

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра теоретических основ электротехники

***ОСНОВЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ***

Методические указания  
к выполнению контрольных работ  
для студентов специальности 1-53 01 07  
заочной формы обучения

Минск БГУИР 2011

УДК 621.3(076)  
ББК 31.21я73  
О-75

С о с т а в и т е л и:  
Л. Ю. Шилин, А. А. Дерюшев, В. Б. Беляков

О-75 **Основы** автоматизированного проектирования электромеханических систем : метод. указания к выполнению контр. работ для студ. спец. 1-53 01 07 заоч. формы обуч. / сост. В. Б. Беляков, А. А. Дерюшев, Л. Ю. Шилин. – Минск : БГУИР, 2011. – 79 с. : ил.  
ISBN 978-985-488-625-1.

Представлены варианты контрольных работ, методические рекомендации, примеры программной реализации типового задания, описание пакета прикладных программ Orcad и задания для лабораторных работ.

**УДК 621.3(076)**  
**ББК 31.21я73**

**ISBN 978-985-488-625-1**

© Шилин Л. Ю., Дерюшев А. А.,  
Беляков В. Б., составление, 2011  
© УО «Белорусский государственный  
университет информатики  
и радиоэлектроники», 2011

# 1. Исследование электрических фильтров типа «к»

Целью контрольной работы является экспериментальное исследование частотных характеристик реактивных электрических фильтров типа «к» нижних и верхних частот.

## Основные теоретические положения

Электрическим фильтром называется линейный четырехполюсник, предназначенный для выделения из состава сложного электрического сигнала, подведенного к его входным зажимам, частотных составляющих, расположенных в заданной полосе частот, и подавления тех составляющих, которые расположены в других, также заданных полосах частот. Они обладают малым и приблизительно постоянным затуханием в полосе частот, называемой полосой прозрачности (полосой пропускания), и достаточно большим затуханием вне этой полосы. Частотная область затухания называется полосой заграждения (полосой задерживания). Частота, разделяющая эти полосы, называется частотой среза.

Приведем классификацию фильтров по взаимному расположению полос пропускания и задерживания. На рис. 1.1 приведены идеальные АЧХ фильтров низких частот (ФНЧ), фильтров верхних частот (ФВЧ), полосовых фильтров (ПФ) и полосно-заграждающих (режекторных) фильтров (ПЗФ).

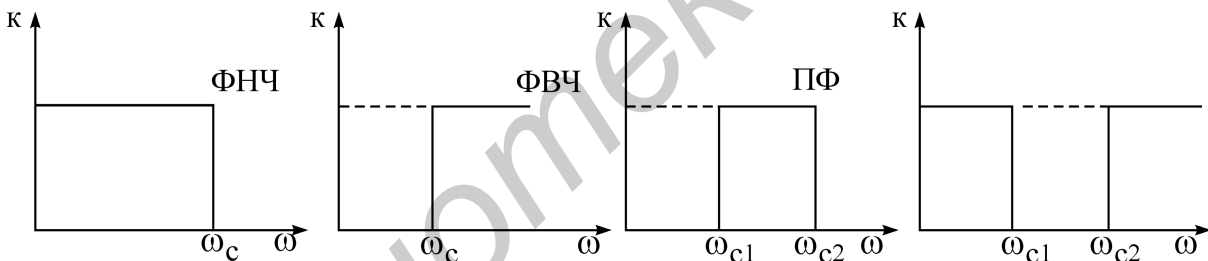


Рис. 1.1

Рассмотрим основное соотношение теории фильтров. Пусть Т- или П-образные звенья фильтра (рис. 1.2) содержат только реактивное сопротивление.

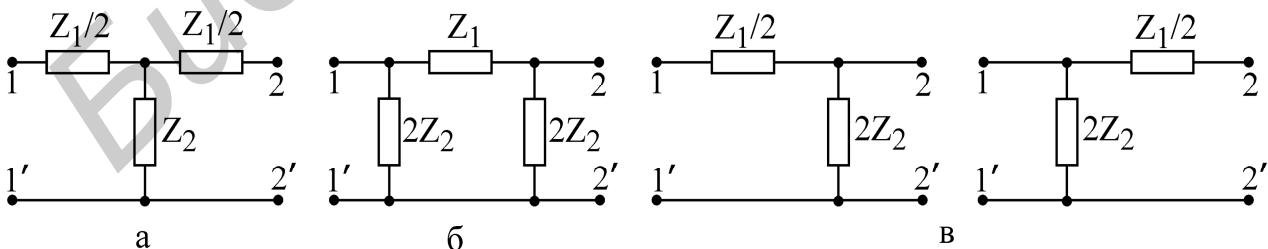


Рис. 1.2

Тогда величина

$$ch g = 1 + Z_1/2Z_2 = A_{11} \quad (1.1)$$

является вещественной. Учитывая, что  $g = a + jb$ , получаем

$$ch g = ch(a + jb) = cha ch jb + sh a sh jb = cha \cos b + jsha \sin b.$$

Отсюда

$$cha \cos b = A_{11},$$

$$sha \sin b = 0.$$

Последнее равенство удовлетворяется при  $a = 0$  или при  $b = 0$ . При этом если  $a = 0$ , то  $cha = 1$ , поэтому  $\cos b = A_{11}$ . Это выполняется только при  $|A_{11}| \leq 1$ .

Следовательно, реактивный фильтр пропускает сигналы без затухания, если

$$-1 < Z_1/4Z_2 < 0. \quad (1.2)$$

Это неравенство является основным соотношением теории фильтров. Оно позволяет определить полосу пропускания фильтра.

За пределами полосы пропускания  $b = 0$ ,  $\cos b = 1$ , т. е.

$$cha = 1 + Z_1/2Z_2. \quad (1.3)$$

Выражение (1.3) позволяет определить затухание в полосе не пропускания.

### Фильтры типа «к»

Если в звеньях фильтра  $Z_1$  и  $Z_2$  являются реактивными сопротивлениями противоположного характера ( $Z_1 = \pm jX_1$ ,  $Z_2 = \mp jX_2$ ), то их произведение

$$Z_1 Z_2 = k^2 \quad (1.4)$$

является постоянной величиной и не зависит от частоты. Такие фильтры называются фильтрами типа «к».

### Фильтр нижних частот

Фильтр нижних частот пропускает без затухания ( $a = 0$ ) угловые частоты от  $\omega = 0$  до  $\omega_c = 2/\sqrt{LC}$ .

T- и П-образные звенья фильтров нижних частот приведены на рис. 1.3 а, б.

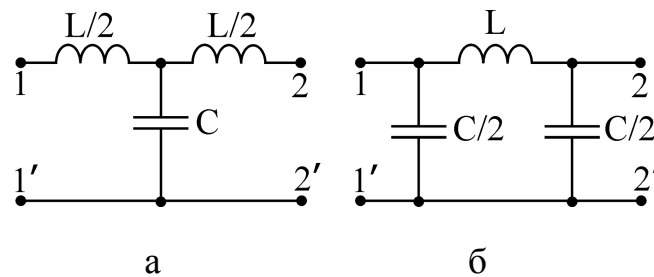


Рис. 1.3

Основными качественными показателями фильтра являются его частотные характеристики:  $a = f_1(\omega)$ ,  $b = f_2(\omega)$ ,  $Z_{ct}(\omega)$  и  $Z_{сн}(\omega)$ .

В полосе пропускания ФНЧ ( $\omega < \omega_c$ ) затухание сигнала равно нулю ( $a = 0$ ), а коэффициент фазы определяется из уравнений (1.1) и (1.2):

$$\sin \frac{b}{2} = \sqrt{\frac{X_1}{4X_2}} = \frac{\omega}{\omega_c} \quad (1.5)$$

В полосе заграждения ( $\omega > \omega_c$ ) коэффициент затухания определяется соотношением

$$\operatorname{ch} \frac{a}{2} = \sqrt{\frac{X_1}{4X_2}} = \frac{\omega}{\omega_c}, \quad (1.6)$$

а коэффициент фазы  $b = \pi$ .

На рис. 1.4 приведены частотные характеристики для ФНЧ.

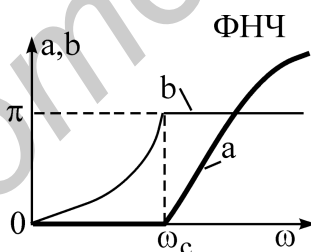


Рис. 1.4

Зависимость от частоты характеристического сопротивления фильтра можно определить из выражений для характеристических сопротивлений четырех-полюсника:

для T-образного звена

$$Z_{ct} = \sqrt{Z_1 Z_2 (1 + Z_1 / 4Z_2)}; \quad (1.7)$$

для П-образного звена

$$Z_{\text{сп}} = \sqrt{Z_1 Z_2 \frac{1}{(1 + Z_1/4Z_2)}}. \quad (1.8)$$

Для ФНЧ эти выражения с учетом значений  $Z_1$  и  $Z_2$  приобретают вид

$$Z_{\text{сп}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \sqrt{1 - \frac{\omega^2}{\omega_c^2}}; \quad Z_{\text{сп}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \left( \sqrt{1 - \frac{\omega^2}{\omega_c^2}} \right)^{-1}. \quad (1.9)$$

Зависимость характеристического сопротивления ФНЧ от частоты показана на рис. 1.5.

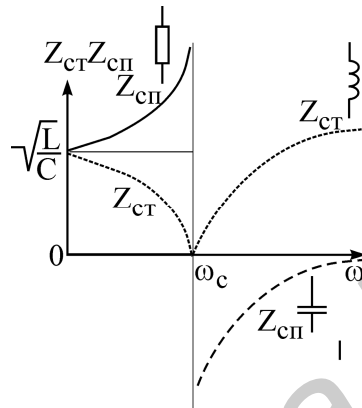


Рис. 1.5

### Фильтр верхних частот

Фильтр верхних частот пропускает без затухания ( $a = 0$ ) угловые частоты:

$$\text{от } \omega_c = \frac{1}{2\sqrt{LC}} \text{ до } \omega = \infty.$$

Схемы Т-образного и П-образного звеньев ФВЧ приведены соответственно на рис. 1.6, а и 1.6, б.

В полосе заграждения ФВЧ ( $\omega < \omega_c$ ) коэффициент фазы постоянен и равен  $-\pi$ . Затухание определяется следующим выражением:

$$ch \frac{a}{2} = \frac{\omega}{\omega_c}. \quad (1.10)$$

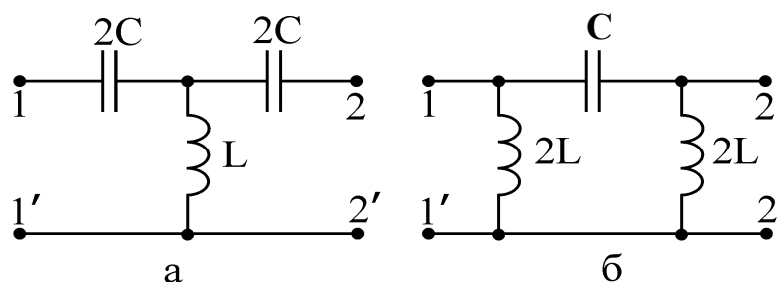


Рис. 1.6

В полосе пропускания ( $\omega > \omega_c$ ) коэффициент затухания равен нулю ( $a = 0$ ), а коэффициент фазы:

$$\cos b = 1 - \frac{1}{2\omega^2 LC} = 1 - \frac{2\omega_0^2}{\omega^2}. \quad (1.11)$$

На рис. 1.7 приведены частотные характеристики  $a(\omega)$  и  $b(\omega)$  для ФВЧ.

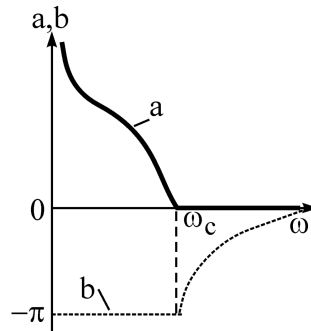


Рис. 1.7

Характеристические сопротивления  $Z_{ст}$  и  $Z_{сп}$  для ФВЧ определяются: для Т-образного звена

$$Z_{ст} = \sqrt{\frac{L}{C}} \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2}; \quad (1.12)$$

для П-образного звена

$$Z_{сп} = \sqrt{\frac{L}{C}} \left( \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2} \right)^{-1}. \quad (1.13)$$

Зависимость характеристического сопротивления от частоты ФВЧ показана на рис. 1.8.

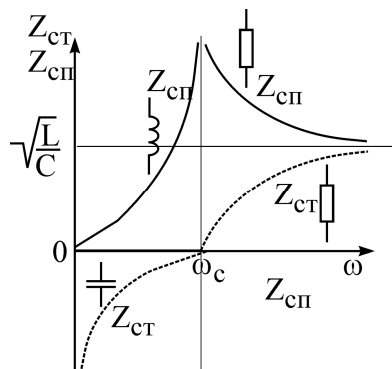


Рис. 1.8

## Влияние числа звеньев на их характеристики

Для упрощения анализа фильтров предполагается, что активные потери элементов фильтра равны нулю, поэтому в полосе пропускания коэффициент затухания также строго равняется нулю, даже при каскадном включении нескольких звеньев. В полосе затухания коэффициент затухания  $a$  и коэффициент фазы  $b$  растут пропорционально числу звеньев:  $a_n$ ,  $b_n$ . Графически это выражается в росте крутизны кривой зависимости затухания от числа звеньев в цепи (рис. 1.9).

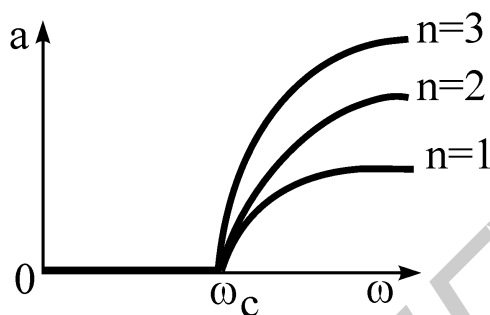


Рис. 1.9

В реальных цепях наиболее ощутимо увеличение затухания при  $n = 2-5$ . С дальнейшим ростом  $n$  крутизна затухания растет медленно.

## Согласованное включение фильтров

Избирательные свойства фильтра лучшим образом проявляются при согласовании его с генератором и нагрузкой, т. е. при условии согласования фильтра:

$$Z_{\Gamma} = Z_{1c}; \quad Z_{\text{H}} = Z_{2c},$$

где  $Z_{\Gamma}$  — внутреннее сопротивление генератора;  $Z_{\text{H}}$  — сопротивление нагрузки;  $Z_{1c}$  и  $Z_{2c}$  — характеристические сопротивления фильтра.

У симметричных фильтров  $Z_{1c} = Z_{2c} = Z_c$ , поэтому коэффициенты затухания и фазы выражаются формулами

$$a = \ln \frac{U_1}{U_2}; \quad b = \psi_1 - \psi_2, \quad (1.14)$$

где  $\dot{U}_1 = U_1 e^{j\psi_1}$  — напряжение на входе фильтра;  $\dot{U}_2 = U_2 e^{j\psi_2}$  — напряжение на выходе фильтра.

Соотношение (1.14) используется для экспериментального определения коэффициентов  $a$  и  $b$ .

Очевидно, что режим согласования фильтров типа «к» весьма условен, так как сопротивления  $Z_{\text{ст}}$  и  $Z_{\text{сп}}$  являются функциями частоты, впрочем,  $Z_{\text{H}}$  и  $Z_{\Gamma}$

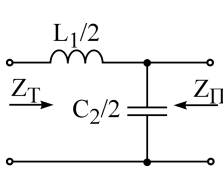
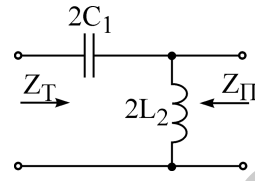
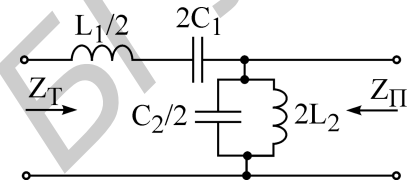


могут быть частотно зависимыми. Поэтому в частотном диапазоне условие согласования нарушается и принятая упрощённая модель фильтра не отражает существа явлений. Следствием этого становится то, что вблизи частоты среза  $\omega_c$  зависимость  $a(\omega)$  имеет отличный от расчётного характер.

### Расчёт фильтров типа «к»

Обычно для расчёта фильтра задаются частота среза  $\omega_c$  или  $f_c$  и сопротивление нагрузки  $R_H$ , необходимо определить элементы T- или П-образной схемы фильтра. В табл. 1.1 приведены схемы полувзвена и формулы параметров реактивных фильтров типа «к»: нижних частот (ФНЧ), верхних частот (ФВЧ), полосовых (ПФ).

Таблица 1.1

	ФНЧ	ФВЧ	ПФ
Схема полувзвена			
$R = \sqrt{Z_1 Z_2}$	$\sqrt{L_1/C_2}$	$\sqrt{L_2/C_1}$	$\sqrt{L_1/C_2} = \sqrt{L_2/C_1}$
Частоты среза	$f_c = \frac{1}{\pi \sqrt{L_1 C_2}}$	$f_c = \frac{1}{4\pi \sqrt{L_2 C_1}}$	$f_{1,2} = \frac{1}{2\pi} \left[ \sqrt{\frac{1}{L_1 C_2} + \frac{1}{L_1 C_1}} \mp \frac{1}{\sqrt{L_2 C_1}} \right]$
$Z_T$	$R \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}$	$\mp R \sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}$	$\mp R \sqrt{1 - \Omega^2}$
$Z_{\Pi}$	$\pm \frac{R}{\sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}}$	$\frac{R}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}$	$\pm \frac{R}{\sqrt{1 - \Omega^2}}$
Формулы для расчёта элементов фильтра	$L_1 = \frac{R}{\pi f_c}$ $C_2 = \frac{1}{\pi f_c R}$	$L_2 = \frac{R}{4\pi f_c}$ $C_1 = \frac{1}{4\pi f_c R}$	$L_1 = \frac{R}{\pi(f_2 - f_1)}$ ; $C_1 = \frac{f_2 - f_1}{4\pi f_1 f_2 R}$ $L_2 = \frac{R(f_2 - f_1)}{4\pi f_1 f_2}$ ; $C_2 = \frac{1}{\pi(f_2 - f_1)R}$

$$\text{Примечание. } \Omega = \frac{f}{f_2} \frac{f_m}{f_m}, \text{ где } f_m = \sqrt{f_1 f_2}.$$

Фильтры типа «m» (рис. 1.10 а, б) являются производными фильтров типа «k». Изменение плеч полузвена типа «k» по схеме рис. 1.10, а приводит к последовательно-производному полузвену типа «m», характеристическое сопротивление  $Z_T$  которого совпадает с сопротивлением  $Z_T$  исходного звена типа «k» – прототипа производного фильтра. Изменение плеч полузвена типа «k» по схеме рис. 1.10, в приводит к параллельно-производному полузвену типа «m», у которого характеристическое сопротивление  $Z_{\Pi}$  совпадает с соответствующим сопротивлением прототипа – исходного звена типа «k».

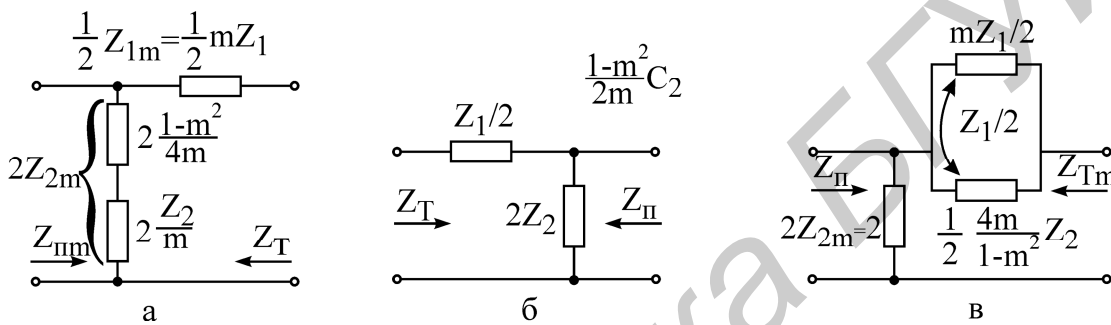


Рис.1.10

В табл. 1.2 приведены схемы полузвеньев фильтров типа «m».

Таблица 1.2

	ФНЧ	ФВЧ	ПФ
Схема последовательно-производного полузвена типа «m»			
Схема параллельно-производного полузвена типа «m»			

Фильтры типов «к» и «т» могут быть соединены каскадно на основе равенства характеристических сопротивлений при одинаковых частотах среза и номинальных характеристических сопротивлениях.

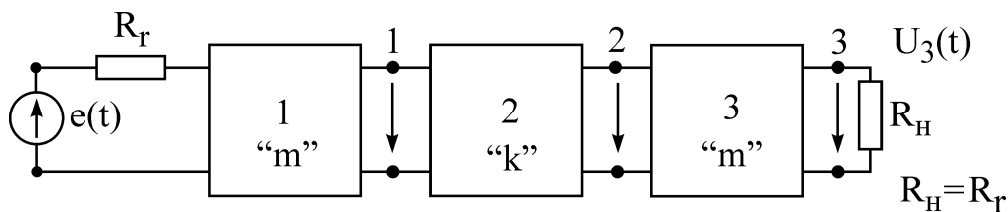


Рис. 1.11

### Домашнее задание

1. Начертить электрическую схему фильтра (рис. 1.11). Пронумеровать узлы и элементы ветвей.
2. Рассчитать элементы схемы.
3. Написать программу для расчета АЧХ фильтра в трех точках (1, 2, 3).
4. Написать программу для расчета переходного процесса в трех точках  $U_1(t)$ ,  $U_2(t)$ ,  $U_3(t)$ . На входе действует источник прямоугольных импульсов с частотой  $f_{вх}$  (меандр).
5. Расчет произвести с помощью пакета прикладных программ PSPICE.
6. Активное сопротивление всех катушек индуктивности принять равным 0,3 Ом.
7. На рис. 1.11–1 «т» и 3 «т» – Г-образные звенья фильтра типа «т» (табл. 1.2), а 2 «к» – фильтр типа «к», вид фильтра и его параметры заданы в табл. 1.3 в соответствии с номером варианта.
8. Расчет фильтров произвести по методике, указанной в учебнике: Атабеков Г. И. Теоретические основы электротехники. – М. : Энергия, 1978.

### Пример расчёта

Следует спроектировать фильтр нижних частот с частотой среза  $f_{ср} = 1000$  Гц;  $R_{н} = 200$  Ом;  $m = 0,5$ . Вид фильтра типа «к» – П-образный. Частота источника прямоугольных импульсов на входе фильтра  $f_{вх} = 800$  Гц.

Электрическая схема фильтра, согласно заданию с учетом активных сопротивлений катушек индуктивности  $r_k = 0,3$  Ом, будет иметь вид (рис. 1.12).

