

Федеральное агентство по образованию
ФИЛИАЛ ГОСУДАРСТВЕННОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
в г. Смоленске

Кафедра Промышленной электроники

М.А Амелина

e-mail: amelina.marina@gmail.com

Конспект лекций

по курсу

***Компьютерный анализ и синтез
электронных устройств (часть 2)***

МОДЕЛИ

Содержание

6. МОДЕЛИ	3
6.1. Пассивные компоненты (Passive components)	3
6.1.1. Резистор (Resistor)	3
6.1.2. Конденсатор (Capacitor)	6
6.1.3. Индуктивность (Inductor)	8
6.1.4. Взаимная индуктивность и магнитный сердечник (K)	11
6.1.5. Трансформатор (Transformer)	16
6.1.6. Линия передачи (Transmission line)	17
6.2. Источники сигналов (Waveform sources)	19
6.2.1. Независимые источники постоянного напряжения и тока	19
6.2.2. Источники сигнала, зависящего от времени	20
6.3. Линейные и нелинейные зависимые источники	31
6.3.1. Зависимые источники линейные и полиномиальные (Dependent Sources)	31
6.3.2. Линейные управляемые источники, задаваемые преобразованиями Лапласа (Laplace Sources) и Z-преобразованиями (Z Transform Sources)	34
6.3.3. Функциональные источники сигналов (Function Sources)	38
6.4. Специальные компоненты (Special Purpose)	40
6.4.1. Ключ (Switch)	40
6.4.2. Ключ, управляемый напряжением (S)	41
6.4.3. Ключ, управляемый током (W)	43
6.4.4. Стрелки (Arrow) и контакты (Bubble)	44
6.5. Макромодели	44
6.5.1. Макромодели в виде схемы формата MICROCAP (MACRO)	44
6.5.2. Макромодели в виде текста подсхемы на языке SPICE (Subcircuit)	45
6.6. Элементы анимации	47
6.6.1. Аналоговая индикаторная линейка (Animated analog bar)	47
6.6.2. Разноцветные светодиоды (Animated analog LED)	48
6.6.3. Двигатель постоянного тока (Animated DC motor)	48
6.6.4. Ключи типа DPST, SPDT, SPST (Animated DPST, SPDT, and SPST switches)	49
6.6.5. Вольтамперметр (Animated meter)	49
6.6.6. Электромагнитное реле (Animated relay)	50
6.6.7. Светофор (Animated traffic light)	51
6.7. Модели полупроводниковых приборов	52
6.7.1. Диод	52
6.7.2. Биполярный транзистор	53
6.7.3. Полевой транзистор с управляющим p-n переходом JFET	55
6.7.4. Арсенид-галлиевый полевой транзистор GaAsFET	56
6.7.5. Полевой транзистор с изолированным затвором MOSFET	57
6.7.6. Операционный усилитель	59

6. МОДЕЛИ

6.1. Пассивные компоненты (Passive components)

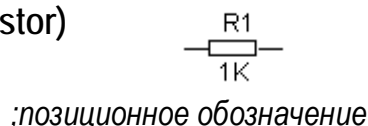
В меню компонентов в раздел пассивные компоненты (Passive components) включены резисторы, конденсаторы, индуктивности, линии передачи, высокочастотные трансформаторы, взаимные индуктивности, диоды и стабилитроны.

Обратим внимание, что значения сопротивлений, емкостей и индуктивностей могут быть числом или выражением, зависящим от времени, узловых потенциалов, разности узловых потенциалов или токов ветвей, температуры и других параметров (причем непосредственная зависимость параметров от времени в программе PSpice не предусмотрена, здесь Micro-Cap явно лидирует).

6.1.1. Резистор (Resistor)

Формат схем MICROCAP-8:

Атрибут PART: <имя>



Примеры:

R5

CARBON5

Атрибут VALUE: <значение> [TC=<TC1>[,<TC2>]] ;величина сопротивления.

Может быть числом или выражением, включающим переменные, зависящие от времени T. Если определяется в виде выражения, содержащего переменные состояния схемы, то используется только при анализе во временной области. Например, выражение, записанное в позиции VALUE $100+V(10)^2$ содержащее значение потенциала узла 10, будет использовано при анализе переходных процессов, при расчете режима по постоянному току перед выполнением малосигнального частотного анализа (AC), и при расчете передаточных характеристик по постоянному току (DC). В режиме малосигнального частотного анализа (AC) зависимость рассматриваемого сопротивления от потенциала V(10) не принимается во внимание. Если в рабочей точке по постоянному току значение потенциала узла 10 оказалось равным 2 В, то сопротивление рассматриваемого резистора во время проведения частотного анализа будет равным $100+2^2=104$.

Атрибут FREQ: [<выражение>] — Если в этой позиции набрано частотно-зависимое выражение, например $V(4,5)*(1+F/1e7)$, то оно при проведении малосигнального частотного анализа (AC) заменяет значение атрибута VALUE. Например, в вышеприведенном выражении для атрибута FREQ F обозначает независимую переменную AC-анализа — частоту, а V(4,5) — малосигнальное напряжение между узлами 4 и 5. При расчете переходных процессов и передаточных характеристик по постоянному току сопротивление резистора равно значению атрибута VALUE независимо от наличия и значения атрибута FREQ.

Атрибут MODEL: [имя модели]

Атрибут PACKAGE: [тип корпуса] — например DIP 16. Используется при составлении списка соединений между компонентами в формате PCB.

Атрибут COST [стоимость] — например 0.3. Используется при составлении перечня компонентов (Bill of Materials).

Атрибут POWER [рассеиваемая мощность] — например 0.125. Используется при составлении перечня компонентов (Bill of Materials).

Resistor:Resistor

Name: ☐ Show Value: ☐ Show

Display: ☐ Pin Markers ☐ Pin Names ☐ Pin Numbers ☒ Current ☒ Power ☒ Condition

PART=R1
VALUE=
FREQ=
MODEL=CT_5%
PACKAGE=CT3
COST=
POWER=

CT_10%
CT_2%
CT_5%
FHV_FK
FHV_FM
FHV_GK
FHV_GM

Source: Global library located at D:\mc8\library\PASSIVE.LIB

R TC1 TC2

TCE NM T_MEASURED

T_ABS T_REL_GLOBAL T_REL_LOCAL

Description: This is the value or expression for the resistance, plus optional temperature coefficients.
Syntax: <value>[TC=<TC1>[,<TC2>]]
Example: 1000 TC=1m,1u

Рис. 6.1. Окно задания параметров резистора

Параметры, описывающие модель резистора в MICROCAP-8, приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1. Параметры модели резистора

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
R	Масштабный множитель сопротивления	—	1
TC1	Линейный температурный коэффициент сопротивления	°C ⁻¹	0
TC2	Квадратичный температурный коэффициент сопротивления	°C ⁻²	0
TCE	Экспоненциальный температурный коэффициент сопротивления	%/°C	0
NM	Масштабный коэффициент спектральной плотности шума	—	1
T_MEASURED	Температура измерения	°C	—
T_ABS	Абсолютная температура	°C	—
T_REL_GLOBAL	Относительная температура	°C	—
T_REL_LOCAL	Разность между температурой устройства и модели-прототипа (АКО)	°C	—

Формат текстовой директивы модели резистора:

.MODEL <имя модели> RES ([параметры модели])

Пример:

.MODEL RM RES (R=2.0 LOT=10% TC1=.015)

Влияние температуры. Существуют два основных температурных фактора — квадратичный и экспоненциальный. Квадратичный фактор характеризуется модельными параметрами TC1 и TC2 или значениями <tc1>, <tc2> в строке задания атрибута VALUE. Экспоненциальный фактор задается модельным параметром TCE.

Если температурные коэффициенты [TC=<tc1>[,<tc2>]] указаны в строке атрибута VALUE, величина сопротивления определяется как <значение>*TF, где TF определяется по формуле:

$$TF = 1 + \langle tc1 \rangle \cdot (T - Tnom) + \langle tc2 \rangle \cdot (T - Tnom)^2.$$

Если указано <имя модели>, но не указан TCE сопротивление рассчитывается аналогично <значение>*TF, где TF определяется по формуле:

$$TF = 1 + TC1 \cdot (T - TNOM) + TC2 \cdot (T - TNOM)^2.$$

Параметр модели резистора TC1 — линейный температурный коэффициент, часто задается в справочном листке резистора как миллионные доли на °C (ppm/degree C). Для преобразования этого справочного параметра в TC1 необходимо его деление на 1000000. Так, например, справочный параметр 3000 ppm/degree C соответствует значению TC1=3E-3.

Если <имя модели> указано и указан TCE сопротивление рассчитывается как <значение>*TF, но температурный фактор TF определяется по экспоненциальной формуле:

$$TF = 1,01^{TCE(T-TNOM)}.$$

Если определено и <имя модели> и [TC=<tc1>[,<tc2>]] в строке атрибута VALUE, то значения температурных коэффициентов в строке VALUE [TC=<tc1>[,<tc2>]] имеют приоритет.

Во всех вышеприведенных формулах T — текущее значение температуры (указывается по директиве .TEMP); TNOM = 27 °C — номинальная температура (указывается в окне *Global Settings*).

Разброс сопротивления. Допуски LOT и DEV для анализа Монте-Карло, доступны только при определении <имени модели> в окне задания параметров или модельной директивы .MODEL в текстовой области или на поле схемы. Допуски могут выражаться в относительных (процентах) или абсолютных единицах и могут быть указаны для всех параметров модели, за исключением температурных параметров. Обе формы задания допусков преобразуются в эквивалентное процентное отклонение и воздействуют на Монте-Карло фактор MF, который, в свою очередь умножается на величину сопротивления с учетом температурных факторов.

$$MF = 1 \pm \langle \text{разброс в процентах DEV или LOT} \rangle / 100$$

Если значение разброса в % (LOT или DEV) равно нулю или анализ по методу Монте-Карло не используется, то MF-фактор устанавливается в единичное значение и не воздействует на окончательную величину сопротивления резистора *rvalue*.

Окончательно сопротивление резистора *rvalue* вычисляется по формуле:

$$rvalue = \langle \text{значение} \rangle \cdot R \cdot TF \cdot MF$$

Шумы резистора. Резистору свойственно напряжение шума, которое возникает из-за неупорядоченного теплового движения носителей заряда. Спектральная плотность теплового шумового тока резистора рассчитывается по формуле Найквиста:

$$I = NM \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T}{rvalue}} \left[\frac{A}{\sqrt{Hz}} \right]$$

NM представляет собой масштабный коэффициент шумового тока и является модельным параметром. Установка его в нулевое значение сводит на нет вклад всех резисторов, имеющих заданную модель, в общий шум схемы.

Примеры задания резисторов и их атрибутов см. в схемных файлах **Resistors.CIR**, **resistor_Freq.CIR** из папки **COMPONENTSPASSIVE COMP**.

6.1.2. Конденсатор (Capacitor)

Формат схем MICROCAP:

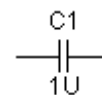
Атрибут PART: <имя>

Примеры:

C5

XC16

Атрибут VALUE: <значение> [IC=< начальное значение напряжения>]



Если <значение> определяется в виде выражения, содержащего переменные состояния схемы, то используется только при анализе во временной области. Например, выражение, записанное в позиции VALUE 1n+V(10)*2n, содержащее значение потенциала узла 10, будет использовано при анализе переходных процессов, при расчете режима по постоянному току перед выполнением малосигнального частотного анализа (AC), и при расчете передаточных характеристик по постоянному току (DC). В режиме малосигнального частотного анализа (AC) зависимость рассматриваемой емкости от потенциала V(10) не принимается во внимание. Если в рабочей точке по постоянному току значение потенциала узла 10 оказалось равным 2В, то емкость рассматриваемого конденсатора во время проведения частотного анализа будет равной 1n + 2*2n = 5n.

IC=< начальное значение напряжения > — присваивает начальное значение напряжению на конденсаторе.

Примеры:

1U

110P IC=3

50U*(1+V(6)/100)

Атрибут FREQ: [<выражение>]. Если в поле этого атрибута присутствует выражение, то оно заменяет значение емкости, рассчитанное в рабочей точке по постоянному току. Т.е. если в этой позиции набрано частотно-зависимое выражение, например 1n+1E-9*V(1,2)*(1+10m*log(f)), то оно при проведении малосигнального частотного анализа (AC) заменяет значение атрибута VALUE. Например, в вышеприведенном выражении для атрибута FREQ F обозначает независимую переменную AC-анализа — частоту, а V(1,2) — малосигнальное напряжение между узлами 1 и 2. При расчете переходных процессов и передаточных характеристик по постоянному току емкость конденсатора будет равна значению атрибута VALUE независимо от наличия и значения атрибута FREQ.

Атрибут MODEL: [имя модели]

Атрибут PACKAGE: [тип корпуса] — например DIP 16. Используется при составлении списка соединений между компонентами в формате PCB.

Атрибут COST [стоимость] — например 0.3. Используется при составлении перечня компонентов (Bill of Materials).

Capacitor:Capacitor

Name: MODEL Value: CAP2

Display: ☐ Pin Markers ☐ Pin Names ☐ Pin Numbers ☒ Current ☒ Power ☒ Condition ☐ Color

PART=C1
VALUE=
FREQ=
MODEL=CAP2
PACKAGE=
COST=
POWER=

OK Cancel Font... Add Help...
New Syntax... Expand... Help Bar

Source: Local text area of D:\mc8\MTR\KAC39\circuit1.cir

C	1. LOT=10%	VC1	0	VC2	0
TC1	0	TC2	0	T_MEASURED	undefined
T_ABS	undefined	T_REL_GLOBAL	undefined	T_REL_LOCAL	undefined

Description: Value or expression for computing capacitance value, plus an optional initial condition.
Syntax: <value | expression> [IC=<initial value>]
Examples: 1u IC=6, 1u*(1+abs(V(C1)/100))

Рис. 6.2. Окно задания параметров конденсатора

Параметры модели конденсатора приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2. Параметры модели конденсатора

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
C	Масштабный множитель емкости	—	1
VC1	Линейный коэффициент зависимости от напряжения	B ⁻¹	0
VC2	Квадратичный коэффициент зависимости от напряжения	B ⁻²	0
TC1	Линейный температурный коэффициент емкости	°C ⁻¹	0
TC2	Квадратичный температурный коэффициент емкости	°C ⁻²	0
T_MEASURED	Температура измерения	°C	—
T_ABS	Абсолютная температура	°C	—
T_REL_GLOBAL	Относительная температура	°C	—
T_REL_LOCAL	Разность между температурой устройства и модели-прототипа (АКО)	°C	—

Формат текстовой директивы модели конденсатора:

.MODEL <имя модели> CAP ([параметры модели])

Примеры:

.MODEL CMOD CAP(C=2.0 LOT=10% VC1=2E-3 VC2=.0015)

.MODEL CEL CAP(C=1.0 LOT=5% DEV=.5% T_ABS=37)

Если в описании конденсатора <имя модели> опущено, то его емкость равна <значению> в фарадах, записанному в строке атрибутов VALUE. В противном случае емкость вычисляется умножением на масштабный коэффициент емкости C и на коэффициенты факторов, перечисленных ниже.

Квадратичная зависимость емкости от напряжения. Если в окне атрибутов [имя модели] используется, то <значению>, записанное в строке атрибута VALUE умножается на QF-фактор для вычисления емкости конденсатора, зависящей от напряжения на его выводах:

$$QF = 1 + VC1 \cdot V + VC2 \cdot V^2$$

Эта возможность оставлена в программе MC8 для сохранения совместимости с версией языка SPICE 2G.

Температурная зависимость емкости. Подобна температурной зависимости сопротивления (см. 3.2.1), задается значениями 2-х модельных коэффициентов TC1 и TC2. В случае задания [имени модели] в окне атрибутов, <значению> в строке атрибута VALUE домножается на значение TF-фактора, который вычисляется по формуле:

$$TF = 1 + TC1 \cdot (T - Tnom) + TC2 \cdot (T - Tnom)^2$$

Разброс емкости. Задается так же, как и разброс сопротивления в модельной строке с помощью ключевых слов LOT или DEV для любых параметров модели, за исключением температурных. В вычислении значения емкости учитывается домножением на MF-фактор, вычисляемый по формуле:

$$MF = 1 \pm \langle \text{разброс в процентах DEV или LOT} \rangle / 100$$

Окончательное значение емкости конденсатора при задании в окне атрибутов [имени модели] *cvalue* определяется выражением

$$cvalue = \langle \text{значение} \rangle \cdot C \cdot QF \cdot TF \cdot MF =$$

$$= \langle \text{значение} \rangle \cdot C \cdot (1 + VC \cdot V + VC2 \cdot V^2) [1 + TC1 \cdot (T - TNOM) + TC2 \cdot (T - TNOM)^2] \cdot MF.$$

6.1.3. Индуктивность (Inductor)

Формат схем MICROCAP-8:

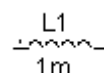
Атрибут PART: <имя>

Примеры:

L5

L1

Атрибут VALUE: <значение> [IC=<начальный ток>]



Если <значение> определяется в виде выражения, содержащего переменные состояния схемы, то оно используется только при анализе во временной области. Например, выражение, записанное в позиции VALUE $100 + I(L2) \cdot 2$, содержащее ток катушки L2, будет использовано при анализе переходных процессов, при расчете режима по постоянному току перед выполнением малосигнального частотного анализа (AC), и при расчете передаточных характеристик по постоянному току (DC). В режиме малосигнального частотного анализа (AC) зависимость рассматриваемой индуктивности от тока $I(L2)$ не принимается во внимание. Если в рабочей точке по постоянному току значение тока через катушку L2 оказалось равным 2А, то рассматриваемая индуктивность во время проведения частотного анализа будет принята равной $100 + 2 \cdot 2 = 104$.

IC=<начальный ток> — присваивает начальное значение току через катушку в режиме анализа переходных процессов, если флажок *Operating Point* сброшен.

Примеры:

1U

110U IC=3

10U*(1+I(L10)/100)

Атрибут FREQ: [<выражение>]. Если в поле этого атрибута присутствует выражение, то оно заменяет значение индуктивности, рассчитанное в рабочей точке по постоянному току с помощью выражения в поле VALUE. Т.е. если в этой позиции набрано частотно-зависимое выражение, например $10\text{mh} + I(L1) \cdot (1 + 1\text{E-}9 \cdot f) / 5\text{m}$, то оно при проведении малосигнального частотного анализа (AC) заменяет значение атрибута VALUE. Например, в вышеприведенном выражении для атрибута FREQ F обозначает независимую переменную AC-анализа — частоту, а $I(L1)$ — малосигнальный ток через катушку L1. При расчете переходных процессов и передаточных характеристик по постоянному току индуктивность будет равна значению атрибута VALUE независимо от наличия и значения атрибута FREQ.

Примеры:

$1.2\text{mh} + 5\text{m} \cdot (1 + \log(F))$

Атрибут MODEL: [имя модели]

Параметры модели индуктивности приведены в табл. 6.3.

Формат текстовой директивы модели индуктивности:

.MODEL <имя модели> IND ([параметры модели])

Примеры:

.MODEL LMOD IND (L=2.0 LOT=10% IL1=2E-3 IL2=.0015)

.MODEL L_W IND (L=1.0 LOT=5% DEV=.5% T_ABS=37)

Если в окне атрибутов катушки [имя модели] опущено, то её индуктивность равна <значению> в Генри, записанному в строке атрибутов VALUE. В противном случае индуктивность вычисляется умножением на масштабный коэффициент индуктивности L и на коэффициенты факторов, перечисленных ниже.

Квадратичная зависимость индуктивности от тока. Если в окне атрибутов [имя модели] используется, то <значение>, записанное в строке атрибута VALUE умножается на QF-фактор для вычисления индуктивности катушки, зависящей от тока в ней:

$$QF = 1 + IL1 \cdot I + IL2 \cdot I^2$$

Эта возможность оставлена в программе MC8 для сохранения совместимости с версией языка SPICE 2G.

Температурная зависимость индуктивности. Подобна температурной зависимости сопротивления и емкости (см. 3.2.1), задается значениями 2-х модельных коэффициентов TC1 и TC2. В случае задания [имени модели] в окне атрибутов, <значение> в строке атрибута VALUE домножается на значение TF-фактора, который вычисляется по формуле:

$$TF = 1 + TC1 \cdot (T - Tnom) + TC2 \cdot (T - Tnom)^2$$

Inductor: Inductor

Name: MODEL Value: IND1 ☐ Show ☒ Show

Display
☐ Pin Markers ☐ Pin Names ☐ Pin Numbers ☒ Current ☒ Power ☒ Condition

PART=L2
 VALUE=1U
 FREQ=
MODEL=IND1
 COST=
 POWER=

IND1

OK Cancel Font... Add Help...
 New Syntax... Expand... Help Bar

Source: Local text area of D:\mc8\DATA\CARLO4.cir

L 1.0 LOT=10% IL1 0 IL2 0
 TC1 0 TC2 0 T_MEASURED undefined
 T_ABS undefined T_REL_GLOBAL undefined T_REL_LOCAL undefined

Description: Value or expression for computing inductance value, plus an optional initial condition.
 Syntax: <value | expression > [IC=<initial value>]
 Examples: .1 IC=2.3, .5*(1+atan((L1)/50))

Рис. 6.3. Окно задания параметров катушки индуктивности

Таблица 6.3 Параметры модели индуктивности

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
L	Масштабный множитель индуктивности	—	1
IL1	Линейный коэффициент зависимости от тока	A ⁻¹	0
IL2	Квадратичный коэффициент зависимости от тока	A ⁻²	0
TC1	Линейный температурный коэффициент индуктивности	°C ⁻¹	0
TC2	Квадратичный температурный коэффициент индуктивности	°C ⁻²	0
T_MEASURED	Температура измерений	°C	—
T_ABS	Абсолютная температура	°C	—
T_REL_GLOBAL	Относительная температура	°C	—
T_REL_LOCAL	Разность между температурой устройства и модели-прототипа (АКО)	°C	—

Разброс индуктивности. Задается так же, как и разброс сопротивления в модельной строке с помощью ключевых слов LOT или DEV для любых параметров модели, за исключением температурных. При расчете значения индуктивности учитывается умножением на MF-фактор, вычисляемый по формуле:

$$MF = 1 \pm \langle \text{разброс в процентах DEV или LOT} \rangle / 100$$

Окончательное значение индуктивности катушки $Lvalue$ при задании в окне атрибутов [имени модели] определяется выражением

$$lvalue = \langle \text{значение} \rangle \cdot L \cdot QF \cdot TF \cdot MF = \\ = \langle \text{значение} \rangle \cdot L \cdot (1 + IL1 \cdot I + IL2 \cdot I^2) [1 + TC1 \cdot (T - TNOM) + TC2 \cdot (T - TNOM)^2] \cdot MF.$$

6.1.4. Взаимная индуктивность и магнитный сердечник (K)

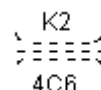
Модель взаимной индуктивности и магнитного сердечника (K)

Формат схем MICROCAP-8:

Атрибут PART: <имя>

Пример:

K1



Атрибут INDUCTORS: <имя индуктивности> <имя индуктивности>*

Пример:

L1 L2 L3

Атрибут COUPLING: <значение коэффициента связи>

Пример:

0.99

Атрибут MODEL: [имя модели]

Пример:

K_3C8

Порядок перечисления имен индуктивностей L_{yyu} , L_{zzz} ... безразличен, знак взаимной индуктивности определяется положительными направлениями токов индуктивностей относительно начал обмоток. Параметром взаимной индуктивности является коэффициент связи.

