параметры математической модели одного из аналоговых компонентов (транзистора или диода, входящего в состав схемы). Преобразовать файл библиотеки MODEL в бинарный, имеющий расширение имени .LBR, предназначенный для передачи в программу моделирования MS.

2. Построить исходную принципиальную схему в программе Micro-Cap (в соответствии с полученным вариантом схемы), на основе транзистора или диода, параметры математической модели которого были рассчитаны в 1 пункте.

3. Провести анализ переходных процессов всей схемы.

4. Построить частотные характеристики.

5. Провести моделирование участка исходной схемы. Рассчитать частотные и переходные характеристики при вариации

параметров.

6. Провести расчет передаточных функций по постоянному току исходной схемы или ее участка.

7. Провести статистический анализ по методу Монте-Карло исходной схемы или ее участка.

8. Провести расчет чувствительностей по постоянному току исходной схемы или ее участка.

4 Указания по выполнению курсового проекта

Пояснительная записка к курсовому проекту должна содержать:

- введение;
- паспортные данные одного из аналоговых компонентов транзистора или диода, входящего в состав исходной схемы;
- рассчитанные параметры математической модели аналогового компонента;
- исходную электрическую схему;
- графики переходных процессов всей схемы и необходимые пояснения;
- частотные характеристики;
- результаты моделирования участка исходной схемы;
- анализ частотных и переходных характеристик при вариации параметров участка исходной схемы;
- расчет передаточных функций по постоянному току;
- статистический анализ по методу Монте-Карло;
- расчет чувствительностей по постоянному току;
- выводы после каждого проведенного анализа;
- список используемой литературы.

Теоретические сведения

Расчет параметров математической модели аналоговых компонентов с помощью программы MODEL

Программа MODEL рассчитывает параметры математических моделей аналоговых компонентов. Она работает в интерактивном режиме и выполняет расчет и оптимизацию параметров математических моделей по их паспортным данным, введенным в табличной или графической форме. При вводе координат графиков должно быть заданы координаты от двух до пяти точек – чем больше данных, тем точнее оцениваются параметры моделей. Ряд данных записываются в виде отдельных чисел, если данные отсутствуют, то принимаются их значения по умолчанию.

Программа MODEL вызывается выбором из меню программы MS Model.

Программа MODEL сохраняет введенные пользователем паспортные данные компонентов и рассчитанные параметры математических моделей в бинарных файлах с расширением имени .MDL. После завершения отработки библиотеки целесообразно удалить из этого файла входные данные и преобразовать его с помощью команды File>Create Model Library в компактную форму. Эти бинарные файлы имеют расширение имени .LBR и они предназначены для передачи в программу моделирования MS.

Присвоение параметров модели текущего окна значений по умолчанию, обычно выполняется перед оптимизацией параметров (Ctrl+I).

Оптимизация параметров модели, оцениваемых в текущем окне (Ctrl+T).

Перечни справочных данных для некоторых типов компонентов приведены в приложении А.

5.2 Выполнение моделирования электрической схемы

5.2.1 Анализ переходных процессов (Transient Analysis)

В окне задания параметров расчета переходных процессов, показанном на рисунок 1 имеются следующие разделы:

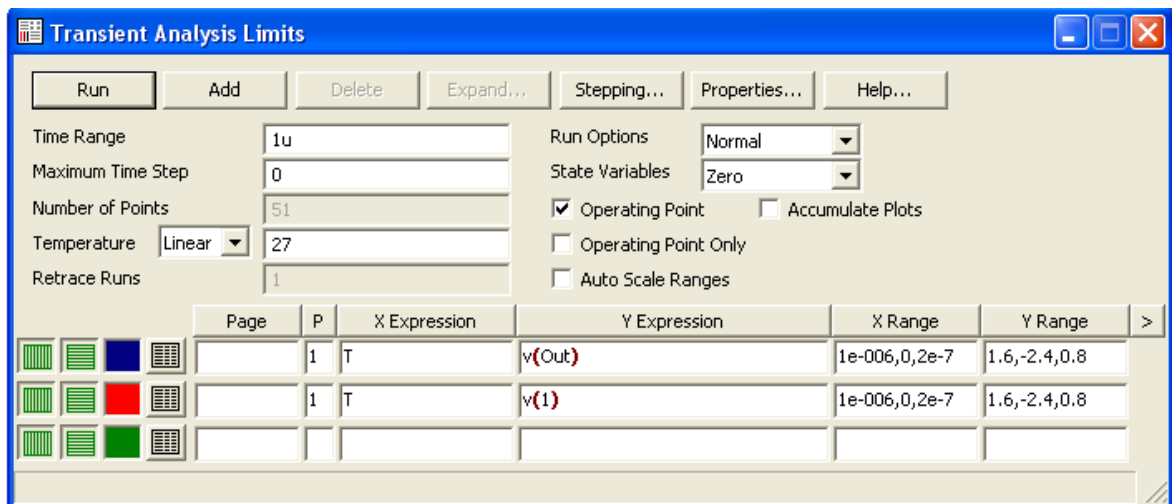






Рисунок 1 - Параметры моделирования

Команды (одинаковы практически для любого анализа):

- Run – начало моделирование (щелчок на пиктограмме  в строке инструментов или нажатие F2 также начинает моделирование). моделирование может быть остановлено в любой момент нажатием на пиктограмму  или клавишу Esc. Последовательные нажатия на пиктограмму  прерывают и затем продолжают моделирование;
- Add – добавить строку спецификации после строки, отмеченной курсором;
- Delete – удалить строку спецификации, отмеченную курсором;
- Expand – открытие дополнительного окна для ввода текста большого размера при расположении курсора в одной из граф, содержащих выражения, например, Y Expression;

– Stepping – открытие диалогового окна создания вариации параметров (вызывается также нажатием пиктограммы ) , с помощью которого производится вариация от одного до 10 параметров, показанное на рисунок 2. В нем содержатся следующие строки:

– Step What – на верхних строках указывается имя компонента и имя его варьируемого параметра. Содержание этих строк зависит от выбранного ниже типа Component или Model.