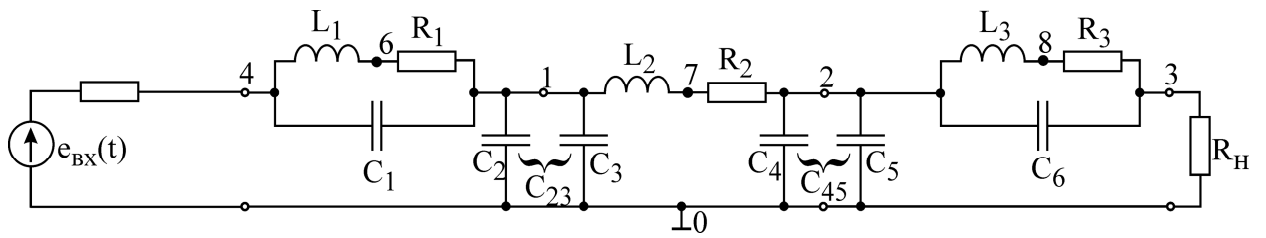


Рис. 1.12

Элементы канонической схемы фильтра типа «к» рассчитываем по формулам

$$L'_2 = L'_1 \frac{R}{\pi f_c} = \frac{200}{3,14 \cdot 1000} = 63,7 \cdot 10^{-3} \text{ Гн};$$

$$C'_2 = \frac{1}{\pi f_c R_n} = \frac{1}{3,14 \cdot 1000 \cdot 200} = 1,59 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Звено типа «т», имеющее то же характеристическое сопротивление, что и фильтр типа «к», является параллельно-производным. Его элементы рассчитываются по формулам табл. 1.2:

$$L_1 = L_3 = \frac{1}{2} m L'_1 = \frac{1}{2} 0,5 \cdot 63,7 \cdot 10^{-3} = 16 \cdot 10^{-3} \text{ Гн};$$

$$C_1 = C_6 = \frac{1-m^2}{2m} C' = \frac{1-0,25}{1} 1,59 \cdot 10^{-6} \text{ Ф};$$

$$C_2 = C_5 = \frac{1}{2} C' = 0,5 \cdot 0,5 \cdot 1,59 \cdot 10^{-6} = 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Программа расчета АЧХ фильтра и переходного процесса при подаче на вход прямоугольного импульса с помощью ППП PSPICE имеет вид:

```

FILTR NISKOY CHASTOTY
RG 5 4 200
R1 6 1 0.3
R2 7 2 0.3
R3 8 3 0.3
RN 3 0 200
L1 4 6 16 MH
L2 1 7 63.7 MH
L3 2 8 16 MH
C1 4 1 1.19 UF
C23 1 0 1.2 UF
C45 2 0 1.2 UF
C6 2 3 1.19 UF
VIN 5 0 AC 1
.AC DEC 10 1 2 KHZ
.PLOT AC V(1) V(2) V(3)
*.VIN 5 0 PULSE (0 1 0 0.625MS 1.25MS)
*.TRAN 12.5US 1.25MS
*.PLOT TRAN V(4) V(1) V(2) V(3)
.PROBE
.END

```

Таблица 1.3

№ варианта	Вид фильтра	$f_{cp}$ (Гц)	$R_{\text{Н}}$ (Ом)	$m$	Вид фильтра типа «к»	$f_{\text{вх}}$
1	НЧ	900	180	0,45	П	700
2	ВЧ	1500	220	0,6	Т	1400
3	ПФ	$f_1 = 1800, f_2 = 2200$	270	0,7	П	2000
4	НЧ	2500	300	0,8	Т	2000
5	ВЧ	3000	330	0,9	П	2900
6	ПФ	$f_1 = 3300, f_2 = 3700$	430	0,4	Т	3500
7	НЧ	4000	470	0,5	П	3500
8	ВЧ	4500	510	0,6	Т	4400
9	ПФ	$f_1 = 4800, f_2 = 5200$	560	0,7	П	5000
10	НЧ	5500	620	0,8	Т	5000
11	ВЧ	6000	680	0,9	П	5900
12	ПФ	$f_1 = 6300, f_2 = 6800$	680	0,5	Т	6500
13	НЧ	7000	620	0,6	П	6500
14	ВЧ	7500	560	0,7	Т	7400
15	ПФ	$f_1 = 7800, f_2 = 8200$	510	0,8	П	8000
16	НЧ	8500	470	0,9	Т	8000
17	ВЧ	9000	430	0,4	П	8900
18	ПФ	$f_1 = 9300, f_2 = 9700$	330	0,5	Т	9500
19	НЧ	10000	300	0,6	П	9500
20	ВЧ	10500	270	0,7	Т	10400
21	ПФ	$f_1 = 10800, f_2 = 11200$	220	0,8	П	11000
22	НЧ	11500	200	0,9	Т	11000
23	ВЧ	12000	180	0,5	П	11900
24	ПФ	$f_1 = 12300, f_2 = 12700$	160	0,6	Т	12500
25	НЧ	13000	150	0,7	П	12500

## 2. СОСТАВ ПАКЕТА ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ ORCAD

Пакет прикладных программ Orcad предназначен для автоматизации процесса проектирования электронных устройств. Он позволяет провести моделирование переходных процессов, рассчитать частотные и шумовые характеристики аналогового, цифрового или аналого-цифрового устройства, заданного принципиальной схемой, оптимизировать параметры устройства в соответствии с заданной целевой функцией, разработать печатную плату. Кроме перечисленных возможностей последняя версия пакета (Orcad 10) включает новые возможности по проектированию устройств на базе FPGA/CPLD интегральных схем; позволяет работать с программами размещения и трассировки от фирм-изготовителей кристаллов Xilinx, Altera и Actel (при предварительной установке программ).

Назначение отдельных программ, входящих в состав пакета, приведено в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Программы пакета Orcad 9.2

Название программы	Назначение
Capture CIS	Управляющая оболочка, позволяющая вводить и редактировать принципиальную схему в графическом режиме, а также вызывать остальные программы пакета
Layout Plus	Разработка печатных плат
PSpice AD	Программа моделирования аналоговых, цифровых и аналого-цифровых устройств
PSpice Model Editor	Редактирование существующих и создание новых библиотек элементов
PSpice Optimizer	Оптимизация параметров устройства для достижения наилучшего функционирования в соответствии с целевой функцией
PSpice Simulation Manager	Управление заданиями на моделирование устройства
PSpice Stimulus Editor	Редактор входных воздействий

Для выполнения нужных разработчику действий может вызываться либо непосредственно необходимая в данный момент программа (например PSpice Model Editor), либо управляющая оболочка (Capture CIS) с последующим выбором необходимого действия. Последний путь обладает большей целостностью и наглядностью и может быть рекомендован при создании нового проекта, а также начинающим пользователям. Запуск выбранной программы осуществляется либо с помощью меню Пуск (например, Пуск → Программы → Orcad Family Release 9.2 Lite Edition → Capture CIS Lite Edition), либо любым другим известным путем.

### 3. ПРОГРАММА CAPTURE CIS

#### 3.1. Рабочее окружение

После запуска на выполнение на экране появляется окно программы, приведенное на рис. 3.1.

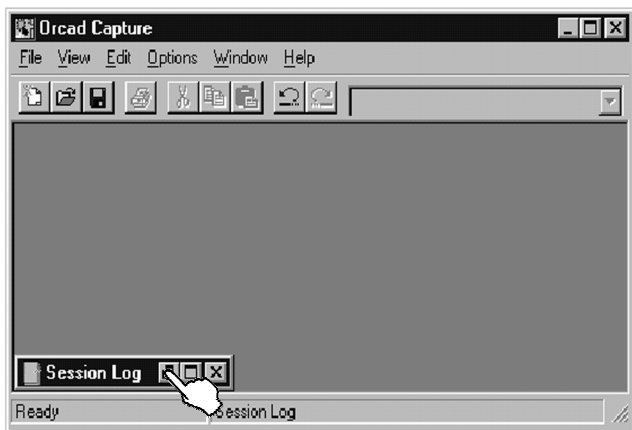


Рис. 3.1. Стартовое окно программы

В левом нижнем углу расположено минимизированное окно Session Log, в которое записывается информация о действиях, произведенных в течение сеанса работы с управляющей оболочкой.

При выборе пункта меню File→New программа Capture предложит создать: новый проект (Project), разработку (Design), библиотеку (Library), VHDL или текстовый файл. Файл проекта (расширение .OPJ) содержит указатель на один файл разработки (.DSN), а также библиотеки, VHDL-файлы, выходные файлы отчетов, связанные с файлом разработки. В файле разработки находятся одна или несколько папок (schematic folders), содержащих по одному или несколько листов схемы (schematic pages), а также кэш разработки, который, подобно библиотеке, содержит копии всех элементов, использованных в разработке.

При создании нового проекта на экране появится окно, представленное на рис. 3.2.

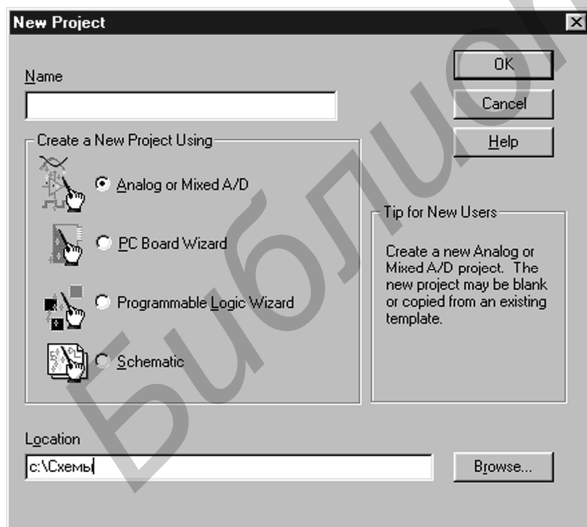


Рис. 3.2. Окно при создании нового проекта

Кроме имени проекта (Name) и его местоположения, на диске пользователя (Location) необходимо выбрать тип проекта:

**Analog or Mixed A/D** – при дальнейшем использовании программы PSpice;

**PC Board Wizard** – при дальнейшем использовании программы Layout;

**Programmable Logic Wizard** – при разработке схемы на основе ПЛИС;

**Schematic** – при необходимости создания только чертежа принципиальной либо функциональной схемы без дальнейшего моделирования либо разработки печатной платы.

Создав новый или открыв существующий проект, в левой части экрана можно увидеть окно менеджера проекта (рис. 3.3), который является удобным средством управления файлами проекта.

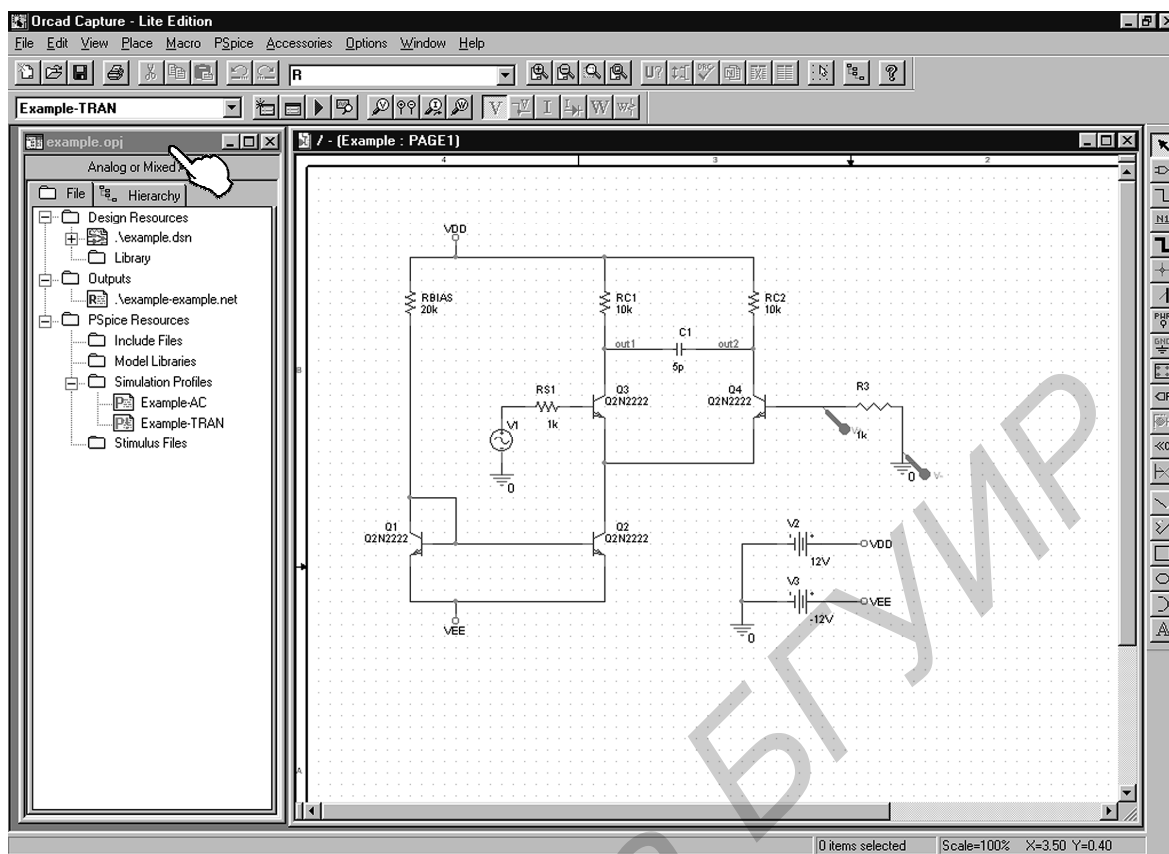


Рис. 3.3. Вид экрана при открытии проекта

Для редактирования выбранного файла в отдельном окне необходимо произвести двойной щелчок левой кнопкой мыши на выбранной пиктограмме.

Для добавления нового файла в проект необходимо:

#### I вариант:

- 1) выбрать в менеджере проектов папку, в которую будет добавляться файл;
- 2) из меню Edit выбрать пункт Project;
- 3) выбрать нужный файл в появившемся диалоговом окне Add File to Project Folder и нажать кнопку Open.

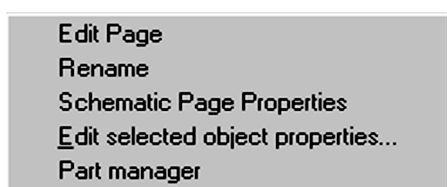
#### II вариант:

перетащить файл из окна Windows Explorer в нужную папку менеджера проекта.

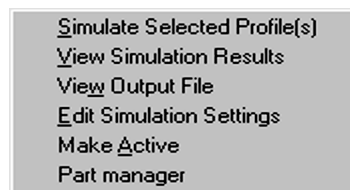
Щелчок правой кнопкой мыши на файле или папке в окне менеджера проекта вызывает появление контекстного меню, зависящего от назначения данного файла или папки. Вид контекстных меню для файлов, содержащих чертеж принципиальной схемы, и файлов, содержащих задание на моделирование, приведен на рис. 3.4, а и б соответственно.

Для удаления файла необходимо выделить его в окне менеджера проекта и нажать клавишу Delete.





а



б

Рис. 3.4. Контекстные меню

Удобным средством, облегчающим взаимодействие пользователя с программой, являются панели инструментов, взаимное положение которых можно изменять перетягиванием мышью. Назначение различных инструментов приведено в табл. 3.1, 3.2 и 3.3.

Таблица 3.1

Инструменты Capture

Пиктограмма	Название	Назначение	Выполнение через Меню
	Перекрестная ссылка	Создает таблицу, содержащую информацию о номинале элемента, его позиционном обозначении, библиотечном источнике и др.	Tools → Cross Reference
	Список материалов	Создает список количества и номиналов элементов для выбранной страницы	Tools → Bill of Materials
	Привязка к сетке	Включает (выключает) привязку к сетке	Options → Preferences → Grid Display → Pointer snap to grid
	Менеджер проекта	Отображает менеджер проекта	Window → название проекта.opj
	Часто используемый элемент	Вставляет элемент из списка наиболее часто используемых	--
	Увеличение	Увеличение	View → Zoom → In
	Уменьшение	Уменьшение	View → Zoom → Out
	Увеличить выбранное	Увеличивает выбранный прямоугольник	View → Zoom → Area
	Увеличить все	Показывает всю схему	View → Zoom → All







Пиктограмма	Название	Назначение	Выполнение через Меню
	Связать	Присваивает позиционные обозначения введенным элементам	Tools → Annotate
	Внести изменения	Позволяет внести изменения, сделанные в других программах (например Layout)	Tools → Back Annotate
	Проверка правил	Проверка схемы на выполнение основных электрических и конструкционных правил. Позволяет найти ошибки	Tools → Design Rules Check
	Создать описание схемы	Создает файл-описание схемы в формате, задаваемом пользователем	Tools → Create Netlist




Таблица 3.2

## Инструменты редактора схем

Пиктограмма	Название	Назначение	Выполнение через меню
	Выбор	Выбирает объекты	–
	Элемент	Выбирает элемент из библиотеки для вставки в схему	Place → Part
	Соединение	Рисует провода, электрически соединяющие точки схемы. Удержание клавиши Shift позволяет рисовать неортогональные провода	Place → Wire
	Имя цепи	Позволяет назначить имя проводу или шине	Place → Net Alias
	Шина	Рисует шины. Удержание клавиши Shift позволяет рисовать неортогональные сегменты	Place → Bus
	Узел	Вводит узел	Place → Junction
	Вход шины	Рисует входы шины	Place → Bus Entry

Пиктограмма	Название	Назначение	Выполнение через меню
	Питание	Рисует символы питания	Place → Power
	Земля	Рисует символы «земли»	Place → Ground
	Иерархический блок	Вставляет иерархический блок	Place → Hierarchical Block
	Иерархический порт	Вставляет иерархический порт	Place → Hierarchical Port
	Иерархический вывод	Вставляет иерархический вывод	Place → Hierarchical Pin
	Межстраничный соединитель	Добавляет межстраничный соединитель	Place → Off-Page Connector
	Нет соединений	Вставляет символ «нет соединения»	Place → No Connect
	Линия	Рисует линию	Place → Line
	Полилиния	Рисует линию с точками изгиба	Place → Polyline
	Прямоугольник	Рисует прямоугольник. Удержание клавиши Shift позволяет нарисовать квадрат	Place → Rectangle
	Эллипс	Рисует эллипс. Удержание клавиши Shift позволяет нарисовать правильный круг	Place → Ellipse
	Дуга	Рисует часть окружности	Place → Arc
	Текст	Позволяет вводить текст	Place → Text

Инструменты редактора элементов

Пиктограмма	Название	Назначение	Выполнение через меню
	IEEE-символ	Помещает на изображение элемента его функциональное назначение в виде стандартного IEEE-символа	Place → IEEE Symbol
	Вывод	Рисует вывод элемента	Place → Pin
	Массив выводов	Рисует массив выводов	Place → Pin Array

В нижней части окна расположена строка состояния (рис. 3.5), на которой отображаются (слева направо) состояние выбранного инструмента либо пояснение к пункту меню; количество выбранных элементов; текущий масштаб и положение курсора.



Рис. 3.5. Строка состояния

Строку состояния и панели инструментов можно убрать с экрана, выбрав соответствующий пункт меню View.

### 3.2. Подготовка схемы и моделирование на PSpice

Перед созданием нового проекта необходимо в стартовом окне программы Capture (см. рис. 3.1) выбрать пункты меню Options → Design Templates, Options → Preferences и установить требуемые единицы измерения, размеры страницы, шаг и привязку сетки, другие необходимые параметры. В противном случае проект будет создан по шаблонам, установленным ранее.

При создании нового проекта (File → New → Project) необходимо в окне создания нового проекта (см. рис. 3.2) указать его тип либо как «Analog or Mixed A/D», либо как «PC Board Wizard». В последнем случае в появившемся окне мастера создания PCB-проекта (рис. 3.6) необходимо активизировать пункт Enable project simulation.

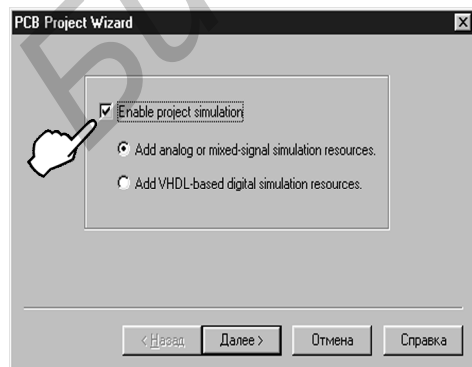


Рис. 3.6. Окно мастера создания PCB-проекта

После создания проекта производится ввод принципиальной схемы пользователя с помощью инструментов редактора принципиальных схем (см. табл. 3.3).

Как правило, сначала производится ввод элементов принципиальной схемы с помощью

кнопки «Элемент» (или нажатия на клавиатуре клавиши P), при этом на экране появляется окно Place Part (рис. 3.7). В левом нижнем углу окна расположен список библиотек, из которого производится выбор нужного элемента, при этом путем выделения можно указать как одну библиотеку, так и все сразу. Отметим, что для дальнейшего моделирования схемы с помощью программы PSpice необходимо выбирать только те элементы, которые снабжены моделью на языке моделирования, о чем свидетельствует наличие пиктограммы PSpice под изображением элемента. При необходимости дальнейшей разработки печатной платы элемент должен содержать также описание посадочного места, о чем свидетельствует наличие пиктограммы Layout. При необходимости список используемых библиотек можно увеличить либо уменьшить с помощью соответствующих кнопок, при этом библиотеки с моделями на языке PSpice расположены по адресу C:\Program Files\OrcadLite\Capture\Library\PSpice и имеют расширение \*.olb.

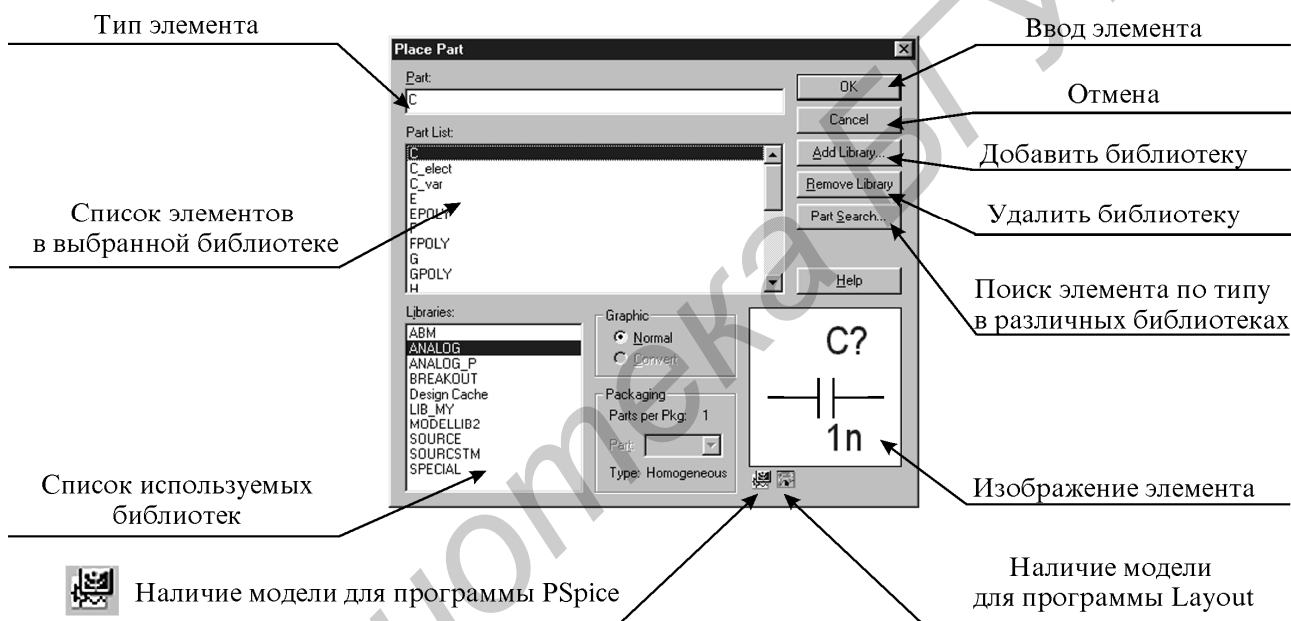


Рис. 3.7. Назначение элементов окна Place Part

Если библиотека, содержащая нужный элемент, неизвестна, то можно произвести поиск во всех библиотеках из заданной папки с помощью команды Part Search.