На одном сердечнике помещается одна или несколько обмоток с именами L_{yyu} , L_{zzz} ... Все обмотки имеют одинаковое <значение коэффициента связи>. При хорошей магнитной связи, осуществляемой посредством замкнутого ферромагнитного сердечника величина коэффициента связи находится в пределах 0.99...0.999. Единичное значение коэффициента связи соответствует 100%-ной магнитной связи между обмотками, что является эквивалентом отсутствия индуктивностей рассеивания.

При задании магнитной связи возможны 2 варианта: а) магнитосвязанными могут быть линейные индуктивности; б) нелинейные индуктивности с нелинейным магнитным сердечником, определяемым параметрами модели CORE. Выбор нелинейного или линейного магнитного сердечника зависит от моделируемого электронного устройства. Если нелинейные явления в сердечнике (гистерезис и насыщение) являются принципиальными для работы устройства (например, в ключах на маг-

нитных усилителях и магнитных реакторах), то используется нелинейный сердечник, если же — нет, (например импульсный или сетевой трансформатор), то используется линейный сердечник.

а) Магнитосвязанные линейные индуктивности.

Коэффициент связи K_{ij} двух обмоток (i, j) определяется выражением:

$$K_{ij} = \frac{M_{ij}}{\sqrt{L_i L_j}}$$

где L_i, L_j — индуктивности обмоток; M_{ij} — их взаимная индуктивность. Напряжение на катушке L_i , с учетом взаимной индукции определяется выражением:

$$U_i = L_i \frac{dI_i}{dt} + M_{ij} \frac{dI_j}{dt} + M_{ik} \frac{dI_k}{dt} + \dots,$$

где I_i — ток втекающий в вывод (+) обмотки (помечен на схеме точкой). В этом случае при вводе в схему связанных индуктивностей посредством вставки элемента К, в открывающемся окне параметров задается лишь позиционное обозначение сердечника KN, позиционные обозначения всех катушек индуктивности (INDUCTORS) с которыми он связан и коэффициент связи (COUPLING) (см. рис. 6.4, а). Имя модели сердечника при этом не вводится.

б) Магнитосвязанные катушки с нелинейным магнитным сердечником. При описании каждой обмотки Lyyu..., упомянутой в составе сердечника в позиции INDUCTORS, изменяется смысл параметра <значение> для катушки индуктивности. Т.е. численное значение, задаваемое в позиции VALUE окна параметров катушки индуктивности теперь определяет не индуктивность, а *число витков соответствующей обмотки* сердечника. В этом случае в позиции MODEL окна параметров сердечника К вводится имя модели нелинейного магнитного сердечника (возможно из открывающегося в этом же окне списка, см. рис. 6.4, б).

Следовательно, в случае использования нелинейного магнитного сердечника величина, задаваемая в позиции VALUE не может быть выражением, а должна быть целым положительным числом. Параметры модели магнитного сердечника приведены в табл. 6.4.

Список связанных индуктивностей в окне задания параметров сердечника может включать даже единственную катушку.

Формат текстовой директивы модели сердечника:

.MODEL <имя модели> CORE(параметры модели)

Примеры:

.MODEL K1 CORE (Area=2.54 Path=.54 MS=2E5)

.MODEL K2 CORE (MS=2E5 LOT=25% GAP=.001)

Петли гистерезиса для разных уровней перемагничивания магнитного материала (значений H_m), базируются на безгистерезисной кривой, которая строится в предположении отсутствия эффектов деформации и вращения векторов намагниченности доменных структур ферромагнетика. Сами же гистерезисные зависимости $M(H)$ ($B(H)$), получаются на основе этой кривой с использованием дифференциального уравнения процесса (аналогичного сухому трению в механике), характеризующегося постоянной коэрцитивной силой K . Таким образом, поведение модели нелинейного магнитного сердечника программы MICROCAP не зависит от времени (а следовательно и от частоты перемагничивания), однако значения напряженности магнитного поля H и магнитной индукции B , могут

быть выведены в режиме анализа переходных процессов Transient, путем связи тока и напряжения обмотки сердечника с дифференциальным уравнением сухого трения В(Н) (см. ниже).

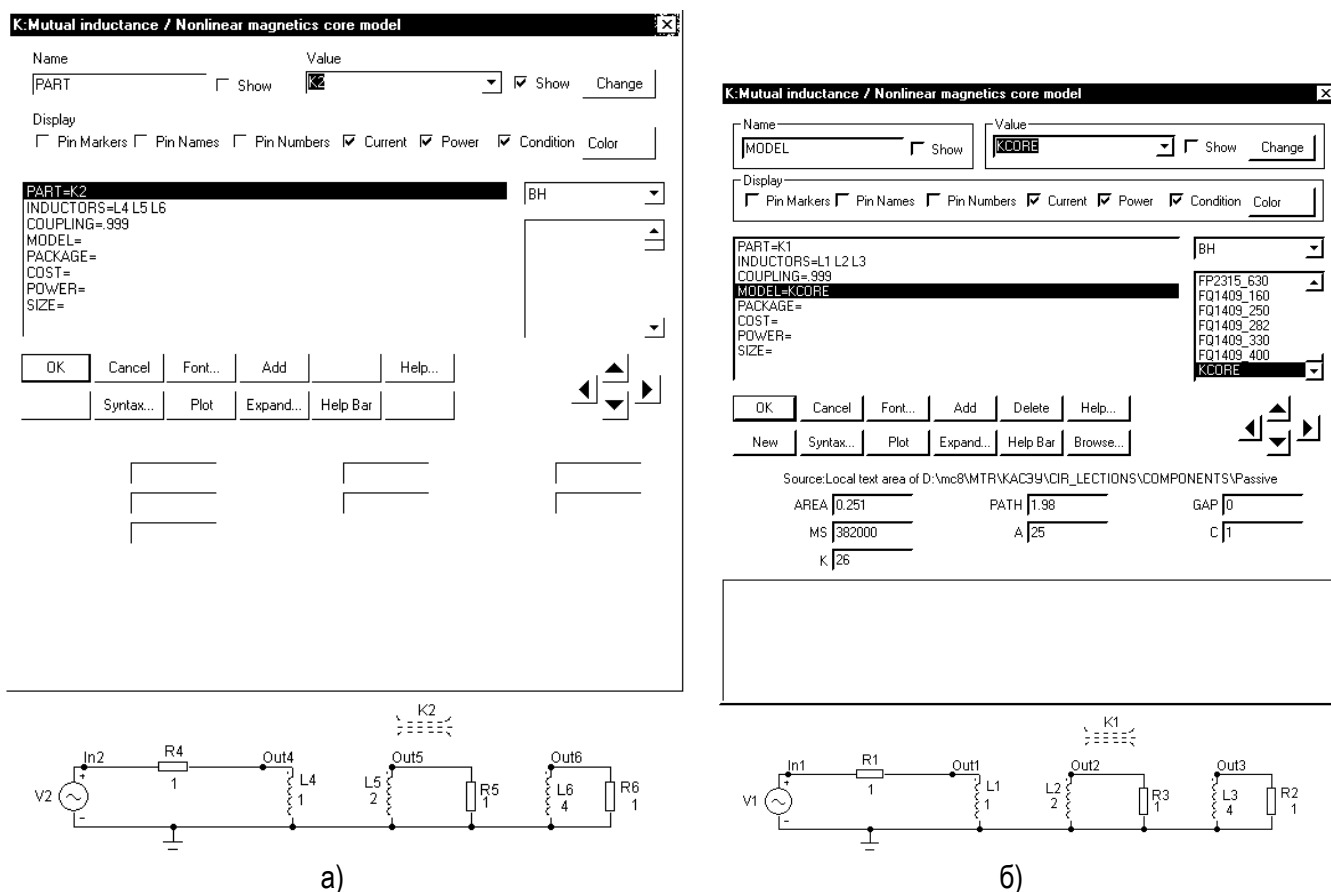


Рис. 6.4. Окна задания параметров сердечника: а) — линейного; б) — нелинейного

Таблица 6.4. Параметры модели магнитного сердечника

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
AREA	Площадь поперечного сечения магнитопровода	см ²	1
PATH	Средняя длина магнитной силовой линии	см	1
GAP	Ширина воздушного зазора	см	0
MS	Намагниченность насыщения	А/м	400·10 ³
A	Параметр формы безгистерезисной кривой намагничивания	А/м	25
C	Постоянная упругого смещения доменных границ		0,001
K	Постоянная необратимой деформации доменных стенок	А/м	25
ALPHA	Параметр эффективности поля (только для MC7, в MC8 — отсутствует)	—	0,001

Модель нелинейного магнитного сердечника MICROCAP-7 представляет собой вариант модели Джилса-Атертона, в котором безгистерезисная кривая намагниченности ферромагнетика является гиперболической функцией напряженности магнитного поля H (\coth). В модели магнитного сердечника, встроенной в программу MICROCAP-8, безгистерезисная кривая вычисляется с использованием

стандартной функции $M_A = \frac{MS \cdot H}{|H| + A}$ (так же как и в пакетах DESIGN LAB, ORCAD).

Построение графиков напряженности поля H и магнитной индукции B

В окне задания параметров анализа переходных процессов (Transient Analysis Limits) в графе Y expression можно задавать построение графиков магнитных величин в сердечнике следующим образом:

$B(L1)$ — построение графика зависимости индукции в сердечнике катушки $L1$ B в единицах системы СГС (Гауссах);

$H(L1)$ — построение графика зависимости напряженности магнитного поля в сердечнике катушки $L1$ H в единицах системы СГС (Эрстедах);

$BSI(L1)$ — построение графика зависимости индукции в сердечнике катушки $L1$ B в единицах системы СИ (Тесла);

$HSI(L1)$ — построение графика зависимости напряженности магнитного поля в сердечнике катушки $L1$ H в единицах системы СИ (А/м).

Основные уравнения варианта модели Джилса-Аттертона MICROCAP-8 (7)

$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ — магнитная проницаемость вакуума, Вб/(А·м);

N — количество витков выбранной обмотки сердечника;

$M_A(H)$ — зависимость безгистерезисной намагниченности от напряженности магнитного поля H (безгистерезисная кривая намагничивания)

H — напряженность магнитного поля в сердечнике;

H_E — эффективная напряженность магнитного поля (только для уравнений MICROCAP-7);

B — магнитная индукция в сердечнике;

M — намагниченность ферромагнетика сердечника, вызванная ориентацией и деформацией доменных структур;

I — ток, протекающий через выбранную обмотку сердечника;

V — напряжение на клеммах выбранной катушки сердечника;

Следует отметить, что расчеты нелинейных магнитных элементов программе MICROCAP-7(8) осуществляются не в системе СИ. В программе принята следующая система единиц: намагниченность M — [А/м], магнитная индукция B — [Гаусс], напряженность магнитного поля H — [Эрстед]. Расчеты в программе MC7 осуществляются по формулам:

$$H = \frac{100 \cdot N \cdot I - M \cdot GAP}{PATH}, \quad H_E = H + ALPHA \cdot Ma, \quad M_A = M_s \cdot \left\{ \operatorname{cth} \left[\frac{H_E}{A} \right] - \frac{A}{H_E} \right\}.$$

В последней версии программы (MICROCAP-8) безгистерезисная кривая намагничивания находится по формуле $M_A = \frac{MS \cdot H}{|H| + A}$ и отсутствует параметр модели магнитного сердечника $ALPHA$, учитывающий эффективную напряженность магнитного поля в сердечнике. Остальные формулы модели остались без изменений.

$$SIGN = 1, \text{ если } \frac{dH}{dt} > 0; \quad SIGN = -1, \text{ если } \frac{dH}{dt} \leq 0$$

Основное дифференциальное уравнение Джилса-Атертона, связывающее изменение намагниченности с величиной напряженности H и предысторией системы:

$$\mu = \frac{dM}{dH} = \frac{(M_A - M) \cdot \text{Sign}}{K \cdot (1 + C)} + \frac{C}{1 + C} \cdot \frac{dM_A}{dH}$$

$$B = \mu_0 \cdot (H + M); \quad L = \frac{\mu_0 \cdot \left(1 + \frac{dM}{dH}\right) \cdot N^2 \cdot \text{AREA}}{\text{PATH}}; \quad V = L \frac{dI}{dt}$$

$$1 \text{ Э} = \frac{10^4}{4\pi} \frac{\text{А}}{\text{м}}; \quad 1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гс}.$$

См. пример схему **Core3.CIR** из каталога **COMPONENTS\PASSIVE COMP** и ее анализ (рис. 5.12).

Определение параметров модели ферромагнитного сердечника в программе MODEL

Для вычисления параметров модели магнитного сердечника по справочным данным используется программа MODEL. Программа подбирает значения параметров модели магнитного сердечника MS, A, C и K.

Параметры модели AREA (площадь поперечного сечения), PATH (средняя длина линии силовой магнитного поля в сердечнике) и GAP (ширина немагнитного зазора) вводятся непосредственно из справочных данных на сердечник.

Многие справочные издания приводят величину магнитной индукции насыщения B_{SAT} в Гауссах. Для пересчета указанного справочного параметра в значение намагниченности насыщения MS требуется B_{SAT} в Гауссах разделить на 79.577. Полученное значение будет приближенная величина намагниченности насыщения в А/м.

Петля гистерезиса и кривые намагничивания Core B-H	
Входные данные	Таблица значений H, B с указанием области петли гистерезиса Region
Оцениваемые параметры	MS, A, C, K
Уравнения	Уравнения Джилса-Атертона модели сердечника
Комментарии	<p>Экспериментальные точки петли гистерезиса могут вводиться в двух системах единиц. В системе СИ напряженность магнитного поля H указывается в А/м, магнитная индукция B в Тесла; в системе СГС напряженность магнитного поля H указывается в Эрстедах, магнитная индукция B в Гауссах. Систему единиц можно переключать командой меню Model <i>Change Core Units</i> (Ctrl+U). Параметр Region принимает значения 1, 2 и 3. Значение 1 соответствует начальной кривой намагничивания при изменении H от 0 до Hmax; значение 2 — верхнему участку петли гистерезиса при изменении H от Hmax до -Hmax; значение 3 — нижнему участку петли гистерезиса при изменении H от -Hmax до Hmax. Для повышения точности результатов на всех участках задается одинаковое число точек. Параметры геометрии сердечника AREA, PATH и GAP указываются пользователем.</p> <p>Если экспериментальные точки начальной кривой намагничивания неизвестны, сразу вводятся точки для областей 2 и 3.</p>

Для выяснения влияния параметров модели магнитного сердечника A, K, C на кривую петли гистерезиса можно загрузить пример **Core.CIR** из каталога **COMPONENTS\PASSIVE** и запустить анализ переходных процессов. Затем можно организовать многовариантный анализ при изменении

модельных параметров. Влияние увеличения каждого модельного параметра может быть выражено следующей таблицей:

параметр	μ	HC	BR
A	–	+	+
K		+	+
C	+	–	–

Где μ — дифференциальная магнитная проницаемость, HC — величина коэрцитивной силы, BR — величина остаточной индукции.

6.1.5. Трансформатор (Transformer)

Формат схем MICROCAP-8:

Атрибут PART: <имя>

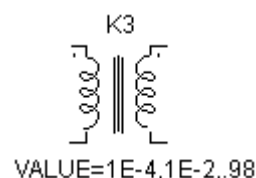
Пример:

T1

Атрибут VALUE: <индуктивность первичной обмотки>, <индуктивность вторичной обмотки>, <коэффициент связи>

Пример:

.01,.0001,.98



Фактически трансформатор представляет собой две катушки индуктивности, связанные магнитно между собой (пронизываемые практически одинаковым магнитным потоком). Его модель эквивалентна двум отдельным катушкам индуктивности, связанным через общий линейный сердечник (компонент K без указания имени модели, см. 3.2.4), определяющий величину взаимной индуктивности указанных катушек. Коэффициент связи K связан с величиной взаимной индуктивности катушек M следующим соотношением:

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_P L_S}},$$

где L_P , L_S — индуктивности первичной и вторичной обмоток соответственно.

При выполнении моделирования между входным и выходным плюсовым выводом трансформатора включается сопротивление величиной $1/GMIN$, для того чтобы не возникли проблемы со сходимостью (ликвидирует индуктивную звезду).

Еще один способ задания трансформатора — в виде схемы-макромодели, содержащей магнитосвязанные индуктивности. Так в программном пакете имеется встроенная модель двухобмоточного трансформатора со средней точкой *Component/Analog Primitives/Macros/Centap*.

Все 3 способа задания трансформатора в схеме для моделирования иллюстрирует пример **Transformer.CIR** из каталога **COMPONENTS\PASSIVE COMP**.

Следует отметить, что программный пакет содержит встроенные макромодели идеальных трансформаторов (не содержащих индуктивных компонентов, а содержащих линейные зависимые источники напряжения и тока, трансформирующие соответствующие физические величины). Это компоненты из группы *Component>Analog Primitives>Macros: Ideal_Trans2*, *Ideal_Trans3*, представляющие собой модель идеального двухобмоточного и трехобмоточного трансформаторов. Они могут быть использованы при моделировании устройств, в которых процессы, происходящие в индуктивных компонентах (индуктивности намагничивания и рассеивания) не существенны. При необходимости модель идеального трансформатора может быть дополнена индуктивностью намагничивания для

моделирования реальных трансформаторов со 100%-ой магнитной связью между обмотками. Для моделирования трансформатора с неидеальной магнитной связью в дополнение к индуктивности намагничивания добавляются и индуктивности рассеяния обмоток, при этом получается модель, эквивалентная 3-м вышеперечисленным, однако неидеальная магнитная связь здесь задается не с помощью коэффициента связи $K < 1$, а наличием индуктивностей рассеивания определенной величины (как правило, на несколько порядков меньше индуктивности намагничивания).

6.1.6. Линия передачи (Transmission line)

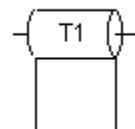
Формат схем MICROCAP-8:

Атрибут PART: <имя>

Пример:

T1

LEN=100 R=3m C=1p L=1n



Для идеальной линии передач без потерь

Атрибут VALUE: Z0=<значение> [TD=<значение>] | [F=<значение> [NL=<значение>]];

Здесь Z0 — волновое сопротивление линии (Ом); TD — задержка сигнала в линии (с); NL — электрическая длина линии на частоте F ($NL=L/\lambda$, где L — геометрическая длина линии, λ — длина волны в линии, по умолчанию $NL=0,25$).

При описании линии передачи задается параметр TD либо F и NL.

Пример:

Z0=50 TD=3.5ns

Для линии передач с потерями

Атрибут VALUE: <физическая длина> LEN=<значение длины Len> R=<значение R> L=<значение L> G=<значение G> C=<значение C>

Пример:

LEN=1 R=.5 L=.8U C=56PF R=.5 L=.8U C=56PF

Атрибут MODEL: [имя модели]

Пример:

RELAY

Формат текстовой директивы модели длинной линии:

.MODEL <имя модели> TRN(параметры модели)

Уравнения модели длинной линии

Эквивалентная схема замещения длинной линии без потерь и с потерями представлена на рис. 6.5. Принципиальное отличие двух моделей — реализация функции задержки сигнала (delay). В модели идеальной линии без потерь задержка моделируется функцией, заданной списком пар значений (время, величина) со сдвигом во времени.

В линии передачи с потерями задержка моделируется принципиально другим способом, состоящим в использовании интеграла свертки импульсной характеристики линии с входным воздействием для расчета реакции на выходе. Импульсная характеристика получается из предварительно

выведенной аналитической формулы. Предварительное аналитическое решение для нахождения импульсной характеристики является наиболее быстрым и точным способом по сравнению с обратным преобразованием Фурье передаточной характеристики в S-области. Свертка подразумевает возможность использования любого входного воздействия.

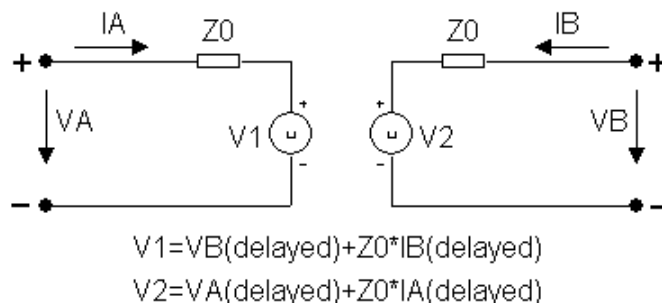


Рис. 6.5. Схема замещения линии передачи

Следует отметить, что поддерживаются только следующие типы длинных линий — RLC, RC, RG, и LC. Ненулевые значения для модельных параметров R, L, C, и G, задающие другой тип распределенной линии, вызовут сообщение об ошибке.