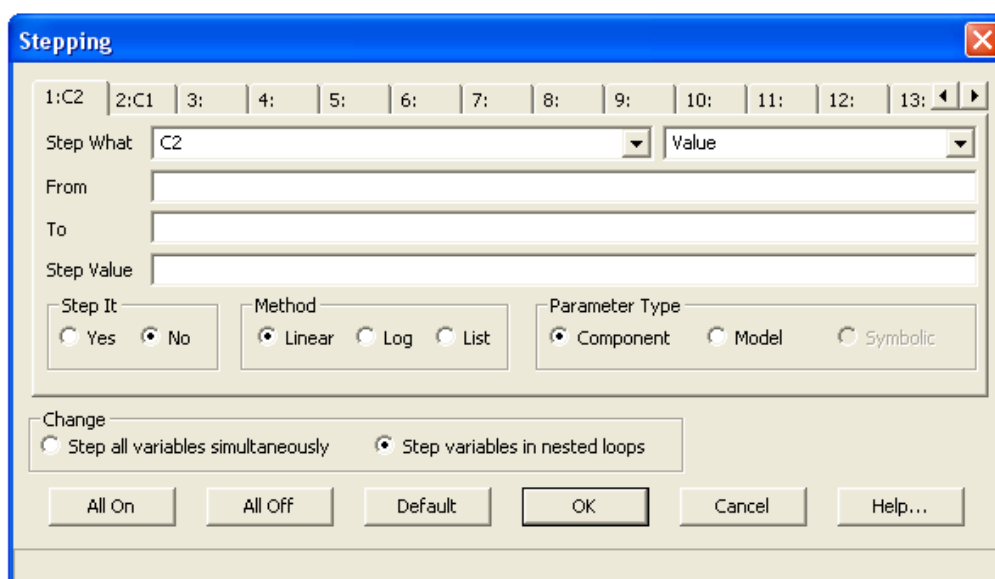


Рисунок 2 - Варьирование параметров компонентов и их моделей

Если выбран тип Symbolic, то становится доступен следующий список параметров:

- From – начальное значение параметра. При выборе логарифмической шкалы оно должно быть больше нуля.
- To – конечное значение параметра. При выборе логарифмической шкалы оно должно быть больше нуля.
- Step Value – величина шага параметра. При линейной шкале оно прибавляется к начальному значению, а при логарифмической шкале умножается на текущее значение параметра.

- Step It – включение режима вариации параметров (Yes) или его выключение (No).

- Method – характер параметра:

Linear – линейная шкала;

Log – логарифмическая шкала;

List - список значений.

Одновременно в окне отображаются две переменные, их номера даны в верхней части окна (Parameter 1 и Parameter 2 в нашем случае). Нажав на кнопку «>>» Вы перемещаетесь к следующим двум переменным.

Числовые параметры:

- Time Range – задается начальное и конечное время моделирования переходных процессов, причем сначала указывается максимальное время, а затем, через запятую, конечное время, например «1.2ms, 0.4ms», задает интервал моделирования от 0.4 мс до 1.2 мс;

- Maximum Time Step – максимальный шаг интегрирования;

- Number of Points – количество точек, выводимых в таблицы, т.е. количество строк в таблице вывода результатов; по умолчанию принимается 51, минимальное значение 6;

- Temperature – диапазон изменения температуры, причем сначала указывается наибольшее значение, затем наименьшее, а затем шаг, значения разделяются запятой.

Опции:

- Run Options – управление выдачей результатов расчетов:

- Normal – результаты расчетов не сохраняются;

- Save – сохраняются результаты расчетов в бинарном дисковом файле;

- Retrieve – считывание последних результатов расчета, при этом производится построение графиков и таблиц переходных процессов, как после обычного расчета.

- State Variables – установка начальных условий:

- Zero – установка нулевых начальных условий для потенциалов всех аналоговых узлов и токов через индуктивности и неопределенных логических состояний «X» для цифровых узлов;

- Read – чтение начальных условий из бинарного дискового файла;

- Leave – установка в качестве начальных условий значений, полученных при окончании расчета предыдущего варианта. При расчете первого варианта они полагаются нулевыми;

- Operation Point – включение режима расчета по постоянному току перед началом каждого расчета переходных процессов. Данные этого режима заменяют значения всех начальных условий, если они были установлены;

- Operation Point Only – расчет только режима по постоянному току (расчет переходных процессов не производится);

- Auto Scale Ranges – присвоение признака автоматического масштабирования по осям X, Y.

Выражения:

- X Expression – имя переменной, откладываемой по оси X. Наиболее часто используются T (время), F (частота), $V(A)$ (потенциал узла A), $I(A)$ (ток в узле A), $D(A)$ (логическое состояние узла A).

- Y Expression – математическое выражение для переменной, откладываемой по оси Y;

- X Range – максимальное и минимальное значение переменной Y. Есть возможность указать Auto для автоматического определения значений;

– Y Range – максимальное и минимальное значение переменной X . Есть возможность указать Auto для автоматического определения значений;

5.2.2 Расчет частотных характеристик (AC Analysis)

В режиме AC сначала рассчитывается режим по постоянному току, затем линейризуются все нелинейные компоненты (пассивные компоненты с нелинейными параметрами, диоды, транзисторы, нелинейные управляемые источники) и выполняется расчет комплексных амплитуд узловых потенциалов и токов ветвей. При линейризации цифровые компоненты заменяются их входными и выходными комплексными сопротивлениями, передача сигналов через них не рассматривается.

К входу схемы должен быть подключен источник синусоидального SIN или импульсного сигнала PULSE или сигнала USER, форма которого задается пользователем.

В окне задание параметров расчета частотных характеристик, имеются разделы сходные с разделами при построении переходных характеристик.

5.2.3 Расчет передаточных функций по постоянному току (DC Analysis Limits)

В режиме DC рассчитываются передаточные характеристики по постоянному току. К входам цепи подключаются один или два независимых источников постоянного напряжения или тока. В качестве выходного сигнала может рассматриваться разность узловых потенциалов или ток через ветвь, в которую включен резистор. При расчете режима DC программа закорачивает индуктивности, исключает конденсаторы и затем рассчитывает

режим по постоянному току при нескольких значениях входных сигналов.