При нажатии кнопки ОК курсор перемещается на страницу с принципиальной схемой, при этом ввод элемента осуществляется нажатием левой кнопки мыши. При необходимости поворота элемента щелчком правой кнопкой мыши вызывается контекстное меню, из которого выбирается пункт Rotate. После ввода нужного количества элементов производится либо вызов контекстного меню с последующим выбором команды End Mode, либо нажатие клавиши Esc. Электрическое соединение элементов производится с помощью инструмента «Соединение» (вызов либо с помощью панели инструментов, либо нажатием клавиши W). При этом щелчок в месте пересечения двух проводов добавляет узел, в противном случае пересекающиеся провода электрически не соединяют-

ся. При необходимости изменения номинала либо позиционного обозначения элемента производится двойной щелчок мыши на изменяемом параметре. Двойной щелчок на изображении самого элемента вызывает редактор свойств; отбор и редактирование необходимых свойств проще осуществлять с использованием фильтра (рис. 3.8).

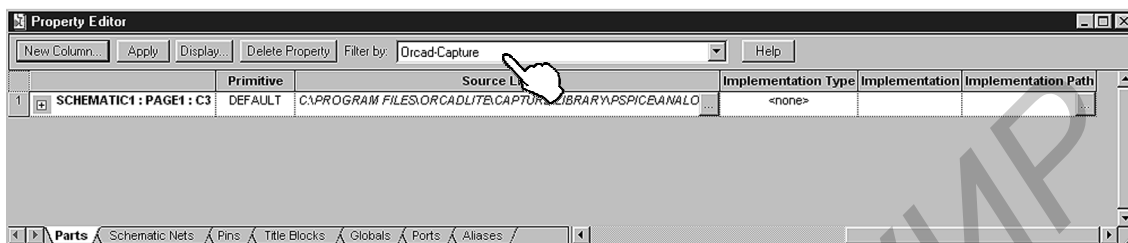


Рис. 3.8. Редактор свойств

Обязательным условием возможности моделирования схемы является наличие элемента «земля», имеющего имя «0». Для этого надо с помощью инструмента «Земля» поместить на схему этот элемент (рис. 3.9), находящийся в библиотеке Source. Альтернативным решением является использование другого элемента «земля» с последующим присвоением ему имени «0».

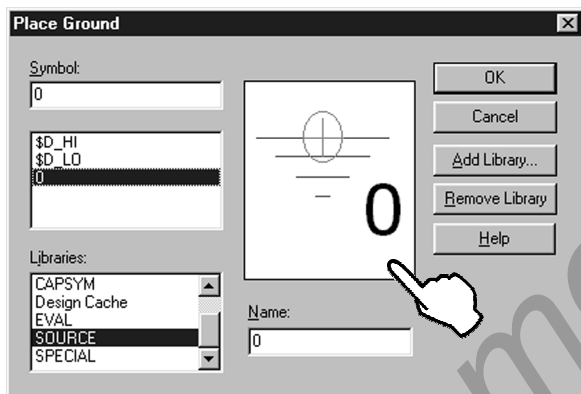


Рис. 3.9. Окно при вызове инструмента GND

Для анализа схемы в переходном режиме кроме стандартных входных воздействий (синусоидального, прямоугольного) могут потребоваться источники входных воздействий (Stimulus sources), задаваемые пользователем. Наиболее

простым путем создания данного источника является использование источника из библиотеки Sourcstm.olb (C:\Program Files\OrCADLite\Capture\Library\PSpice\Sourcstm.olb), в которой представлены:

- VSTIM** – аналоговые источники напряжения;
- ISTIM** – аналоговые источники тока;
- DIGSTIMn** – источники цифровых сигналов.

После размещения источника на схеме с помощью правой кнопки мыши вызывается контекстное меню, из которого выбирается пункт Edit PSpice Stimulus, после чего можно произвести редактирование входного воздействия с помощью редактора Stimulus Editor.

После окончания ввода принципиальной схемы желательно проверить ее на наличие ошибок, для чего следует воспользоваться инструментом «Проверка правил» (см. табл. 3.2) либо выбрать пункт меню Tools → Design Rules Check.

**i** Пункт меню Tools и инструмент «Проверка правил» становятся доступными при активации окна менеджера проекта.

После этого на экране возникает окно, показанное на рис. 3.10.

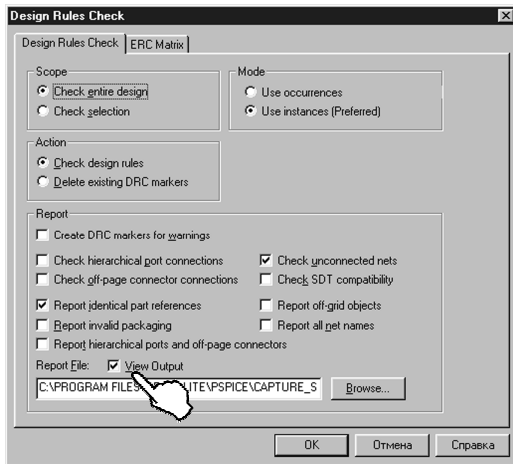


Рис. 3.10. Окно при вызове инструмента DRC

Для того чтобы сразу просмотреть файл отчета, необходимо установить флажок View Output.

Состав сведений, включаемых в отчет, выбирается с помощью установки соответствующего флажка в группе Report, а именно:

**Create DRC markers for warnings** – создаст маркеры не только для ошибок, но и для предупреждений;

**Check hierarchical port connections** – проверяет соответствие иерархических портов на главной и дочерней страницах схемы;

**Check off-page connector connections** – проверяет соответствие имен межстраничных соединителей на всех страницах схемы;

**Report identical part reference** – проверяет наличие идентичных ссылок на разные элементы;

**Report invalid packaging** – проверяет на правильность размещения элементов по корпусам;

**Report hierarchical ports and off-page connectors** – включает в файл отчета сведения об иерархических портах и межстраничных соединителях;

**Check unconnected nets** – проверяет наличие неприсоединенных цепей (каждая цепь обязательно должна иметь путь к «земле»), а также наличие цепей с одинаковыми именами;

**Check SDT compatibility** – проверяет на совместимость с Инструментами Разработки Схем (SDT – Schematic Design Tools). Проверка данного пункта необходима при дальнейшем сохранении схемы в формате SDT;

**Report off-grid objects** – включает в отчет сведения об объектах, лежащих вне сетки;

**Report all net names** – включает в отчет сведения обо всех именах цепей.

Предупреждение – сообщение, при котором возможно (в отличие от ошибки) дальнейшее моделирование схемы. Для конкретной схемы в зависимости от логики ее работы часть предупреждений может игнорироваться разработчиком, часть должна быть обязательно учтена.

Кроме файла отчета информация об ошибках размещается на изображении принципиальной схемы в виде зеленого кружка рядом с элементом, для которого

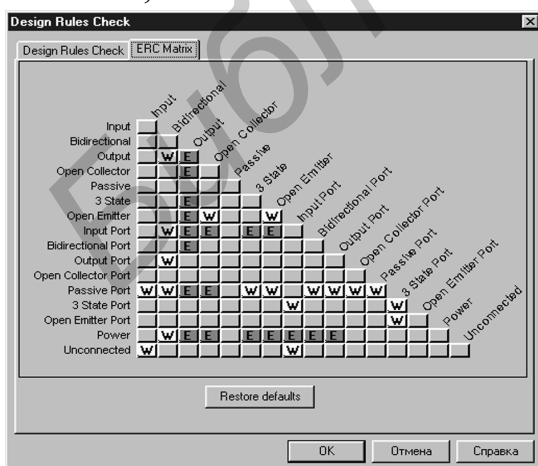


Рис. 3.11. Матрица правил проверки ошибок

обнаружена ошибка. Двойной щелчок на кружке выводит на экран описание ошибки.

Выбор ситуаций, которые необходимо рассматривать как ошибку либо выдавать предупреждение, может осуществляться пользователем с помощью выбора вкладки ERC Matrix в окне, изображенном на рис. 3.10. Матрица правил проверки ошибок изображена на рис. 3.11. Выбор значка «E» на пересечении соответствующей строки и столбца (путем щелчка левой кнопкой мыши) приводит к рассмотрению данной ситуации как ошибки; значок «W» позволяет сгенерировать предупреждение. Моделирование схемы осуществляется либо с помощью панели инструментов (табл. 3.4), представленной на рис. 3.12, либо с помощью пункта меню PSpice (табл. 3.5).



Рис. 3.12. Панель инструментов для программы PSpice

Таблица 3.4

Назначение инструментов для программы PSpice

Пиктограмма	Назначение
	Создает новый профиль (набор параметров) моделирования
	Редактирует параметры моделирования
	Запускает программу PSpice в режиме моделирования
	Позволяет просмотреть результаты моделирования
	Устанавливает маркер напряжения. Позволяет определить напряжение в заданной точке относительно потенциала «земли»
	Устанавливает два маркера, между которыми определяется напряжение
	Устанавливает маркер тока
	Устанавливает маркер мощности
	Позволяет просмотреть результаты анализа цепи (напряжения, токи, мощности в узлах) по постоянному току. Для активации этих инструментов должен быть активирован пункт меню PSpice → Bias Points → Enable
	Позволяет скрыть выделенный параметр (напряжение, ток, мощность). Для активации соответствующего инструмента должен быть активен инструмент «V», «I» или «W»



## Команды меню PSpice

Название	Назначение
New Simulation Profile	Создает новый профиль моделирования
Edit Simulation Profile	Редактирует существующий профиль моделирования
Run	Запускает программу PSpice в режиме моделирования
View Simulation Results	Позволяет просмотреть результаты моделирования
View Output File	Позволяет просмотреть текстовый файл с результатами моделирования
Create Netlist	Создает текстовый файл *.net, содержащий описание схемы
View Netlist	Позволяет просмотреть созданное (*.net) описание схемы
Place Optimizer Parameters	Задаёт параметры для программы PSpice Optimizer
Run Optimizer	Запускает программу PSpice Optimizer
Markers	Задаёт маркеры, отмечающие необходимые для расчета напряжения, токи, мощности
Bias Points	Выдает результаты расчета цепи по постоянному току

Перед началом моделирования необходимо создать профиль (набор параметров) моделирования, воспользовавшись соответствующим инструментом (см. табл. 3.4) либо пунктом меню (табл. 3.5), затем указать для созданного профиля имя. Вид анализа схемы и параметры моделирования указываются в окне, изображенном на рис. 3.13.

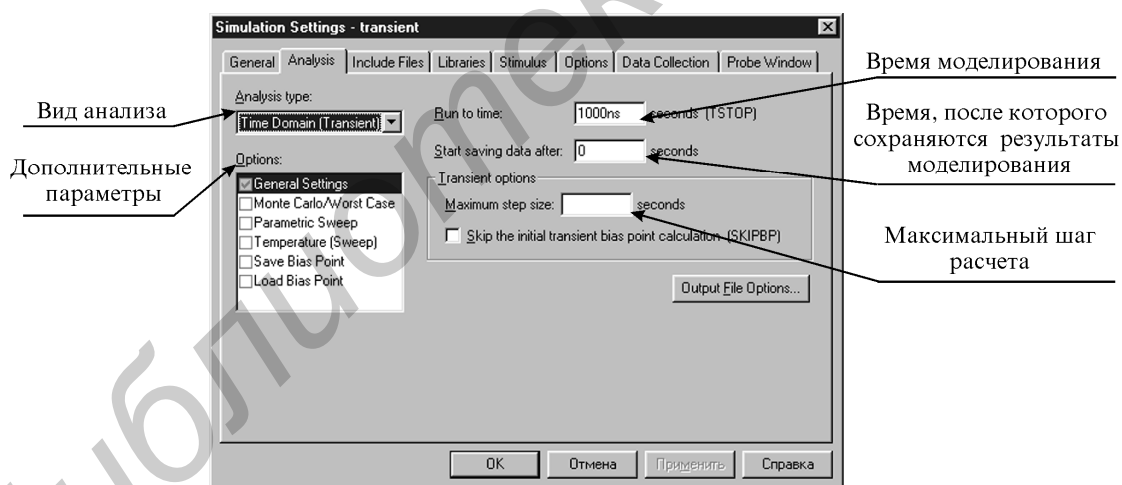


Рис. 3.13. Создание профиля моделирования

Вид анализа (Analysis type) может быть выбран как:

**Time Domain (Transient)** – анализ цепи во временной области (расчет переходного процесса);

**DC Sweep** – расчет цепи по постоянному току при изменении источников питания, параметров моделей элементов или температуры в заданных пределах;

**AC Sweep/Noise** – расчет АЧХ и ФЧХ цепи; при дополнительной активации раздела Noise – расчет шумовых характеристик (вклада каждого источника шумов в выходной сигнал, среднеквадратичной суммы шума на выходе от дейст-

вия всех шумовых генераторов, расчет эквивалентного входного источника шума);

**Bias Point** – расчет цепи по постоянному току.

В разделе Options кроме общих установок (General Settings), определенных при выборе вида анализа, можно дополнительно задать:

**Monte Carlo/Worst Case** – статистический анализ методом Монте-Карло либо расчет цепи на наихудший случай;

**Parametric Sweep** – изменение параметра схемы;

**Temperature (Sweep)** – температуру, при которой рассчитывается работа схемы и ее изменение;

**Save Bias Points** – сохранение результатов анализа схемы по постоянному току в отдельный файл;

**Load Bias Points** – загрузка из файла значений, определяющих режим работы схемы по постоянному току.

Вид правой части окна (см. рис. 3.13) определяется выбором вида анализа и дополнительных параметров моделирования. Для выполнения анализа схемы по переменному току (расчета АЧХ и ФЧХ) необходимо указать:

**Start Frequency** – начальную частоту анализа;

**End Frequency** – конечную частоту анализа;

**Linear** – линейное изменение частоты (при необходимости) ;

**Logarithmic** – логарифмическое изменение частоты(при необходимости) (Decade – по декадам, Octave – по октавам);

**Points/Decade** – количество точек расчета на одну декаду;

**Total Points** – общее количество точек расчета.

Для обработки результатов анализа с помощью постпроцессора Probe необходимо на вкладке окна (см. рис. 3.13) выбрать закладку Probe Window и установить переключатель Display Probe window.

**i** Постпроцессор Probe позволяет просмотреть результаты анализа в виде графиков, что намного нагляднее результатов, представленных в текстовом файле \*.out.

После создания профиля моделирования необходимо запустить программу PSpice путем нажатия пиктограммы с синей стрелкой. При отсутствии ошибок на экране появится окно программы PSpice с результатами моделирования, приведенное на рис. 3.14.

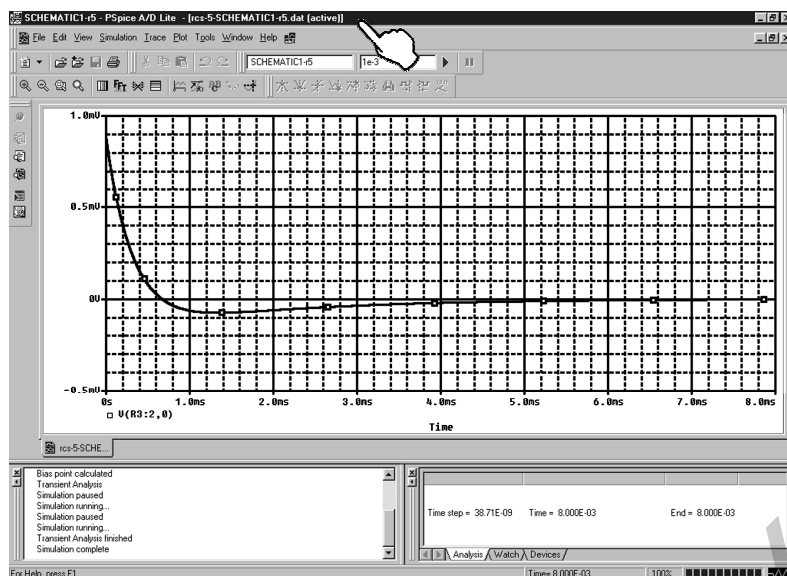


Рис. 3.14. Результаты моделирования




В случае когда не будет указана требуемая выходная величина, в окне результатов моделирования отобразится только координатная сетка. Для отображения необходимого графика следует добавить его в число видимых на экране с помощью пункта меню **Trace** → **Add Trace** (либо щелкнув мышью на пиктограмме, указанной на рис. 3.14).

В табл. 3.6 приведено описание инструментов обработки результатов моделирования, которые позволяют представить результат в наиболее удобной форме, а также провести дополнительный анализ функционирования схемы.

Таблица 3.6

Инструменты для обработки результатов моделирования

Пиктограмма	Назначение	Выполнение через меню
	Отображает логарифмическую шкалу по оси $X$	Tools → Axis Settings
	Выполняет Фурье-анализ. Для выполнения данного пункта должен быть рассчитан переходный процесс	Trace → Fourier
	Позволяет сравнить характеристики семейства выходных сигналов	Trace → Performance Analysis
	Отображает логарифмическую шкалу по оси $Y$	Tools → Axis Settings
	Строит график для указанной переменной	Trace → Add Trace
	Вычисляет целевую функцию	Trace → Eval Goal Function

Пикто- грамма	Назначение	Выполнение через меню
	Вставляет текстовую метку	Plot → Label → Text
	Помечает рассчитанные точки	—
	Включает отображение курсора. Является удобным средством для измерений по графику	Trace → Cursor → Display

### 3.3. Моделирование функциональных схем

С помощью программ Capture-PSpice электрические схемы можно моделировать не только на уровне принципиальной схемы, но также и на уровне функциональной, что является удобным средством на этапе предварительного определения параметров каждого блока устройства.

Для моделирования схемы на функциональном уровне необходимо использовать библиотеку ABM (Analog Behavioral Modeling), расположенную по адресу C:\Program Files\OrcadLite\Capture\Library\PSpice\abm.olb.

Весь набор элементов этой библиотеки можно разбить на два подмножества: элементы систем управления и PSpice-эквивалентные элементы. Элементы систем управления имеют один вход и один выход. Предполагается, что входные (выходные) сигналы этих элементов действуют между входом (выходом) элемента и «землей», при этом вид используемого сигнала (ток, напряжение и т. д.) безразличен. PSpice-эквивалентные элементы отражают структуру управляемых источников тока ( $G$ ) и напряжения ( $E$ ), используемых в программе PSpice, и имеют дифференциальный вход и симметричный выход. Описания элементов библиотеки ABM приведены в табл. 3.7 и 3.8.

Таблица 3.7

Элементы систем управления

Категория	Элемент	Описание	Параметры
Основные компоненты	CONST	Константа	VALUE
	SUM	Сумматор	
	MULT	Умножитель	
	GAIN	Усилитель	GAIN
	DIFF	Вычитание	
Ограничители	LIMIT	Ограничитель	LO, HI
	GLIMIT	Усилитель-ограничитель	LO, HI, GAIN
	SOFTLIM	«Мягкий» усилитель-ограничитель	LO, HI, GAIN

Категория	Элемент	Описание	Параметры
Фильтры Чебышева	LOPASS	Фильтр нижних частот	FP, FS, RIPPLE, STOP
	HIPASS	Фильтр верхних частот	FP, FS, RIPPLE, STOP
	BANDPASS	Полосовой фильтр	FP, FS, RIPPLE, STOP
	BANDREJ	Режекторный фильтр	FP, FS, RIPPLE, STOP
Интегратор и дифференциатор	INTEG	Интегратор	GAIN, IC
	DIFFER	Дифференциатор	GAIN
Передаточная функция от ком- плексной пере- менной $s$	LAPLACE	Элемент, задаваемый передаточной функцией от комплексной переменной $s$	NUM, DENOM
Таблицы соответствия	TABLE	Элемент, задаваемый таблицей: входное напряжение – выходное напряжение	ROW1...ROW5
	FTABLE	Элемент, задаваемый таблицей: частота входного сигнала – ослабление в дБ – фаза	ROW1...ROW5
Математические функции	ABS	$ x $	
	SQRT	$\sqrt{x}$	
	PWR	$ x ^{EXP}$	EXP
	PWRS	$x^{EXP}$	EXP
	LOG	$\ln(x)$	
	LOG10	$\log(x)$	
	EXP	$e^x$	
	SIN, COS, TAN	$\sin(x), \cos(x), \tan(x)$	
	ATAN, ARCTAN	$\tan^{-1}(x)$	
Функции пользователя	ABM	Элемент без входа и с одним выходом по напряжению	EXP1..EXP4
	ABM1	Элемент с одним входом и одним выходом по напряжению	EXP1..EXP4
	ABM2	Элемент с двумя входами и одним выходом по напряжению	EXP1..EXP4
	ABM3	Элемент с тремя входами и одним выходом по напряжению	EXP1..EXP4
	ABM/I	Элемент без входа и одним токовым выходом	EXP1..EXP4
	ABM1/I	Элемент с одним входом и токовым выходом	EXP1..EXP4

Категория	Элемент	Описание	Параметры
	ABM2/I	Элемент с двумя входами и токовым выходом	EXP1..EXP4
	ABM3/I	Элемент с тремя входами и токовым выходом	EXP1..EXP4

В табл. 3.7 использованы следующие обозначения параметров:

VALUE – значение;

GAIN – коэффициент усиления (в раз);

LO – нижний уровень;

HI – верхний уровень;

FP – граничная частота полосы пропускания;

FS – граничная частота полосы задерживания;

RIPPLE – неравномерность АЧХ в полосе пропускания (в дБ);

STOP – затухание в полосе задерживания (в дБ);

F0, F1, F2, F3 – частоты среза;


IC – начальное значение;

NOM – числитель;

DENOM – знаменатель;

ROW – строка;

EXP – арифметическое выражение.

 Аргументы тригонометрических функций должны быть указаны в радианах.

PSpice-эквивалентные элементы могут быть классифицированы как приборы E- и G- типов. Так как передаточные функции данных элементов могут содержать произвольную комбинацию входных токов и напряжений, то тип используемого элемента определяется только необходимым выходным сигналом (током или напряжением).

На языке моделирования описание PSpice-эквивалентного элемента имеет следующий вид:

$E$  <name> <connecting nodes> <ABM keyword> <ABM function> ,

где name – имя устройства;

connecting nodes – узлы подключения;

ABM keyword – определяет вид используемой передаточной функции, а именно:

VALUE – арифметическое выражение;

TABLE – таблица соответствия;

LAPLACE – функция комплексной переменной  $s$ ;

FREQ – таблица соответствия в частотной области;

CHEBYSHEV – характеристика фильтра Чебышева;

ABM function – описание передаточной функции в виде формулы либо таблицы соответствия.