Для обоих типов линии передачи могут быть указаны и значения в строке атрибута VALUE и модельные параметры. В этом случае параметры строки VALUE имеют приоритет и замещают модельные параметры при расчетах. Если модификатор длины <физическая длина> задан, то он замещает параметр модели LEN.

Таблица 6.5. Параметры модели линии передачи

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
Идеальная линия без потерь			
Z0	Волновое сопротивление	Ом	—
TD	Время задержки сигнала	с	—
F	Частота для расчета NL	Гц	—
NL	Электрическая длина на частоте F (относительно длины волны)		0,25
Линия с потерями			
R	Погонное сопротивление	Ом/м	—
L	Погонная индуктивность	Гн/м	—
G	Погонная проводимость	См/м	—
C	Погонная емкость	Ф/м	—
LEN	Длина линии	м	—

Линия передач без потерь при расчете переходных процессов выполняет роль линии задержки, при расчете частотных характеристик она представляет собой безынерционное звено с линейной ФЧХ.

TLine

Name: Show

Value: Show

Display: ☐ Pin Markers ☐ Pin Names ☐ Pin Numbers ☒ Current ☒ Power ☒ Condition

PART=T2
VALUE=
MODEL=LT2
PACKAGE=
COST=
POWER=

LT1
LT2
LT3

OK Cancel Font... Add Delete Help... Lossy
New Syntax... Plot Expand... Help Bar Browse... Ideal

Source: Local text area of D:\MC7\MTR\KAC3Y\COMPONENTS\PASSIVE COMP\LINE_L_3.CIR

Z0 TD F
NL R L
G C LEN

Description: Line parameters may be entered here or as a model (below).
Syntax: [LEN=<val> R=<val> L=<val> C=<val> G=<val>] |
ZO=<val> [TD=<val>] | [F=<val> [NL=<val>]]
Example: LEN=100 R=3m C=1p L=1.2n

Рис. 6.6. Окно задания параметров линии передачи

Примеры моделирования линий передачи без потерь — **Tline_01.CIR...Tline_03.CIR**; линии передачи с потерями — **Tline_L_3.CIR**. Схемы находятся в каталоге **COMPONENTS\PASSIVE COMP**.

6.2. Источники сигналов (Waveform sources)

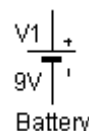
6.2.1. Независимые источники постоянного напряжения и тока

Источники постоянного напряжения (Battery)

Формат схем MICROCAP-8:

Атрибут PART: <имя>

Атрибут VALUE: <значение>



Батарея (Battery) представляет собой источник постоянного напряжения. Напряжение на ее выводах равно заданному <значению>, независимо от подключенной к ней внешней цепи.

Фиксированное смещение для аналоговых цепей (Fixed Analog)

Формат схем MICROCAP-8:

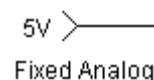
Атрибут PART: <имя>

Атрибут VALUE <значение>

Примеры:

15V

12.5



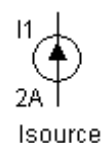
Компонент *fixed analog* на своем выходе создает фиксированный потенциал равный заданному <значению>, независимо от подсоединенной внешней цепи. Постановка подобного компонента в схему эквивалентна включению батареи с соответствующим значением напряжения, один из выводов которой подключен к земле (Ground).

Источник постоянного тока (Isource)

Формат схем MICROCAP-8:

Атрибут PART: <имя>

Атрибут VALUE: <значение>



Компонент *Isource* представляет собой источник постоянного тока. Ток через источник равен заданному <значению>, независимо от подключенной к его выводам внешней цепи.

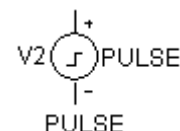
6.2.2. Источники сигнала, зависящего от времени

Источник импульсного напряжения (Pulse source)

Формат схем MICROCAP-8:

Атрибут PART: <имя>

Атрибут MODEL: <имя модели>



Формат текстовой директивы модели источника импульсного сигнала:

.MODEL <имя модели> PUL([список параметров])

Пример:

.MODEL STEP PUL (VZERO=.5 VONE=4.5 P1=10n P2=20n P3=100n P4=110n P5=500n)

Параметры модели источника импульсного напряжения приведены в табл. 6.6, а его форма — на рис. 6.7, окно задания параметров — на рис. 6.8.

Таблица 6.6. Параметры модели источника импульсного сигнала в формате MC8

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
VZERO	Начальное значение	В	0
VONE	Максимальное значение	В	5
P1	Начало переднего фронта	с	1E-7
P2	Начало плоской вершины импульса	с	1,1E-7
P3	Конец плоской вершины импульса	с	5E-7
P4	Момент достижения с уровня VZERO	с	5,1E-7
P5	Период повторения	с	1E-6

Примечание. В режиме анализа АС независимо от заданных параметров источник выдает гармонический сигнал с единичной амплитудой. Т.е. для режима АС узлы подключения источника импульсного сигнала являются местом приложения гармонического воздействия изменяющейся частоты.

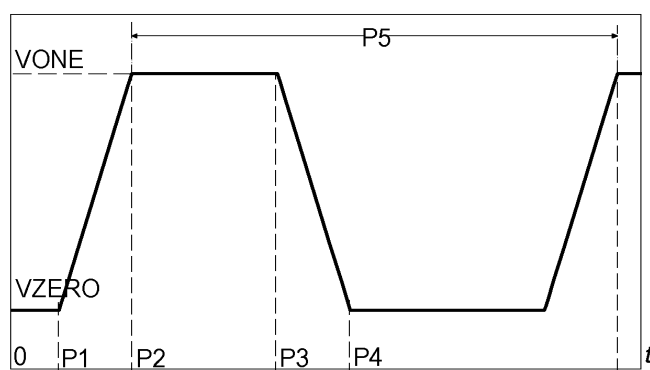


Рис. 6.7. Описание импульсного сигнала в формате MC8

Напряжение во время фронта (спада) импульса источника импульсного сигнала формата MICROCAP (Pulse) изменяется по линейному закону. При необходимости использования фронтов другой формы следует использовать источники импульсного сигнала формата SPICE (V или I, см. далее).

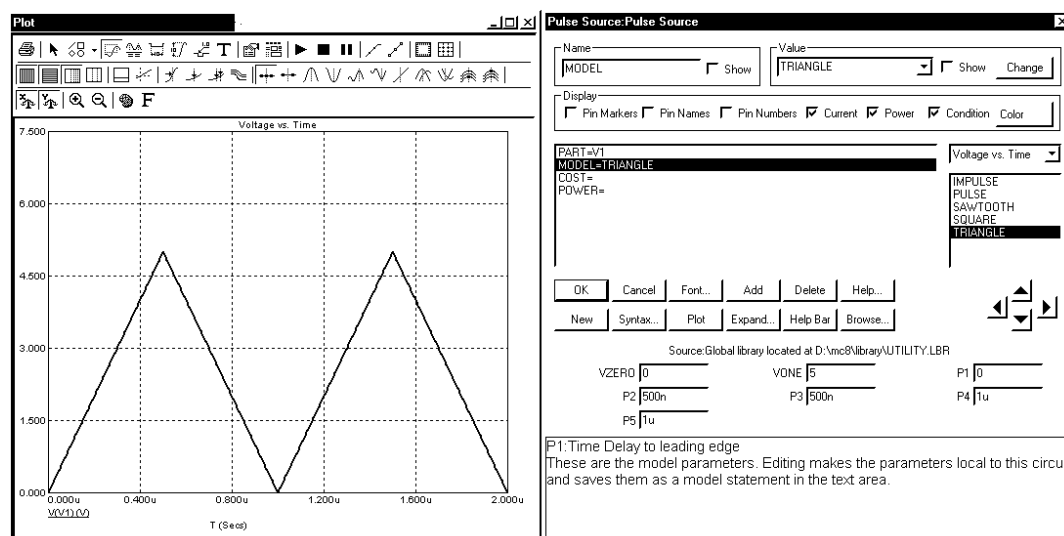


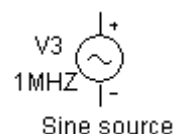
Рис. 6.8. Окно задания параметров импульсного сигнала

Источник синусоидального напряжения (Sine source)

Формат схем MICROCAP-8:

Атрибут PART: <имя>

Атрибут MODEL: <имя модели>



Формат текстовой директивы модели источника синусоидального напряжения:

.MODEL <имя модели> SIN ([список параметров])

Параметры модели источника синусоидального напряжения приведены в табл. 6.7, а его форма на рис. 6.9, окно задания параметров — на рис 3.10.

Уравнения модели

Если $TAU=0$, то $V_{sin} = DC + A \cdot \sin[2\pi \cdot F \cdot TIME + PH]$

Если TAU отлично от нуля, то $V_{sin} = DC + A \cdot e^{\frac{-T}{TAU}} \cdot \sin[2\pi \cdot F \cdot TIME + PH]$,

где $T=TIME \bmod RP$.

Таблица 6.7. Параметры модели источника гармонического сигнала

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
F	Частота	Гц	10^6
A	Амплитуда	В	1
DC	Постоянная составляющая	В	0
PH	Начальная фаза	радиан	0
RS	Внутреннее сопротивление	Ом	0,001
RP	Период повторения затухающего сигнала	с	0
TAU	Постоянная времени изменения амплитуды сигнала по экспоненциальному закону	с	0

Примечание. Амплитуда сигнала в режиме AC принимается равной 1 В.

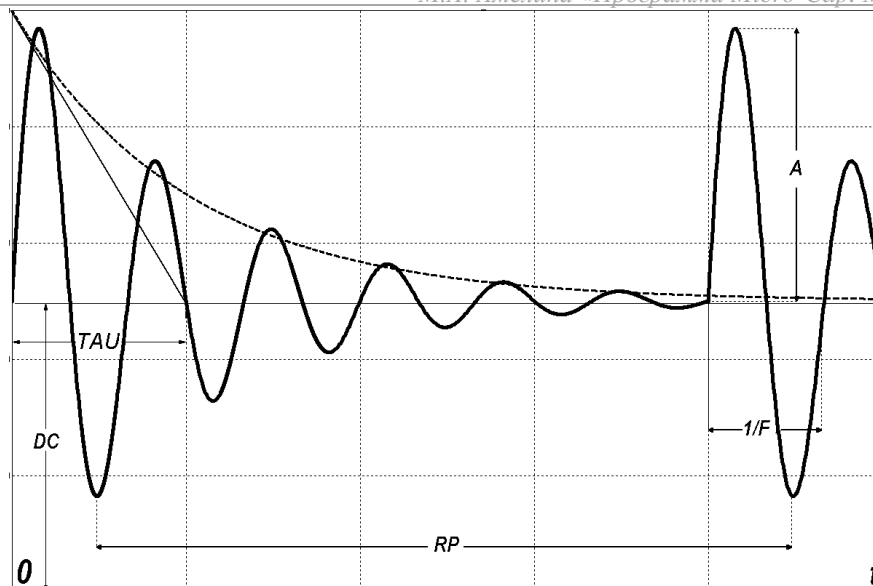


Рис. 6.9. Синусоидальный сигнал с периодическим экспоненциальным затуханием

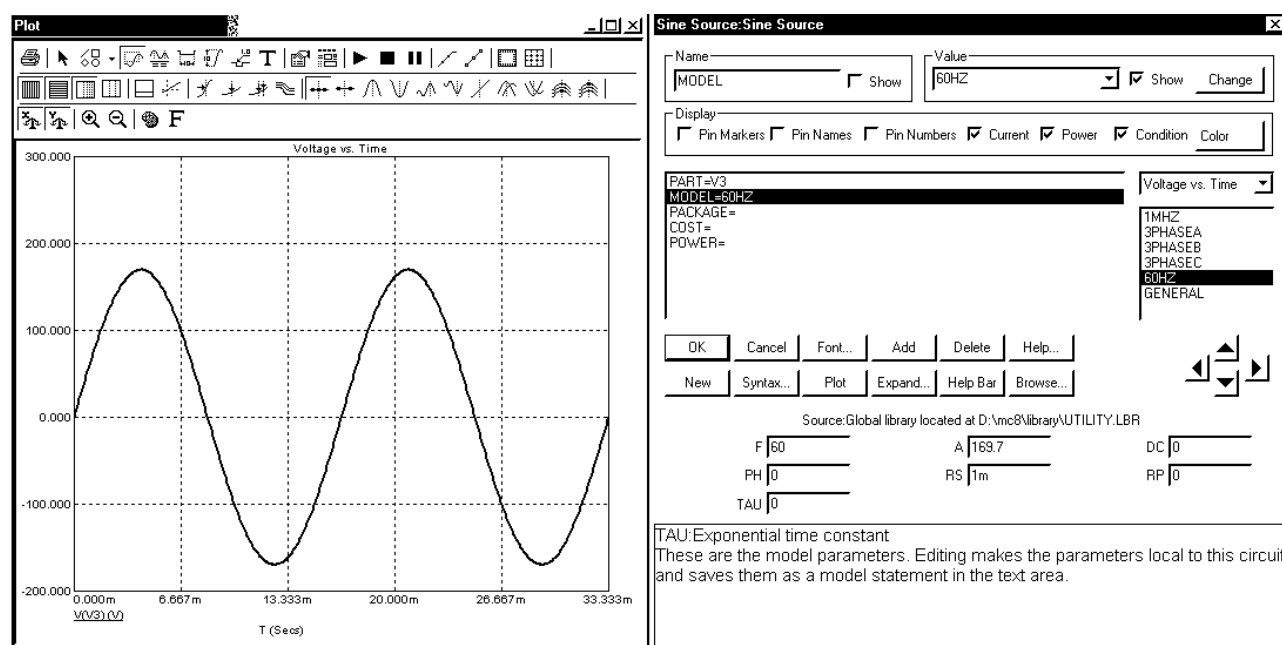


Рис. 6.10. Окно задания параметров источника синусоидального напряжения

Независимые источники напряжения и тока (V и I) сложной формы формата SPICE

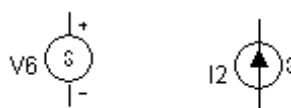
Независимые источники напряжения (V) и тока (I) позволяют создавать входные воздействия разнообразной формы: импульсные, синусоидальные, экспоненциальные, кусочно-линейные, гармонические с частотной модуляцией и др. Для всех этих сигналов указывается значение постоянной составляющей (DC) — необязательный параметр. Кроме того, при расчете частотных характеристик (режим AC) можно задавать амплитуду и начальную фазу этих сигналов.

Формат схем MICROCAP:

Атрибут PART: <имя>

Атрибут VALUE: <список параметров>

В <список параметров> вносится та же информация, что и для соответствующих источников в SPICE, за исключением имени компонента и номеров узлов его подключения.



Примеры:

DC 1 PULSE 0 1MA 12ns 8ns 110ns 240ns 500ns

I22 SPICE 0 DC 0 AC 1 0 SFFM 0 2 2E6 .5 1E7 ;current-sffm

Уравнения для сигналов и их графическое представление, приведенные ниже, относятся только к режиму анализа переходных процессов. Малосигнальный анализ по переменному току AC использует значения амплитуды и фазы гармонического сигнала, указанного в списке параметров после ключевого слова AC. Они же задаются в окне задания параметров источника сигнала в позициях *AC magnitude*, *AC phase*. Анализ по постоянному току использует значение постоянного напряжения или тока, указанное после ключевого слова DC. Оно же задается в окне задания параметров источника сигнала в позициях *DC*.

Импульсный сигнал (PULSE) задается параметрами, приведенными в табл. 6.8. Обратим внимание, что здесь источник импульсного сигнала напряжения или тока задается другим способом по сравнению с ранее рассмотренным источником импульсного напряжения PULSE. Однако он также формирует периодический импульсный сигнал с линейными фронтом и спадом.

Ниже также приведен вид окна задания параметров импульсного источника V (I).

Таблица 6.8. Параметры импульсного сигнала независимого источника V или I

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
V1	Начальное значение	В или А	—
V2	Максимальное значение	В или А	—
TD	Задержка до начала переднего фронта	с	0
TR	Длительность переднего фронта	с	TSTEP*
TF	Длительность заднего фронта	с	TSTEP*
PW	Длительность плоской части импульса	с	TSTOP"
PER	Период повторения	с	TSTOP**

* TSTEP - шаг вывода на печать.
 ** TSTOP - конечное время анализа переходного процесса (параметры TSTEP и TSTOP задаются в директиве .TRAN или в окне *Transient Analysis Limits*).

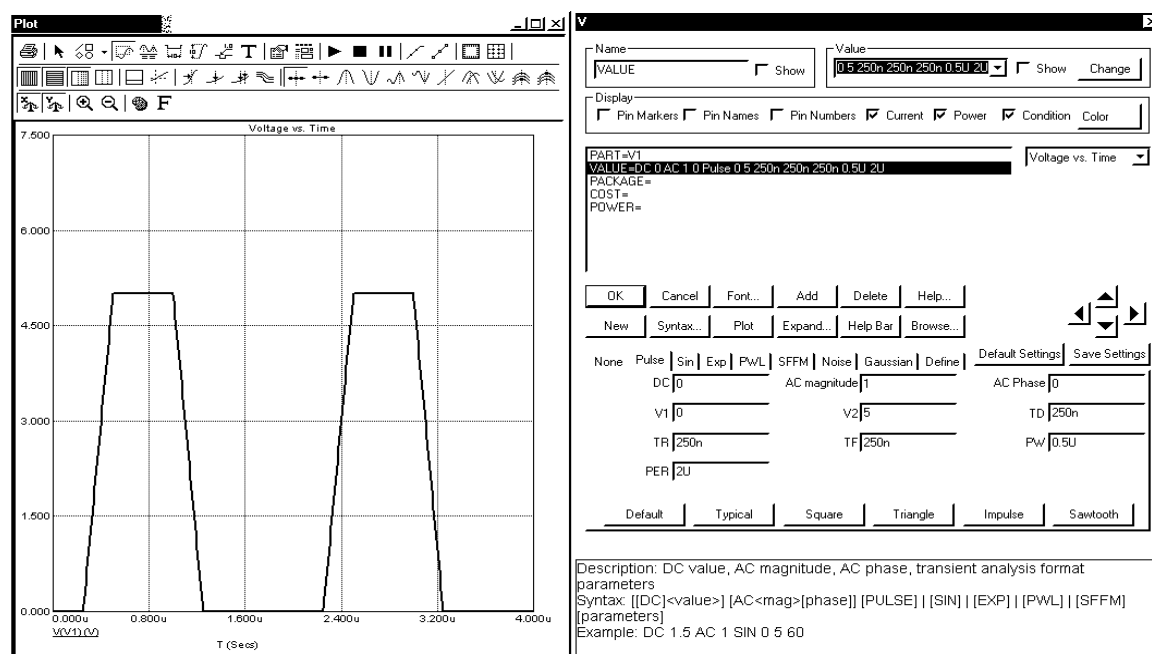


Рис. 6.11. Окно задания параметров независимого источника V (I) импульсного сигнала PULSE

Синусоидальный сигнал (SIN) задается параметрами, приведенными в табл. 6.9. Он описывается выражением:

$$V(t) = \begin{cases} V0, & \text{при } 0 < TIME \leq TD \\ V0 + VA \cdot e^{-(TIME-TD) \cdot DF} \sin \left[2\pi F(TIME - TD) + \frac{2\pi \cdot PH}{360} \right], & \text{при } TIME > TD \end{cases}$$

Его параметры приведены в табл. 6.9., а окно задания параметров с выведенным в нем графиком – на рис. 6.12. Пример задания и график в режиме TRANSIENT — в схемном файле **Waveform_V_Sin.CIR** из каталога **COMPONENTS\SOURCES**.