Задание параметров моделирования DC Analysis Limits

В окне задания параметров расчета передаточных характеристик по постоянному току, показанном на рисунке 3, имеются следующие разделы.

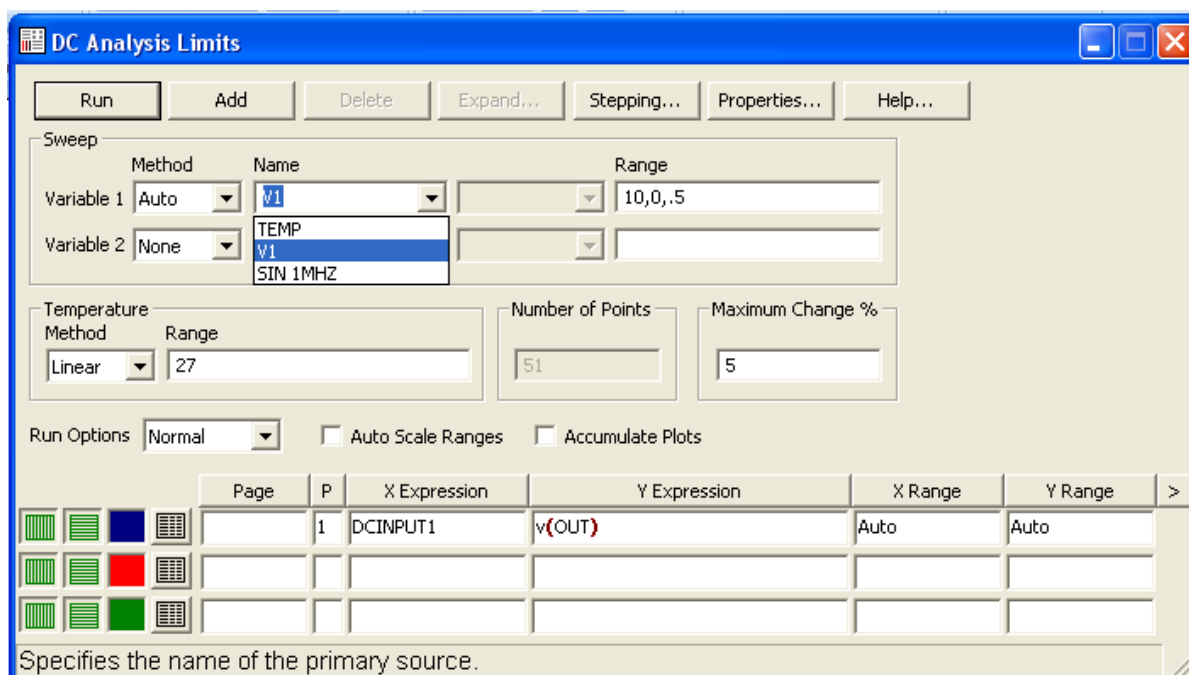



Рисунок 3 - Задание параметров расчета в режиме DC

Команды: аналогичны командам анализа переходных процессов (Transient Analysis).

Числовые параметры:

– Variable 1 – задание первой варьируемой переменной. В графе выбирается метод варьирования переменной (*Auto* - выбираемый автоматически; *Linear* - линейный, задаваемый в графе по формату Final[,Initial[,Step]], если опустить параметр Step (шаг), то шаг будет принят равным (Final-Initial)/50, если опустить параметр

Initial, то начальное значение будет положено равным нулю, если изменяется только один источник, то можно оставить строку пустой; *Log* - логарифмический; *List* - в виде списка значений, разделяемых запятыми). В графе из списка, открываемого нажатием на кнопку , выбирается имя варьируемой переменной – величины источника постоянного напряжения или тока, температуры или имени одного из компонентов, имеющих математические модели; при выборе в графе имени такого компонента в расположенном справа окне выбирается варьируемый параметр его математической модели.

– *Number of Points* – количество точек, выводимых в таблицы, т. е. количество строк в таблице вывода результатов, минимальное значение равно 5.

– *Temperature* – диапазон изменения температуры, сначала указывается наибольшее значение, затем наименьшее, а затем шаг, значения разделяются запятой.

– *Maximum change, %* - максимально допустимое приращение графика первой функции на одном шаге (в процентах от полной шкалы). Если график функции изменяется быстрее, то шаг приращения первой переменной автоматически уменьшается.

Опции и вывод результатов моделирования аналогичны анализу переходных процессов (*Transient Analysis*).

5.2.4 Статистический анализ по методу Монте-Карло

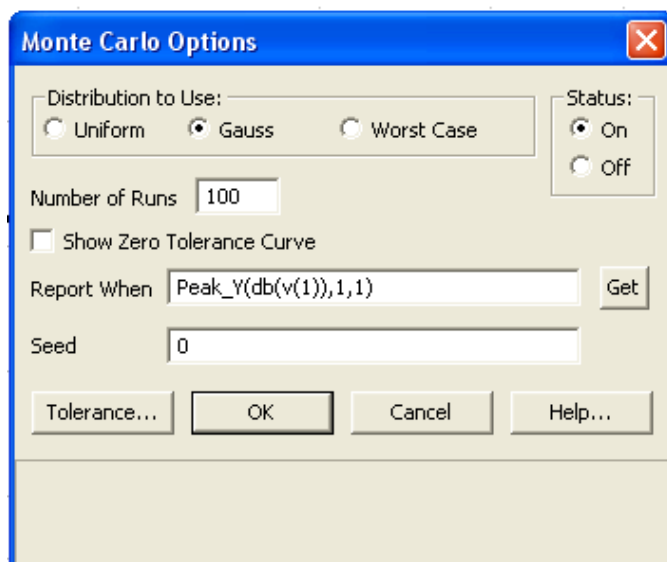
При выборе режимов моделирования *Transient Analysis*, АС или DC становится доступен анализ *Monte Carlo* для расчета характеристик цепей при случайном разбросе параметров:

Options – установка параметров метода Монте-Карло (рисунок 4);