Пример: рассмотрим умножитель, имеющий четыре входа и два выхода. Его описание имеет вид

$E^{\text{@REFDES}} \%OUT+ \%OUT - VALUE \{V(\%IN1+, \%IN1 -) * V(\%IN2+, \%IN2 -)\}.$

Таблица 3.8

PSpice-эквивалентные элементы

Категория	Элемент	Описание	Параметры
Математические выражения	EVALUE, GVALUE	Функция	EXPR
	ESUM, GSUM	Сумматор	—
	EMULT, GMULT	Умножитель	—
Таблица соответствия	ETABLE, GTABLE	Таблица соответствия	EXPR, TABLE
	EFREQ, GFREQ	Таблица: входная частота – выходное напряжение (ток)	EXPR, TABLE
Передающая функция от комплексной переменной $s$	ELAPLACE, GLAPLACE	Элемент, задаваемый передающей функцией от комплексной переменной $s$	EXPR, XFORM

В табл. 3.8 использованы следующие обозначения параметров:

EXPR – математическая функция от двух (в отличие от EXP) входных сигналов;

TABLE – таблица;

XFORM – функция от комплексной переменной  $s$ .



Пример:  $EXPR = 15\text{ma} * \text{SIN}(6.28 * 10\text{kHz} * \text{TIME} + V(\%IN+, \%IN -));$

$TABLE = (0, 0) (.02, 2.690\text{E} - 03) (.04, 4.102\text{E} - 03) (.06, 4.621\text{E} - 03);$

$XFORM = 1/(1+.001*s).$

## 4. ПРОГРАММА PSpICE

### 4.1. Алгоритм подготовки схемы к моделированию

Для запуска программы PSpice без запуска программы Capture необходимо выбрать следующие пункты меню «Пуск»: Пуск → Программы → Orcad Family Release 9.2 Lite Edition → PSpice AD Lite Edition.

В появившемся на экране окне программы необходимо создать новый текстовый файл, используя команды меню «File» (File → New → Text File). В появившемся окне нового документа необходимо набрать текст программы на языке моделирования.

После ввода схемы необходимо сохранить файл на диск в виде <имя файла>.cir. После этого необходимо закрыть созданный текстовый файл и открыть

файл в формате описания схемы (\*.cir). После выполнения указанных действий на панели инструментов появляется синяя стрелка, щелчок на которой запускает процесс моделирования.

## 4.2. Входной язык

В программе SPICE информация о схеме и необходимых видах и параметрах анализа задается во входном текстовом файле, который формируется в соответствии со входным языком.

Формат входного языка свободный, т. е. нет жестких требований к последовательности записи входной информации. В качестве разделителей для полей записей используются пробел(ы), запятая, знак равенства или левая и правая скобки. Пробелы в записи, не используемые в качестве разделителей, игнорируются. Любая запись может быть перенесена на следующую строку, для чего в начале строки необходимо поместить знак плюс. Поле имени в записи должно начинаться с буквы латинского алфавита (A–Z) и не может содержать перечисленные выше разделители. Информационные поля могут быть целочисленными, с плавающей точкой, могут использовать экспоненциальную форму или сопровождаться следующими масштабными коэффициентами:

$T = 1E12$ ;  $G = 1E9$ ;  $MEG = 1E6$ ;  $K = 1E3$ ;

$M = 1E-3$ ;  $U = 1E-6$ ;  $N = 1E-9$ ;  $P = 1E-12$ ;  $F = 1E-15$ .

Символы, следующие сразу за числом и не являющиеся масштабными коэффициентами, игнорируются. Например:


$1000 = 1000.0 = 1000HZ = 1E3 = 1.0E3 = 1KHZ = 1K = 0.001MEGHZ$ .

Существует два типа записей:

- 1) записи описания элементов схемы;
- 2) управляющие записи, или директивы управления.

Первый тип записей определяет топологию схемы, ее состав и значения элементов. Второй тип записей управляет работой программы и задает параметры моделей элементов.

Первая запись во входном файле всегда является заголовком. Последняя должна быть всегда директивой [.END]. Порядок остальных записей произвольный.

 Отсутствие заголовка приводит к тому, что первая строка описания схемы исключается из рассмотрения, что приводит к ошибке.


Каждый элемент схемы описывается записью, которая содержит имя элемента, узлы подключения элемента и параметры, определяющие его электрические характеристики. Первая буква в имени элемента задает его тип.



Номерами узлов схемы должны быть произвольные целые неотрицательные числа. Узел, соответствующий «земле», имеет номер ноль и должен обязательно присутствовать в описании схемы.

Токи в ветвях схемы всегда направлены по уменьшению напряжения. Схема не может содержать контуров из источников напряжения и (или) индуктивностей, а также сечений из источников тока и (или) емкостей. К каждому узлу в схеме должны быть подключены по крайней мере две ветви (за исключением конечных узлов линии с распределенными параметрами и узлов подложки МОП-транзисторов). Любой узел должен иметь путь по постоянному току к «земле».

Входной язык позволяет вставлять записи с комментариями в любое место входного файла. Строка с комментарием должна начинаться с символа «\*». При добавлении комментария в конец строки используется символ «;».

 Напишем программу для расчета амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) схемы, представленной на рис. 4.1, с параметрами  $R = 50 \text{ Ом}$ ,  $L = 0,25 \text{ Гн}$ ,  $C = 2 \text{ мкФ}$ :

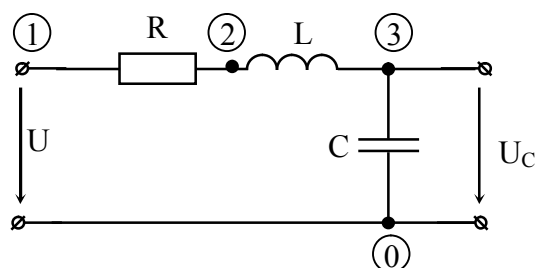


Рис. 4.1. Схема примера

```
PRIMER
R 1 2 50
L 2 3 0.25
C 3 0 2U
VIN 1 0 AC 1
.AC LIN 100 30 300
.PLOT AC V(3)
.PROBE
.END
```

Отметим, что в схеме обязательно должен присутствовать источник, тип которого определяется требуемым видом анализа схемы.

Директива `.PROBE` служит для запуска постпроцессора, позволяющего представить результаты моделирования в графическом виде.

Подробное описание элементов схемы и директив управления приведено ниже.

### 4.3. Описание элементов электронных схем

Для задания структуры электронной схемы применяются записи с описаниями элементов, которые содержат информацию об узлах подключения и значениях параметров моделей. Рассмотрим составление данных записей более подробно.

#### 4.3.1. Резисторы:

Римя N1 N2 <Имя модели> [Номинал],

где R – идентификатор резистора;

имя – позиционное обозначение элемента в схеме;

N1, N2 – узлы подключения резистора (положительное направление тока через резистор от N1 узла к узлу N2);

Номинал – величина сопротивления резистора (может быть положительной, отрицательной, но не нулевой). В случае необходимости в нулевом сопротивлении необходимо ввести значение, много меньшее других сопротивлений в схеме (например 1E-6).

Имя модели – имя модели, описывающей зависимость сопротивления от температуры.

Параметры модели резистора приведены в табл. 4.1.

*Примечание.* В дальнейшем между символами “<” и “>” будем размещать необязательные параметры.

Таблица 4.1

Параметры модели резистора

Параметр	Коэффициенты	Ед. изм.	Значение по умолчанию
R	Масштабный	–	1
TC1	Линейный температурный	1/°C	0
TC2	Квадратичный температурный	1/°C <sup>2</sup>	0
TCE	Экспоненциальный температурный	1/°C	0
T_ABS	Абсолютная температура	°C	27
T_MEASURED	Температура измерений	°C	27
T_REL_GLOBAL	Относительная температура	°C	0
T_REL_LOCL	Разность между температурой резистора и модели-прототипа	°C	0

Описание модели резистора в общем случае имеет следующий вид:

.MODEL [Имя модели] RES <R=3Н1> <TC1=3Н2> <TC2=3Н3> ,

где Имя модели – имя модели резистора;  
3Н1, 3Н2, 3Н3 – значения параметров.

Параметрам, не указанным в описании модели, присваиваются значения по умолчанию. Если модель не задана, то значение сопротивления резистора принимается равным номиналу. Если в модели не указан параметр TCE, то величина сопротивления резистора  $r$  определяется по формуле

$$r = \text{Номинал} * R * [1 + (T - T_0) * TC1 + (T - T_0)^2 * TC2].$$

В случае, если параметр TCE задан, то величина сопротивления резистора  $r$  определяется как

$$r = \text{Номинал} * R * 1.01^{TCE * (T - T_0)}.$$



R1 15 0 2K

\*Резистор R1, включенный между узлами 15 и 0 номиналом 2 КОм

RG 1 2 mod\_my 2E2.

\*Резистор RG, включенный между узлами 1 и 2, имеющий номинал \*200 Ом и описываемый моделью mod\_my.

#### 4.3.2. Конденсаторы:

Симья N<sub>1</sub> N<sub>2</sub> <Имя модели> [Номинал] <IC> ,

где С – идентификатор конденсатора;

имя – обозначение элемента на схеме;

N<sub>1</sub>,N<sub>2</sub> – узлы подключения конденсатора;

Номинал– величина емкости конденсатора (может быть положительной, отрицательной, но не нулевой);

IC – начальное значение напряжения на конденсаторе.

Параметры модели конденсатора приведены в табл. 4.2

Таблица 4.2

Параметры модели конденсатора

Параметр	Коэффициенты	Ед. изм.	Значение по умолчанию
С	Масштабный	–	1
VC1	При линейной части VC	1/V	0
VC2	При квадратичной части VC	1/V <sup>2</sup>	0
TC1	Линейный температурный	1/°C	0
TC2	Квадратичный температурный	1/°C <sup>2</sup>	0
T_ABS	Абсолютная температура	°C	27
T_MEASURED	Температура измерений	°C	27
T_REL_GLOBAL	Относительная температура	°C	0
T_REL_LOCL	Разность между температурой конденсатора и модели-прототипа	°C	0

Описание модели конденсатора в общем случае имеет следующий вид:

.MODEL [Имя] CAP <П1 = ЗН1> <П2 = ЗН2> ..... ,

где Имя – имя модели;

П1,П2,... – наименования параметров;


ЗН1,ЗН2,... – значения параметров.

Параметрам, не указанным в описании модели, присваиваются значения по умолчанию. Если модель не задана, то величина емкости конденсатора принимается равной номиналу.

Если модель задана, то значение емкости определяется по формуле

$$C = (\text{Номинал} * C) * (1 + VC * VC1 + VC^2 * VC2) * [1 + (T - T_0) * TC1 + (T - T_0)^2 * TC2].$$

Задание начального напряжения на конденсаторе позволяет уменьшить время расчета переходного процесса.

 CLOAD 15 0 20PF  
 C2 1 2.2E – 12 IC=15V  
 CFDB 3 4 CMOD 10PF

### 4.3.3. Индуктивности:

Лимя N1 N2 <Имя модели> [Номинал] <IC> ,

где L – идентификатор индуктивности;

имя – обозначение элемента на схеме;

N1, N2 – узлы подключения индуктивности;

Номинал – величина индуктивности (может быть положительной, отрицательной, но не нулевой);

IC – начальный ток через индуктивность.

Параметры модели индуктивности приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Параметры модели катушки индуктивности

Параметр	Коэффициенты	Ед. изм.	Значение по умолчанию
L	Масштабный	–	1
IL1	Линейный по току	1/A	0
IL2	Квадратичный по току	1/A <sup>2</sup>	0
TC1	Линейный температурный	1/C	0
TC2	Квадратичный температурный	1/C <sup>2</sup>	0

Описание модели индуктивности в общем случае имеет следующий вид:

.MODEL [Имя] IND <П1 = ЗН1> <П2 = ЗН2> ..... ,

где Имя – имя модели;


П1, П2... – наименования параметров;

ЗН1, ЗН2 ... – значения параметров.

Параметрам, значения которых не указаны в описании модели, присваиваются значения по умолчанию. Если модель не задана, то значение индуктивности принимается равным номиналу. Если модель задана явно, то значение индуктивности определяется по формуле

$$L = (\text{Номинал} * L) * (1 + I * IL1 + I^2 * IL2) * [1 + (T - T_0)^2 * TC2].$$

Задание начального тока через индуктивность позволяет уменьшить время расчета переходного процесса.

 LLOAD 15 0 20MH  
 L1 2 3 LMOD 0.3  
 Lbm2 4 7 Lmod 1m IC = 0.1

#### 4.3.4. Взаимные индуктивности (трансформаторы):

Кимя Lxxx Лууу  $K_{св}$ ,

где К – идентификатор взаимной индуктивности (трансформатора);  
имя – обозначение элемента на схеме;  
xxx, ууу – имена индуктивностей на схеме, между которыми имеется взаимная связь;  
 $K_{св}$  – коэффициент связи ( $-1 < K_{св} < 1$ ).

Коэффициент связи можно определить, зная индуктивности катушек и их взаимную индуктивность, по формуле

$$K_{св} = \frac{M}{\sqrt{L1 \cdot L2}}$$

Пример:



KTR L1 L2 0.1  
L1 2 3 1  
L2 5 6 0.5

*Примечание.* Начало обмотки помещается в первый узел индуктивности. Полярность определяется только последовательностью узлов в описании индуктивностей и не зависит от порядка описания индуктивностей в записи «К». Если трансформатор состоит из нескольких обмоток, то в записях «К» нужно перечислить все взаимосвязанные пары.



Например, трансформатор со средним отводом от первичной обмотки и с двумя вторичными обмотками описывается так:

*Первичная обмотка				*Взаимная связь			
L1	1	2	100UH	K12	L1	L2	.9999
L2	2	3	100UH	K13	L1	L3	.9999
*Вторичная обмотка				K14	L1	L4	.9999
L3	11	12	100UH	K23	L2	L3	.9999
L4	13	14	100UH	K24	L2	L4	.9999
K34	L3	L4	.9999				

#### 4.3.5. Магнитный сердечник трансформатора:

Кимя Lxxx Лууу  $K_{св}$  <имя модели> <масштабный коэффициент>,

где Кимя – идентификатор сердечника;  
имя – обозначение элемента на схеме;  
xxx, ууу – имена индуктивностей, расположенных на сердечнике;  
 $K_{св}$  – коэффициент связи.

Все обмотки имеют одинаковый коэффициент связи. При описании каждой обмотки, упомянутой в составе сердечника, необходимо указывать не индуктивность, а число витков обмотки сердечника.

Параметр <масштабный коэффициент> – изменяет площадь поперечного сечения магнитопровода (по умолчанию равен единице), которая равна произведению этого коэффициента на параметр модели сердечника AREA. Параметры модели для LEVEL = 2 приведены в табл. 4.4.

Существуют два уровня этой модели: LEVEL = 1 и LEVEL = 2, из которых модель LEVEL = 1 оказалась неудачной и в последних версиях PSpice была исключена. В программе PSpice используется модель Джилса и Атерна, основанная на представлении движения доменных границ магнитных материалов. Она отражает следующие основные характеристики гистерезиса: кривую начальной намагниченности, намагниченность насыщения, коэрцитивную силу и остаточную намагниченность.

Параметры AREA, PATH, GAP, PACK определяются геометрическими параметрами сердечника, остальные – свойствами магнитного сердечника.

Таблица 4.4

Параметры модели сердечника

Параметр	Описание	Ед. изм.	Значение по умолчанию
LEVEL	Индекс модели	–	2
A	Параметр формы безгистерезисной кривой намагниченности	А/м	1000
AREA	Площадь поперечного сечения магнитопровода	см <sup>2</sup>	0.1
C	Постоянная упругого смещения доменных границ	–	0.2
GAP	Ширина воздушного зазора	см	0
K	Постоянная подвижности доменов	А/м	500
MS	Намагниченность насыщения	А/м	10 <sup>6</sup>
PACK	Коэффициент заполнения сердечника	–	1
PATH	Средняя длина магнитной силовой линии	см	1

Описание модели сердечника в общем случае имеет следующий вид:

.MODEL [Имя] CORE <П1 = ЗН1> <П2 = ЗН2> ..... ,

где Имя – имя модели;

П1, П2... – наименования параметров;

ЗН1, ЗН2 ... – значения параметров.

#### 4.3.6. Линии передачи:


Т<sub>Имя</sub> X1+ X2 – X3+ X4- ZO <TD> <F> <NL> ,

где Т – идентификатор линии передачи;

Имя – обозначение элемента на схеме;

X1, X2 – узлы подключения на первой паре;  
 X3, X4 – узлы подключения на второй паре;  
 ZO – характеристическое сопротивление;  
 TD – время задержки в секундах;  
 F – частота в герцах;  
 NL – длина волны на частоте F.

*Примечание.* (+) и (–) выводы позволяют определить направление тока (от (+) к (–)). По умолчанию NL = 0,25.

 TDELAY 15 0 16 0 ZO = 5000HM TD = 0.2NS  
 T33 4.2 3 5 ZO = 220 F = 2.25MEGHZ

#### 4.3.7. Идеальные управляемые ключи:

Симя N1 N2 N3+ N4- [Имя модели],

где S – идентификатор ключа;

имя – обозначение элемента на схеме;

N1, N2 – узлы подключения контактов ключа;

N3, N4 – положительный N3 и отрицательный N4 узлы подключения управляющего источника напряжения (тока).

Параметры модели ключа приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Параметры модели управляемого ключа

Параметр	Значение параметра	Ед. изм.	Значение по умолчанию
VON	Напряжение открывания	В	–
VOFF	Напряжение закрывания	В	–
ION	Ток открывания	А	–
IOFF	Ток закрывания	А	–
RON	Сопротивление открытого ключа	Ом	1
ROFF	Сопротивление закрытого ключа	Ом	10 <sup>6</sup>

Описание модели идеального ключа имеет следующий вид:

.MODEL [Имя] [ТИП] <П1 = ЗН1> <П2 = ЗН2> .... ,

где Имя – имя модели;

ТИП – один из следующих типов:

VSWITCH – модель ключа, управляемого напряжением,

ISWITCH – модель ключа, управляемого током;

П1, П2... – наименования параметров;

ЗН1, ЗН2... – значения параметров.

Параметрам, значения которых не указаны в описании модели, присваиваются значения по умолчанию.

При напряжениях (токах), находящихся в диапазоне между порогом открывания и порогом закрывания, сопротивление ключа изменяется в пределах ROFF и RON. Сопротивление утечки по входу управления 1E12 Ом.



Sbw2 15 2 3 0 TTT

.MODEL TTT VSWITCH Von = 2 Voff = 1

#### 4.3.8. Полупроводниковые диоды:

Димя N+ N- [Имя модели] <area> ,

где D – идентификатор диода;

имя – обозначение элемента на схеме;

N+ – узел подключения положительного вывода диода (анода);

N- – узел подключения отрицательного вывода диода (катода);

Имя модели – имя модели диода;

area – относительное значение площади прибора (по умолчанию 1,0).

Параметры модели диода приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Параметры модели диода

Параметр	Описание	Ед. изм.	Значение по умолчанию
AF	Показатель степени в формуле фликер-шума	–	1
BV	Обратное напряжение пробоя (положительная величина)	В	$\infty$
CJO	Барьерная емкость при нулевом смещении	Ф	0
EG	Ширина запрещенной зоны	эВ	1.11
IBV	Начальный ток пробоя, соответствующий напряжению BV (положительная величина)	А	$10^{-10}$
IBVL	Начальный ток пробоя низкого уровня	А	0
IKF	Предельный ток при высоком уровне инжекции	А	$\infty$
IS	Ток насыщения при T = 27°C	А	$10^{-14}$
ISR	Ток рекомбинации	А	0
NR	Коэффициент эмиссии для тока ISR	–	2
RS	Объемное сопротивление	Ом	0
TRS1	Линейный температурный коэффициент RS	1/С	0



Параметр	Описание	Ед. изм.	Значение по умолчанию
TRS2	Квадратичный температурный коэффициент RS	1/°C <sup>2</sup>	0
TT	Время переноса заряда	с	0
VJ	Контактная разность потенциалов	В	1
XTI	Температурный коэффициент тока насыщения	–	3
T_ABS	Абсолютная температура	°C	27
T_MEASURED	Температура измерений	°C	27
T_REL_GLOBAL	Относительная температура	°C	0
T_REL_LOCL	Разность между температурой диода и модели-прототипа	°C	0

Описание модели диода выглядит следующим образом:


.MODEL [Имя] [Тип] <П1 = ЗН1> <П2 = ЗН2> ...,

где Имя – имя модели;

Тип – D для плоскостного диода;

П1, П2... – наименования параметров;

ЗН1, ЗН2... – значения параметров.

 D1 14 0 DMOD  
.MODEL DMOD D

#### 4.3.9. Биполярные транзисторы:

Qимя NC NB NE [Имя модели] <area> ,

где Q – идентификатор биполярного транзистора;

имя – обозначение элемента на схеме;

NC, NB, NE – узлы подключения коллектора, базы, эмиттера биполярного транзистора соответственно;

Имя модели – имя модели транзистора;

area – относительное значение площади прибора (по умолчанию 1,0).

*Примечание.* При анализе по постоянному току используется модель Гумеля – Пунна, а в случае отсутствия ряда параметров этой модели используется модель Эберса – Молла.

Описание модели биполярного транзистора выглядит следующим образом:

.MODEL [Имя] [Тип] <П1 = ЗН1> <П2 = ЗН2> .....,

где Имя – имя модели;

Тип – один из следующих типов:

NPN – модель транзистора с проводимостью n-типа,

PNP – модель транзистора с проводимостью p-типа;

П1, П2... – наименования параметров;

ЗН1, ЗН2... – значения параметров.

Параметры модели биполярного транзистора приведены в табл. 4.7.