Таблица 6.9. Параметры гармонического сигнала независимого источника V(или I)

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
V0	Постоянная составляющая	В или А	—
VA	Амплитуда	В или А	—
F	Частота	Гц	1/TSTOP
TD	Задержка	с	0
DF	Коэффициент затухания	1/с	0
PH	Фаза	град.	0

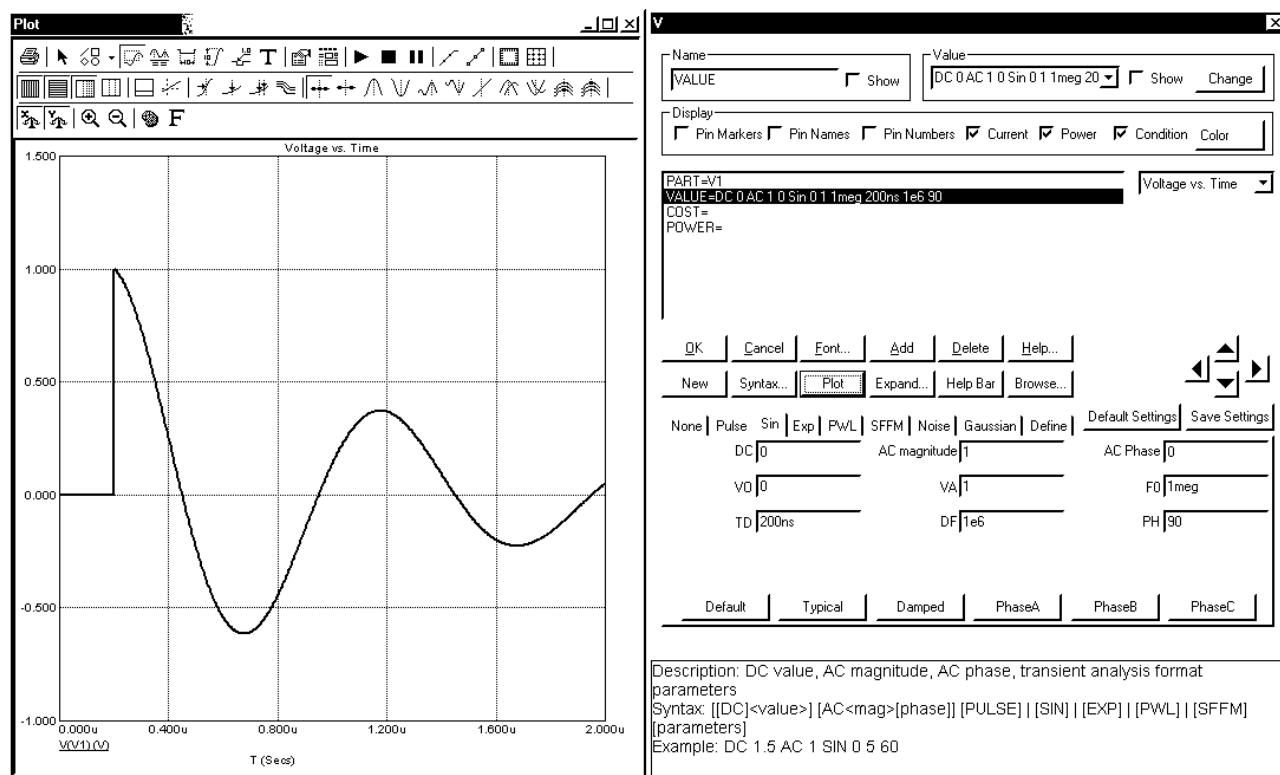


Рис. 6.12. Окно задания параметров независимого источника V (I) гармонического сигнала (SIN)

Импульсный сигнал с экспоненциальными фронтами задается параметрами, приведенными в табл. 6.10 и описывается следующей зависимостью от времени:

$$V(t) = \begin{cases} V1 & \text{при } 0 < TIME \leq TD1 \\ V1 + (V2 - V1) \cdot \left(1 - e^{\frac{-(TIME - TD1)}{TC1}} \right) & \text{при } TD1 < TIME \leq TD2 \\ V1 + (V2 - V1) \cdot \left[e^{\frac{-(TIME - TD2)}{TC2}} - e^{\frac{-(TIME - TD1)}{TC1}} \right] & \text{при } TD2 < TIME \end{cases}.$$

Таблица 6.10. Параметры независимого источника (V или I) экспоненциального сигнала

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
V1	Начальное значение	В или А	—
V2	Максимальное значение	В или А	—
TD1	Начало переднего фронта	с	0
TC1	Постоянная времени переднего фронта	с	TSTEP*
TD2	Начало заднего фронта	с	TD1+TSTEP
TC2	Постоянная времени заднего фронта	с	TSTEP

* TSTEP — шаг по времени вывода на печать результатов расчетов переходных процессов (задается в директиве .TRAN и дублируется в окне *Transient Analysis Limits*).

Параметры одиночного импульса с экспоненциальными фронтами иллюстрирует рис. 6.13, а на рис 3.14 приведено окно задания параметров сигнала для источника тока.

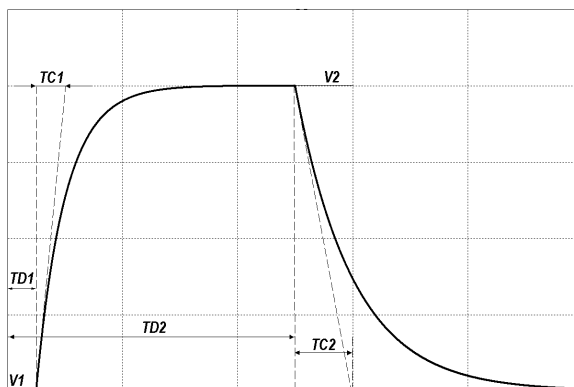


Рис. 6.13. Параметры импульса с экспоненциальными фронтами

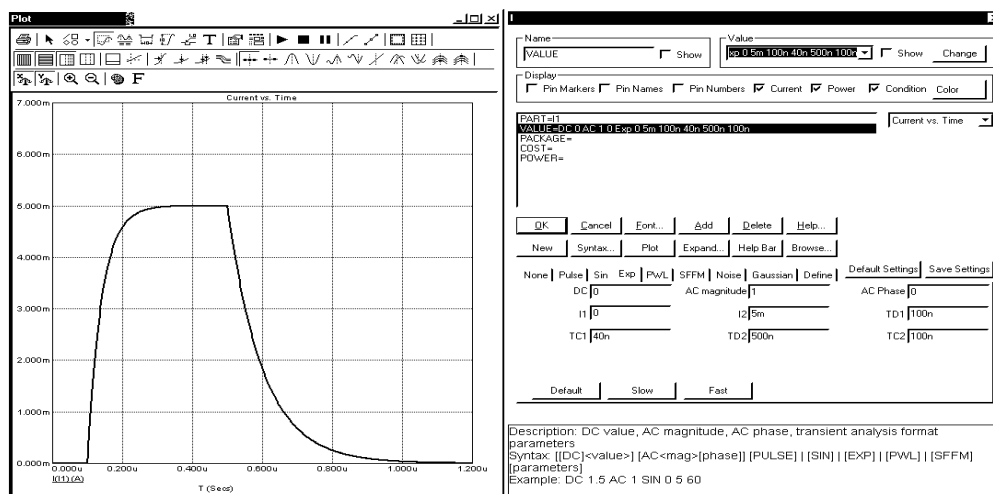


Рис. 6.14. Окно задания параметров импульса с экспоненциальными фронтами (для источника тока)

Пример задания и график в режиме TRANSIENT находится в схемном файле **Waveform_V_Exp.CIR** из каталога **COMPONENTS\SOURCES**.

Синусоидальная функция с частотной модуляцией (SFFM) задается параметрами, приведенными в табл. 6.11 и описывается следующей функцией времени:

$$V(T) = V0 + VA \cdot \sin[2\pi \cdot F0 \cdot T + MI \cdot \sin(2\pi \cdot FM \cdot T)].$$

Таблица 6.11. Параметры независимого источника (V или I) гармонического сигнала с частотной модуляцией

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
V0	Постоянная составляющая	В или А	—
VA	Амплитуда	В или А	—
F0	Частота несущей	Гц	1/TSTOP
MI	Индекс частотной модуляции	—	0
FM	Частота модуляции	Гц	1/TSTOP

Ниже приведено окно задания параметров независимого синусоидального источника тока с возможной частотной модуляцией.

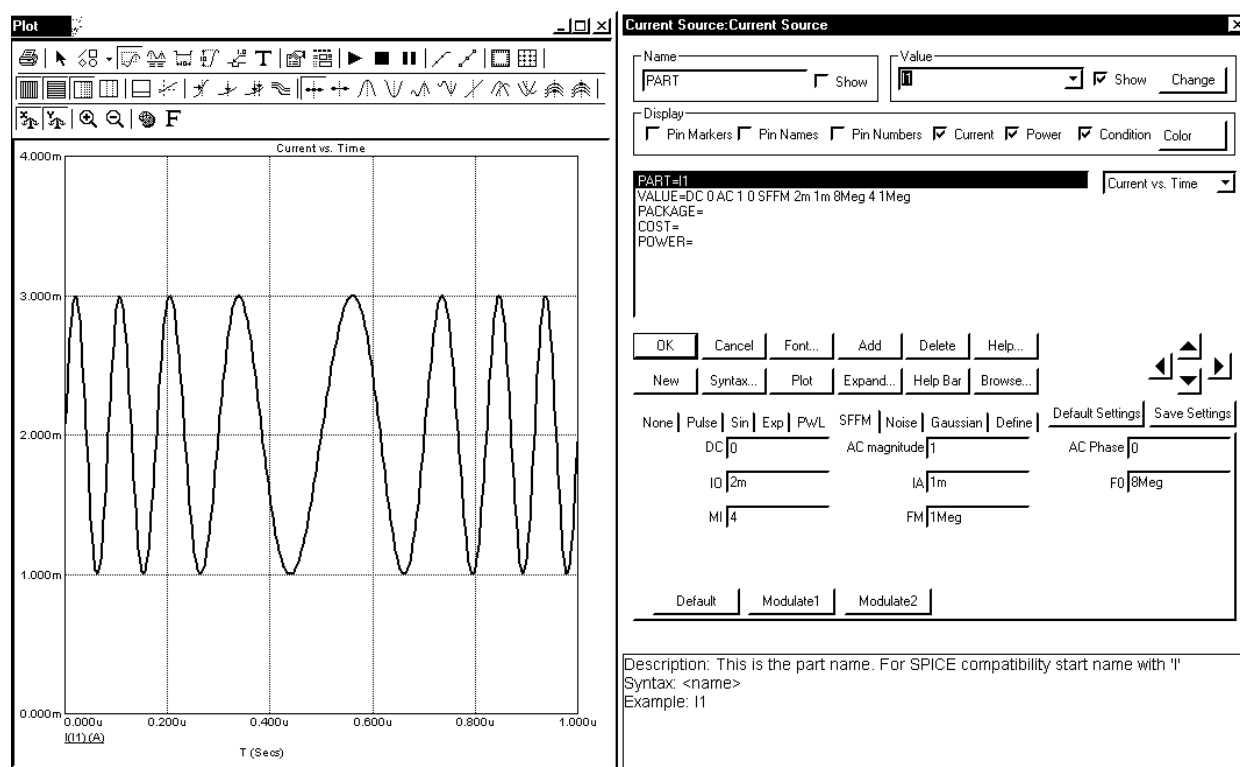


Рис. 6.15. Окно задания параметров независимого источника V (I) синусоидального сигнала с частотной модуляцией (SFFM)

Кусочно-линейный сигнал (PWL) задается координатами точек излома (T_i , V_i), см. окно задания его параметров с выведенным графиком на рис. 6.16.

Общий формат:

PWL [TIME_SCALE_FACTOR=<значение>] [VALUE_SCALE_FACTOR=<значение>] +
+(пары координат точек полилинии)

синтаксис (пары координат точек полилинии):

<значение времени t_{IN} >, <величина сигнала i_n >

Если в командной строке указаны масштабные множители по времени и (или) по значению то соответствующие координаты умножаются на масштабные коэффициенты.

Синтаксис для нескольких точек, определяющих ломаную линию сигнала, пары координат перечисляются через знак пробела:

(<tin₁>,<in₁>) (<tin₂>,<in₂>) ... (<tin_m>,<in_m>)

Синтаксис для командной строки, задающий повтор ломаной линии n раз:

REPEAT FOR <n> (пары координат точки полилинии)*
ENDREPEAT

Синтаксис для командной строки, задающий бесконечный повтор ломаной линии:

REPEAT FOREVER (пары координат точек полилинии)*
ENDREPEAT

Примеры:

Одиночный прямоугольный импульс амплитудой 5В, с задержкой 5 нс и длительностью 5нс:

PWL (0,0) (5n,0) (5n,5) (10n,5) (10n,0)

PWL TIME_SCALE_FACTOR=1n (0,0) (5,0) (5,5) (10,5) (10,0)

Аналогичный прямоугольный импульс, повторяющийся 20 раз:

PWL REPEAT FOR 20 (0,0) (5n,0) (5n,5) (10n,5) (10n,0) ENDREPEAT

Аналогичный периодически повторяющийся прямоугольный импульс:

PWL REPEAT FOREVER (0,0) (5n,0) (5n,5) (10n,5) (10n,0) ENDREPEAT

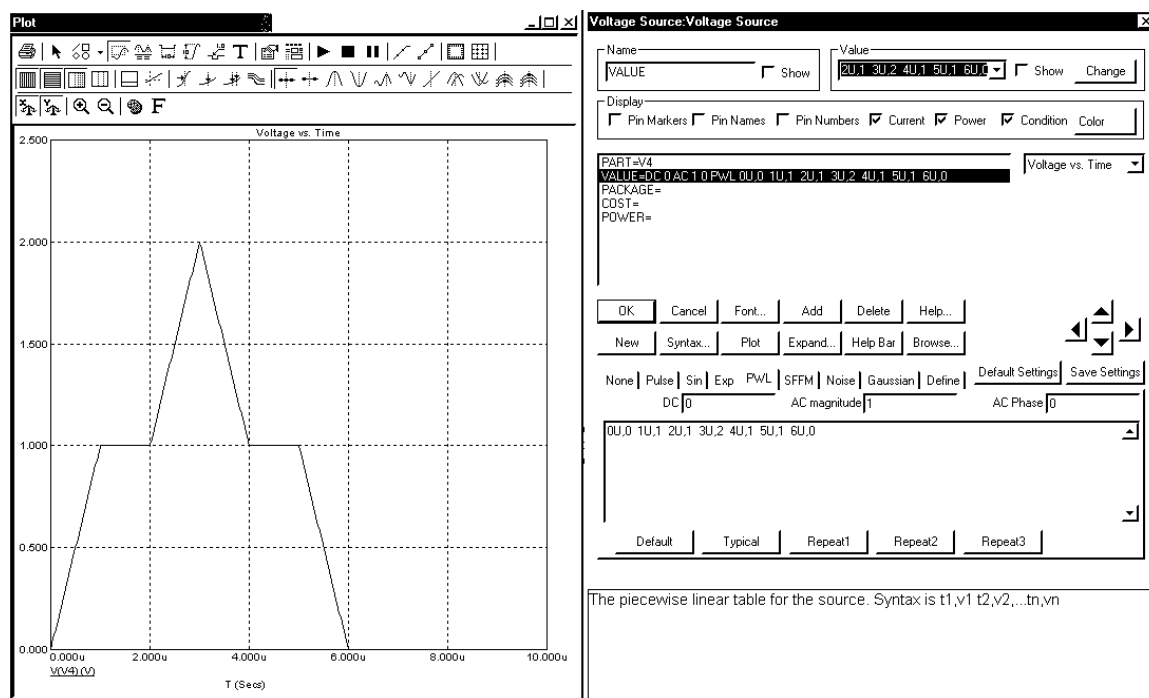


Рис. 6.16. Окно задания независимого источника сигнала в виде кусочно-линейной функции

Шумовой сигнал NOISE задается параметрами, приведенными в табл. 6.12.

Шумовой сигнал стартует от значения <DC> в момент <start> и далее его значения появляются последовательно через временной интервал <Interval>, находясь при этом в промежутке между +<amplitude>/2 и -<amplitude>/2 относительно базового уровня <DC>. Описанный процесс генерации случайных значений продолжается до момента времени <end>, далее сигнал принимает постоянное

значение $\langle DC \rangle$. Следует отметить, что первое случайное значение генерируется в момент времени $T = \langle start \rangle + \langle interval \rangle$, последнее — в момент времени $T = \langle end \rangle - \langle interval \rangle$.

Если $seed \geq 1$, случайная последовательность одна и та же при каждом новом запуске. В противном случае последовательности отличаются между собой при каждом новом запуске. Зерно $seed$ инициализируется при каждом новом значении температуры, анализе Монте-Карло или многовариантном анализе (Stepping).

Таблица 6.12. Параметры шумового сигнала NOISE

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
DC	Постоянная составляющая, на которую накладывается шум	В или А	0
Interval	Интервал между случайными значениями	с	0
amplitude	Амплитуда шумового сигнала	В или А	0
Start	Стартовое время случайной последовательности	с	0
End	Конечное время случайной последовательности	с	0
seed	Значение «зерна» для генератора случайных чисел	—	0

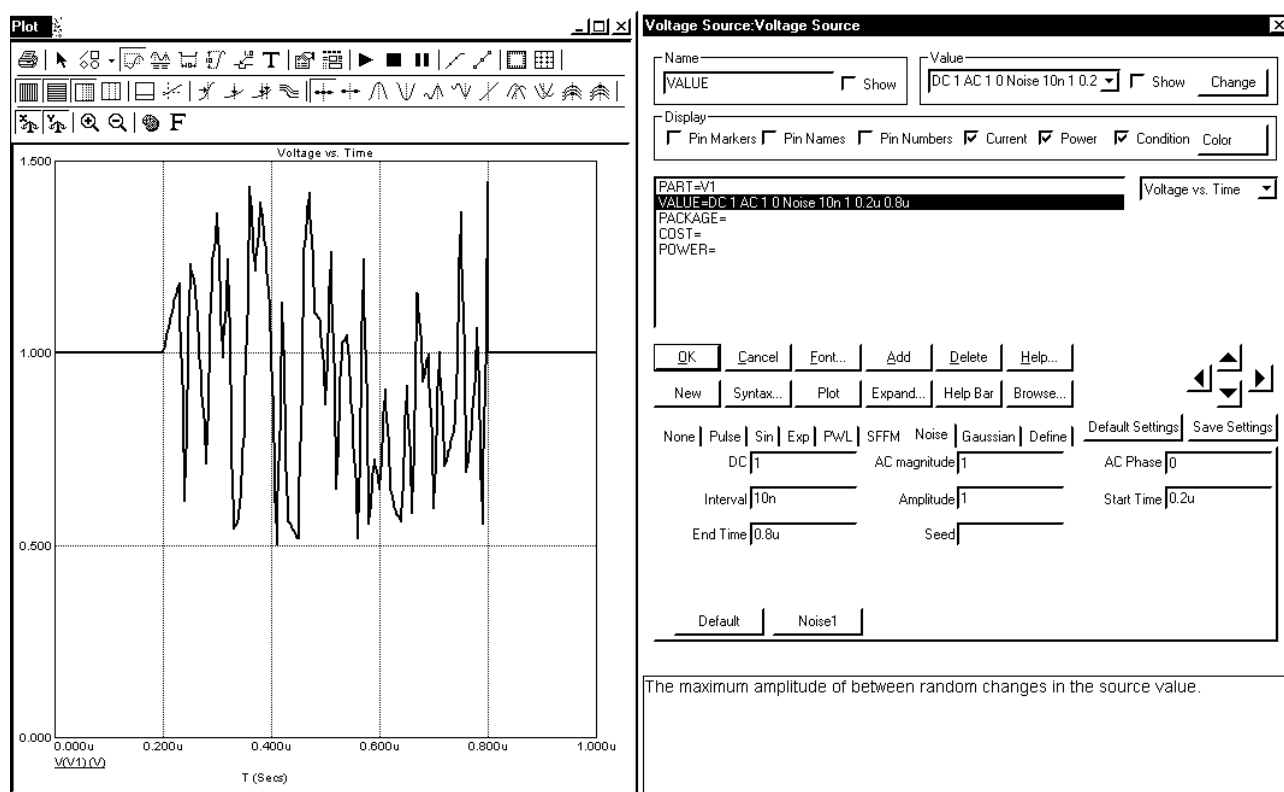


Рис. 6.17. Окно задания независимого источника шумового сигнала NOISE

Импульс Гаусса описывается параметрами, приведенными в табл. 6.13 и внутри каждого периода повторения рассчитывается по следующей формуле:

$$V(T) = DC + amp \cdot \exp(-\text{pow}(((T \bmod \text{period}) - tpeak)/(width/1.6652), 2))$$

$$V(T) = DC + amp \cdot e^{-\left(\frac{(T \bmod \text{period}) - tpeak}{width/1.6652}\right)^2},$$

где T — время прошедшее от начала моделирования

Таблица 6.13. Параметры импульсов Гаусса GAUSS

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
DC	Значение постоянной составляющей	В или А	0
amp	Амплитуда импульса	В или А	—
tpeak	Время достижения амплитудного значения	с	—
width	Ширина импульса при 50%-ой величине	с	0

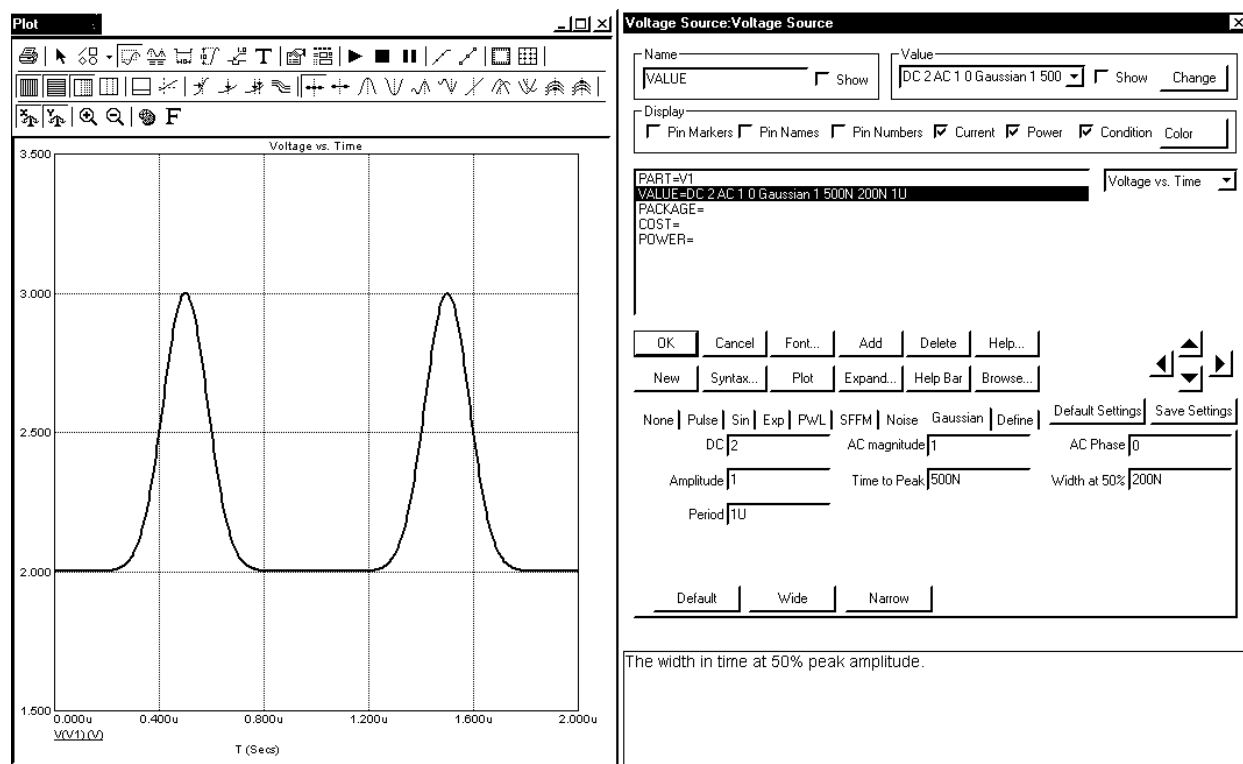


Рис. 6.18. Окно задания независимого источника Гауссовых импульсов GAUSS

Следует отметить, что в программе MICROCAP-8 появилось дополнительное удобство для создания источников сигнала SPICE-формата. В окне задания параметров сигнала, появились кнопки создания заготовок для сигналов.