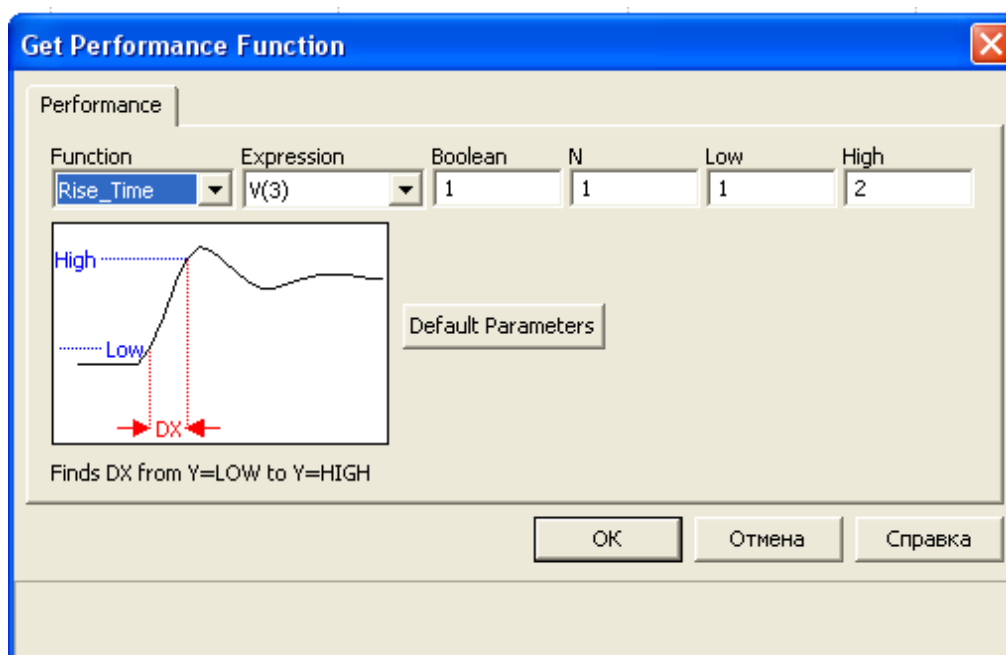
Add Histogram – добавление окна гистограмм (доступно после проведения моделирования);

Delete Histogram – удаление окна гистограмм (доступно после проведения моделирования);

Statistics – статистическая обработка результатов (доступно после проведения моделирования).



а)



б)

Рисунок 4 - Диалоговое окно Monte Carlo Options (а) и окно задания функций (б)

В диалоговом окне Monte Carlo Options (рисунок 4), открываемом по команде Monte Carlo>Options, указывается количество статистических испытаний Number of Runs (не более

30000) и характер закона распределения случайных параметров: Uniform равномерное распределение, Gauss – гауссово, Worst Case – наихудший случай.

В окне Global Settings задается отношение разброса случайных параметров к среднеквадратическому отклонению SD. На строке Report When указывается условие, при выполнении которого выводится предупреждающее сообщение в текстовый файл результатов моделирования, имеющий расширение имени *.OUT. Имя указываемой на этой строке функции может быть выбрано в списке доступных функций (рисунок 4), открываемом нажатием на клавишу Function. Перед выполнением расчета по методу Монте-Карло следует поставить переключатель Status в положение On.

Выделение параметров, имеющих случайный разброс, выполняется с помощью ключевых слов LOT и/или DEV, как показано на изображенной, на рисунке 5 схеме.

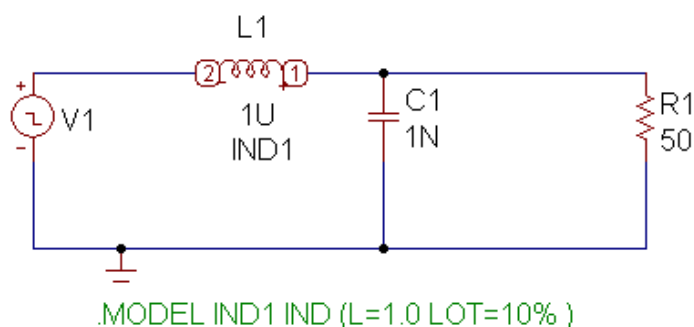


Рисунок 5 - Включение в директиву .MODEL значений разброса параметров DEV и LOT

Для расчета разброса значений параметров, имеющих разброс LOT и DEV, используются различные датчики случайных чисел. В свою очередь параметры, имеющие признак DEV, получают независимые случайные значения, а имеющие признак LOT – коррелированные случайные значения в пределах параметров одного элемента. Ключевые слова LOT и DEV помещаются после номинального значения параметра и имеют формат:

[LOT = <разброс> [%]][DEV=<разброс> [%]]

Указывается либо абсолютное, либо относительное значение разброса в процентах (в последнем случае надо ввести знак %).

Разброс параметров компонентов указывается в директиве .MODEL с помощью ключевых слов LOT и DEV (рисунке 5), например:

```
.MODEL PULSE PUL (VZERO=0 VONE=5 P1=100N P2=110N  
P3=500N P4=510N P5=1000N)
```

```
.MODEL IND1 IND (L=1.0 LOT=10% )
```

```
.MODEL CAP2 CAP (C=1.0 LOT=10% )
```

В последнем примере параметр BF имеет некоррелированный разброс 20 % и, кроме того, разброс 5 %, коррелированный с изменением параметров IS.

Допустим, что в режиме Transient Analysis, AC или DC анализируется некоторая функция цепи $y=f(x)$, где x – независимая переменная (время, частота, входное постоянное напряжение или ток), y – зависимая переменная (узловой потенциал, входное сопротивление и т.п.). Для каждой реализации процесса $y(x)$ рассчитывается глобальная характеристика F (the collaction function), например максимальное значение реализации $F=\max\{y(x)\}$. Название характеристики F вводится на строке Report When или выбирается из окна Functions (рисунок 4, б), открываемого нажатием на клавишу Get (рисунок 4, а).

После установки параметров начинают моделирование выбором пункта Run в меню моделирования выбранного типа или нажатием F2. Реализации характеристик цепи $y(x)$ выводятся на экран дисплея в виде семейства графиков, как в качестве примера показано на рисунке 6 при расчете частотных характеристик.

Статистическая обработка результатов моделирования производится по команде Monte Carlo> Histograms/ Add

Histograms. Ее результаты представляются в виде гистограммы, примерный вид которой показан на рисунке 7.