Таблица 4.7

Параметры модели биполярного транзистора

Параметр	Описание	Ед. изм.	Значение по умолчанию
AF	Показатель степени в формуле фликер-шума	–	1
BF	Коэффициент передачи тока в нормальном режиме в схеме с ОЭ	–	100
BR	Коэффициент передачи тока в инверсном режиме в схеме с ОЭ	–	1
CJC	Емкость коллекторного перехода при нулевом смещении	Ф	0
CJE	Емкость эмиттерного перехода при нулевом смещении	пФ	0
CJS	Емкость коллектор – подложка при нулевом смещении	Ф	0
EG	Ширина запрещенной зоны	эВ	1.11
FC	Коэффициент нелинейности барьерных емкостей прямосмещенных переходов	–	0,5
IKF	Ток начала спада зависимости BF от тока коллектора в нормальном режиме	А	$\infty$
IKR	Ток начала спада зависимости BF от тока эмиттера в инверсном режиме	А	$\infty$
IRB	Ток базы, при котором сопротивление базы уменьшается на 50 % полного перепада между RB и RBM	А	$\infty$
IS	Ток насыщения при T = 27 °C	А	$10^{-15}$
ISC	Ток насыщения утечки перехода база – коллектор	А	0
ISE	Ток насыщения утечки перехода база – эмиттер	А	0
ISS	Обратный ток перехода подложки	А	0
KF	Коэффициент, определяющий спектральную плотность фликер-шума	–	0
PTF	Дополнительный фазовый сдвиг на граничной частоте транзистора	град	0
RB	Объемное сопротивление базы при нулевом смещении база – эмиттер	Ом	0
RBM	Минимальное сопротивление базы при больших токах	Ом	RB
RC	Объемное сопротивление коллектора	Ом	0

Параметр	Описание	Ед. изм.	Значение по умолчанию
RE	Объемное сопротивление эмиттера	Ом	0
TF	Время переноса заряда через базу в нормальном режиме	с	0
TR	Время переноса заряда через базу в инверсном режиме	с	0
TRB1	Линейный температурный коэффициент RB	1/°C	0
TRB2	Квадратичный температурный коэффициент RB	1/°C <sup>2</sup>	0
TRC1	Линейный температурный коэффициент RC	1/°C	0
TRC2	Квадратичный температурный коэффициент RC	1/°C <sup>2</sup>	0
TRE1	Линейный температурный коэффициент RE	1/°C	0
TRE2	Квадратичный температурный коэффициент RE	1/°C <sup>2</sup>	0
TRM1	Линейный температурный коэффициент RM	1/°C	0
TRM2	Квадратичный температурный коэффициент RM	1/°C <sup>2</sup>	0
VAE	Напряжение Эрли в нормальном режиме	В	∞
VAR	Напряжение Эрли в инверсном режиме	В	∞
VJC	Контактная разность потенциалов перехода база – коллектор	В	0,75
VJE	Контактная разность потенциалов перехода база – эмиттер	В	0,75
VJS	Контактная разность потенциалов перехода коллектор – подложка	В	0,75
VTF	Напряжение, характеризующее зависимость TF от смещения база – коллектор	В	∞
XTB	Температурный коэффициент BF и BR	–	0
XTI	Температурный коэффициент IS	–	3
T_ABS	Абсолютная температура	°C	27
T_MEASURED	Температура измерений	°C	27



Пример: Q1 14 2 13 KT3102A  
.MODEL KT3102A NPN (BF = 500)

#### 4.3.10. Полевые транзисторы с изолированным затвором (МОП-транзисторы) (MOSFET):

M имя ND NG NS NB [Имя модели] <L = [valL]> <W = [valW]>  
+<AD = [valAD]> <AS = [valAS]> <PD = [valPD]> <PS = [valPS]>  
+ <NRD = [valNRD]> <NRS = [valNRS]> ,

где M – идентификатор МОП-транзистора;  
имя – обозначение элемента на схеме;  
ND, NG, NS – узлы подключения соответственно стока, затвора, истока  
МОП-транзистора;

NB – узел подключения подложки;

Имя модели – имя модели транзистора;

valL – длина канала (может устанавливаться пользователем);

valW – ширина канала (может устанавливаться пользователем);

valAD – площадь стока, в метрах;

valAS – площадь истока, в метрах;

valPD – периметр стока, в метрах;

valPS – периметр истока, в метрах;

valNRD – относительное сопротивление стока;

valNRS – относительное сопротивление истока.

Описание модели МОП-транзистора в общем случае имеет вид

.MODEL [Имя] [Тип] <П1 = ЗН1> <П2 = ЗН2> .....

где Имя – имя модели;

Тип – один из следующих типов:

NMOS – модель МОП-транзистора с каналом n-типа,

PMOS – модель МОП-транзистора с каналом p-типа;

П1, П2... – наименования параметров;

ЗН1, ЗН2... – значения параметров. Параметрам, не указанным в описании модели, присваиваются значения по умолчанию.

M1 14 2 13 0 PNOM L = 25U W = 12U

M2A 0 2 100 100 NW L = 33U W = 12U AD = 288P AS = 288P PD = 60U

#### 4.3.11. Полевые транзисторы с управляющим p-n-переходом:

J имя ND NG NS [Имя модели] [area],

где J – идентификатор полевого транзистора с управляющим p-n-переходом;

имя – обозначение элемента на схеме;

ND, NG, NS – узлы подключения стока, затвора и истока полевого транзистора соответственно;

Имя модели – имя модели транзистора;  
area – относительное значение площади прибора (по умолчанию 1,0).

Описание модели полевого транзистора с управляющим р-n-переходом в общем случае имеет следующий вид:

.MODEL [Имя] [Тип] <П1 = ЗН1> <П2 = ЗН2> ... ,

где Имя – имя модели;


Тип – один из следующих типов:

NJF – модель полевого транзистора с каналом типа n.

PJF – модель полевого транзистора с каналом типа p;

П1, П2... – наименования параметров;

ЗН1, ЗН2... – значения параметров. Параметрам, не указанным в описании модели, присваиваются значения по умолчанию.

 J13 22 14 23 JNOM 2.0

#### 4.3.12. Транзисторы на основе арсенида галлия (GASFET):

В имя ND NG NS [Имя модели] < Коэфф. кратности area> ,

где В – идентификатор транзистора на основе арсенида галлия;

имя – обозначение элемента на схеме;

ND, NG, NS – узлы подключения стока, затвора и истока полевого транзистора соответственно;

Имя модели – имя модели транзистора.

Описание модели транзистора на основе арсенида галлия в общем случае имеет следующий вид:

.MODEL [Имя] [Тип] <П1=ЗН1> <П2=ЗН2> ....

где Имя – имя модели;

Тип – GASFET-модель транзистора на основе арсенида галлия с n-каналом;

П1,П2... – наименования параметров;

ЗН1,ЗН2... – значения параметров. Параметрам, не указанным в описании модели, присваиваются значения по умолчанию.

 BIN 100 1 0 GFAST  
V13 22 14 23 GNOM 2.0

#### 4.3.13. Независимые источники тока и напряжения:

Vимя N+ N – <DC [ЗН1]> <АС [ЗН2] <ФАЗА>> <ТЗАК> <ПАРАМЕТРЫ> ,

Имя N+ N – <DC [ЗН1]> <АС [ЗН2] <ФАЗА>> <ТЗАК> <ПАРАМЕТРЫ1> ,

где V (I) – идентификатор источника напряжения (тока);

имя – обозначение источника на схеме;

N+, N- – соответственно положительный и отрицательный узлы подключения источника (ток течет от положительного узла через источник к отрицательному);

DC – обозначение источника постоянного напряжения (тока);

ЗН1 – номинальное значение источника в вольтах (амперах);  
АС – обозначение источника переменного (синусоидального) напряжения (тока) для частотного анализа;

ЗН2 – амплитуда сигнала в вольтах (амперах);

ФАЗА – фаза переменной составляющей в градусах (если эта величина не задана, то она принимается равной нулю);

ТЗАК – закон, по которому изменяется напряжение или ток источника во времени. Применяется при анализе переходного процесса. Может быть задан один из следующих законов:

PULSE – для источника трапецеидальных импульсов;

EXP – для источника экспоненциальных импульсов;

SIN – для источника синусоидального напряжения;

PWL – для кусочно-линейного источника;

SFFN – для амплитудно-модулированного источника;

ПАРАМЕТРЫ – параметры источника во временной области (свои для каждого конкретного источника) задаются.

#### 4.3.13.1. Источник трапецеидальных импульсов:

PULSE (V1 V2 TD TR TF PW PER),

PULSE (I1 I2 TD TR TF PW PER),

где PULSE – идентификатор импульсного источника;

V1 (I1) – постоянная составляющая, в вольтах (амперах);

V2 (I2) – максимальное значение сигнала, в вольтах (амперах);

TD – время задержки в секундах (по умолчанию равно 0);

TR – длительность переднего фронта импульса, (по умолчанию равна TSTEP);

TF – длительность заднего фронта импульса, в секундах (по умолчанию равна TSTEP);

PW – длительность вершины импульса, в секундах (по умолчанию равна TSTEP);

PER – период импульса, в секундах (по умолчанию равен TSTOP).

Перечисленные параметры пояснены на рис. 4.2.

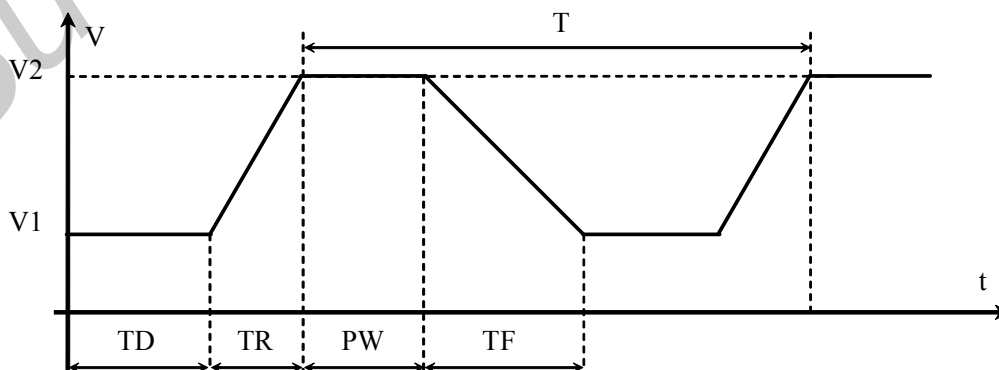



Рис. 4.2. Параметры источника трапецеидальных импульсов

*Примечание.* TSTEP – приращение времени при расчете переходного процесса;

TSTOP – конечная временная точка при расчете переходного процесса.

 VIN 100 0 PULSE (0 5 0 0 1 2); источник прямоугольных импульсов с \* амплитудой 5В, длительностью вершины 1с и периодом 2с

VIN 100 0 PULSE (0 5 0 1 1 0 2); источник треугольных импульсов

#### 4.3.13.2. Синусоидальный источник:

SIN (V1 V2 FC TD DF PHASE),

SIN (I1 I2 FC TD DF PHASE),

где SIN – идентификатор синусоидального источника;

V1(I1) – постоянная составляющая, В (А)

(обязательный параметр);

V2(I2) – максимальное значение сигнала, В (А)

(обязательный параметр);

FC – частота сигнала, в герцах (по умолчанию 1/STOP);

TD – задержка, в секундах (по умолчанию равна 0);


DF – декремент затухания, 1/с (по умолчанию равен 0);

PHASE – фаза, в градусах (по умолчанию равна 0).

*Примечание.* При наличии затухания величина сигнала синусоидального источника определяется по формулам

$$V(t) = V1 + V2 * \text{EXP}(-(T - TD) * DF) * \text{SIN}(2 * \text{PI} * FC * (T - TD) - \text{PHASE}),$$

$$I(t) = I1 + I2 * \text{EXP}(-(T - TD) * DF) * \text{SIN}(2 * \text{PI} * FC * (T - TD) - \text{PHASE}).$$

 VIN 100 0 SIN (0 5 50)  
V1 5 4 SIN (0 25 1KHZ)

#### 4.3.13.3. Кусочно-линейный источник:


PWL (T1 V1 T2 V2 ..... TN VN),

PWL (T1 I1 T2 I2 ..... TN IN),

где PWL – идентификатор кусочно-линейного источника;

T1...TN – длительности интервалов;

V1...VN (I1.... IN) – значения уровней сигнала по окончании соответствующего интервала.

 VIN 1 0 PWL (0 1 2N 1 3N 5 4N 10)

#### 4.3.13.4. Экспоненциальный источник:

EXP (V1 V2 TD TER TR TFR),

EXP (I1 I2 TD TER TR TFR),

где EXP – идентификатор экспоненциального источника;

VI (I1) – постоянная составляющая, вольт (ампер);


V2(I2) – максимальное значение сигнала, вольт (ампер);

TD – время задержки (по умолчанию равно 0);

TER – постоянная времени нарастания переднего фронта, в секундах (по умолчанию равна TSTEP);

TR – постоянная времени начала спада заднего фронта, в секундах (по умолчанию равна TD+TSTEP);

TFR – постоянная времени спада, в секундах (по умолчанию равна TSTEP).

 VIN 1 0 EXP (0 .2 2U 20U 40U 20U)  
I20 1 0 EXP (0 .2 2U 20U 40U 20U) .

#### 4.3.13.5. Амплитудно-модулированный источник:

SFFM (VI V2 FC MOD FM),

SFFM (I1 I2 FC MOD FM),

где SFFM – идентификатор амплитудно-модулированного источника;

V1(I1) – постоянная составляющая, вольт (ампер) (обязательный параметр);

V2(I2) – максимальное значение сигнала, вольт (ампер) (обязательный параметр);

FC – частота сигнала, в герцах (по умолчанию 1/STOP);


MOD – коэффициент амплитудной модуляции (по умолчанию равен 0);

FM – частота несущей, в герцах (по умолчанию 1/STOP).

Величина сигнала модулированного источника в момент времени t определяется по формулам:

$$V(t) = V1 + V2 \cdot \sin((2 \cdot \pi \cdot FC \cdot T) + MOD \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot FM \cdot T)),$$

$$I(t) = I1 + I2 \cdot \sin((2 \cdot \pi \cdot FC \cdot T) + MOD \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot FM \cdot T)).$$

 VIN 1 0 SFFM (0 2 100MEGH 5 4KH)  
I20 1 0 SFFM (0 2MA 100MEG 5 4KH)

#### 4.3.14. Управляемые источники напряжения и тока

Нелинейные зависимые источники могут управляться от нескольких источников, и их значение определяется с помощью полинома. Полиномом для одного аргумента V1 (одного источника) является

$$V = a_0 + a_1 \cdot V1 + a_2 \cdot V1^2 + a_3 \cdot V1^3 + \dots$$

Полиномом для двух аргументов V1, V2 (двух управляющих источников) является

$$V = a_0 + a_1 \cdot V1 + a_2 \cdot V2 + a_3 \cdot V1^2 + a_4 \cdot V1 \cdot V2 + a_5 \cdot V2^2 + a_6 \cdot V1^3 + \dots$$



Полиномом для трех аргументов  $V_1, V_2, V_3$  (трех управляющих источников) является

$$V = a_0 + a_1 \cdot V_1 + a_2 \cdot V_2 + a_3 \cdot V_3 + a_4 \cdot V_1^2 + a_5 \cdot V_1 \cdot V_2 + a_6 \cdot V_1 \cdot V_3 + a_7 \cdot V_2^2 + \dots$$

#### 4.3.14.1. Источники тока, управляемые напряжением:

Гимя N+ N- <Vимя> <NY+> <NY-> [Крутизна]

или

Гимя N+ N- POLY(ND) <Vимя> <NY+> <NY-> [Значение коэффициента],

где G – идентификатор источника тока, управляемого напряжением;

имя – обозначение элемента на схеме;

N+, N- соответственно положительный и отрицательный узлы подключения источника тока;

Vимя – имя управляющего источника напряжения; управляющий источник напряжения должен быть независимым и не равным нулю;

NY+, NY- – положительный и отрицательный узлы подключения управляющего напряжения;

Крутизна – крутизна источника;

POLY – указывает на то, что управляемый источник описывается с помощью полинома;

ND – число аргументов, входящих в полиномиальную зависимость;

Значение коэффициента – коэффициенты полинома.

GBUF 1 2 10 11 1.0

 GNON 100 101 POLY(2) 3 0 2 0 0.0 13.6 .2 005

#### 4.3.14.2. Источники тока, управляемые током:

Фимя N+ N- <Иимя> <NY+> <NY-> [Значение]

или

Фимя N+ N- POLY(ND) <Иимя> <NY+> <NY-> [Значение коэффициентов],

где F – идентификатор источника тока, управляемого током;

имя – обозначение элемента на схеме;

N+, N- – положительный и отрицательный узлы подключения источника тока соответственно;

Иимя – имя управляющего источника тока; ток, протекающий через управляющий источник, определяет выходной ток; управляющий источник тока должен быть независимым и не равным нулю;


NY+, NY- – положительный и отрицательный узлы подключения источника управляющего тока соответственно;

POLY – указывает на то, что управляемый источник описывается с помощью полинома;

ND – число аргументов, входящих в полиномиальную зависимость;

Значение – коэффициент пропорциональности;

Значение коэффициентов – коэффициенты полинома.

 FSSENS 1 2 VSSENS 10.0  
FAMP 13 0 VIN 500

#### 4.3.14.3. Источники напряжения, управляемые током:

Имя N+ N- <Имя> <NY+> <NY-> [Крутизна]

или

Имя N+ N- POLY(ND) <Имя> <NY+> <NY-> [Значение коэффициентов],  
где Н – идентификатор источника напряжения, управляемого током;

имя – обозначение элемента на схеме;

N+, N- – соответственно положительный и отрицательный узлы подключения источника тока;

Имя – имя управляющего источника тока; ток, протекающий через управляющий источник, определяет выходной ток; управляющий источник тока должен быть независимым и не равным нулю;

Крутизна – крутизна источника;

POLY – указывает на то, что управляемый источник описывается с помощью полинома;

ND – число аргументов, входящих в полиномиальную зависимость;

Значение коэффициентов – коэффициенты полинома.

HSENS 1 2 ISENS 10.0

 HAMP 13 0 IN 500

HNOLIN 100 101 POLY(2) ICNTRL1 ICNTRL2 0.0 13.6 .2 .005

#### 4.3.14.4. Источники напряжения, управляемые напряжением:

Еимя N+ N- <Vимя> <NY+> <NY-> [Значение]

или

Еимя N+ N- POLY(ND) <Vимя> <NY+> <NY-> [Значение коэффициентов],  
где Е – идентификатор источника напряжения, управляемого напряжением:

имя – обозначение элемента на схеме;

N+, N- – соответственно положительный и отрицательный узлы подключения источника напряжения;

Vимя – имя управляющего источника напряжения; управляющий источник напряжения должен быть независимым и не равным нулю;


NY+, NY- – соответственно положительный и отрицательный узлы подключения управляющего источника;

Значение – коэффициент пропорциональности;

POLY – указывает на то, что управляемый источник описывается с помощью полинома;

ND – число аргументов, входящих в полиномиальную зависимость;

Значение коэффициентов – коэффициенты полинома.

 EBUF 1 2 10 11 1.0

ENON 100 101 POLY(2) 3 0 4 0 1.1 0.0 13.6 2 9.65 0.003

Примечания:

1. Первая форма записи отражает линейную зависимость выходной величины от входной. Рассмотрим EBUF: здесь 1 и 2 – выходные узлы; 10 и 11 – управляющие узлы; 1.0 – крутизна;  $V_{\text{вых}}=1,0 \cdot V_{\text{вх}}$ .

2. Вторая форма записи отражает нелинейную зависимость выходной величины от входной. Рассмотрим ENON: здесь 100 и 101 – выходные узлы; POLY(2) – наличие двух управляющих источника; 3 и 0 – узлы подключения первого управляющего источника V1; 4 и 0 – узлы подключения второго управляющего источника V2; 1.1, 0.0, 13.6, 2, 9.65, 0.003 – коэффициенты полинома; при этом

$$V_{\text{вых}} = 1.1 + 0.0 \cdot V1 + 13.6 \cdot V2 + 2 \cdot V1 \cdot V1 + 9.65 \cdot V1 \cdot V2 + 0.003 \cdot V2 \cdot V2.$$

#### 4.3.15. Подсхемы

Обращение к подсхеме в программе имеет следующий вид:

X<имя> [узел] [имя подсхемы],

при этом должно иметься описание подсхемы в виде

```
.SUBCKT [имя] [Узел]
```

```
.....  
.ENDS
```

где SUBCKT – запись, описывающая подсхему;

узел – узлы подключения подсхемы;

X – идентификатор подсхемы;

Узел – узлы подключения подсхемы (для вложенной);

.ENDS – оператор конца описания подсхемы.

При вызове подсхемы запись [X . . . ] замещается описанием подсхемы. При вызове подсхемы номера узлов, указанные в вызывающей записи, замещают номера узлов, заданные при описании подсхемы. Уровень вложенности может быть любой, но нельзя допускать зацикливания, т. е. если подсхема А вызывает подсхему В, то из подсхемы В нельзя снова вызывать подсхему А.

```
.SUBCKT OPAMP 1 2 101 102
```

```
X1 1 2 4 UNITAMP
```

```
.ENDS
```

```
.SUBCKT UNITAMP 1 2 5
```

```
R1 4 6 10K
```

```
.....
```

```
.ENDS
```



#### 4.4. Директивы управления

Записи с директивами управления позволяют задавать требуемый вид анализа, его параметры, форму представления выходной информации и ряд величин, определяющих ход вычислительного процесса. Рассмотрим директивы управления более подробно.

#### 4.4.1. Директива [.TEMP]:

.TEMP t1 <t2<t3...>>



Директива [.TEMP] задает различные температуры t1,t2,t3,..., в градусах по Цельсию, для каждой из которых производится моделирование схемы. Величина t1, меньшая -223 градусов, игнорируется. Параметры моделей задаются при номинальной температуре, которая может быть изменена заданием директивы [.OPTIONS] с опцией TNOM. Если директива [.TEMP] отсутствует, то моделирование проводится при температуре, равной номинальной.

 .TEMP -27 0 27  
 .TEMP -55.0 25 155.5

#### 4.4.2. Директива [.NODESET]

.NODESET V(Номер узла) = [Напряжение] <...>

Данная директива позволяет задать начальные напряжения перечисленных в ней узлов для анализа по постоянному току и расчета переходных процессов. Она должна применяться при моделировании схем с двумя и более устойчивыми состояниями для улучшения сходимости расчета по постоянному току и выбора правильной рабочей точки. Применение директивы [.NODESET] при расчете схем с одним устойчивым состоянием позволяет в ряде случаев снизить затраты машинного времени на моделирование и не влияет на окончательную рабочую точку.

 .NODESET V(22) = 2.1 V(100) = 0 V(5) = -12  
 .NODESET V(11) = -5.5V V(100) = 100 V(5) = -1V



#### 4.4.3. Директива [.IC]:

.IC V(Номер узла)=[Напряжения] <...>

Директива [.IC] задает начальные условия при расчете переходных процессов для перечисленных в ней узлов. В зависимости от опции [UIC] в директиве [.TRAN] директива [.IC] может иметь различное действие:

а) при задании опции [UIC] в директиве [.TRAN] значения узловых напряжений, определенных в директиве [.IC], используются при расчете начальных условий в моделях емкости, диода, транзисторов, что эквивалентно заданию опции [IC=...] в каждом описании модели полупроводникового прибора, но в более удобной форме. При одновременном задании директивы [.IC] и опции [IC=...] принимается значение, указанное в опции. В директиве [.IC] должны быть обязательно заданы напряжения на всех источниках постоянного тока, определяющих начальные условия для полупроводниковых приборов;


б) если опция [UIC] в директиве [.TRAN] не задана, то перед моделированием определяется рабочая точка схемы по постоянному току, т. е. директива [.IC] не оказывает влияния на результат моделирования.

 .IC V(22) = 2.1 V(102) = 0 V(3) = -12  
 .IC V(11) = -22.3 V(102) = 100 V(3) = -1V

#### 4.4.4. Директива [.OP]:

.OP

При задании директивы [.OP] программа проводит анализ схемы по постоянному току. При этом индуктивности представляются в виде короткого замыкания, емкости закорачиваются. Данный вид анализа позволяет рассчитать токи активных элементов, рассеиваемые мощности всех источников напряжения. Определяются также линеаризованные параметры всех нелинейных управляемых источников и полупроводниковых элементов. При отсутствии этой директивы рабочие точки все равно рассчитываются, но в выходной файл выводится лишь список узловых напряжений.