Для *импульсного сигнала* это кнопки: Default (по умолчанию), Typical (типовой сигнал), Square (прямоугольный импульс), Triangle (треугольный импульс), Impulse (импульсная функция Дирака или δ -функция), Sawtooth (пилообразный импульс).

Для *гармонического сигнала* это кнопки: Default (по умолчанию), Typical (Типовой сигнал), Damped (затухающая синусоида), PhaseA (с нулевой начальной фазой), PhaseB (с положительной начальной фазой), PhaseC (с отрицательной начальной фазой).

Для *экспоненциального сигнала* это кнопки: Default (по умолчанию), Slow (с пологими фронтами), Fast (с крутыми фронтами).

Для *гармонического сигнала с частотной модуляцией SFFM* это кнопки: Default (по умолчанию), Modulate1 (низкий индекс модуляции, несущая частота меньше модулирующей частоты), Modulate2 (высокий индекс модуляции, несущая частота больше модулирующей частоты).

Для кусочно-линейного сигнала это кнопки: Default (по умолчанию нулевой сигнал), Typical (Типовой кусочно-линейный сигнал), Repeat1 (5 идущих подряд трапецеидальных импульсов), Repeat2 (периодические трапецеидальные импульсы), Repeat3 (последовательность δ -импульсов с увеличивающейся паузой).

Для импульсов Гаусса GAUSS это кнопки Wide (широкий импульс) и Narrow (узкий импульс).

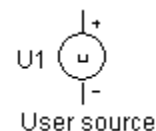
Источник напряжения, задаваемый пользовательским файлом (User file source)

Формат схем MICROCAP-8:

Атрибут PART: <имя>

Пример:

U1



Атрибут FILE: <имя файла>

Пример:

AMP.USR

Атрибут EXPRESSION: [текстовое выражение]

Пример:

V(OUT) vs T

Атрибут REPEAT [целое число]

Пример:

5

Представляет собой источник напряжения, форма которого задается в пользовательском текстовом файле. Повторяется заданное число раз (значение атрибута Repeat) в режиме анализа переходных процессов TRANSIENT, один раз — в режимах AC и DC анализа.

Пользователь имеет возможность задать источник напряжения произвольной формы. Отсчеты сигнала записываются в текстовый файл, который имеет стандартное расширение .USR. В этом файле записывается общее количество отсчетов N и пары значений, определяющие выражения для отсчетов моментов времени и значений переменных состояния. Этот файл может быть создан с помощью любого текстового редактора (на что потребуются значительное время) или образован путем сохранения одного или нескольких сигналов, полученных в результате расчета переходных процессов. На рисунке, приведенном ниже, показано окно задания параметров пользовательского источника. Текстовый файл с расширением *.usr должен быть создан заранее путем сохранения кривой переходного процесса расчета другой схемы. Для этого после получения графиков переходных процессов двойным щелчком левой клавиши вызывается диалоговое окно *Properties*, в нем выбирается закладка *Save Curves* и выбирается график, который мы хотим взять как пользовательский сигнал, затем нажимается кнопка SAVE.

В окне задания параметров пользовательского источника в позиции EXPRESSION необходимо в этом случае указать, какая именно зависимость будет использована в качестве источника (в примере это зависимость напряжения V(2) от времени — V(2) vs T), а в позиции FILE имя и путь сохраненного *.USR файла (Можно воспользоваться кнопкой BROWSE).

Отметим, что если во время сохранения кривой переходного процесса название сохраняемой зависимости поменять на LABEL vs T, то позицию EXPRESSION в окне задания параметров можно не заполнять.

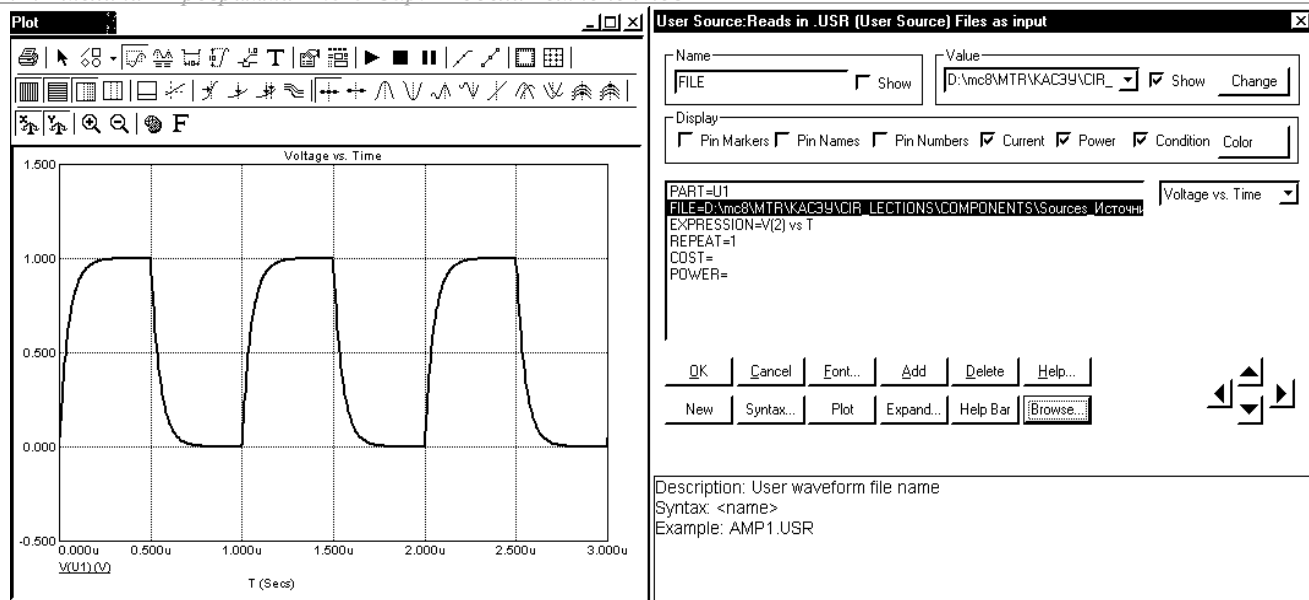


Рис. 6.19. Окно задания параметров пользовательского источника

Отметим, что задание и работу всех рассмотренных в разделе 3.3 независимых источников иллюстрируют примеры **Waveform Source.CIR**, **Meandr_Exp_RC.CIR**, **Waveform_V.CIR** из каталога **COMPONENTS\SOURCES**.

6.3. Линейные и нелинейные зависимые источники

6.3.1. Зависимые источники линейные и полиномиальные (Dependent Sources)

Линейные зависимые источники

Формат схем MICROCAP-8:

Атрибут PART: <имя>

Атрибут VALUE: <коэффициент передачи>

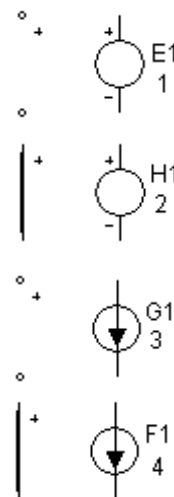
В программе MC8 имеются четыре линейных зависимых источника напряжения и тока:

VofV — источник напряжения, управляемый напряжением (ИНУН);

VofI — источник напряжения, управляемый током (ИНУТ);

IofV — источник тока, управляемый напряжением (ИТУН).

IofI — источник тока, управляемый током (ИТУТ);

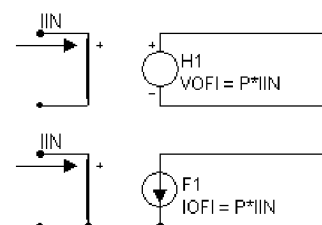


Все они задаются единственным параметром — коэффициентом передачи.

Уравнения моделей

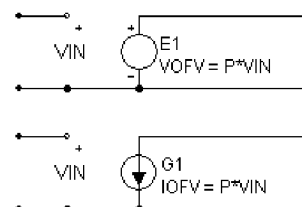
IOFI: $I_{out}(I_{in}) = \langle \text{коэффициент передачи} \rangle \cdot I_{in}$

IOFV: $I_{out}(V_{in}) = \langle \text{коэффициент передачи} \rangle \cdot V_{in}$

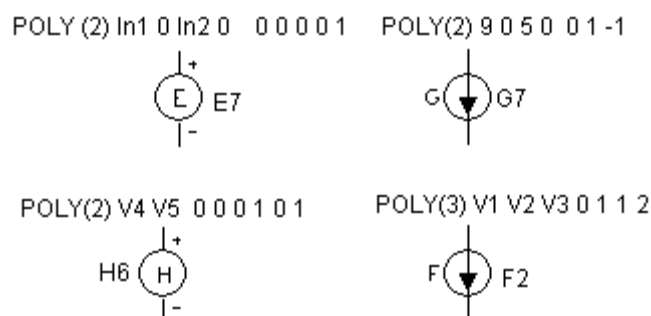


VOFV: $V_{out}(V_{in}) = \langle \text{коэффициент передачи} \rangle \cdot V_{in}$

VOFI: $V_{out}(I_{in}) = \langle \text{коэффициент передачи} \rangle \cdot I_{in}$



Полиномиальные зависимые источники



В программе MC8 имеется четыре полиномиальных зависимых источника напряжения и тока:

EVofV — источник напряжения, управляемый напряжениями;

HVofI — источник напряжения, управляемый токами;

GlofV — источник тока, управляемый напряжениями.

FlofI — источник тока, управляемый токами;

Формат схем MICROCAP-8:

Атрибуты моделей полиномиальных зависимых источников подобны атрибутам SPICE-моделей, за исключением номеров узлов подключения источников.

Атрибут PART: <имя>

Пример:

G1

Атрибут VALUE:

[POLY(<k>)] n1p n1m [n2p n2m...nkp nkm] p0 [p1...pk] [IC=c1[,c2[,c3...[,ck]]]]

[POLY(<k>)] v1 [v2...vk] p0 [p1...pk] [IC=c1[,c2[,c3...[,ck]]]]

Примеры:

POLY(2) 10 15 20 25 1.0 2.0 10.0 20.0 — источник напряжения (тока), управляемый двумя напряжениями V(10,15) и V(20,25), функция $F = I + 2 \cdot V(10,15) + 10 \cdot V(20,25) + 20 \cdot V(10,15)^2$.

POLY(3) 10 15 20 25 30 35 1.0 2.0 3.0 10.0 20.0 30.0 — источник напряжения (тока), управляемый 3-мя напряжениями V(10,15), V(20,25), V(30,35), выходная функция $F = I + 2 \cdot V(10,15) + 3 \cdot V(20,25) + 10 \cdot V(30,35) + 20 \cdot V(10,15)^2 + 30 \cdot V(10,15) \cdot V(20,25)$.

POLY(2) V1 V2 1.0 2.0 10.0 20.0 — источник напряжения (тока), управляемый 2-мя токами: через источник V1 — I(V1) и через источник V2 — I(V2), выходная функция $F = I + 2 \cdot I(V1) + 10 \cdot I(V2) + 20 \cdot I(V1)^2$.

POLY(3) V1 V2 V3 1.0 2.0 3.0 10.0 20.0 30.0 — источник напряжения (тока), управляемый 3-мя токами: через источник V1 — I(V1), через источник V2 — I(V2), и через источник V3 — I(V3), выходная функция $F = I + 2 \cdot I(V1) + 3 \cdot I(V2) + 10 \cdot I(V3) + 20 \cdot I(V1)^2 + 30 \cdot I(V1) \cdot I(V2)$.

Если ключевое слово *POLY* не используется, выражение для выходной функции:

$$F = p_0 + p_1 \cdot V_I + p_2 \cdot V_I^2 + p_3 \cdot V_I^3 + \dots p_k \cdot V_I^k,$$

где V_I — независимая переменная (управляющая зависимым источником), $p_0 \dots p_k$ — $(k+1)$ полиномиальных коэффициентов.

Если ключевое слово *POLY* используется, выражение для выходной функции:

$$F = \sum_{j=0}^n p_j \prod_{k=1}^n V_k^{E_k}.$$

Значения показателей степени $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$ выбираются из табл. 6.14.

Таблица 6.14. Значения полиномиальных коэффициентов

	Число управляющих переменных									
	1	2		3			4			
Коэффициент	E1	E1	E2	E1	E2	E3	E1	E2	E3	E4
P0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0
P2	2	0	1	0	1	0	0	1	0	0
P3	3	2	0	0	0	1	0	0	1	0
P4	4	1	1	2	0	0	0	0	0	1
P5	5	0	2	1	1	0	2	0	0	0
P6	6	3	0	1	0	1	1	1	0	0
P7	7	2	1	0	2	0	1	0	1	0
P8	8	1	2	0	1	1	1	0	0	1
P9	9	0	3	0	0	2	0	2	0	0
P10	10	4	0	3	0	0	0	1	1	0
P11	11	3	1	2	1	0	0	1	0	1
P12	12	2	2	2	0	1	0	0	2	0
P13	13	1	3	1	2	0	0	0	1	1
P14	14	0	4	1	1	1	0	0	0	2
P15	15	5	0	1	0	2	3	0	0	0
P16	16	4	1	0	3	0	2	1	0	0
P17	17	3	2	0	2	1	2	0	1	0
P18	18	2	3	0	1	2	2	0	0	1
P19	19	1	4	0	0	3	1	2	0	0

Пример построения полиномиальной функции для зависимого источника, зависящего от трех переменных состояния схемы, обозначенных x_1, x_2, x_3 :

$$Y = P_0 + P_1 x_1 + P_2 x_2 + P_3 x_3 + P_4 x_1^2 + P_5 x_1 x_2 + P_6 x_1 x_3 + P_7 x_2^2 + P_8 x_2 x_3 + P_9 x_3^2 + P_{10} x_1^3 + \\ + P_{11} x_1^2 x_2 + P_{12} x_1^2 x_3 + P_{13} x_1 x_2^2 + P_{14} x_1 x_2 x_3 + P_{15} x_1 x_3^2 + P_{16} x_2^3 + P_{17} x_2^2 x_3 + P_{18} x_2 x_3^2 + P_{19} x_3^3$$

Здесь x_1, x_2, x_3 — управляющие переменные. Они могут быть токами или разностью потенциалов; одновременное управление током и разностью потенциалов не допускается.

Если управляющие переменные — напряжения, то сразу после ключевого слова POLY, попарно указывается список узлов: <номер (или обозначение) положительного узла первого напряжения> <номер (или обозначение) отрицательного узла первого напряжения>

Если управляющие переменные — токи, то после ключевого слова POLY указывается список источников ЭДС, через которые протекают управляющие токи. Если таковых в схеме нет, то необходимо ввести в соответствующие ветви нулевые источники ЭДС.

Все коэффициенты полинома вводить не обязательно, но вводить их необходимо подряд без пропусков.

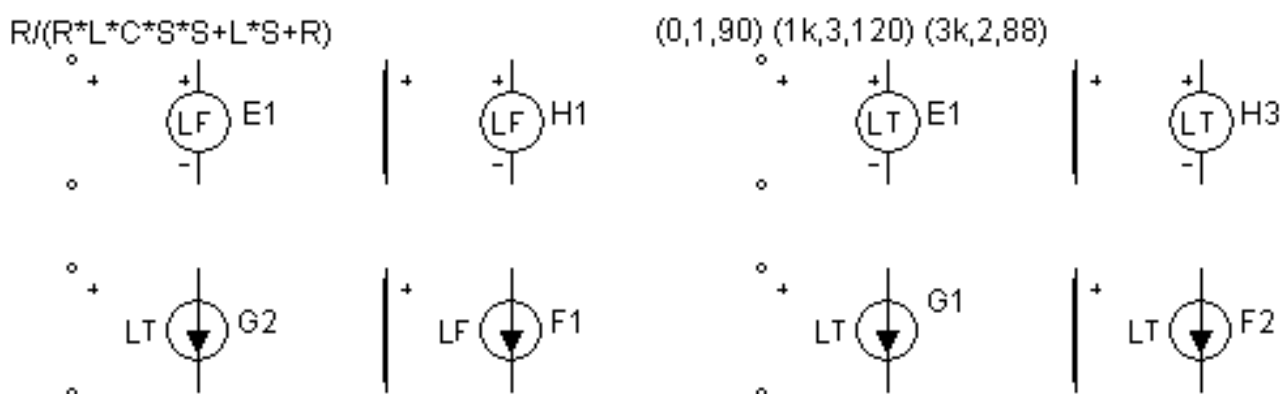
Примеры задания и анализа зависимых линейных и полиномиальных источников приведены в схемных файлах **Dependent Sources.CIR**, **Dependent Sources_Poly.CIR** из каталога **COMPONENTS\SOURCES**.

6.3.2. Линейные управляемые источники, задаваемые преобразованиями Лапласа (Laplace Sources) и Z-преобразованиями (Z Transform Sources)

Линейные четырехполюсники могут задаваться передаточными функциями с помощью управляемых источников. Имена таких источников начинаются с символа L (Laplace Sources) или Z (Z Transform Sources). Передаточные функции задаются с помощью формул — тогда после символа L указывается F — или табличной зависимостью — добавляется символ T (для Laplace Sources). Например, LFVofV означает задаваемый формулой передаточной функции источник напряжения, управляемый напряжением. LTofI — задаваемый табличной зависимостью комплексного коэффициента передачи от частоты источник тока, управляемый током. ZVofI — задаваемый передаточной функцией в z-области источник напряжения, управляемый током. Эти источники используются не только при расчете частотных характеристик, но и проведении всех остальных видов анализа.

В программе MICROCAP-8 имеются следующие зависимые источники с частотно-зависимой передаточной функцией:

Laplace Sources



Обозначение	Тип зависимого источника	Входная величина	Выходная величина	Позиц. Обозн.
<i>Зависимые источники, задаваемые формулой передаточной функции в s-области</i>				
LFIOFI	управляемый током источник тока	I	I	F
LFVOFI	управляемый током источник напряжения	I	V	H
LFVOFV	управляемый напряжением источник напряжения	V	V	E
LFIOFV	управляемый напряжением источник тока	V	I	G
<i>Зависимые источники, задаваемые табличной зависимостью комплексного коэффициента передачи от частоты</i>				
LTIOFI	управляемый током источник тока	I	I	F
LTVOFI	управляемый током источник напряжения	I	V	H
LTVOFV	управляемый напряжением источник напряжения	V	V	E
LTIOFV	управляемый напряжением источник тока	V	I	G
<i>Зависимые источники, задаваемые формулой передаточной функции в Z-области</i>				
ZIOFI	управляемый током источник тока	I	I	F
ZVOFI	управляемый током источник напряжения	I	V	H
ZVOFV	управляемый напряжением источник напряжения	V	V	E
ZIOFV	управляемый напряжением источник тока	V	I	G

Формат схем MICROCAP-8:

Атрибут PART: <имя>

Примеры:

FIL1

LOW1

Атрибут LAPLACE для источников LFIOFI, LFIOFV, LFVOFI, LFVOFV: <выражение>

Примеры:

$1/(1+.001*S)$ — ФНЧ первого порядка.

$1/(1+.001*S+1E-8*S*S)$ — ФНЧ второго порядка.

$\exp(-\text{pow}((C*S*(R+S*L)),.5))$ — передаточная характеристика длинной линии с потерями.

Атрибут FREQ для источников LTIOFI, LTIOFV, LTVOFI, LTVOFV:

<(частота₁,модуль₁,фаза₁) (частота₂,модуль₂,фаза₂)...(частота_n,модуль_n,фаза_n)>

Примеры:

(0.0,1.0,0.0) (1Meg,0.9,-10) (10Meg,0.2,-35)

Атрибут KEYWORD: [[DB | MAG] [DEG | RAD]] | [R_I] (для использования совместно с атрибутом FREQ)

Входящие в эти определения ключевые слова означают следующее:

DB — модуль передаточной функции задается в децибелах (по умолчанию);

MAG — модуль передаточной функции задается в абсолютных единицах;

DEG — фаза передаточной функции в градусах (по умолчанию);

RAD — фаза передаточной функции в радианах;

R_I — таблица содержит действительные и мнимые части передаточной функции.