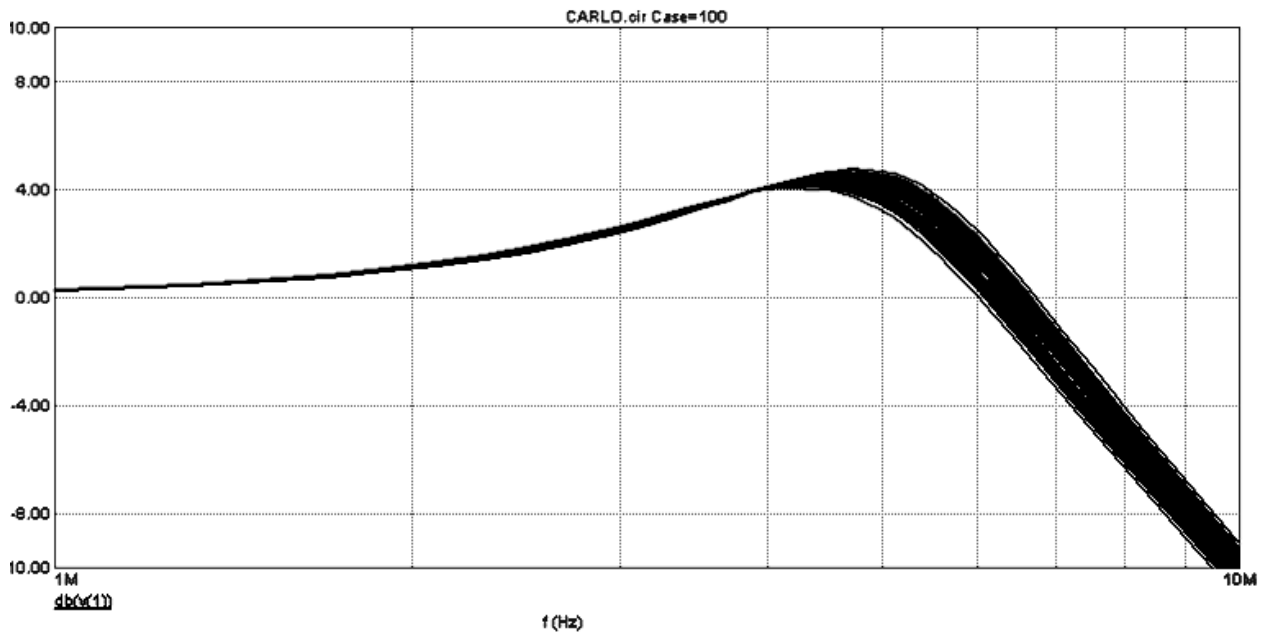


Рисунок 6 - Семейство реализаций переходного процесса при случайном разбросе индуктивности

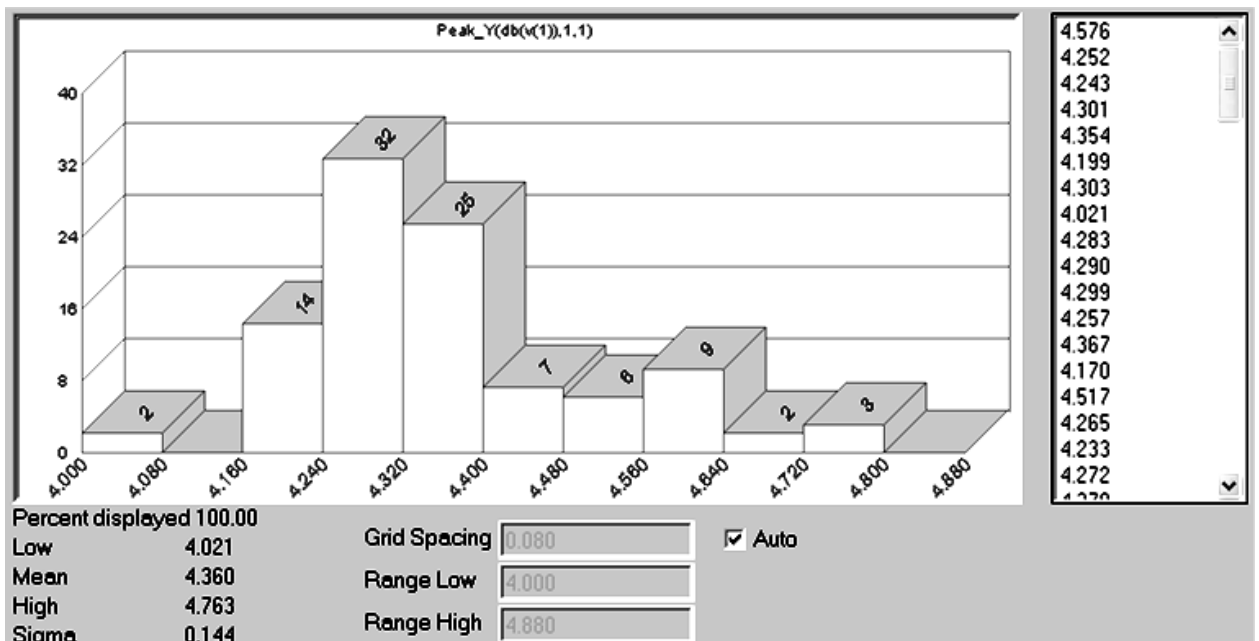


Рисунок 7 - Окно построения гистограмм

В начале выполнения команды Add Histograms, открывается диалоговое окно задания параметров Properties (закладка Plot),

рисунок 8. В нем в строке Function указывается имя анализируемой функции F , а в строке Expression – имя характеристики цепи y .