 Пример: .OP

#### 4.4.5. Директива [.DC]:

.DC [Имя источника] VB1 VE1 VS1 <[Имя источника] VB2 VE2 VS2>

Директива [.DC] определяет источник напряжения или тока, для которого рассчитываются характеристики схемы по постоянному току, а также задает пределы изменения и шаг при построении передаточных характеристик схемы. В программе предусмотрен расчет передаточных характеристик при одновременном изменении параметров двух источников. В этом случае сначала будет изменяться значение параметра первого источника при каждом значении параметра второго источника, что используется при расчете вольт-амперных и выходных характеристик полупроводниковых приборов.


Опции директивы [.DC] означают:

VB1,VB2 – начальные напряжения или токи источников;

VE1,VE2 – конечные напряжения или токи источников;

VS1,VS2 – соответствующие приращения.

.DC VIN 0.25 2.2 0.1

 .DC VDS 0 10 0.5 VGS 0 5 1

.DC VCE 0 10 0.25 IB 0 10u Iu

#### 4.4.6. Директива [.TF]:

.TF [Выходная величина] [Входной источник]

Директива позволяет рассчитать на постоянном токе в режиме малого сигнала в зависимости от типов входного источника и выходной величины следующие характеристики:

- 1) передаточную характеристику по току или напряжению;
- 2) входное сопротивление;
- 3) выходное сопротивление.

 .TF V(10.2) VIN

.TF I(VS) VIN

#### 4.4.7. Директива [.TRAN]:

.TRAN</OP> TS TE <TB <TMAX> <UIC>

Директива [.TRAN] позволяет проводить расчет переходных процессов,

при этом:

TS – величина шага при выводе таблиц и графиков;

TE – время окончания расчета переходных процессов;

TB – начало переходного процесса (по умолчанию TB=0). В интервале времени [0, TB] расчет переходных процессов все равно производится для определения начальных условий, однако результаты расчета не запоминаются.

TMAX – максимальный шаг интегрирования. По умолчанию TMAX равен наименьшему из двух величин: TS либо (TE–TB)/50.

Опция [/OP] используется для вывода значений рабочей точки схемы.

Опция [UIC] позволяет использовать в качестве начальных условий значения параметров [IC=...], заданных при описании элементов схемы.

.TRAN 1ns 100ns

 .TRAN/OP 1ns 1000ns 100n

.TRAN 1 100 UIC

#### 4.4.8. Директива [.AC]:

.AC DEC ND FB FE

.AC LIN NP FB FE

.AC OCT NO FB FE

Директива определяет расчет электронной схемы по переменному току и позволяет выполнить анализ ее характеристик в заданном диапазоне частот. В схеме обязательно должен быть один независимый источник с параметром [AC].

Опции в директиве [.AC] означают:

DEC – изменение частоты по декадам;

ND – число точек в декаде;

LIN – линейное изменение частоты;

NP – число точек в диапазоне;

OCT – изменение частоты по октавам;

NO – число точек в октаве;

FB – начальная частота анализа;

FE – конечная частота анализа.

.AC DEC 10 1 10000

 .AC OCT 10 10 100K


.AC LIN 100 1K 10MEG

#### 4.4.9. Директива [.FOUR]:

.FOUR [Частота основной гармоники] [Выходные переменные]

Директива предназначена для проведения Фурье-анализа и соответственно определения гармонических составляющих выходного сигнала. При этом вычисляются амплитуды и фазы гармонических составляющих, а также их величины, отнесенные к амплитуде и фазе первой гармоники.


Директива [.FOUR] работает только совместно с директивой [.TRAN], число рассчитываемых гармоник равно 9.

 .FOUR 10K V(12) V(13) I(IVIN)  
 .FOUR 50HZ V(5) V(7)

#### 4.4.10. Директива [.SENS]:

.SENS [Выходная переменная] <[Выходная переменная]>

При наличии директивы [.SENS] производится анализ чувствительности на постоянном токе для всех перечисленных выходных переменных по отношению к каждому из параметров схемы.

 .SENS V(15) V(16.2) V(22)  
 .SENS V(2) I(VCC)

#### 4.4.11. Директива [.NOISE]:

.NOISE [Выходная переменная] [Входной источник]

Директива [.NOISE] предназначена для расчета шумовых характеристик и используется совместно с директивой [.AC]. Программа рассчитывает шумы для заданной выходной переменной, эквивалентные шумы, приведенные ко входному источнику, выводит таблицу весовых коэффициентов для каждого источника шумов в рамках частотного диапазона, определяемого параметром NSUM. Если NSUM=0, то таблица не выводится.

#### 4.4.12. Директива [.PLOT]:

.PLOT [DC] [AC] [NOISE] [TRAN] [ВыхПер] [НП] [ВП]

Директива предназначена для представления результатов расчета в виде таблиц и графиков, формируемых с помощью текстовых символов в файле \*.out.

Опции директивы:


[DC], [AC], [NOISE], [TRAN] – вид анализа, для которого выводится выходная информация;

[ВыхПер] – выходные переменные, для которых строится таблица и графики;

[НП] – нижний предел;

[ВП] – верхний предел.

При построении графика в программе автоматически определяются максимальная и минимальная величины выходных переменных и происходит масштабирование осей координат так, чтобы график подходил под эти размеры. Однако масштабированием можно управлять, если указать пределы осей координат. На один график одновременно можно вывести до 8 переменных.

 .PLOT DC V(3) V(2.3) V(R1) I(VIN) I(R2) IB(Q3) VBE(Q3)  
 .PLOT AC VM(2) VP(2) VM(3,4) VG(5) VDB(5) IR(6) II(6)  
 .PLOT NOISE INOISE ONOISE DB(INOISE) DB(ONOISE)  
 .PLOT TRAN V(3) V(2,3) (0,5V) ID(M2) I(VCC) (-50MA,50MA)

#### 4.4.13. Директива [.PROBE]:

.PROBE [Выходные переменные]

Директива предназначена для передачи данных в графический постпроцессор Probe и запуска последнего на исполнение. В результате выполнения директивы появляется возможность просмотра результатов моделирования в графическом виде. Если выходные переменные не указаны, то в дальнейшем в окне (см. рис. 3.13) возможно отобразить все токи, напряжения, мощности для данной схемы. В противном случае возможен только выбор из указанных выходных переменных.



.PROBE

.PROBE V(1) I(R)

#### 4.4.14. Директива [.LIB]:

.LIB [Имя библиотеки]

Директива служит для подключения библиотеки моделей компонентов.



.LIB NOM.LIB

.LIB C:\PSPICE\MYLIB.LIB

## 5. СОЗДАНИЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ БИБЛИОТЕК

Для полноценной работы в среде Orcad необходимо наличие библиотек, содержащих используемые разработчиком элементы. Многие библиотеки с описаниями зарубежных элементов, разработанные фирмами-производителями, можно найти с помощью Internet. К сожалению, отечественные производители не обеспечивают поддержку своих изделий в системах автоматизированного проектирования, поэтому при проектировании приходится либо использовать зарубежные аналоги, либо создавать свои библиотечные элементы.

Для создания библиотечного элемента, пригодного для моделирования с помощью программы Capture, необходимо:

1. Создать модель, описывающую функционирование элемента, в соответствии с соглашениями программы PSpice.
2. Создать условное графическое обозначение (УГО) элемента.
3. Связать УГО и модель в единый библиотечный элемент.

При дальнейшей разработке печатной платы необходимо также разработать чертеж посадочного места элемента и внедрить его в библиотечный элемент.

### 5.1. Создание моделей элементов

В зависимости от вида описываемого устройства все множество моделей можно разделить на два вида:

1. Модели, имеющие встроенное описание на языке PSpice. При создании пользовательской модели необходимо задать необходимые параметры.



Пример:

.MODEL D\_MY D VJ = 0.75

2. Модели, описываемые с помощью подсхем, содержащих описание электрической схемы устройства, а также набор параметров, значения которых задаются при использовании модели либо принимаются равными значениям по умолчанию.





Пример:

```
.SUBCKT MY_CIR IN OUT AGND
+ PARAMS: C1VAL=1 C2VAL=1 R1VAL=1 R2VAL=1 GAIN=10000
C1 IN N1 {C1VAL}
C2 N1 OUT {C2VAL}
R1 IN N1 {R1VAL}
R2 N1 OUT {R2VAL}
EAMP1 OUT AGND VALUE={V(AGND,N1)*GAIN}
.ENDS
```

Файлы с описаниями моделей имеют расширения \*.mod (содержит только одну модель) или \*.lib (содержит как одну, так и целую библиотеку моделей) и представляют собой текстовые файлы, которые в принципе могут создаваться в любом текстовом редакторе.

При создании моделей первого вида удобно пользоваться программой PSpice Model Editor, входящей в состав пакета Orcad, которая по паспортным данным рассчитывает параметры моделей полупроводниковых приборов (диодов, биполярных, полевых, статически индуцированных биполярных транзисторов, мощных МОП-транзисторов, транзисторов Дарлингтона, макромоделей операционных усилителей, компараторов напряжения, регуляторов напряжения, стабилизаторов напряжения и моделей магнитных сердечников). Отметим, что Orcad 9.2 Lite Edition позволяет рассчитать только модели диодов.

В качестве примера работы с программой PSpice Model Editor рассчитаем параметры модели полупроводникового диода. Сначала по команде File→Open указывается имя файла библиотеки моделей диодов (если такого файла не существует, то создается новый файл с расширением .lib по команде File→New). Далее по команде Model→New вводится имя модели диода и в предлагаемом списке типов моделей указывается его тип Diode (рис. 5.1).

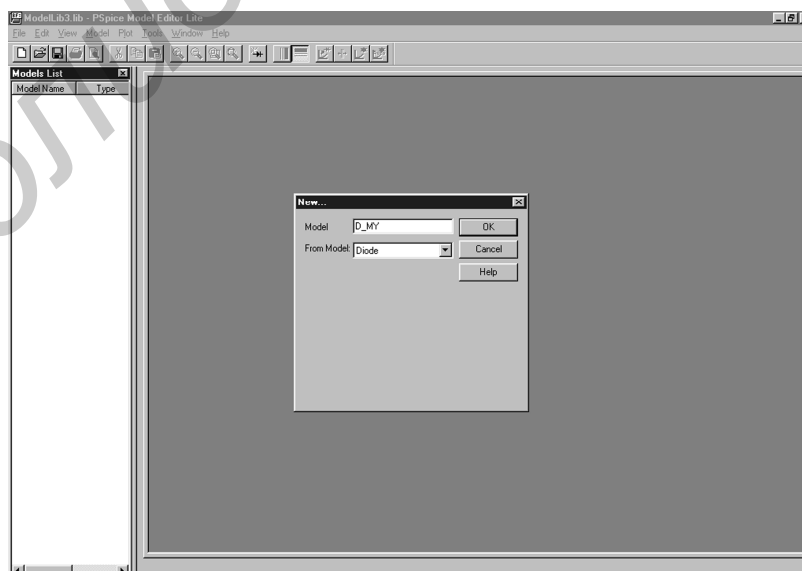


Рис. 5.1. Окно выбора типа модели

После ввода имени и типа модели на экран выводится список параметров модели (рис. 5.2). В левой части экрана приведен перечень моделей в данной библиотеке, в правой – перечень вводимых паспортных данных параметров математической модели и их графическое отображение, в нижней части окна выводится перечень параметров математической модели, рассчитанной на основе введенных паспортных данных. Первоначально всем параметрам модели присваиваются значения по умолчанию. Паспортные данные вводятся порциями, соответствующими различным режимам работы компонента.

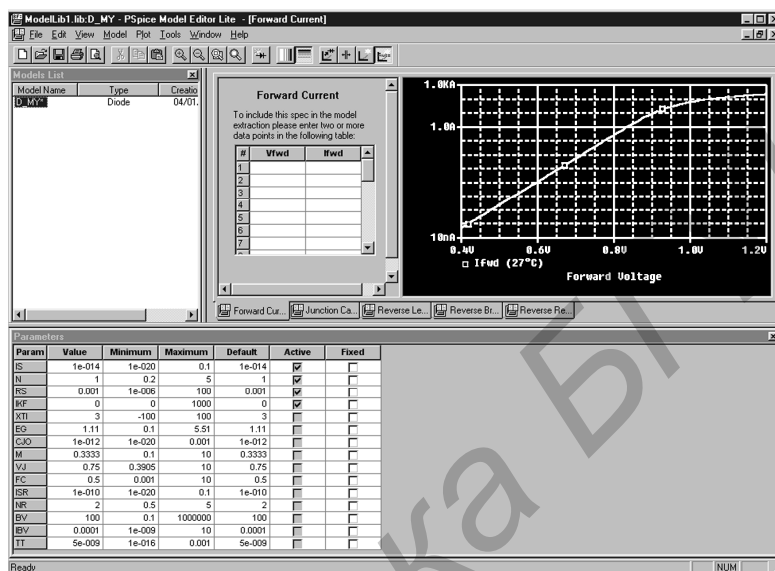


Рис. 5.2. Окно редактирования модели

Вводимые данные при нажатии соответствующей кнопки (ввод команды Extract) немедленно отображаются графически. На основании порции введенных данных по команде Extract рассчитывается ряд параметров математической модели, значения которых отображаются в окне Parameters (см. рис. 5.2). Редактирование значений отдельных рассчитанных параметров математической модели выполняется после щелчка в соответствующем окне. По команде Plot→Add Trace возможно построить семейство характеристик при вариации температуры или других параметров модели. По умолчанию предлагается построить графики характеристик при изменении температуры. Имя варьируемой переменной изменяется по команде Plot→Axis Settings. Например, для диодов возможна вариация параметров IS, N, RS, IKF, EG и XTI.

Построение модели завершается командой записи обновленных данных в библиотечный файл File→Save.

PSpice Model Editor позволяет также редактировать и создавать модели второго вида (в виде подсхем), однако редактирование происходит в текстовом виде и не имеет преимуществ перед обычным текстовым редактором.

Для создания сложных моделей второго вида можно рекомендовать использование программы Capture. При этом сначала создается принципиальная схе-

ма, на которой помещаются иерархические порты, указывающие вход и выход (например, приведенная на рис. 5.3, а). После этого необходимо создать файл, содержащий описание подсхемы. Для этого необходимо активизировать окно менеджера проекта, после чего из появившегося пункта меню Tools выбрать подпункт Create Netlist. В появившемся окне перейдем на вкладку PSpice и выберем в разделе Options пункт Create SubCircuit Format Netlist (рис. 5.3, б). После выбора места сохранения и имени файла нажмем кнопку ОК – и наша модель готова.

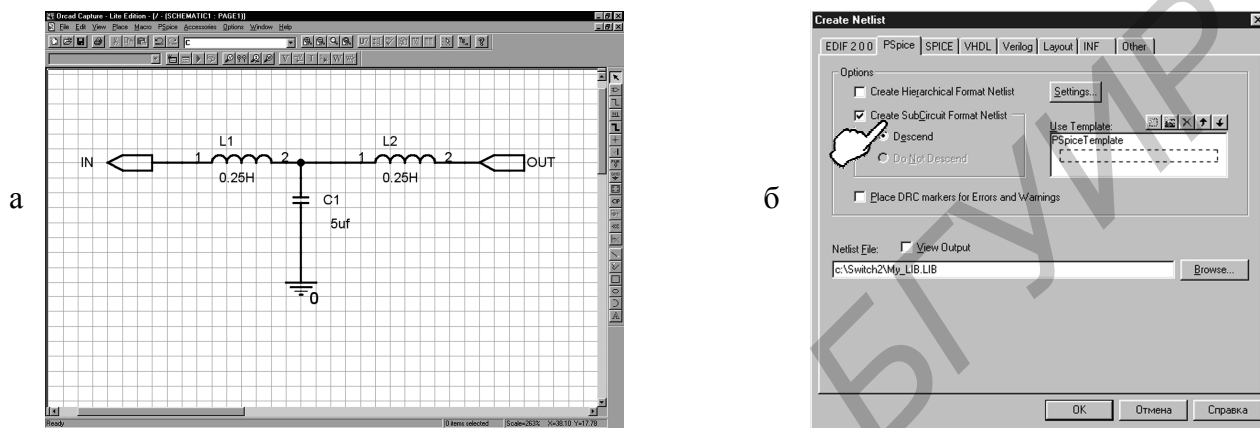


Рис. 5.3. Этапы создания модели второго вида

## 5.2. Создание законченного пользовательского элемента

Рассмотрим создание законченного библиотечного элемента на примере разработки ключа, замыкаемого в определенный момент времени.

1. Разработаем модель ключа, для чего создадим текстовый файл, описывающий наше устройство с использованием источника трапецеидальных импульсов и ключа, управляемого напряжением:

```
.SUBCKT Switch 1 2 PARAMS:
+ tClose=0; момент замыкания ключа
+ ttran=1u; время срабатывания ключа
+ Rclosed=0.01; сопротивление в закрытом состоянии
+ Ropen=1Meg ; сопротивление в открытом состоянии
V1 3 0 pulse(0 1 {tClose} {ttran} 1 10k 11k)
S1 1 2 3 0 Smod
.model Smod Vswitch(Ron={Rclosed} Roff={Ropen})
.ends
```

Сохраним полученный файл под именем Switch.lib.

2. Запустим программу PSpice Model Editor. В меню File выберем пункт Create Capture Parts. В появившемся окне (рис. 5.4) в строке Enter Input Model Library укажем файл, содержащий созданную модель (C:\Switch\Switch.LIB), при этом в строке Enter Output Part Library появится предлагаемое название файла с описанием создаваемого элемента (C:\Switch\Switch.olb), с чем мы со-

гласимся, нажав кнопку ОК. После этого будет создан файл библиотеки

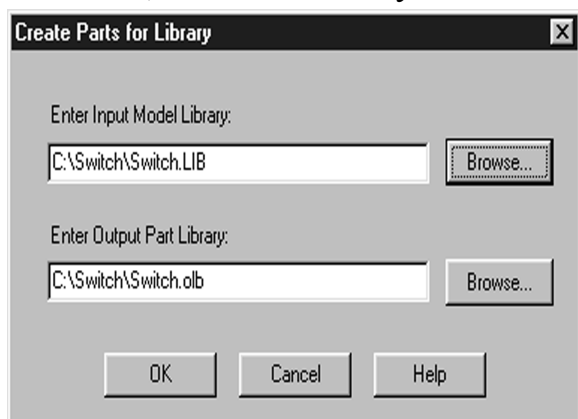
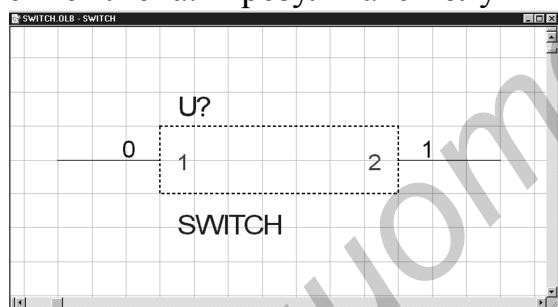


Рис. 5.4. Окно создания элемента в программе PSpice Model Editor

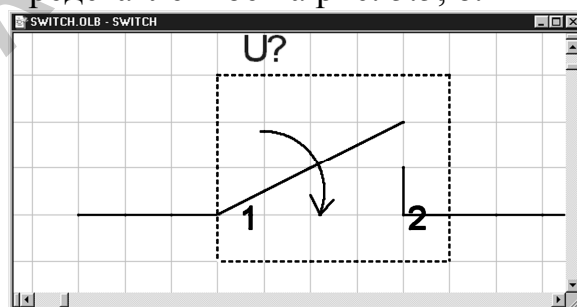
Switch.olb. Отметим, что аналогичный результат можно получить с помощью программы Capture, для чего необходимо в меню Tools выбрать пункт Generate Part. При этом также происходит обращение к программе PSpice Model Editor, однако без появления оконного интерфейса последней. Генерация элементов по умолчанию происходит на основе библиотеки C:\ProgramFiles\OrcadLite\Capture\Library\PSpice\model.edc. При необходимости изменения этой установки нужно в меню программы PSpice Model Editor выбрать

пункт Tools→Options и изменить пункт Base Part On.

3. В программе Capture откроем библиотеку Switch.olb (File→Open→Library→Switch.olb). В появившемся окне менеджера проекта дважды щелкнем на названии элемента Switch, после чего появится окно с изображением символа элемента, представленное на рис. 5.5, а. Пунктирная линия очерчивает границы элемента, которые легко изменяются с помощью мыши. При использовании элемента в схеме граница не изображается. С помощью панели инструментов, расположенной справа в главном окне, нарисуем условное графическое обозначение ключа. В результате получим УГО, представленное на рис. 5.5, б.



а



б

Рис. 5.5. Окно с изображением УГО элемента

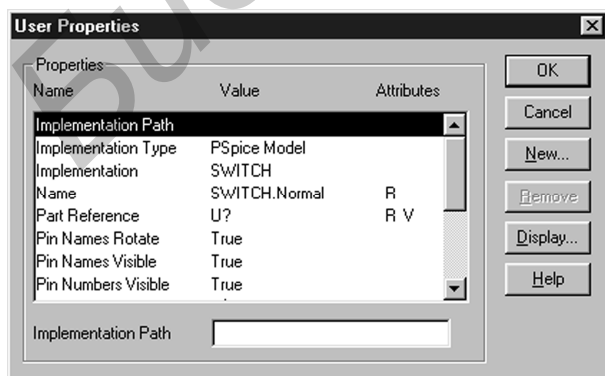


Рис. 5.6. Окно User Properties

Дважды щелкнем левой кнопкой мыши на белом поле окна (см. рис. 5.5, б). В результате появится окно User Properties (рис. 5.6). Сделаем невидимыми номера узлов, для чего щелкнем на строчке Pin Number Visible, после чего в нижней части окна (см. рис. 5.5) изменим значение с True на False. Сделаем видимым параметр TCLOSE, для чего дважды щелкнем левой кнопкой мыши на строчке TCLOSE, после чего в появившемся

окне Display Properties (рис. 5.7) в группе Display Format активизируем переключатель Name and Value.

При необходимости таким же образом можно сделать видимыми сопротивления ключа в открытом и закрытом состояниях и другие параметры.

Закроем окно User Properties, нажав кнопку ОК.

Графическое изображение получившегося элемента приведено на рис. 5.8.

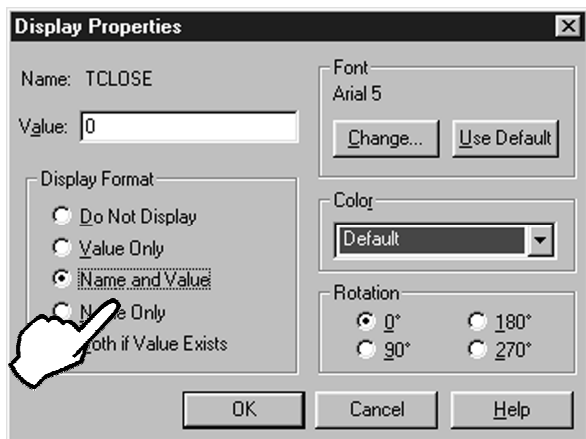


Рис. 5.7. Окно Display Properties

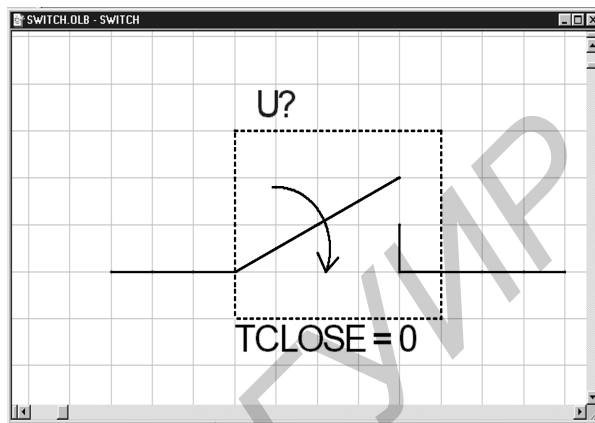


Рис. 5.8. Графическое изображение элемента

Сохраним библиотеку, выбрав пункт Save меню File. Создание пользовательского библиотечного элемента закончено.