Примеры:

DB RAD

MAG DEG

R_I

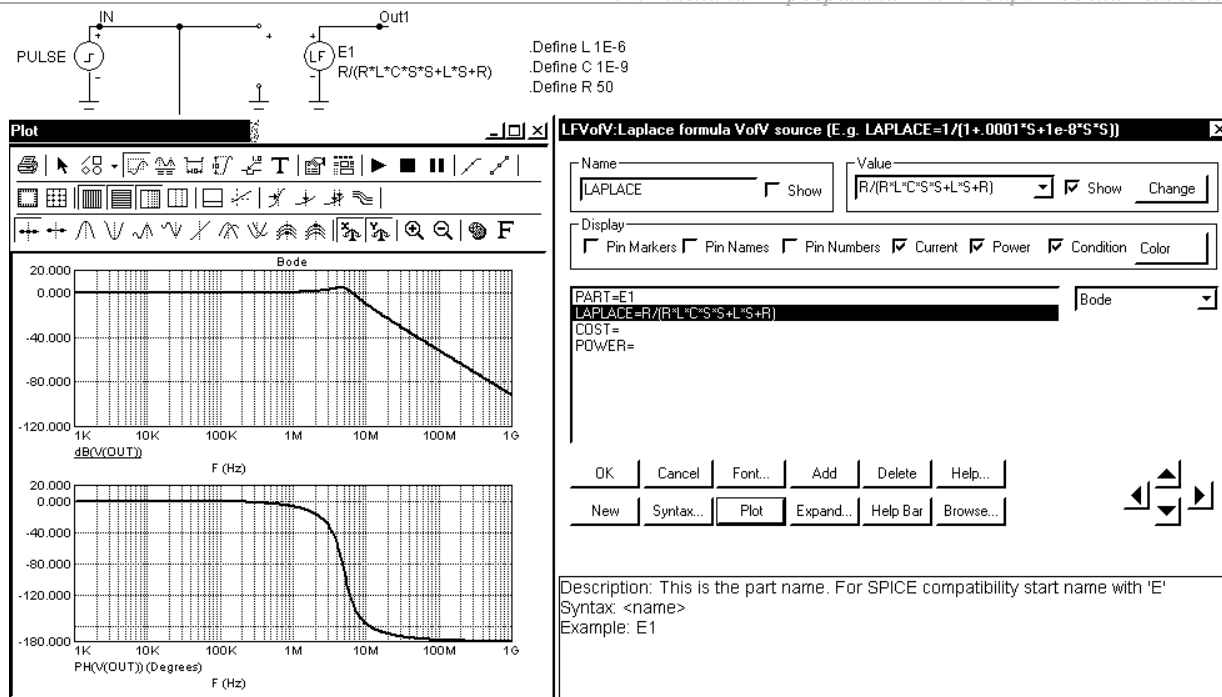


Рис. 6.20. Окно задания параметров зависимого лапласова источника

Для источников типа LFlofV, LFlofI, LFVofV и LFVofI задается формула передаточной функции комплексной переменной S в поле атрибута LAPLACE.

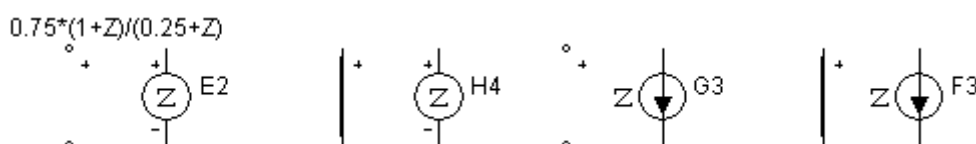
Для источников типа LTlofV, LTlofI, LTVofV и LTVofI задаются значения комплексной передаточной функции для нескольких частот, взятых в возрастающем порядке. Значения частоты задаются в герцах, модуль передаточной функции в децибелах или абсолютных единицах, фаза в градусах или радианах. При указании ключевого слова R_I вместо модуля и фазы передаточной функции задаются значения ее действительной и мнимой части. Значения передаточной функции указываются в порядке возрастания частоты. Таблица для передаточной функции может указываться в поле атрибута FREQ под именем символьной переменной, которая должна быть определена триплетом значений посредством директивы .DEFINE (на поле схемы или в текстовой области).

Для расчета передаточной функции между опорными точками применяется линейная интерполяция в логарифмическом масштабе. Значения передаточной функции вне заданного диапазона частот полагаются равными их значениям в крайних точках.

При расчете частотных характеристик (режим AC) переменная S заменяется на $2\pi \cdot j \cdot F$. При расчете режима по постоянному току (режим DC) полагается $S=0$. При расчете переходных процессов (режим Transient analysis) отыскивается импульсная характеристика четырехполюсника путем обратного преобразования Фурье его передаточной функции в s -области, затем путем нахождения интеграла свертки импульсной характеристики с входным сигналом отыскивается отклик на выходе.

Для иллюстрации сказанного см. примеры **Laplace Source_01.CIR...Laplace Source_05.CIR** из каталога **COMPONENTS\SOURCES**.

Z Transform Sources



Формат схем MICROCAP-8:

Атрибут PART: <имя>

Атрибут ZEXP: <выражение для z-преобразования>

Пример:

$(10 \cdot (Z+1) \cdot (\text{POW}(Z,2) - 0.70 \cdot Z + 1)) / ((Z - 0.56) \cdot (\text{POW}(Z,2) - 1.16 \cdot Z + 0.765))$

Атрибут CLOCK FREQUENCY: <частота дискретизации для z-преобразования>

Зависимый источник, заданный передаточной функцией в Z-области ведет себя подобно лапласову зависимому источнику с передаточной функцией, полученной при подстановке вместо переменной $Z = \text{EXP}(S / \text{clock frequency})$, где $S = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot F$.

Например, цифровой фильтр нижних частот с передаточной функцией

$$H(z) = \frac{0.10285 \cdot (z+1) \cdot (z^2 - 0.070621 \cdot z + 1)}{(z - 0.55889) \cdot (z^2 - 1.1579 \cdot z + 0.76494)},$$

задается с помощью управляемого источника E1. При схемном вводе атрибуту ZEXP присваивается значение в виде переменной ZFILTER, которая в свою очередь определяется с помощью директивы .DEFINE:

.DEFINE ZFILTER .10285*(Z+1)*(Z*Z-.070621*Z+1)/((Z-.55889)*(Z*Z-1.1579*Z+.76494))

Частота дискретизации 24 кГц задается с помощью атрибута CLOCK FREQUENCY=24k.

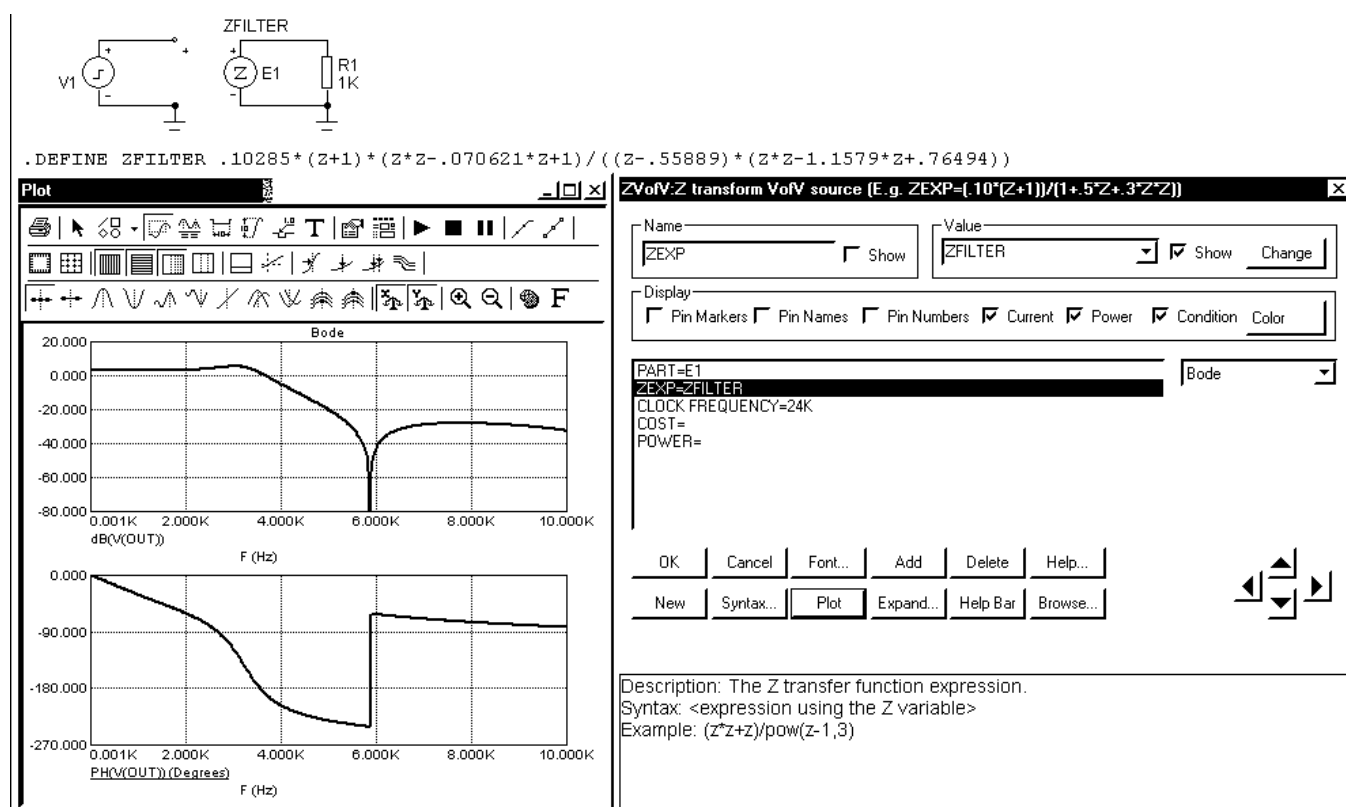


Рис. 6.21. Задание источника Z-TRANSFORM

Примеры моделирования цифровых фильтров приведены в схемных файлах **transform Source_01.CIR...Z-transform Source_04.CIR** из каталога **COMPONENTS\SOURCES**.

Z-

6.3.3. Функциональные источники сигналов (Function Sources)

Управляемые источники Function sources, имена которых начинаются с N, задаются функциональными зависимостями во временной области.

Формат схем MICROCAP-8:

Атрибут PART: <имя>

Атрибут VALUE для источников NFV и NFI: <формула>

Примеры:

$10 * \sin(2 * \pi * 1E6 * T) * V(3) * I(L1) * \exp(-V(IN)/100NS)$

$K * \text{POW}((V(\text{Plate}) - V(\text{Cathode}) + \text{Mu} * (V(\text{Grid}) - V(\text{Cathode}))), 1.5)$

Атрибут FREQ для источников NFV и NFI: [<F-выражение>]

Примеры:

$1200 * (1 + \sqrt{F/1e6})$

Атрибут DERIVATIVE для источников NFV и NFI: [<Algebraic> | <Numeric> | <Default>]

Примеры:

Algebraic

Атрибут NOISE EXPRESSION для источников NFV и NFI: [<N-выражение>]

Примеры:

$1200 * (1 + \sqrt{F/1e6})$

Атрибут TABLE для источников NTlofl, NTlofV, NTVofV, NTVofI:

(<x1,y1>) (<x2>,<y2>) ... (<xk>,<yk>)

Примеры:

(-1m,25) (1m,25) (2m,30)

{{start - 1m}, {25*level}} (end,level) {{end+3m}, level2}

Функциональные источники расширяют возможности моделирования переходных процессов в электронных схемах. Они позволяют задавать источники напряжения и тока, имеющие произвольную зависимость от времени, путем задания формулы или таблицы значений.

Функциональные источники, задаваемые формулой (NFI, NFV). Этот тип источников подобен источникам программы SPICE3 B и задается выражением, содержащим переменные, зависящие от времени. В зависимости от выходной величины различаются 2 типа таких источников: NFI — функциональный источник тока, NFV — функциональный источник напряжения.

Нелинейные зависимые источники напряжения NFV и тока NFI описываются произвольной функциональной зависимостью от напряжений и токов схемы, например функциональный источник NFI для анодного тока вакуумного триода:

$K * \text{pow}((V(\text{Plate}) - V(\text{Cathode}) + \text{Mu} * (V(\text{Grid}) - V(\text{Cathode}))), 1.5)$

Если для рассматриваемых функциональных источников указан атрибут FREQ, то он заменяет обычное малосигнальное приращение, определенное во время расчета рабочей точки по постоянному току. <F-выражение> может быть числом или выражением, включающим частотнозависимые переменные. Оно принимается во внимание лишь при проведении малосигнального частотного анализа, когда независимой переменной является частота. Например, предположим, что выражение для атрибута FREQ — $1 + V(3) * (1 + 1e6/F)$. В этом выражении F является независимой переменной малосигнального частотного анализа — частотой, а V(3) — малосигнальный комплексный потенциал 3-го узла. Указанная зависимость будет использована лишь при проведении частотного анализа, при

проведении анализа переходных процессов для формульного функционального источника будет использовано выражение в позиции атрибута VALUE.

Если задан атрибут NOISE EXPRESSION то функциональным источником генерируется шумовой ток, величина спектральной плотности которого задается <N-выражением>. Например для моделирования фликер-шума можно использовать следующее выражение: $1E-16$

*row(6.5ma,1.1) / F. Отметим, что выражение для атрибута NOISE EXPRESSION должно зависеть только от частоты F и может быть использовано только для функциональных источников NFI.

Атрибут DERIVATIVE задает способ вычисления производных в выражениях. Он может быть 3-х видов:

Algebraic — производная вычисляется путем правил дифференцирования алгебраических выражений. Это наиболее предпочтительный способ вычисления в смысле точности. Однако сложные алгебраические выражения, содержащие большое количество переменных, приводят к громоздким выражениям для производных, которые требуют намного больше времени для расчета, чем простое численное дифференцирование.

Numeric — численное дифференцирование методом простой пертурбации. Предпочтительно использовать при наличии сложных формул.

Default — производные вычисляются в соответствии со значением флага NUMERIC_DERIVATIVE в Global Settings.

Функциональные источники, задаваемые таблицей (NTVofI, NTIofI, NTIofV, NTVofV). Эти источники подобны источникам программы SPICE3 A, используют упорядоченную в порядке возрастания аргумента таблицу. Данная таблица задает функциональную зависимость выходной величины (напряжения, тока) от входной величины (напряжения, тока). В зависимости от вида входной и выходной величины имеются 4 типа табличных функциональных источников:

Обозначение	Тип зависимого источника	Входная величина	Выходная величина	Позиц. Обозн.
NTIOFI	управляемый током источник тока	I	I	F
NTVOFI	управляемый током источник напряжения	I	V	H
NTVOFV	управляемый напряжением источник напряжения	V	V	E
NTIOFV	управляемый напряжением источник тока	V	I	G

Зависимые источники NTVofI, NTIofI, NTIofV и NTVofV задаются таблицей зависимостей значений выходного сигнала Y_k от значений входного сигнала X_k . Значения отсчетов выходного сигнала Y указываются в порядке возрастания аргумента X . Для расчета выходного сигнала между опорными точками применяется линейная интерполяция. Значения сигнала Y вне заданного диапазона изменения аргумента полагаются равными их значениям в крайних точках. Например, задание табличных пар значений $(-0.01, -10)$ $(0.01, 10)$ для источника NTVOFV, описывает идеальный усилитель с коэффициентом передачи 1000 и с уровнями ограничения выходного напряжения $\pm 10V$. Когда входное напряжение $\leq -0.01V$, на выходе будет $-10V$, а когда входное напряжение ≥ 0.01 на выходе будет $+10V$.

Примеры определения и использования функциональных источников приведены в схемных файлах **Function Source_01.CIR...Function Source_04.CIR, Function (table).CIR** из каталога **COMPONENTS\SOURCES**.

6.4. Специальные компоненты (Special Purpose)

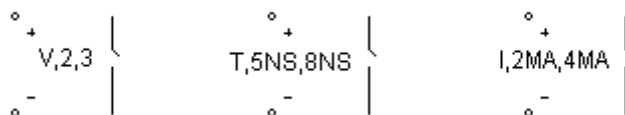
В раздел Special Purpose помещены ключи разного типа (Switches), устройство выборки-хранения (Samle and Hold), таймер (Timer), стрелки (Arrow) и контакты (bubble).

6.4.1. Ключ (Switch)

Формат схем MICROCAP-8:

Атрибут PART: <имя>

Атрибут VALUE: <[V | T | I] <n1, n2>[,Ron>[,<Roff>]]



Примеры:

V,1,2

I,2ma,3ma

T,1ms,2ms,50,5Meg

I,2ma,3ma,0.01,1MEG

При расчете переходных процессов используются ключи, управляемые разностью потенциалов, током (через индуктивность) и коммутируемые в определенные моменты времени. Это наиболее старый вид ключей, применяемых в ранних версиях программы MICROCAP. В последней версии используются также ключи типа S и W (см. ниже), имеющие более плавный переход между состояниями «включено» и «выключено».

В ключах SWITCH приняты обозначения:

V — управление разностью потенциалов;

I — управление током;

T — переключение в определенные моменты времени;

n1, n2 — значения управляющей величины, при которых происходят переключения;

Ron, Roff — сопротивления ключа в замкнутом и разомкнутом состояниях. По умолчанию Ron=1E-3 Ом, Roff=1E9 Ом

Если $n1 < n2$, то ключ замкнут (находится в состоянии ON) при управляющем сигнале $n1 < X < n2$ и разомкнут (находится в состоянии OFF), когда $X < n1$ или $X > n2$.

Если же $n1 > n2$, то ключ разомкнут (OFF) при управляющем сигнале $n1 > X > n2$ и замкнут (ON), когда $X > n1$ или $X < n2$.

Для ключей типа «V» управляющий сигнал X представляет собой разность потенциалов между управляющими выводами ключа.

Для ключей типа «I» управляющий сигнал X представляет собой ток через индуктивность, включенную между управляющими выводами ключа.

Для ключей типа «T» управляющий сигнал X представляет время, при этом управляющие выводы ключа должны быть заземлены для минимизации общего количества узлов в схеме.

При анализе переходных процессов следует обратить внимание на выбор шага расчета. Если шаг будет слишком большим, ключ может не переключаться. Для переключения ключа хотя бы одна расчетная точка должна попасть внутрь области значений, переводящих ключ в противоположное состояние.

При выполнении расчетов частотных характеристик или режима по постоянному току ключ заменяется постоянным сопротивлением.

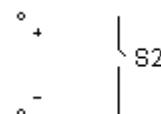
Примеры всех указанных видов ключей Switch и графики переходных процессов с их участием в схемном файле **Switch_01.CIR** из каталога **COMPONENTS\SPECIAL PURPOSE**.

6.4.2. Ключ, управляемый напряжением (S)

Формат схем MICROCAP-8:

Атрибут PART: <имя>

Атрибут MODEL: <имя модели>



Формат текстовой директивы модели ключа, управляемого напряжением:

.MODEL <имя модели> VSWITCH ([список параметров])

Примеры:

.MODEL S1 VSWITCH (RON=1 ROFF=1K VON=1 VOFF=1.5)

.MODEL S2 VSWITCH (RON=1 ROFF=1K VT=3 VH=1)

Рассматриваемый ключ может работать в двух режимах: плавного переключения и гистерезиса.

Режим плавного переключения. Режим используется, когда не нужен гистерезис для входного сигнала. Данный режим сводит к минимуму проблему обеспечения сходимости при расчете ключевых схем. В этом режиме задаются VON (напряжение замыкания ключа) и VOFF (напряжение размыкания ключа). Параметры гистерезиса VT и VH игнорируются.

Если $VON > VOFF$, то ключ замкнут при управляющем напряжении $V_{упр} > VON$ и разомкнут при $V_{упр} < VOFF$. На интервале $VOFF < V_{упр} < VON$ сопротивление ключа плавно уменьшается от значения ROFF до RON.

Если $VON < VOFF$, то ключ замкнут при $V_{упр} < VON$ и разомкнут при $V_{упр} > VOFF$. На интервале $VON < V_{упр} < VOFF$ сопротивление ключа плавно увеличивается от значения RON до ROFF.

Гистерезисный режим. Используется, если необходим гистерезис для управляющего сигнала и схема не подвержена проблемам сходимости при расчете. В гистерезисном режиме обязательно должны быть заданы параметры VT и VH. Величина параметров VON и VOFF игнорируются, важно лишь их соотношение. При $VON < VOFF$ сопротивление ключа увеличивается резким скачком от RON до ROFF при прохождении управляющим сигналом значения $VT + VH$ и уменьшается резким скачком от ROFF до RON при прохождении управляющим сигналом значения $VT - VH$. При задании $VON > VOFF$ сопротивление ключа уменьшается резким скачком от ROFF до RON при прохождении управляющим сигналом значения $VT + VH$ и увеличивается резким скачком от RON до ROFF при прохождении управляющим сигналом значения $VT - VH$.

Таблица 6. 15. Параметры модели ключа, управляемого напряжением

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
VON	Напряжение замыкания ключа	В	1
VOFF	Напряжение размыкания ключа	В	0
RON	Сопротивление замкнутого ключа	Ом	1
ROFF	Сопротивление разомкнутого ключа	Ом	10^6
VT	Пороговое напряжение	В	—
VH	Величина гистерезиса	В	—

Рассматриваемый ключ управляется напряжением между двумя входными узлами и меняющееся сопротивление ключа связывается с выходными узлами. RON и ROFF должны быть положительными величинами по абсолютной величине меньшими чем сопротивление $1/G_{min}$. Не пытайтесь сделать величину VON-VOFF слишком малой, это приведет к увеличению количества расчетных точек при пересечении входным сигналом промежуточной области. Минимально возможная величина этой разности $(REL TOL \cdot (\max(VON, VOFF)) + VNTOL)$.

Параметры модели ключа, управляемого напряжением, приведены в табл. 6.15.

Уравнения модели ключа, управляемого напряжением

VC — напряжение между управляющими узлами.