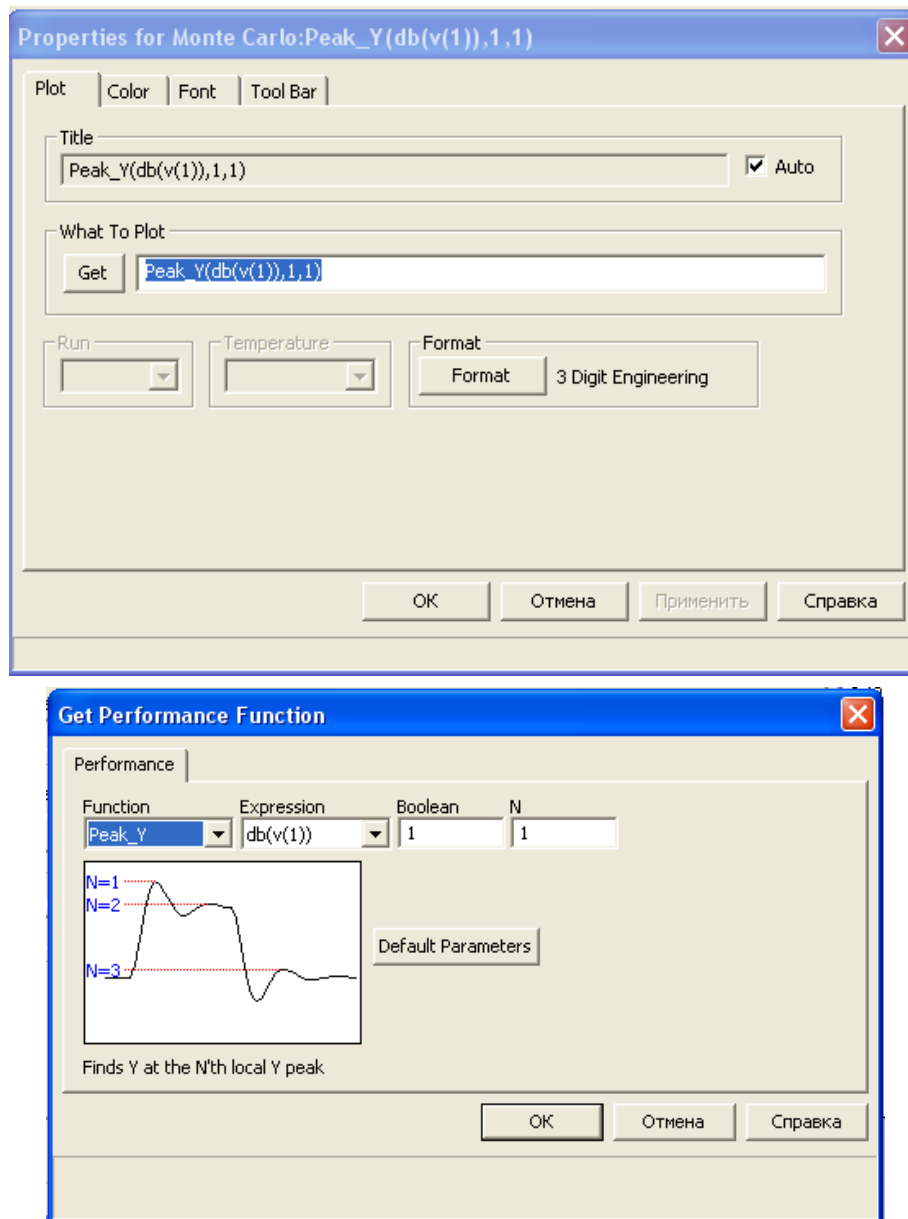


Рисунок 8 - Окно конфигурирования гистограмм

На графике гистограммы по горизонтальной оси откладываются значения характеристик F , по вертикали – вероятности в процентах.

Значение характеристики F во всех реализациях выведены в окне в правой части экрана. Ниже него приведено окно, в котором

можно задать количество интервалов разбиения области определения анализируемой характеристики F (Intervals) и значения ее границ (Low, High).

Результаты статистической обработки заносятся также в текстовый файл после выбора подкоманды Monte Carlo> Histograms/ Add Histograms. Текстовая информация размещается в файлах, имеющих то же имя, что и имя схемы, и расширения имени .AMC, .DMC, .TMC в зависимости от вида анализа. В них помещаются результаты статистической обработки, как показано на рисунке 9.

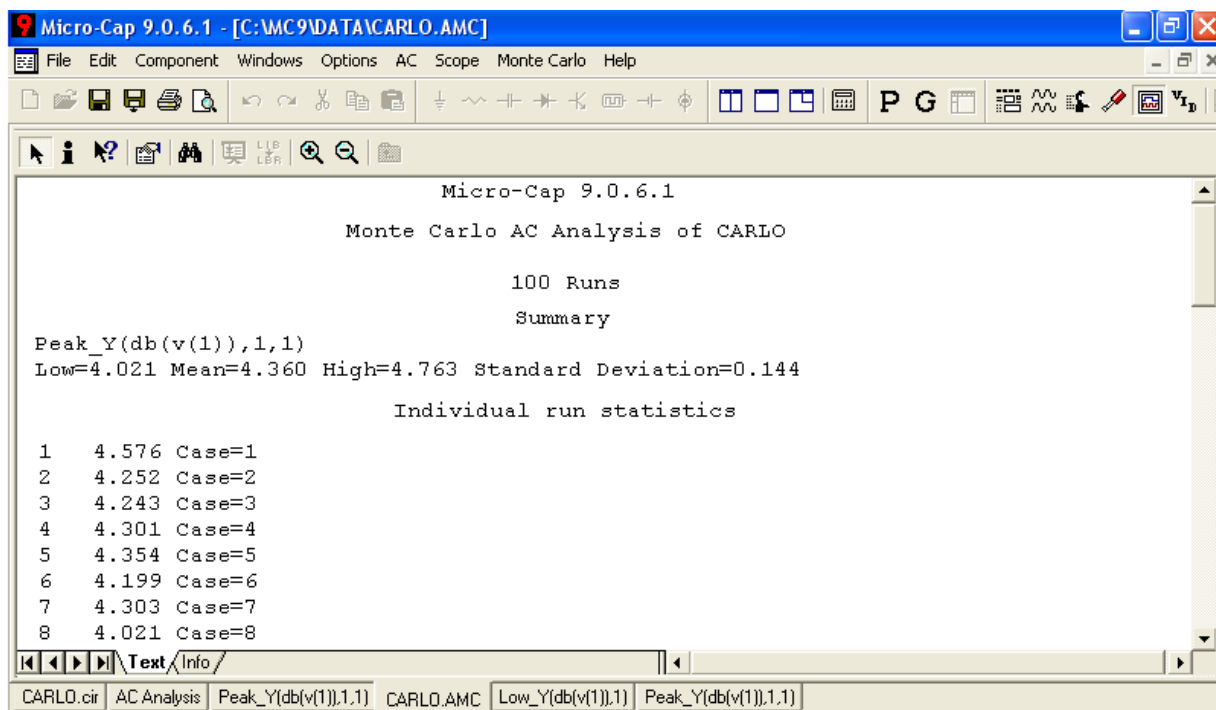


Рисунок 9 - Вывод результатов статистической обработки
в текстовом виде

5.2.5 Расчет чувствительностей по постоянному току (Sensitivity)