Проверим функционирование нашего элемента, для чего создадим новый проект и соберем схему, представленную на рис. 5.9. На рис. 5.10 а, б приведены графики выходного напряжения при значениях параметра TCLOSE, равных 0 и 5 с соответственно.

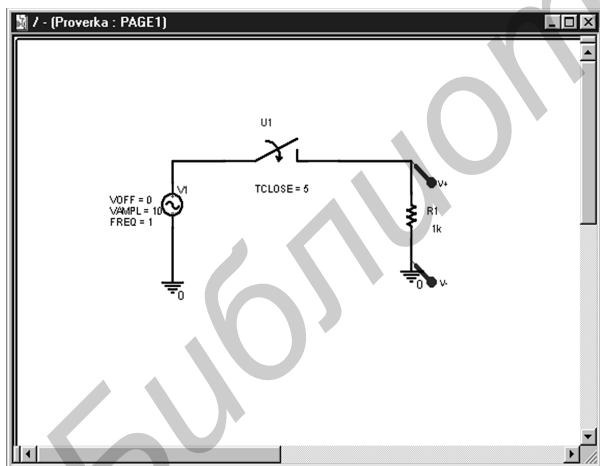


Рис. 5.9. Схема для проверки функционирования элемента

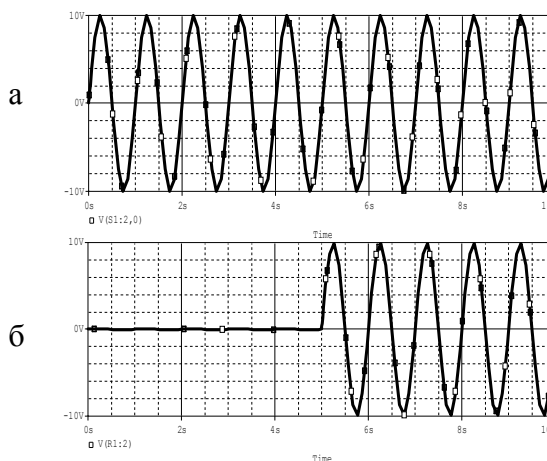


Рис. 5.10. Графики выходного напряжения

Из рис. 5.10 мы видим, что созданный библиотечный элемент функционирует правильно, т. е. замыкание ключа происходит в заданный момент времени. Небольшое прохождение входного сигнала на выход при разомкнутом контакте обусловлено наличием сопротивления Ropen, которое мы приняли равным 1МОм. Увеличение Ropen приближает созданный элемент к идеальному.

Единственным недостатком созданного элемента является то, что он имеет позиционное обозначение U, что не соответствует принятому стандартному обозначению ключевого элемента S. Для исправления этого недостатка вновь откроем библиотеку с нашим элементом, для чего в программе Capture в меню выберем пункты File→Open→Library→Switch.olb. Затем выберем пункты меню Options→Package Properties. В появившемся окне Edit Part Properties в поле Part Reference Prefix заменим U на S.

Если при использовании пользовательского элемента в схеме программа Capture не может найти созданную библиотеку с моделью элемента и выдает соответствующее сообщение об ошибке (например ERROR – Subcircuit Switch used by X\_S1 is undefined), то необходимо открыть окно редактирования профиля моделирования (см. рис. 3.12), перейти на закладку Libraries, указать в строке Filename имя и путь к библиотеке, после чего либо сделать созданную библиотеку глобальной (доступной всем проектам), нажав кнопку Add As Global, либо добавить ее только к созданному проекту, нажав кнопку Add to Design (рис. 5.11).

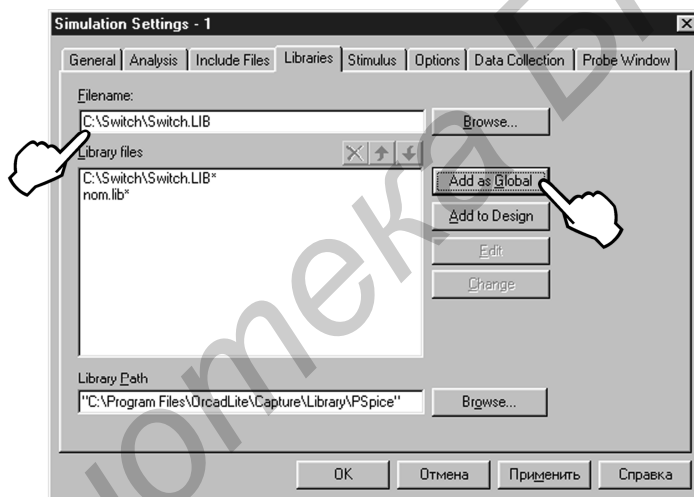


Рис. 5.11. Объявление созданной библиотеки в качестве глобальной

Рассмотрим второй путь создания библиотечного элемента, при котором файл \*.olb не генерируется в автоматическом режиме, а создается вручную.

1. Разработаем модель ключа так же, как это было сделано выше.
2. Запустим программу Capture и создадим новую библиотеку (File→New→Library). Присвоим новой библиотеке имя Switch2.olb, для чего сохраним ее под этим именем командой Save As. Создадим новый элемент, для чего выделим в менеджере проекта заголовок библиотеки одним щелчком левой кнопки мыши, затем щелкнем правой кнопкой и выберем пункт New Part (рис. 5.12). В результате появится окно New Part Properties (рис. 5.13).

В графе Name данного окна укажем имя элемента (Switch). В графе Part Reference Prefix необходимо указать обозначение элемента на схеме (например, для резистора – R, для конденсатора – C и т. д.). Для ключа выберем стандарт-

ное обозначение S. В графе PCB Footprint указывается посадочное место, которое будет использоваться при разработке печатной платы. Так как в дальнейшем не предполагается использовать наш элемент для разработки печатной платы, то оставим эту графу пустой.

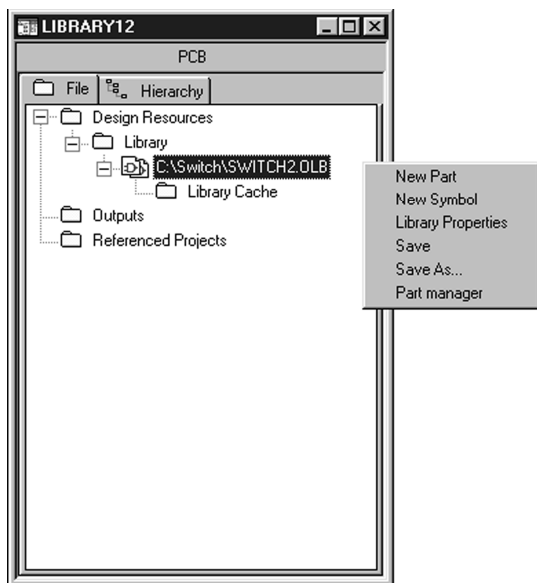


Рис. 5.12. Создание нового элемента

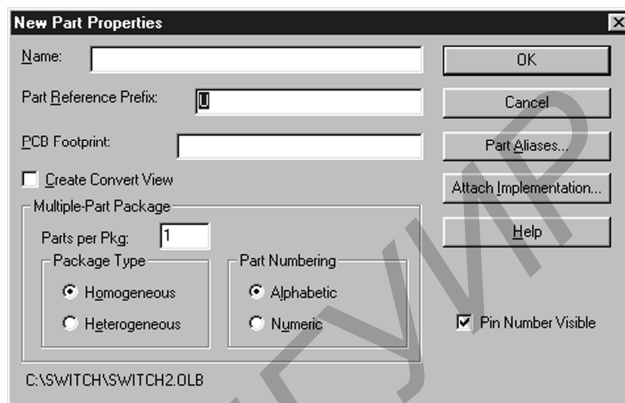


Рис. 5.13. Окно New Part Properties

Переключатель **Create Convert View** предназначен для создания альтернативного изображения элемента (если существуют несколько вариантов принятых обозначений).

Раздел **Multiple-Part Package** предназначен для указания количества элементов в одном корпусе, при этом элементы могут быть как однотипными (Homogeneous), например, все элементы – инверторы, так и разнотипными (Heterogeneous), например, кроме инверторов в корпус входят также элементы ИЛИ.

Раздел **Part Numbering** позволяет указать способ нумерации элементов: Alphabetic – буквенный, Numeric – числовой.

Кнопка **Part Aliases** позволяет присвоить элементу один или несколько псевдонимов, что позволяет уменьшить размер библиотеки за счет использования одного библиотечного элемента для описания различных приборов с одинаковым функциональным назначением (например: K164ЛА7, K561ЛА7, K1564ЛА7).

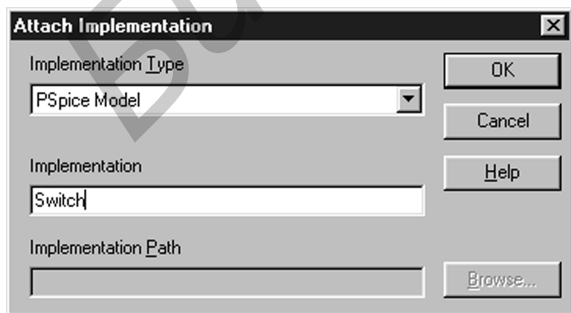


Рис. 5.14. Создание связи с PSpice моделью

Кнопка **Attach Implementation** позволяет добавить описание, в том числе модель для программы PSpice (рис. 5.14). В графе Implementation укажем имя модели Switch.

После добавления модели закроем окно (см. рис. 5.13), нажав кнопку ОК.

В результате получим окно редактирования элемента (рис. 5.15).

Добавим выводы элемента, нажав кнопку Вывод (Place Pin) (см. табл. 3.3) панели инструментов. При этом появится окно, показанное на рис. 5.16.

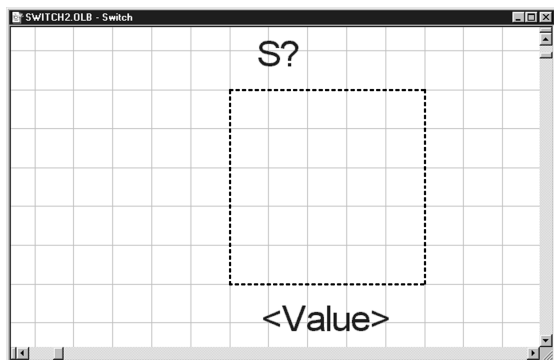


Рис. 5.15. Окно редактирования элемента

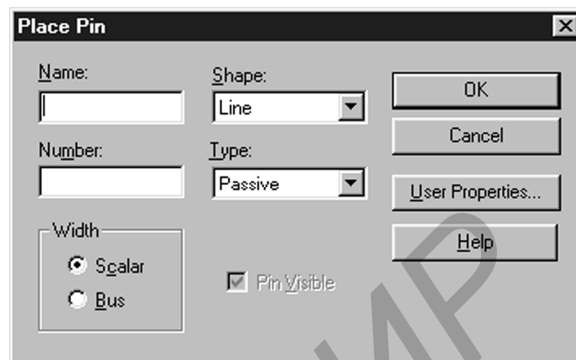


Рис. 5.16. Окно создания вывода элемента

Рассмотрим назначение полей:

**Name** – имя узла. Может быть как цифровое, так и буквенное. При необходимости ввода имени с чертой вверху нужно после каждой буквы поставить слэш (например R\E\S\E\T\).

**Number** – номер узла (можно не указывать).

**Width** – тип вывода. Если вывод соединен с одиночным проводником, необходимо выбрать Scalar при соединении вывода с шиной – Bus.

**Shape** – вид графического изображения вывода:

- Line;
- ⏏ – Dot;
- ⌚ – Clock;
- ⏏⌚ – Dot-Clock;
- ⊘ – Zero;
- ⏏ – Short;

**Type** – тип вывода по функциональному назначению:

**3-state** – вывод с тремя состояниями (низкий уровень, высокий уровень, высокоомное состояние);

**Bidirectional** – двунаправленный вывод (вход – выход);

**Input** – вход;

**Output** – выход;

**Open collector** – открытый коллектор;

**Open emitter** – открытый эмиттер;

**Passive** – пассивный вывод. Пассивный вывод обычно используется в устройствах, не содержащих источников энергии (например, такие выводы имеет резистор).

**Power** – вывод питания или «земли».

Переключатель **Pin Visible** позволяет отобразить или убрать изображение выводов питания.



Кнопка **User Properties** отображает соответствующее окно, позволяющее указать дополнительные свойства вывода, а также произвести редактирование существующих.

Добавим два пассивных вывода в форме линии (Line) с именами 1 и 2. После этого нарисуем графическое изображение ключа так же, как это было сделано выше.

В отличие от первого варианта создания библиотечного элемента шаблон PSpiceTemplate, необходимый для моделирования с помощью программы PSpice, автоматически не создается. Поэтому добавим его вручную, для чего, дважды щелкнув левой кнопкой мыши на белом фоне, перейдем в окно User Properties (см. рис. 5.6). Нажмем кнопку New, в поле Name введем имя PSpice-Template, в поле Value введем значение (структура приведенного описания будет пояснена ниже):

```
X^@REFDES %1 %2 @MODEL PARAMS: ?TCLOSE|TCLOSE=@ TCLOSE||TCLOSE=0|?TTRAN|TTRAN=@TTRAN||TTRAN=1U|?RCLOSED|RCLOSED=@RCLOSED||RCLOSED=0.01|?ROPEN|ROPEN=@ROPEN||ROPEN=1MEG|,
```

затем нажмем кнопку ОК.

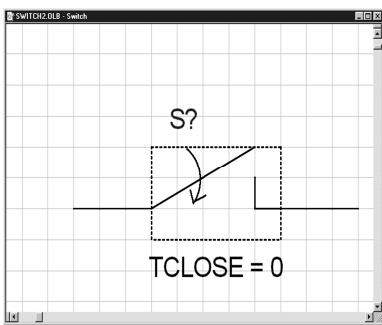


Рис. 5.17. Окончательный вид элемента

Аналогично создадим параметры TCLOSE, TTRAN, RCLOSED, ROPEN, сделав параметр TCLOSE видимым.

Окончательный вид получившегося элемента приведен на рис. 5.17.

Для проверки правильности функционирования созданного элемента включим его в схему (см. рис. 4.9). После моделирования получим те же графики, что и ранее (см. рис. 5.10), что подтверждает работоспособность нового элемента.

Наиболее сложным этапом при втором способе создания элемента является написание шаблона PSpiceTemplate. Рассмотрим структуру этого шаблона более подробно.

Шаблон состоит из списка атрибутов. Атрибуты, состоящие из стандартных символов, копируются в список соединений без изменений. Стандартные символы состоят из алфавитно-цифровых символов, знаков «\$», «\_», пробелов и знаков пунктуации. Если перед именем атрибута помещен специальный знак «@», «?», «~», «#» или «&», то в зависимости от его вида атрибуты шаблонов заменяются следующими величинами:

**@<имя>** – значением атрибута <имя>. В отсутствие указанного атрибута или его значения выдается сообщение об ошибке;

**&<имя>** – значением атрибута <имя>, если этот атрибут определен;

**?<имя>s...s** – заменяется текстом, помещенным между одинаковыми символами s, если атрибут определен;

**~<имя>s...s** – заменяется текстом, помещенным между одинаковыми символами s, если атрибут не определен;

#<имя>s...s – производятся те же действия, что и при наличии знака «?», но остальная часть шаблона удаляется, если <имя> не определено.

Символы s, ограничивающие текст, могут быть любыми неалфавитными символами (сами они в список соединений не переносятся); наиболее часто используются следующие: «.», «,», «/», «|».

Внутри этого текста допускается вложение, т. е. размещение атрибутов, предваряемых специальными знаками.

Знак «^» также специальный. Он заменяется указанием полного пути доступа к компонентам, имеющим иерархическую структуру. Для компонентов, находящихся на высшем уровне иерархии, в списке соединений этот знак заменяется знаком подчеркивания «\_».

Последовательность знаков «\n» приводит к переходу на следующую строку в списке соединений. Так что шаблон PSpiceTemplate, который размещается на одной строке практически неограниченной длины, в списке соединений может быть размещен на нескольких строках. Кроме того, таким способом в шаблоне PSpiceTemplate можно описать подключение к основному компоненту ряда дополнительных (например, учесть сопротивление потерь катушки индуктивности и т. п.).

Имена выводов в шаблоне предваряются знаком «%». Имена выводов символов перечисляются в шаблоне в том порядке, в котором они должны быть записаны для каждого компонента по правилам PSpice. В списке соединений они замещаются именами цепей, к которым они подсоединены на схеме. В шаблоне под именем вывода понимаются все символы, расположенные между символом «%» и первым разделителем (пробелом или запятой).

В шаблоне PSpiceTemplate имена компонентов в списке соединений должны начинаться с префикса, обозначающего их тип (R – резистор, Q – биполярный транзистор, X – подсхема и т.п.).

В качестве примера рассмотрим шаблон резистора, имеющего два узла (1 и 2) и два требуемых свойства: REFDES и VALUE.

Запишем шаблон PSpiceTemplate:

```
R^@REFDES %1 %2 @VALUE.
```

При использовании такого резистора в схеме список соединений (Netlist) может иметь вид R\_R15 23 0 10K; при этом REFDES равно R15, VALUE равно 10K, резистор включен между 23 и 0 узлами.

Рассмотрим шаблон подсхемы Z, имеющей два узла (a и b) и изменяемый параметр подсхемы G, по умолчанию равный 1000:

```
X^@REFDES %a %b Z PARAMS: ?G|G=@G|~G|G=1000|.
```

Данный шаблон может быть записан и в форме (если ..., то)

```
X^@REFDES %a %b Z PARAMS: ?G|G=@G||G=1000|.
```

При использовании подсхемы в схеме список соединений может иметь вид

при указании значения G, равного 150,

X\_U3 25 11 Z PARAMS: G=150;

при отсутствии указания значения G

X\_U3 25 11 Z PARAMS: G=1000.

### 5.3. Создание пользовательских символов

К символам в программе Orcad относятся: символы «земли» и питания (Power), межстраничные соединители (Off-Page Connector), иерархические порты (Hierarchical Port) и основные надписи (Title Block). Набор символов, поставляемых с программой Orcad, находится в библиотеке по адресу C:\Program Files\OrcadLite\Capture\Library\capsym.olb. К сожалению, не все из них соответствуют требованиям отечественных стандартов, поэтому возникает необходимость редактирования существующих и создания оригинальных пользовательских символов.

Наиболее актуальной задачей является создание основных надписей, поэтому рассмотрим данный процесс более подробно.

Создадим новую библиотеку, для чего в программе Capture выполним

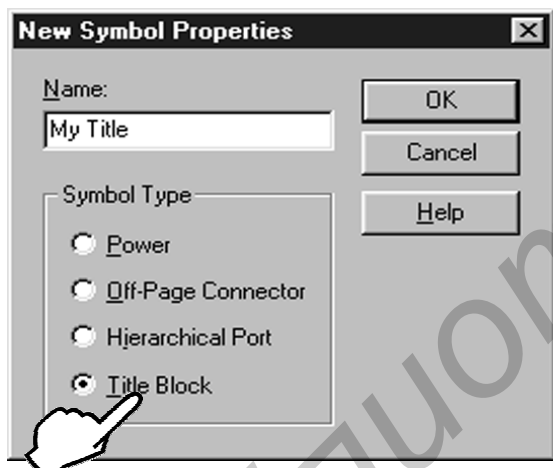


Рис. 5.18. Окно New Symbol Properties



Рис. 5.19. Инструменты редактора символов

пункты меню File→New→Library. В появившемся окне менеджера проекта щелкнем правой кнопкой мыши на названии библиотеки и выберем пункт New Symbol (см. рис. 5.12). В появившемся окне New Symbol Properties (рис. 5.18) введем имя нашего символа (My Title) и выберем его тип (Title Block). После нажатия кнопки ОК перейдем в окно редактирования символа, аналогичное окну редактирования элемента (см. рис. 5.15).

С помощью инструментов редактора символов (рис. 5.19, пояснения приведены в табл. 3.2) нарисуем требуемую основную надпись, а все подписи выполним с помощью инструмента «Текст».

Получившаяся основная надпись приведена на рис. 5.20.

Наша основная надпись пока не содержит сведений, относящихся к разработчикам, т. е. не заполнены поля «Разраб.», «Пров.» и т. д. Заполнение этих полей с помощью инструмента «Текст» приведет к созданию символа с ограниченными возможностями использования, что противоречит концепции создания библиотечных элементов.

В то же время Orcad обладает возможностями автоматического заполнения




Ссылки на поля шаблона Design Template

Название поля в шаблоне Design Template	Название параметра
Title	Title
Organization Name	OrgName
Organization Address 1	OrgAddr1
Organization Address 2	OrgAddr2
Organization Address 3	OrgAddr3
Organization Address 4	OrgAddr4
Document Number	Doc
Revision	RevCode
Cage Code	Cage Code

Закроем окно создания нового параметра, в окне редактирования свойств символа нажмем кнопку Display, затем установим видимость Value Only. Для того чтобы надпись можно было заполнить на русском языке, в разделе Font нажмем кнопку Change, затем в поле Набор символов выберем пункт Кириллица. Аналогично создадим другие параметры. Для того чтобы вставить дату, необходимо в качестве названия параметра выбрать Design Create Date.

Часть основной надписи с созданными автозаполняемыми полями приведе-



Изм.	Лист.	№ докум.	Подп.	Дата
Разраб.		<OrgAddr1>		
Пров.		<OrgAddr2>		
Т. контр.		<OrgAddr3>		
Н. контр.				
Утв.				

Рис. 5.24. Часть основной надписи

на на рис. 5.24, при этом для ввода фамилий разработчика, контролера и проверяющего использованы поля Organization Address (адрес организации), т. к. адрес организации согласно ГОСТу в основную надпись не входит. Сохраним созданную библиотеку, выполнив пункты меню File→Save As (при этом, для того чтобы сохранилась именно библиотека с расширением файла \*.olb, необходимо, чтобы в окне менеджера проекта

было выделено название библиотеки (см. рис. 5.12)).

Проверим функционирование нашего элемента. Для этого произведем редактирование шаблона Design Template, заполнив необходимые поля в группе Text в соответствии с выбранными связями с полями основной надписи. Также необходимо заполнить поля в группе Symbol, указав в графе Library Name название созданной библиотеки с полным путем к ней (например C:\Program Files\OrcadLite\Capture\Library\MyLib.olb), а в графе Title Block Name – название созданной основной надписи (в нашем случае My Title). Создав новый проект, убедимся, что место основной надписи заняла созданная нами надпись, при этом поля с автозаполнением имеют правильные значения.