$LM = \ln[(RON \cdot ROFF)^{1/2}]$ — логарифм среднего геометрического RON, ROFF

$LR = \ln(ROFF/RON)$

$VM = (VON + VOFF)/2$

$VD = VON - VOFF$

k — постоянная Больцмана

T — температура анализа

RS — выходное сопротивление ключа

Режим плавного переключения (при задании VON и VOFF)

1. При $VON > VOFF$

Если $VC \geq VON$, $RS = RON$;

если $VC \leq VOFF$, $RS = ROFF$

При $VOFF < VC < VON$, $RS = e^{\left[LM + \frac{3 \cdot LR \cdot (VC - VM)}{2 \cdot VD} + \frac{2 \cdot LR \cdot (VC - VM)^3}{VD^3} \right]}$

2. При $VON < VOFF$

Если $VC \leq VON$, $RS = RON$;

если $VC \geq VOFF$, $RS = ROFF$

Если $VOFF > VC > VON$ $RS = e^{\left[LM - \frac{3 \cdot LR \cdot (VC - VM)}{2 \cdot VD} + \frac{2 \cdot LR \cdot (VC - VM)^3}{VD^3} \right]}$

Гистерезисный режим (Если VON и VOFF не определены)

If $VC \geq VT + VH$, $RS = RON$

If $VC \leq VT - VH$, $RS = ROFF$

Иначе RS не меняется

Шумовые эффекты

Шум учитывается как шум резистора, сопротивление которого равно найденному во время расчета рабочей точки по постоянному току. Его тепловой шум определяется по следующей формуле:

$$I = \sqrt{\frac{4 \cdot k \cdot T}{RS}}.$$

6.4.3. Ключ, управляемый током (W)

Формат схем MICROCAP-8:

Атрибут PART: <имя>

Атрибут REF: <имя источника напряжения ветви с управляющим током>

Атрибут MODEL: <имя модели>

Формат текстовой директивы модели ключа, управляемого током:

.MODEL <имя модели> ISWITCH ([список параметров])

Примеры:

.MODEL W1 ISWITCH (RON=1 ROFF=1K ION=1 IOFF=1.5)

.MODEL W2 ISWITCH (RON=1 ROFF=1K IT=1 IH=1.5)

W ключ может работать в двух различных режимах: в режиме плавного переключения и в гистерезисном режиме. Работа в этих двух режимах аналогична работе ранее описанного ключа, управляемого напряжением (см. 3.2.3), за исключением того, что управляющей величиной является ток. Соответственно меняются модельные параметры с VON, VOFF, VT, VH на ION, IOFF, IT, IH. Смысл этих параметров такой же, как для ключа, управляемого напряжением, только параметр ION по умолчанию равен 1 мА.

Таблица 6. 16. Параметры модели ключа, управляемого током

Обозначение	Параметр	Размерность	Значение по умолчанию
ION	Напряжение замыкания ключа	A	0.001
IOFF	Напряжение размыкания ключа	A	0
RON	Сопротивление замкнутого ключа	Ом	1
ROFF	Сопротивление разомкнутого ключа	Ом	10 ⁶
IT	Пороговое напряжение	A	—
IH	Величина гистерезиса	A	—

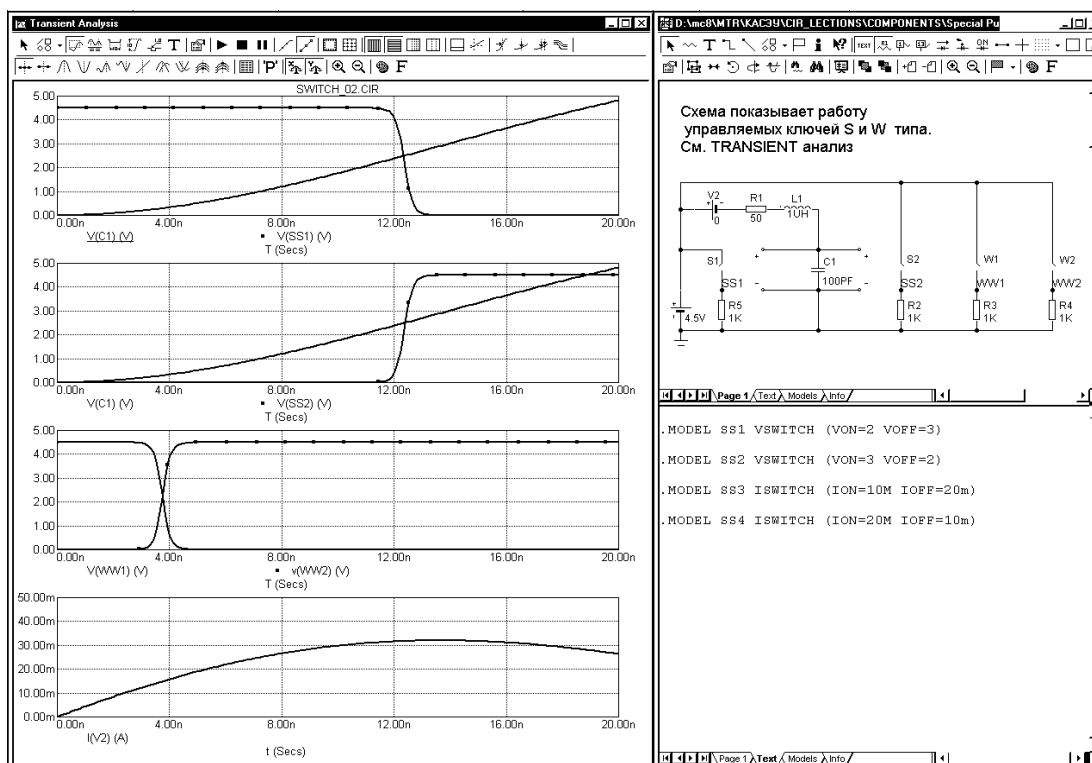


Рис. 6.22. Моделирование ключей, управляемых током и напряжением

Уравнения работы ключа управляемого током можно получить из уравнений ключа управляемого напряжением при замене переменных VOFF на IOFF, VON на ION, VC на IC.

Примеры моделирования ключей, управляемых напряжением (S) и током (W) приведены в схемном файле **Switch_02.CIR** из каталога **COMPONENTS\SPECIAL PURPOSE** (см. также рис. 6.22).

6.4.4. Стрелки (Arrow) и контакты (Bubble)



Если в графе Definition редактора компонентов Component Editor (разд. 2.3) выбран тип Blank (пустой), то компонент такого типа не имеет электрических свойств, не участвует в моделировании и предназначен лишь для нанесения на схему дополнительной информации. К таким компонентам относится Arrow — стрелка, указывающая, в частности, направление тока, и Bubble — контакт, помеченный текстовой меткой.

6.5. Макромодели

6.5.1. Макромодели в виде схемы формата MICROCAP (MACRO)

Формат схем MICROCAP-8:

Атрибут PART: <имя>

Примеры:

2N5168

Атрибут FILE: <имя схемы макромодели>

Примеры:


SCR

Макромодели (MACRO) представляют собой схемный эквивалент текстовых описаний подсхем на языке SPICE (subcircuits). Как правило, они представляют собой функционально законченные блоки электрических схем, созданные и сохраненные на диске для последующего использования в других схемах.

Создание макромодели (MACRO circuit)

1. Создайте с помощью схемного редактора схему блока. Обозначьте выводы блока текстовыми надписями (с использованием английских букв) для идентификации схемных выводов блока. Если вы хотите при моделировании передавать в макромодель численные значения параметров, используйте для атрибута VALUE элементов макромодели символические имена и (или) объявите эти символические имена в директиве .PARAMETERS. Сохраните схему на диске под выбранным именем как макромодель (с расширением файла MAC).

2. Введите вновь созданный компонент в библиотеку компонентов следующим образом:

- Запустите Component Editor (*Windows>Component Editor*). Выберите группу в которую вы хотите поместить вашу макромодель. Дайте команду Add Part (.
- Введите в поле NAME для появившегося нового компонента имя файла макромодели.
- Выберите подходящее условное графическое отображение (УГО) для созданной макромодели, т.е. заполните поле SHAPE.
- Выберите в поле DEFINITION — Macro

- Присвойте выводам УГО имена, кликнув мышью на выводе УГО. Для названия выводов используйте те же текстовые обозначения, которыми были обозначены выводы в схемном файле макромодели (см. п. 1).
- Добавьте директиву .MACRO в один из *.LIB файлов для замены длинного списка параметров на более короткий (необязательное действие).

Использование схемной макромодели

3. Находясь в схемном редакторе, выберите из библиотеки компонентов макромодель (Component...). Поместите ее в схему, при необходимости введя в окне задания параметров необходимые значения параметров макромодели.

Когда схемная макромодель помещается в схему, программа просматривает схемный файл макроопределения, определяет, имеет ли она параметры, и если имеет, то показывает параметры и их значения, заданные по умолчанию в окне задания атрибутов компонента. При необходимости их в этом окне можно отредактировать.

4. При наличии соответствующих директив .MACRO в библиотечном файле (если выполнено последнее необязательное действие при создании макромодели, см. п. 2) можно вызвать нужную разновидность макро по ее псевдониму. При этом подставляется короткое имя-псевдоним, например 2N5168, на место имени файла макроопределения с соответствующим переопределением параметров.

Формат директивы .MACRO:

.MACRO <псевдоним> <имя схемного файла макроопределения(список параметров)>

Подобная директива, набранная в библиотечном файле с расширением LIB позволяет хранить в нем нужные параметры для необходимой разновидности макромодели. Например, в поставляемом варианте программы MICROCAP-8, имеются модели различных тиристоров, базирующихся на макромодели SCR.mas. Для этого в файле THY_LIB.LIB записана серия директив .MACRO для различных наименований тиристоров с нужными параметрами для каждого наименования прибора.

Подробности о директивах .MACRO и .PARAMETERS см. в разделе 2.1.4, посвященном текстовым директивам.

В качестве иллюстрации использования макромодели-схемы MICROCAP см. схемные файлы **System2.CIR** и **OA_Ideal.CIR** из каталога **COMPONENTSIMACRO**.

6.5.2. Макромодели в виде текста подсхемы на языке SPICE (Subcircuit)

Формат схем MICROCAP-8:

Атрибут PART: <имя>

Примеры:

X1

Атрибут NAME <имя SPICE-подсхемы>

Примеры:

FILTER

Атрибут FILE [<имя файла>]

Примеры:

MYFILE.MOD

Атрибут PARAMS: [<имя параметра>=<значение параметра>*>]

Примеры:

CENTER=10KHZ BW=1KHZ

Атрибут TEXT: [<имя текстовой переменной>=<текст>*>]

Примеры:

JEDEC="FILENAME"

Атрибут FILE задает имя текстового SPICE-файла, в котором находится определение нужной подсхемы, начинающееся с директивы .SUBCKT. Программа MC8 ищет указанную директиву для подсхемы под заданным именем NAME в следующих перечисленных местах в той же последовательности:

1. Если создаваемая схема имеет **схемный формат MICROCAP**

- В текстовой области схемного файла
- В файле, заданном в поле атрибута FILE
- В одном или более файлах, перечисленных в директиве .LIB
- В одном или нескольких файлах, перечисленных в директиве, выполняющейся каждый раз по умолчанию '.LIB NOM.LIB' (фактически в файле NOM.LIB, и во всех файлах, которые в нем указаны с помощью соответствующих директив .LIB)

2. Если создаваемая схема имеет **формат текстового SPICE-файла** (крайне редкий случай)

- В строках текста текущего схемного текстового файла
- В одном или более файлах, перечисленных в директиве .LIB
- В одном или нескольких файлах, перечисленных в директиве, выполняющейся каждый раз по умолчанию '.LIB NOM.LIB'

Подсхемы в формате SPICE (subcircuits) используются достаточно часто в библиотеке аналоговых компонентов программы MICROCAP. Они всегда являются доступными, благодаря использованию умолчательной директивы '.LIB NOM.LIB'.

Атрибут PARAMS позволяет избежать перечисление длинного списка параметров подсхемы. <Имя параметра> представляет собой имя параметра, <значение параметра> определяет величину, которая будет присвоена параметру при вызове подсхемы. Например, для следующего определения подсхемы:

.SUBCKT CLIP 1 2 PARAMS: LOW=0 HIGH=10,

любой из нижеприведенных вызовов подсхемы будет корректным:

X1 10 20 CLIP ;результатирующие значения параметров LOW=0, HIGH=10

X2 10 20 CLIP PARAMS: LOW=1 HIGH=2 ; результирующие значения параметров LOW=1, HIGH=2

X3 10 20 CLIP PARAMS: HIGH=4 ; результирующие значения параметров LOW=0, HIGH=4

Атрибут TEXT позволяет избежать задания текстовых параметров подсхемы. <Имя текстовой переменной> представляет собой имя текстового параметра, а <текст> определяет текст, который будет присвоен переменной, если параметр не включается в вызов подсхемы. Например, для следующего определения подсхемы:


.SUBCKT STIMULUS 1 2 3 4 TEXT: FILE="T1.STM"

любой из нижеприведенных вызовов будет корректным:

X1 10 20 30 40 STIMULUS ;приведет к взятию информации из текстового файла T1.STM

X2 10 20 30 40 STIMULUS TEXT:FILE="P.STM" ; приведет к взятию информации из текстового файла P.STM

Использование текстовых подсхем в формате SPICE организовано в программе MC8 достаточно просто:

1. Необходимо ввести подсхему на языке SPICE в библиотеку компонентов, используя редактор компонентов (Component Editor). Для этого необходимо в выбранной группе создать новый компонент () и для созданного компонента необходимо ввести:

- Имя подсхемы (в позиции Name). Можно использовать любое уникальное имя. Для того, чтобы не возникла неразбериха лучше ввести имя, использованное в директиве .SUBCKT текстового определения подсхемы (хотя это и не является строго обязательным требованием).
- Имя УГО подсхемы (в позиции Shape). Можно использовать любое подходящее УГО с соответствующим числом внешних выводов.
- В позиции Definition необходимо указать SUBCKT.
- После этого необходимо присвоить имена выводам макромодели. Они обозначаются в том же порядке, в котором следуют в определении подсхемы директивой .SUBCKT. Для того, чтобы присвоить обозначение выводу подсхемы, необходимо кликнуть мышью по выводу УГО. При необходимости обозначения выводов (жирные красные точки) могут быть перетянуты мышью *точно* в конец линии вывода.

Макромодель-подсхема помещается в создаваемую схему обычным способом.

В качестве иллюстрации использования макромодели-подсхемы SPICE см. схемные файлы **Subckt1.CIR** и **PLA2.CIR** из каталога **COMPONENTS\MACRO**.

6.6. Элементы анимации

Компоненты анимации введены в программу для изображения движения, вращения, изменения цвета индикации, линейных размеров и изображения в ответ на манипуляции пользователя со схемой посредством кликов мыши и поступление управляющих сигналов. В большинстве случаев они имитируют реальный прибор по принципу действия и управлению.

6.6.1. Аналоговая индикаторная линейка (Animated analog bar)

Формат схем MICROCAP-8:

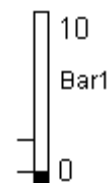
Атрибут PART: <имя>

Примеры:

BAR1

Атрибут LOW <минимальное значение>

Атрибут HIGH <максимальное величина>



Аналоговая индикаторная линейка отображает светящийся столбик, высота которого пропорциональна входному напряжению. Когда напряжение равно <минимальному значению>, высота светящегося столбика минимальна, когда — <максимальному значению>, высота светящегося столбика максимальна. См. схемный файл **Animated Analog Bar.CIR** из каталога **COMPONENTS\ANIMATION**.

6.6.2. Разноцветные светодиоды (Animated analog LED)

Формат схем MICROCAP-8:

Атрибут PART: <имя>

Примеры:

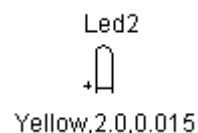
LED2

Атрибут COLOR <цвет свечения>, <напряжение включения>, <ток свечения>

Атрибут HIGH <максимальное величина>

Примеры:

Red,1.7,0.015



Анимированные цветные светодиоды — диоды, которые начинают светиться соответствующим цветом, когда к ним приложено прямое напряжение, не меньшее чем <напряжение включения>. Реально они моделируются электрической моделью обычного диода, прямое падение напряжения на котором и прямой ток свечения определяются параметрами <напряжение включения> и <ток свечения>.

Выбор цвета свечения контролируется палитрой, выбираемой пользователем, связанной с параметром <цвет свечения>. Для изменения цвета свечения светодиода сделайте на нем двойной клик мышью, затем кликните один раз на поле атрибута COLOR, а после этого — на кнопке *LED Button*. Появится диалоговое окно, которое позволит выбрать светодиод с нужным цветом свечения и при необходимости добавить новые типы. Приведенные ниже типы светодиодов поддерживаются стандартной библиотекой программы MC8:

YELLOW, 2.0, .015

GREEN, 2.1, .015

BLUE, 3.4, .012

RED, 1.7, .015

Для иллюстрации см. Схемные файлы **Anim6.CIR**, **Animated Analog LED.CIR** из каталога **COMPONENTS\ANIMATION**.

6.6.3. Двигатель постоянного тока (Animated DC motor)

Формат схем MICROCAP-8:

Атрибут PART: <имя>

Примеры:

MOTOR1

Атрибут RPSPV <оборотов в секунду на вольт>

Примеры:

1

Атрибут RMOTOR <сопротивление двигателя>

Атрибут LMOTOR <индуктивность двигателя>

Двигатель постоянного тока вращается с угловой скоростью, пропорциональной уровню входного напряжения. Скорость вращения в оборотах в секунду определяется следующим образом:

$$\omega = \text{<входное напряжение>} * \text{<оборотов в секунду на вольт>}$$

Как электрическая схема, мотор представляет собой резистор величиной <сопротивление двигателя>, соединенный последовательно с индуктивностью величиной <индуктивность двигателя>.



Напряжение на выводе *Velocity* представляет собой угловую скорость вращения в оборотах в секунду, выраженную в Вольтах.

Предупреждение: Если скорость вращения слишком высока, то из-за отображения ротора на электронном дисплее он будет пропадать. Величина скорости в 10 об/сек является максимальной скоростью, при которой заметно угловое перемещение ротора.

Для иллюстрации см. схемный файл **Animated DC motor.CIR** из каталога **COMPONENTS\ANIMATION**.

6.6.4. Ключи типа DPST, SPDT, SPST (Animated DPST, SPDT, and SPST switches)

Формат схем MICROCAP-8:

Атрибут PART: <имя>

Атрибут STATE: <UP | DOWN> (для переключателей SPDT)

Атрибут STATE: <OPEN | CLOSED> (для ключей SPST или DPST)

Атрибут RON: < значение RON>

Примеры:

.001

Атрибут ROFF: <значение ROFF>

Примеры:

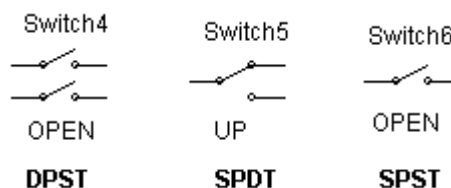
1E12

Атрибут GROUP: <<имя группы> | NOT <имя группы>>

Примеры:

Group1

NOT Group22



Двойной клик мышью на ключах переключает состояние SPST и DPST ключей между разомкнутым (OPEN) и замкнутым (CLOSED); состояние переключателя SPDT — между верхним (UP) и нижним (DOWN) положением. Все ключи моделируются простым резистором, величина которого во включенном и выключенном состоянии ключа равна соответственно Ron (по умолчанию 0.001) и Roff (по умолчанию 1E15). Двойной клик мышью непосредственно рядом с элементом вызывает диалоговое окно установки атрибутов. Двойной клик на ключе, имеющем атрибут GROUP вызывает смену состояния всех других ключей данной группы. Если <имя группы> в поле атрибута GROUP предваряется словом NOT, ключ работает противоположно другим ключам данной группы.

Для иллюстрации см. схемный файл **Anim5.CIR** из каталога **COMPONENTS\ANIMATION**.

6.6.5. Вольтамперметр (Animated meter)

Формат схем MICROCAP-8:

Атрибут PART: <имя>

Примеры:

METER1

Атрибут LOW: <минимальное значение>

Атрибут HIGH: <максимальное значение>

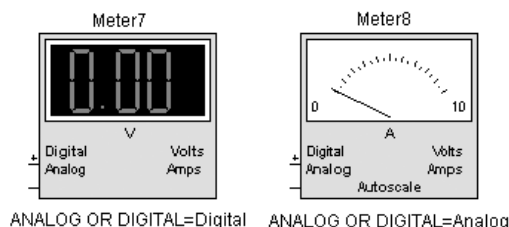
Атрибут SCALE: < T | MEG | K | m | u | n | p | f >

Атрибут AUTOSCALE: <ON | OFF>

Атрибут ANALOG_OR_DIGITAL: <ANALOG | DIGITAL>

Атрибут AMPS_OR_VOLTS: <AMPS | VOLTS>

Атрибут INPUT_RESISTANCE: <Rin>



ANALOG OR DIGITAL=Digital

ANALOG OR DIGITAL=Analog

Анимированный измерительный прибор представляет собой либо амперметр либо вольтметр, который, кроме того, может быть аналоговым либо цифровым. Тип прибора (ампер или вольтметр) а также его вид (аналоговый либо цифровой) устанавливается двойным кликом мыши на соответствующих надписях передней панели его УГО. Двойной клик мыши на надписи «Autoscale» на передней панели аналогового прибора переключает его режимы между двумя состояниями: автоматическим определением предела шкалы и ручным. В режиме ручного определения предела шкалы (manual scaling) нижний предел устанавливается по значению атрибута LOW, а верхний — по значению атрибута HIGH. Цифровой прибор всегда находится в режиме автоматического определения предела шкалы (autoscaling).

Значение атрибута SCALE принимается во внимание только тогда, когда атрибут AUTOSCALE выключен (OFF) и выбран аналоговый измерительный прибор. Например, при входном напряжении 8000В, атрибут SCALE к приведет к показанию стрелки вольтметра на цифре 8 при верхнем пределе шкалы 10 и нижнем 0 (LOW=0 и HIGH=10).

Для модели вольтметра параллельно его входным клеммам включается резистор величиной R_{in} .

Для иллюстрации см. схемный файл **Animated meter.CIR** из каталога **COMPONENTS\ANIMATION**.

6.6.6. Электромагнитное реле (Animated relay)

Формат схем MICROCAP-8:

Атрибут PART: <имя>

Примеры:

RELAY1

Атрибут LIN: <входная индуктивность>

Атрибут RIN: <входное сопротивление>

Атрибут ION: <входной ток включения>

Атрибут IOFF: <входной ток выключения>

Атрибут RON: <сопротивление во включенном состоянии>

Атрибут ROFF: <сопротивление в выключенном состоянии>

Атрибут BIDIRECTIONAL: <YES | NO>



Компонент animated relay представляет собой SPST-реле, которое реагирует на изменения входного тока. Оно ведет себя подобно переключаемому плавно токовому W-ключу. Входная цепь реле моделируется как индуктивность величиной <входная индуктивность> последовательно соединенная с резистором величиной <входное сопротивление>.