Чувствительность режима по постоянному току рассчитывается по команде Analysis>Sensitivity. Чувствительность рассчитывается после линеаризации схемы в окрестности рабочей

точки. При этом рассчитывается чувствительность одной или нескольких выходных переменных к изменению выбранных параметров схемы. Диалоговое окно команды показано на рисунке 10.

В графе Output указывается одно или несколько выражений для выходных переменных, каждое выражение на отдельной строке, например I(R1). В окне Input Variable выбирается один входной параметр, например R1 (несколько параметров здесь выбрать не разрешается).

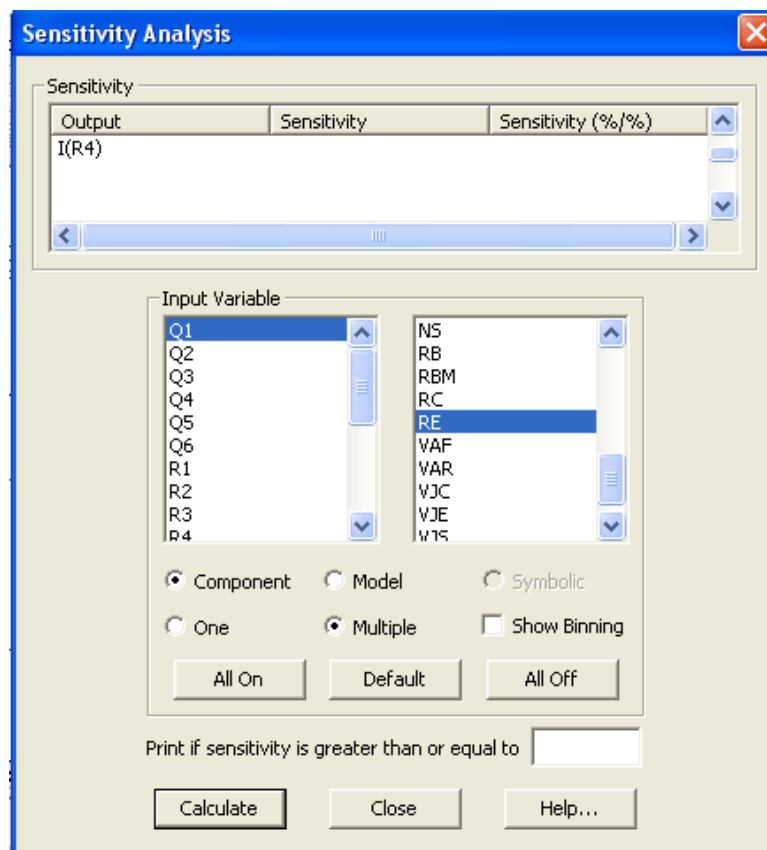


Рисунок 10 - Диалоговое окно Sensitivity

Результаты расчета чувствительности после нажатия на панель Calculate помещаются в графу Sensitivity. В графе Sensitivity %/% помещаются значение приращения выходной переменной в процентах, разделенное на изменение входного параметра в

процентах. Тип входных переменных выбирается с помощью кнопок Component, Model и Symbolic. При выборе переменной типа Model можно в качестве входных выбрать несколько параметров математической модели указанного компонента (все параметры выбираются нажатием на кнопку All On, при этом результаты расчета чувствительностей заносятся в текстовый файл с расширением имени *.sen, как показано на рисунке 11).

Name	Value	Sensitivity	Sensitivity (%/%)
Q1.BF	250	0.0415935	1.99036
Q1.BR	1	-4.70155e-005	-8.99926e-006
Q1.EG	1.11	0	0
Q1.IS	1e-016	1.56172e+017	2.9893
Q1.MJC	0.33	0	0
Q1.MJE	0.33	0	0
Q1.NC	2	0	0
Q1.NE	1.5	0	0
Q1.NF	1	-408.72	-78.2333
Q1.NK	0.5	0	0
Q1.NR	1	1.50067e-008	2.87243e-009
Q1.NS	1	0	0
Q1.VJC	0.75	0	0
Q1.VJE	0.75	0	0
Q1.VJS	0.75	0	0
R1.Value	10000	0.00263545	5.04453
Q3.BF	250	-0.0415896	-1.99017
Q3.BR	1	4.7026e-005	9.00126e-006

Рисунок 11 - Вывод результатов расчета чувствительностей
в текстовом виде

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А 1 - Диоды

Прямая ветвь вольтамперной характеристики	
Входные данные	Таблица значений I_f , V_f
Оцениваемые параметры	I_S , N , R_S
Уравнения	$V_f = V_T \cdot \ln(I_f / I_S) + I_f \cdot R_S$
Комментарии	Данные для малых токов диода I_f определяют значения параметров I_S , N , больших токов - сопротивление R_S
Барьерная емкость перехода	
Входные данные	Таблица значений C_j , V_r
Оцениваемые параметры	C_{j0} , M , V_J , F_C
Уравнения	$C_j = C_{j0} / (1 + V_r / V_J)^M$
Комментарии	Напряжение обратного смещения V_r всегда положительно. Параметры E_G , X_T назначаются по умолчанию
Обратная ветвь вольтамперной характеристики	
Входные данные	Таблица значений I_{rev} , V_{rev}
Оцениваемые параметры	R_L
Уравнения	$I_{rev} = V_{rev} / R_L$
Комментарии	Сопротивление R_L моделирует утечку закрытого диода, напряжение пробоя V_V устанавливается по умолчанию (оно редактируется пользователем) и участок пробоя на графиках не отображается
Рассасывание носителей заряда	
Входные данные	Таблица значений T_{rr} , I_r / I_f
Оцениваемые параметры	T_T
Уравнения	$T_{rr} = T_T \cdot \log(1 + I_r / I_f)$
Комментарии	Среднее время пролета T_T оценивается на основе зависимости времени рассасывания T_{rr} от отношения обратного и прямого тока I_r / I_f , при котором оно измерялось