## 6. ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ

### 6.1. Основные понятия

В процессе анализа электронной схемы, созданной разработчиком, может оказаться, что ее функционирование не вполне отвечает требованиям технического задания. Такое расхождение чаще всего обусловлено тем, что современные электронные схемы содержат большое число нелинейных элементов, в силу чего для расчета схемы используются приближенные методы, основанные на различных вариантах линеаризации.

Для достижения требуемых технических характеристик необходимо произвести коррекцию первоначальных значений параметров элементов схемы. Для этого существуют два пути:

1. Многократное моделирование схемы при ручном изменении параметров элементов с целью определения влияния каждого из них на значения требуемых выходных характеристик с последующими подбором и фиксацией требуемых значений.

2. Автоматизированный подбор параметров с помощью программы PSpice Optimizer.

Второй путь позволяет значительно сократить затраты машинного времени и усилия разработчика.

Перед использованием программы PSpice Optimizer дадим определения основным понятиям:

**Оптимизация** (Optimization) – процесс точной настройки работы схемы путем вариации ее параметров до достижения заданного (или наиболее близкого к заданному) значения глобальной целевой функции.

PSpice Optimizer позволяет производить следующие виды оптимизации.

**Оптимизация без ограничений** (Unconstrained optimization). При этом вычисляется экстремум одной целевой функции.

**Оптимизация при ограничениях** (Constrained optimization). Вычисляется экстремум одной целевой функции при выполнении одного или нескольких неравенств.

**Минимизация по методу наименьших квадратов без ограничений** (Unconstrained least squares). Минимизирует сумму квадратов ошибок (разниц между заданными и текущими значениями) для набора целевых функций.

**Минимизация по методу наименьших квадратов при ограничениях** (Constrained least squares). Минимизирует сумму квадратов ошибок для набора целевых функций при выполнении заданных неравенств.

**Параметр** (Parameter) – свойство схемы, для которого PSpice Optimizer пытается определить лучшее значение в заданных пользователем пределах. В качестве параметра может использоваться:

- номинал элемента (например емкость конденсатора);

- другое свойство элемента (например положение движка потенциометра);
- член выражения, определяющий свойство элемента (например коэффициент в записи передаточной функции).

PSpice Optimizer может оптимизировать схему, содержащую до восьми варьируемых параметров.

**Спецификация (Specification)** – описание глобальной целевой функции с помощью локальных целевых функций и ограничений. В PSpice Optimizer существуют два типа спецификаций:

- внутренняя (internal specification), состоящая из целевых функций (заданных своими значениями) и неравенств (заданных в виде допустимых пределов), которые введены в PSpice Optimizer с помощью диалоговых окон;
- внешняя (external specification), состоящая из результатов измерений, заданных в виде внешнего файла.

При задании спецификации необходимо указать:

- название (Name);
- значение глобальной целевой функции (Target) и ее допустимое отклонение (Range);
- вид анализа схемы (Analysis);
- название профиля моделирования либо файла-описания схемы (Simulation Profile or Circuit File);
- выражение для описания глобальной целевой функции (в графе Evaluate).

Спецификация также может включать:

- название probe-файла, содержащего описание целевых функций (Probe file containing Goal Functions);
- имя файла, содержащего результаты измерений и опорные данные (при использовании внешней спецификации).

**Глобальная целевая функция (Evaluation)** – функция, значение которой является мерой соответствия реального режима в схеме желаемому.

В качестве глобальной целевой функции могут выступать:

1. Одноточечная trace-функция программы PSpice.
2. Локальная целевая функция (Goal Function) программы PSpice.
3. Выражение программы PSpice Optimizer.

*Trace-функция* определяет требуемый выходной параметр схемы при проведении одноточечного анализа (например DC sweep при фиксированном входном напряжении в 12 В).

Примеры:  $V(out)$  для измерения выходного напряжения;  $I(d1)$  – для измерения тока через диод.

*Локальная целевая функция (Goal Function)* определяет требуемый выходной параметр при проведении всех остальных видов анализа, кроме одноточечного (например AC, Tran).

Локальная целевая функция вычисляется по результатам моделирования схемы при фиксированных значениях параметров. Встроенные локальные целевые функции программы PSpice приведены в табл. 6.1.

## Локальные целевые функции программы PSpice

Функция	Назначение	Пример
Bandwidth(выражение, уровень в дБ), BPBW(выражение, уровень в дБ)	Ширина полосы пропускания полосового фильтра, определяемая по заданному уровню	Bandwidth(V(out),3) BPBW(V(out),3)
CenterFreq(выражение, уровень в дБ)	Центральная частота полосы пропускания	CenterFreq (V(5),3)
Falltime(выражение)	Длительность заднего фронта	Falltime(I(R))
GainMargin(выр. 1, выр. 2)	Определяет (в дБ) значение амплитуды для выражения 2, при котором набег фазы выражения 1 достигает $180^\circ$	GainMargin(P(V(out)), V(out))
GenFall(выражение)	Длительность заднего фронта огибающей сигнала	GenFall(V(out))
GenRise(выражение)	Длительность переднего фронта огибающей сигнала	GenRise(V(out))
HPBW(выражение, уровень в дБ)	Ширина полосы пропускания фильтра верхних частот, определяемая по заданному уровню	HPBW(V(out),3)
LPBW(выражение, уровень в дБ)	Ширина полосы пропускания фильтра нижних частот	HPBW(V(out),3)
MAX(выражение)	Глобальный максимум	Max(I(R))
MAXr(выр., t1, t2)	Локальный максимум выражения на интервале времени от t1 до t2	Maxr(V(3), 0, 2s)
MIN(выражение)	Глобальный минимум	Min(I(R))
MINr(выр., t1, t2)	Локальный минимум выражения на интервале времени от t1 до t2	Minr(V(3), 0, 2s)
Overshoot(выражение)	Определяет разницу между максимальным и конечным значением выражения	Overshoot(V(out))
Peak(выражение, n)	Значение выражение в n-м пике	Peak(V(out), 2)
Period(выражение)	Период сигнала. Определяется от первого до второго импульса	Period(V(out))
PhaseMargin(выр. 1, выр. 2)	Определяет значение фазы выражения 2, при котором амплитуда выражения 1 достигает значения ноль дБ	PhaseMargin(V(out), P(V(out)))
Pulsewidth(выражение)	Длительность импульса (определяется как интервал времени от середины положительного до середины отрицательного фронта)	Pulsewidth(V(out))



Функция	Назначение	Пример
Risetime(выражение)	Длительность переднего фронта	Risetime(V(out))
SWINGr(выр.,нач._x,кон_х)	Разница между максимальным и минимальным значением выражения в указанном интервале	SWINGr(V(out),0,8ms)
TPmW2(выр., период)	Вычисляет функцию $(y1 - y2) * 1000 / (x1 - x2)$ от выражения на указанном периоде. Может использоваться для расчета общей рассеиваемой мощности (в мВт) на указанном периоде, если $выр. = \int (V(out) * I(out))$	TPmW2(s(V(out)*I(out)), 5)
XatNthY(выр.,zn_Y,n)	Находит значение X для выражения, соответствующее n-му повторению заданного значения Y	XatNthY(V(out),10,1)
XatNthYn(выр.,zn_Y,n)	Находит значение X, соответствующее n-му отрицательному фронту, для выражения пересекающего заданное значение Y	XatNthYn(V(out),10,1)
XatNthYp(выр.,zn_Y,n)	Находит значение X, соответствующее n-му положительному фронту, для выражения пересекающего заданное значение Y	XatNthYp(V(out),10,1)
XatNthYpct(выр.,Y_в_проц.,n)	Находит значение X, соответствующее n-му пересечению значения Y, для выражения заданного в процентах от максимальной амплитуды	XatNthYpct(V(out), 50,1)
YatX(выр., zn_X)	Находит значение выражения при заданном значении X	YatX(V(3),20)
YatXpct(выр.,X_в_проц.)	Находит значение выражения при заданном в процентах от полного диапазона значений X	YatXpct(V(3),75)

Выражение *PSpice Optimizer* содержит переменные, константы, функции и операторы программы *PSpice Optimizer*. Например, для вычисления общего сопротивления двух резисторов с параметризованными значениями сопротивлений R1val и R2val можно использовать выражение R1val «operator» R2val, где вместо «operator» необходимо использовать «+», «-», «\*», «/», «\*\*» (возведение в степень). Допустимо использовать также функции sin, cos, tan, atan, exp, log, log10.

#### Схемы, не подлежащие оптимизации:

1. Неработающие схемы. *PSpice Optimizer* не сможет «оживить» схему, содержащую ошибки, не позволяющие провести ее моделирование.

2. Схемы, содержащие элементы с несколькими состояниями (например триггеры), если при незначительном изменении параметра изменяется состояние схемы.

## 6.2. Оптимизация схемы с помощью программы PSpice Optimizer

Алгоритм оптимизации схемы с помощью программы PSpice Optimizer рассмотрим на конкретном примере.

Пример: подбором номинала R5 добиться того, чтобы в схеме рис. 6.1 ток через нелинейный элемент (диод) составил 1мА с точностью 1 %.

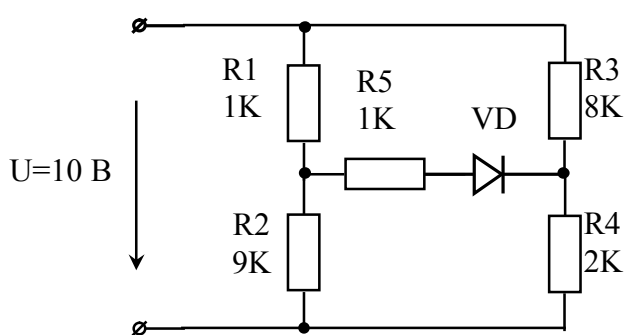


Рис. 6.1. Схема примера

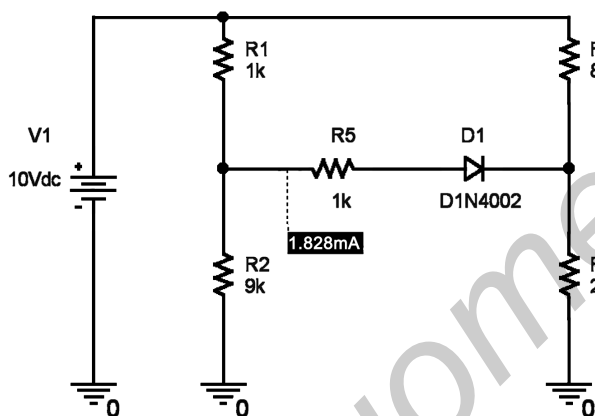


Рис. 6.2. Результат расчета исходной схемы

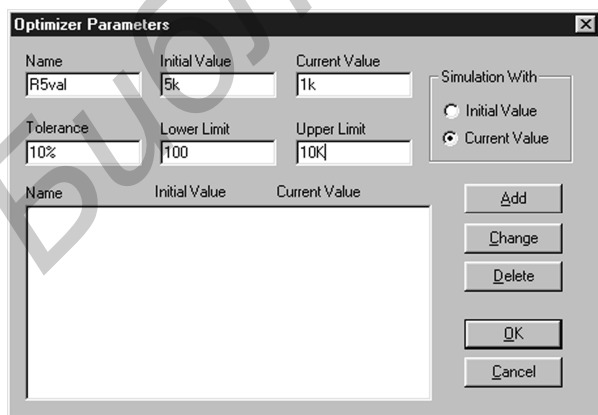


Рис. 6.3. Окно ввода параметра

1. Промоделируем данную схему на постоянном токе с помощью программы Capture. Для этого соберем схему, проведем расчет переходного процесса (Time Domain), затем выведем результаты расчета по постоянному току, для чего из меню PSpice выберем пункты Bias Points → Enable, затем на панели инструментов нажмем кнопку «I». Результаты моделирования приведены на рис. 6.2. (На этом рисунке значения всех токов, кроме интересующего, убраны). Видим, что при данных параметрах ток через диод составляет 1,828 мА.

2. Параметризуем значение сопротивления R5, для чего заменим значение 1K для R5 записью с именем параметра в фигурных скобках, например {R5val}.

3. В программе Capture из меню PSpice выберем пункт Place Optimizer Parameters и поместим появившуюся рамку на удобном месте.

4. Дважды щелкнув левой кнопкой мыши на рамке, перейдем в окно ввода параметра, приведенное на рис. 6.3.

Поля этого окна имеют следующие назначения:

Name – название параметра;

Initial Value – значение, с которого начинается процесс оптимизации;

Current Value – текущее значение параметра;

Tolerance – допуск на параметр. Задается для последующего выбора значения из стандартного ряда;

Lower Limit – нижний допустимый предел изменения параметра;

Upper Limit – верхний допустимый предел изменения параметра.

Переключатель Simulation With позволяет проводить моделирование из программы Capture либо с начальным значением параметра (Initial Value), либо с текущим (Current Value).

Заполним верхние поля так, как показано на рисунке, затем нажмем кнопки Add и OK.

5. Запустим программу PSpice Optimizer, выбрав в программе Capture пункты меню PSpice→Run Optimizer. В результате получим окно программы PSpice Optimizer, приведенное на рис. 6.4.

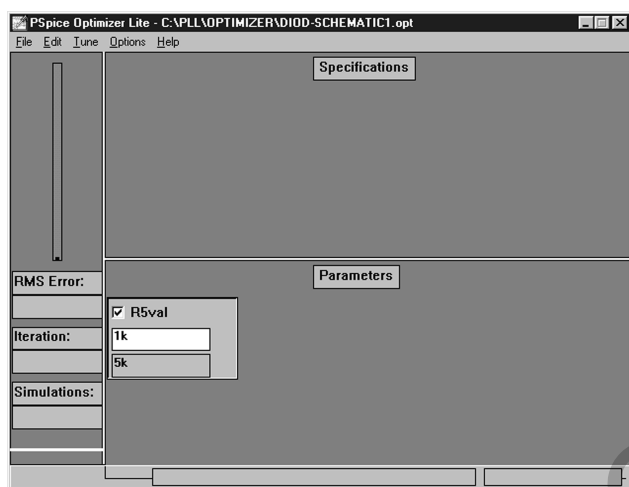


Рис. 6.4. Окно программы PSpice Optimizer

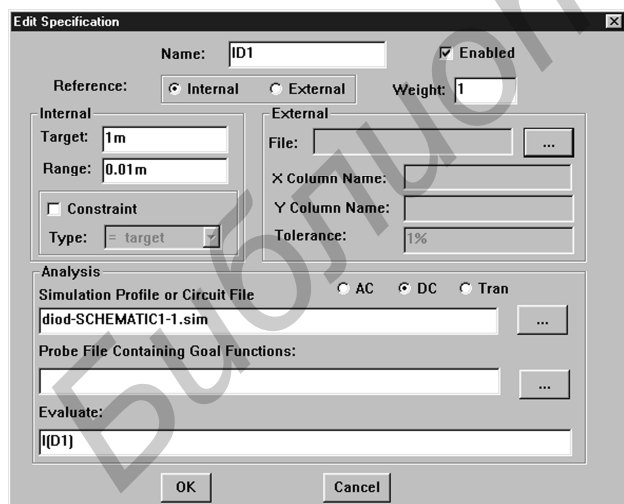


Рис. 6.5. Окно Edit Specification

Окно состоит из трех основных частей: области спецификаций (Specifications), области параметров (Parameters), области индикатора процесса оптимизации. Видим, что пока область спецификаций пуста.

6. Добавим глобальную целевую функцию, для чего в меню Edit данной программы выберем пункт Specifications. В появившемся окне нажмем кнопку Add, в результате чего появится окно Edit Specification, приведенное на рис. 6.5. Поля этого окна имеют следующие назначения:

Name – название глобальной целевой функции;

Reference – источник ее описания;

Internal – поле Evaluate;

External – внешний файл;

Target – желаемое значение глобальной целевой функции;

Range – ее допустимое отклонение;

Constraint – наличие ограничений-неравенств, вид которых выбирается из поля Type;

Analysis – вид анализа схемы (AC, DC либо Tran);

Simulation Profile or Circuit File – название профиля моделирования либо файла-описания схемы;

Probe File Containing Goal Functions – имя файла с расширением .prb, содержащего описание локальных целевых функций (например C:\Program Files\OrcadLite\PSpice\Common\pspice.prb);

Evaluate – описание глобальной целевой функции.

При использовании нескольких целевых функций можно задать удельный вес каждой из них в графе Weigth.

При использовании внешнего описания целевой функции необходимо заполнить поля:

X column name	Y column name
Vbe	Ic
4.0E-01	6.05E-06
4.1E-01	8.90E-06
4.2E-02	1.31E-05

Рис. 6.6. Структура файла-описания целевой функции

File – имя файла с данными;

X Column Name – заголовок столбца в файле, содержащего независимые (X) значения (например Vbe на рис. 6.6.);

Y Column Name – заголовок столбца в файле, содержащего зависимые (Y) значения (например Ic на рис. 5.6.);

Tolerance – допуск в процентах, задаваемый для последующего выбора значения параметра из стандартного ряда (например 10 %).

Заполним поля окна Edit Specifications так, как показано на рис. 6.5; закроем это окно, нажав ОК. После этого закроем окно Specifications с помощью кнопки

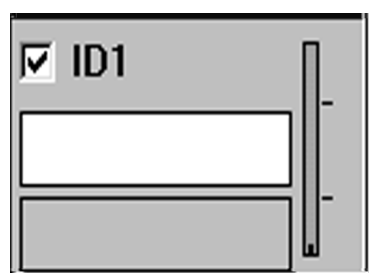


Рис. 6.7. Окно глобальной целевой функции

Close. Видим, что в поле Specifications появилось окно, показанное на рис. 6.7. В верхней части окна находится переключатель, включающий/исключающий целевую функцию из процесса вычислений. Белое поле в середине окна содержит текущее значение функции, нижнее поле – начальное значение. В правой части окна находится индикатор, показывающий соответствие значения целевой функции заданному. Если индикатор имеет красный цвет, то функция не достигла заданного значения, при этом по меткам в правой части шкалы можно

видеть, больше или меньше заданного текущее значение глобальной целевой функции. При достижении заданного значения индикатор меняет цвет на зеленый.

7. Для того чтобы можно было запустить процесс оптимизации, необходимо соответствие между видом анализа, указанного в окне Edit Specification (см. рис. 6.5), и профилем моделирования в программе Capture. Для расчета схемы по постоянному току мы использовали режим Tran, поэтому необходимо:

*I вариант.* Снова открыть окно Edit Specification, для чего либо дважды щелкнуть левой кнопкой мыши на правой части окна (см. рис. 6.7), либо выполнить пункты меню Edit→Specifications; после чего выбрать вид анализа Tran. Так как Tran является многоточечным видом анализа, то в качестве глобальной целевой функции в графе Evaluate задают выражение, содержащее локальные целевые функции, например MAX(I(D1)). После выхода из окон Edit Specification и Specifications можно запускать процесс оптимизации.

*II вариант.* Для сокращения времени моделирования задать одноточечный

вид анализа, для чего вернуться в программу Capture и отредактировать профиль моделирования, например так, как показано на рис. 6.8.

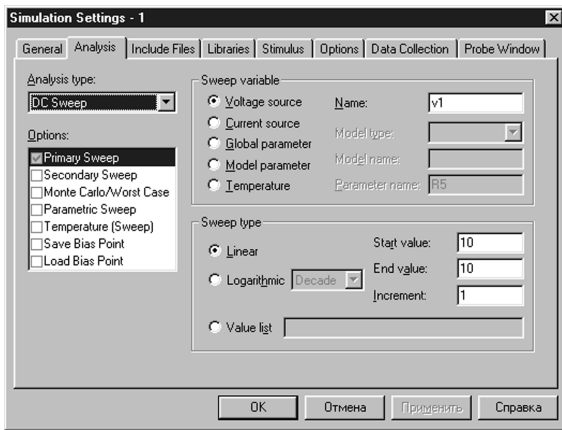


Рис. 6.8. Профиль моделирования

параметров (Iteration), числа запусков процесса моделирования с помощью программы PSpice (Simulations).

После окончания оптимизации схемы получим значение тока 1,00023 мА при значении сопротивления R5, равном 3,89443 К.

8. Округлим полученное значение сопротивления до ближайшего стандартного, взятого из ряда E12 (что соответствует указанному допуску 10 %), для чего выполним пункты меню Edit→Round Nearest. В результате получим значение R5, равное 3,9 К; при этом ток через диод будет равен 0,99937 мА.

При наличии у разработчика достаточных оснований можно создать новое стандартное значение, для чего выполнить пункты меню Edit→Round Calculated.

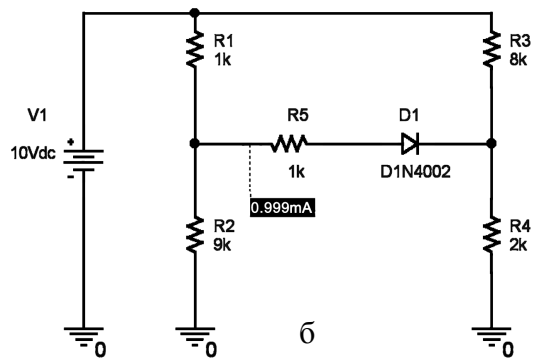
9. Внесем полученное значение в схему в программе Capture, для чего выполним пункты меню Edit→Update Schematic. В результате рамка Optimizer Parameter примет вид, показанный на рис. 6.9, а.

10. Промоделируем схему с новым значением параметра так же, как в первом пункте. Убедимся, что функционирование схемы соответствует ожидаемому (рис. 6.9, б).

OPTIMIZER PARAMETERS:

Name	Initial	Current
R5val	5k	3.9k

а



б

Рис. 6.9. Результаты оптимизации схемы

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ ТИПА «k» .....	1
2. ОСТАВ ПАКЕТА ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ ORCAD .....	14
3. ПРОГРАММА CAPTURE CIS .....	15
3.1. Рабочее окружение .....	15
3.2. Подготовка схемы и моделирование на PSPICE .....	20
3.3. Моделирование функциональных схем .....	28
4. ПРОГРАММА PSPICE .....	31
4.1. Алгоритм подготовки схемы к моделированию .....	31
4.2. Входной язык .....	32
4.3. Описание элементов электронных схем .....	33
4.4. Директивы управления .....	51
5. СОЗДАНИЕ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ БИБЛИОТЕК .....	56
5.1. Создание моделей элементов .....	56
5.2. Создание законченного пользовательского элемента .....	59
5.3. Создание пользовательских символов .....	67
6. ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМ .....	70
6.1. Основные понятия .....	70
6.2. Оптимизация схемы с помощью программы PSpice Optimizer .....	74

*Учебное издание*

**ОСНОВЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Методические указания  
к выполнению контрольных работ  
для студентов специальности 1-53 01 07  
заочной формы обучения

Составители:

**Беляков** Виктор Борисович  
**Дерюшев** Андрей Анатольевич  
**Шилин** Леонид Юрьевич

Редактор И. П. Острикова  
Корректор Е. Н. Батурчик  
Компьютерная верстка Ю. Ч. Ключкевич

---

Подписано в печать 27.04.2011.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Отпечатано на ризографе.	Усл. печ. л. 4,77.
Уч.-изд. л. 4,5.	Тираж 100 экз.	Заказ 513.

---

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»  
ЛИ №02330/0494371 от 16.03.2009. ЛП №02330/0494175 от 03.04.2009.  
220013, Минск, П. Бровки, 6