Таблица А 2 - Биполярные транзисторы

Напряжение на переходе база-эмиттер в режиме насыщения	
Входные данные	Таблица значений V_{be} , I_c
Оцениваемые параметры	I_S , N_F , R_E
Уравнения	$V_{be} = V_T * N_F * \ln(I_c / I_S) + I_c * R_E$
Комментарии	Рассчитывается зависимость напряжения насыщения V_{be} от тока коллектора I_c . Параметры E_G , $X_T I$ назначаются по умолчанию
Выходная проводимость	
Входные данные	Таблица зависимости выходной проводимости H_{oe} от тока коллектора I_c
Оцениваемые параметры	Напряжение смещения V_{ce}
Уравнения	V_{AF}
Комментарии	$H_{oe} = I_C / (V_{AF} + V_{ce} - 0,7)$
Статический коэффициент передачи по току	
Входные данные	Таблица зависимости статического коэффициента усиления тока в схеме ОЭ β_{st} от тока коллектора I_c
Условия	Напряжение смещения V_{ce}
Оцениваемые параметры	N_E , I_{SE} , β_F , I_{KF}
Уравнения	Табличная зависимость $\beta_{st} = f(I_c)$
Напряжение насыщения коллектор-эмиттер	
Входные данные	Таблица зависимости напряжения насыщения коллектор-эмиттер V_{ce} от тока коллектора I_c
Условия	Отношение I_c / I_b
Оцениваемые параметры	N_C , I_{SC} , β_R , I_{KR} , R_C
Уравнения	$V_{ce} = f(I_c) + I_c (R_C + R_E)$
Барьерная емкость перехода коллектор-база	
Входные данные	Таблица значений C_{ob} , V_{cb}
Оцениваемые параметры	C_{JC} , M_{JC} , V_{JC} , F_C
Уравнения	$C_{ob} = C_{JC} / (1 + V_{cb} / V_J)^{M_{JC}}$

Продолжение таблицы А 2

Комментарии	Напряжение обратного смещения V_{cb} всегда положительно
Барьерная емкость перехода эмиттер-база	
Входные данные	Таблица значений C_{ib} , V_{eb}
Оцениваемые параметры	C_{JE} , M_{JE} , V_{JE}
Уравнения	$C_{ib} = C_{JE} / (1 + V_{eb} / V_J)^{M_{JE}}$
Комментарии	Напряжение обратного смещения V_{eb} всегда положительно
Время рассасывания заряда	
Входные данные	Таблица зависимости времени рассасывания T_s от тока коллектора I_c
Условия	Отношение токов I_s / I_b
Оцениваемые параметры	T_R
Уравнения	$A_r = b_r / (1 + b_r)$, $a_f = b_f / (1 + b_f)$, $k_1 = (1 - a_f * a_r) / a_r$, $k_2 = (a_f / a_r) * T_F$, $T_s = ((T_R + k_2) / k_1) * \ln(2 / ((I_c / I_b) / b_f + 1))$
Комментарии	Среднее время пролета T_R оценивается на основе зависимости времени рассасывания T_s от тока коллектора I_c
Площадь усиления	
Входные данные	Зависимость граничной частоты коэффициента передачи тока F_t в схеме с ОЭ от тока коллектора I_c
Условия	V_{ce}
Оцениваемые параметры	T_F , I_{TF} , X_{TF} , V_{TF}
Уравнения	$V_{be} = V_T * N * \ln(I_c / I_{SS})$, $V_{bc} = V_{be} - V_{ce}$, $a_{tf} = 1 + X_{TF} * (I_c / (I_c + I_{TF}))^2 e^{(V_{bc} / (1,44 * V_{TF}))}$, $t_f = T_F (a_{tf} + 2(a_{tf} - 1) * I_{TF} / (I_c + I_{TF})) + V_T * N (a_{tf} - 1) / (1,44 * V_{TF})$, $f_a = (1 - V_{cb} / V_{AF})(1 - V_{bc} / V_{AF})$, $F_t = 1 / (2 * \pi * (t_f / f_a + V_T * N (C_{je} + C_{jc} (1 + I_c * RC / (V_T * N)))) / I_c)$

Список литературы

- 1 Авдеев Е.В. Системы автоматизированного проектирования по радиоэлектронике: Справочник. / Е.В. Авдеев, А.Т. Ермин, И.П. Норенков. М.: Радио и связь, 1994. 324 с.
- 2 Зайцев А.А. Полупроводниковые приборы. Транзисторы средней и большой мощности: Справочник / А.А. Зайцев, А.И. Миркин, В.В. Моряков. М.: Радио и связь, 1997. 642 с.
- 3 Новикова Е.И. «Лабораторный практикум по курсу «Основы САПР»: учеб. пособие / Е.И. Новикова, О.В. Родионов, Е.Н. Коровин. Воронеж: ВГТУ, 2005. 176 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1 Цель курсового проекта	1
2 Особенности выполнения курсового проекта	1
3 Задание на курсовой проект	1
4 Указания по выполнению курсового проекта	2
5 Теоретические сведения	3
5.1 Расчет параметров математической модели аналоговых компонентов с помощью программы MODEL	3
5.2 Выполнение моделирования электрической схемы	4
5.2.1 Анализ переходных процессов (Transient Analysis)	5
5.2.2 Расчет частотных характеристик (AC Analysis)	8
5.2.3 Расчет передаточных функций по постоянному току (DC Analysis Limits)	8
5.2.4 Статистический анализ по методу Монте-Карло	10
5.2.5 Расчет чувствительностей по постоянному току (Sensitivity)	16
ПРИЛОЖЕНИЕ А	19
Список литературы	22

Подписано в печать 16.11.2011

Формат 60x84/16. Бумага для множительных аппаратов.

Усл. печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,3. Тираж 29 экз. «С» 132.

Зак. №