Для иллюстрации см. схемный файл **Anim7.CIR** из каталога **COMPONENTS\ANIMATION**.

Уравнения электрической модели

Если атрибут BIDIRECTIONAL равен NO, $IC = (\text{Ток, втекающий в плюсовой вывод})$,
иначе $IC = ABS[\text{Ток, втекающий в плюсовой вывод}]$

$$LM = \ln \left[\left(\frac{RON}{ROFF} \right)^{1/2} \right]; \quad LR = \ln \left[\frac{RON}{ROFF} \right]; \quad IM = \frac{ION + IOFF}{2}; \quad ID = ION - IOFF;$$

$RS = (\text{выходное сопротивление ключа})$

При $ION > IOFF$

Если $IC \geq ION$, $RS = RON$;

Если $IC \leq IOFF$, $RS = ROFF$;

Если $IOFF < IC < ION$, $RS = e^{\left(LM + \frac{3 \cdot LR \cdot (IC - IM)}{2 \cdot ID} - \frac{2 \cdot LR \cdot (IC - IM)^3}{ID^3} \right)}$

При $ION < IOFF$

Если $IC \leq ION$, $RS = RON$

Если $IC \geq IOFF$, $RS = ROFF$

Если $IOFF > IC > ION$, $RS = e^{\left(LM - \frac{3 \cdot LR \cdot (IC - IM)}{2 \cdot ID} + \frac{2 \cdot LR \cdot (IC - IM)^3}{ID^3} \right)}$

6.6.7. Светофор (Animated traffic light)

Формат схем MICROCAP-8:

Атрибут PART: <имя>

Примеры:

LIGHT1

Атрибут TURN-ON VOLTAGES: <напряжение включения>

Light1 0



Элемент animated traffic light моделирует работу светофора (последовательное зажигание индикаторов). У него есть 3 индикатора разного цвета свечения: красного, желтого и зеленого. Каждый из трех индикаторов загорается, когда напряжение на его управляющих выводах превышает <напряжение включения>.

Для иллюстрации см. схемный файл **Anim4.CIR** из каталога **COMPONENTS\ANIMATION**.

6.7. Модели полупроводниковых приборов

6.7.1. Диод

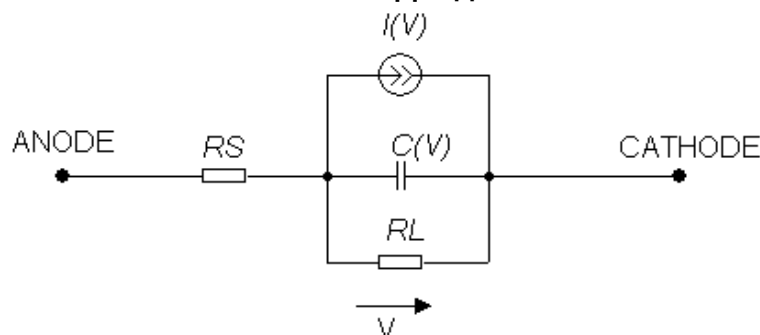


Рис. 6.23. Модель полупроводникового диода

$$I = IS(T) \cdot (e^{\frac{V}{VT \cdot N}} - 1) + IBV(T) \cdot (e^{\frac{V+BV}{VT \cdot NBV}} - 1)$$

Емкость, зависящая от времени пролета (Transit Time capacitance)

$$CT = TT \cdot Gd,$$

где Gd — дифференциальная проводимость диода на постоянном токе

Барьерная емкость

$$\text{Если } V \leq FC \cdot VJ(T) \quad \text{то} \quad CJ(V) = CJO(T) \cdot \left[1 - \frac{V}{VJ(T)} \right]^{-M}$$

$$\text{Иначе} \quad CJ(V) = CJO(T) \cdot [1 - FC]^{-(1+M)} \cdot \left[1 - FC \cdot (1+M) + M \cdot \frac{V}{VJ(T)} \right]$$

Суммарная емкость

$$C(V) = CT + CJ$$

Таблица 6.17. Основные параметры модели диода (D)

Level	Тип модели: 1 — SPICE2G, 2 — PSpice
N	Коэффициент эмиссии (неидеальности)
BV	Обратное напряжение пробоя (положительная величина)
IBV	Начальный ток пробоя, соответствующий напряжению BV (положительная величина)
NBV	Коэффициент неидеальности на участке пробоя
TT	Время переноса заряда
CJO	Барьерная емкость при нулевом смещении
VJ	Контактная разность потенциалов
M	Коэффициент плавности р-п перехода (1/2 — для резкого, 1/3 — для плавного)
FC	Коэффициент нелинейности барьерной емкости прямосмещенного перехода
EG	Ширина запрещенной зоны
RS	Объемное сопротивление
RL	Сопротивление утечки перехода

6.7.2. Биполярный транзистор

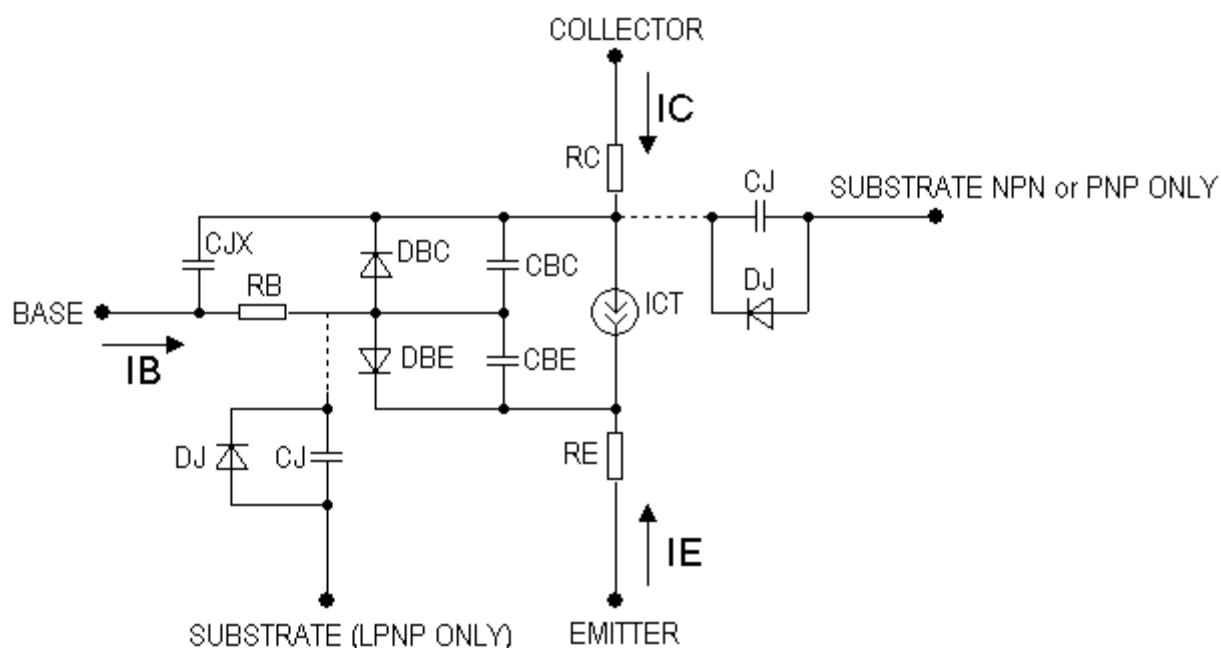


Рис. 6.24. Модель биполярного транзистора (полная схема)

Таблица 6.18. Основные параметры модели биполярного транзистора (NPN, PNP)

IS	Ток насыщения при температуре 27°C
BF	Максимальный коэффициент усиления тока в нормальном режиме в схеме с ОЭ
NF	Коэффициент эмиссии (неидеальности) для нормального режима
VAF	Напряжение Эрли в нормальном режиме
BR	Максимальный коэффициент усиления тока в инверсном режиме в схеме с ОЭ
NR	Коэффициент эмиссии (неидеальности) для инверсного режима
RC	Объемное сопротивление коллектора
RE	Объемное сопротивление эмиттера
RB	Объемное сопротивление базы (максимальное) при нулевом смещении перехода база-эмиттер
TF	Время переноса заряда через базу в нормальном режиме
TR	Время переноса заряда через базу в инверсном режиме
MJC(E)	Коэффициент, учитывающий плавность коллекторного (эмиттерного) перехода
VJC(E)	Контактная разность потенциалов перехода база-коллектор (база-эмиттер)
CJC(E)	Емкость коллекторного (эмиттерного) перехода при нулевом смещении
FC	Коэффициент нелинейности барьерных емкостей прямосмещенных переходов

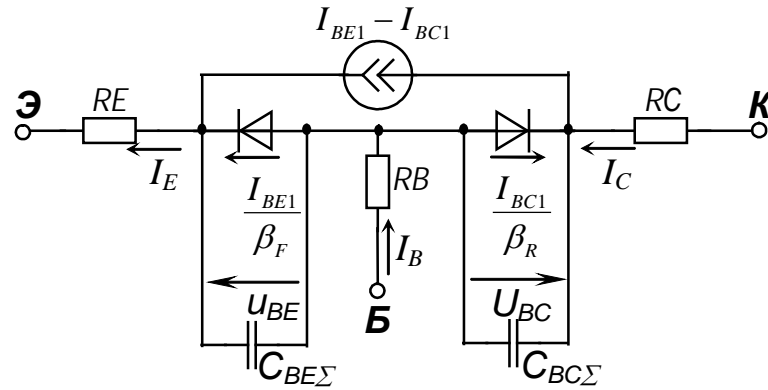


Рис. 6.25. Модель Эберса-Молла DESIGN LAB, MICROCAP (упрощенная схема)

Уравнения для статического режима (на постоянном токе)

$$\begin{cases} I_{BE1} = I_S \cdot \left(e^{\frac{U_{BE}}{N_F \phi_T}} - 1 \right); & I_{BC1} = I_S \cdot \left(e^{\frac{U_{BC}}{N_R \phi_T}} - 1 \right); \\ I_B = \frac{I_{BE1}}{\beta_F} + \frac{I_{BC1}}{\beta_R}; & I_C = I_{BE1} - \frac{\beta_R + 1}{\beta_R} \cdot I_{BC1}; & I_E = \frac{\beta_F + 1}{\beta_F} \cdot I_{BE1} - I_{BC1} \end{cases}$$

Уравнения для паразитных емкостей

Суммарная паразитная емкость эмиттерного и коллекторных переходов:

$$C_{BE\Sigma} = t_F \cdot G_{BE} + C_{JBE}(U_{BE}) \quad C_{BC\Sigma} = t_R \cdot G_{BC} + C_{JBC}(U_{BC}),$$

где t_F , t_R — *forward transit time*, *reverse transit time* (прямое и обратное время пролета). Величины, характеризующие инерционные процессы накопления носителей при прямом смещении на переходе б-э и б-к соответственно.

$$G_{BE} = \frac{dI_{BE}}{dU_{BE}}, \quad G_{BC} = \frac{dI_{BC}}{dU_{BC}} \quad \text{— проводимости переходов база-эмиттер и база-коллектор на}$$

постоянном токе при прямом смещении на соответствующем переходе.

$C_{JBE}(U_{BE})$, $C_{JBC}(U_{BC})$ — **барьерные емкости переходов** база-эмиттер и база-коллектор, имеют сложную зависимость от напряжения на соответствующих переходах U_{BE} , U_{BC} . При прямом и обратном смещениях на переходах вычисляется по разным формулам:

$$C_{JBE(C)} = C_{JE(C)} \cdot \left(1 - \frac{V_{BE(C)}}{V_{JE(C)}} \right)^{-M_{JE(C)}}, \quad \text{при } V_{BE(C)} \leq FC \cdot V_{JE(C)};$$

$$C_{JBE(C)} = C_{JE(C)} \cdot (1 - FC)^{-(1+M_{JE(C)})} \cdot \left(1 - FC \cdot (1 + M_{JE(C)}) + \frac{M_{JE(C)} V_{BE(C)}}{V_{JE(C)}} \right),$$

при

$$V_{BE(C)} > FC \cdot V_{JE(C)}.$$

6.7.3. Полевой транзистор с управляющим р-п переходом JFET

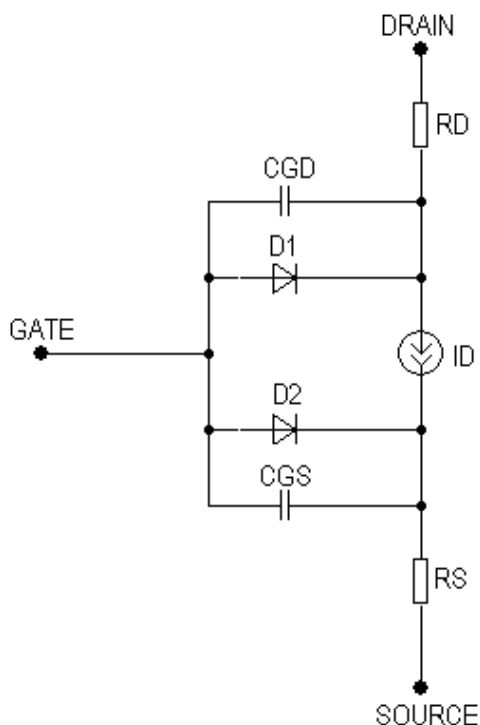


Рис. 6.26. Модель полевого транзистора с управляющим р-п переходом

Таблица 6.19. Основные параметры модели полевого транзистора с управляющим переходом (NJF, PJF)

pn-

VTO	Пороговое напряжение
BETA	Коэффициент пропорциональности (удельная передаточная проводимость
LAMBDA	Параметр модуляции длины канала
RD	Объемное сопротивление области стока
RS	Объемное сопротивление области истока
CGS	Емкость перехода затвор-исток при нулевом смещении
CGD	Емкость перехода затвор-сток при нулевом смещении
M	Коэффициент плавности перехода затвор-исток
FC	Коэффициент нелинейности емкостей переходов при прямом смещении

Уравнения для токов JFET

Область отсечки: $V_{gs} \leq V_{TO}(T)$

$$I_d = 0$$

Область насыщения: $V_{ds} > V_{gs} - V_{TO}(T)$

$$I_d = BETA(T) \cdot (V_{gs} - V_{TO}(T))^2 \cdot (1 + LAMBDA \cdot V_{ds})$$

Линейная область: $V_{ds} < V_{gs} - V_{TO}(T)$,

$$I_d = BETA(T) \cdot V_{ds} \cdot [2 \cdot (V_{gs} - V_{TO}(T)) - V_{ds}] \cdot (1 + LAMBDA \cdot V_{ds})$$

6.7.4. Арсенид-галлиевый полевой транзистор GaAsFET

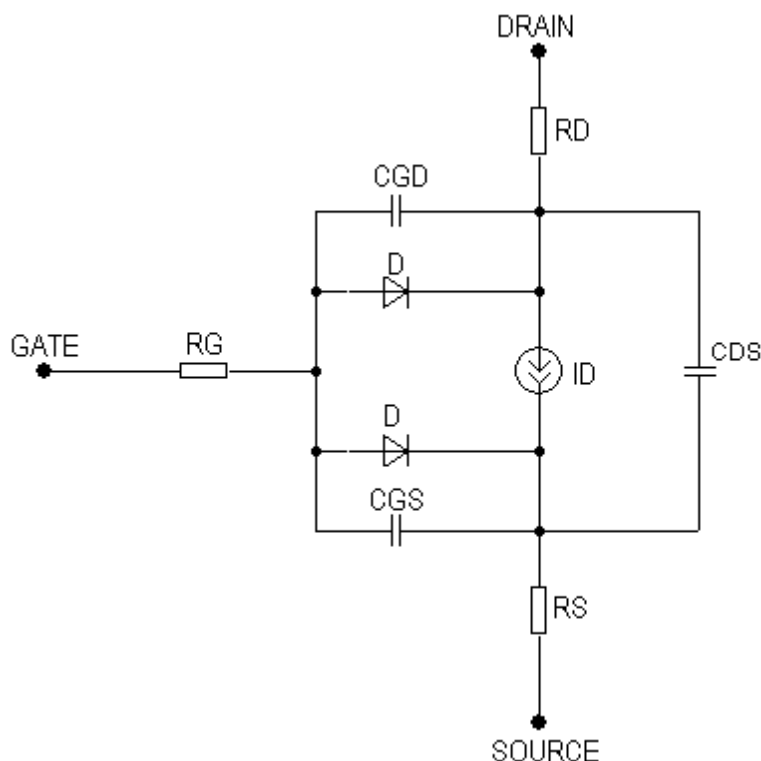


Рис. 6.27. Модель арсенидгаллиевого полевого транзистора

Таблица 6.20. Основные параметры модели арсенид-галлиевого полевого транзистора (GaAsFET)

LEVEL	Тип модели: 1 — модель Куртиса, 2 — модель Рэйтеона, 3 — модель TriQuint
VTO	Барьерный потенциал перехода Шоттки или пороговое напряжение
ALPHA	Коэффициент для напряжения насыщения тока стока
BETA	Удельная крутизна (удельная передаточная проводимость)
LAMBDA	Параметр модуляции длины канала
RG	Объемное сопротивление области затвора
RD	Объемное сопротивление области стока
RS	Объемное сопротивление области истока
CGD	Емкость затвор-сток при нулевом смещении
CGS	Емкость затвор-исток при нулевом смещении
CDS	Емкость сток-исток фиксированная
FC	Коэффициент нелинейности барьерной емкости прямосмещенного р-п-перехода затвора

Уравнения для токов модели LEVEL 1

Область отсечки: $V_{gs} \leq V_{TO}(T)$

$$I_d = 0$$

Область линейного режима и режима насыщения: $V_{gs} > V_{TO}(T)$

$$I_d = BETA(T) \cdot (1 + LAMBDA \cdot V_{ds}) \cdot (V_{gs} - V_{TO}(T))^2 \cdot \tanh(ALPHA \cdot V_{ds})$$

6.7.5. Полевой транзистор с изолированным затвором MOSFET

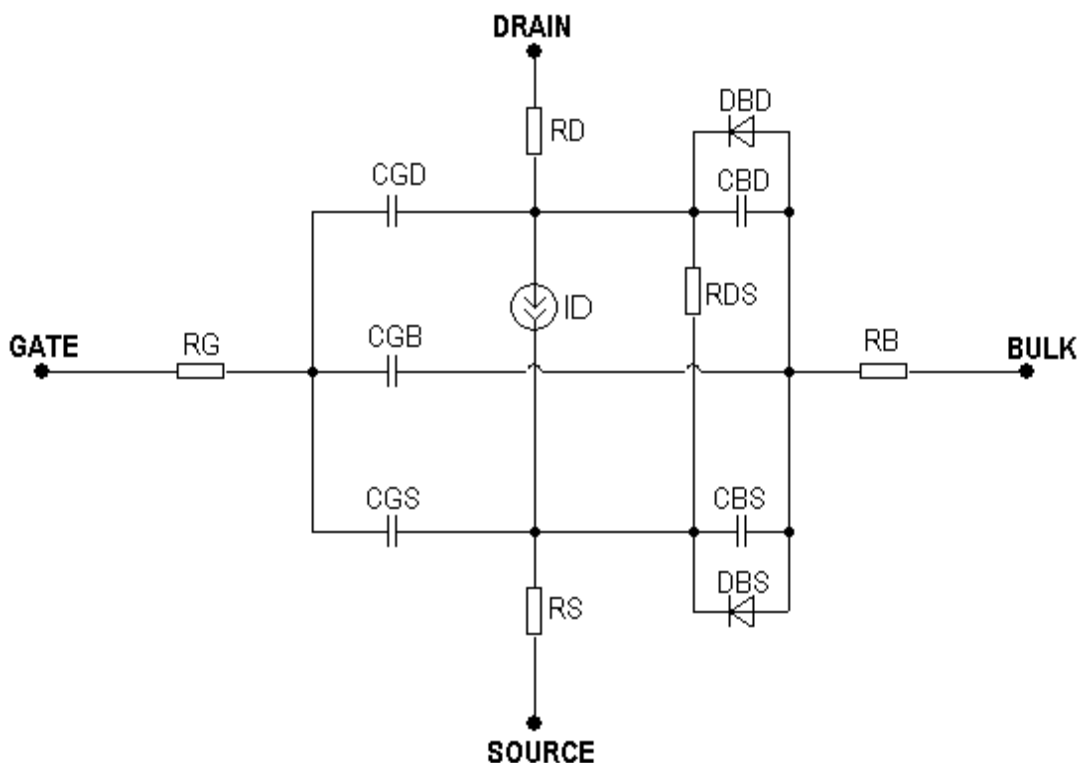


Рис. 6.28. Эквивалентная схема модели МОП-транзистора

Таблица 6.21. Основные параметры модели МОП-транзистора (NMOS, PMOS)

LEVEL	Индекс уровня модели
KP	Параметр удельной крутизны
VTO	Пороговое напряжение при нулевом смещении
GAMMA	Коэффициент влияния потенциала подложки на пороговое напряжение
PHI	Поверхностный потенциал сильной инверсии
LAMBDA	Параметр модуляции длины канала
RDS	Сопротивление утечки сток-исток
RD	Объемное сопротивление стока
RS	Объемное сопротивление истока
RG	Объемное сопротивление затвора
RB	Объемное сопротивление подложки
CGDO	Удельная емкость перекрытия затвор-сток на длину канала (за счет боковой диффузии)
CGSO	Удельная емкость перекрытия затвор-исток (за счет боковой диффузии)
CGBO	Удельная емкость перекрытия затвор-подложка (за счет выхода затвора за пределы канала)
MJ	Коэффициент, учитывающий плавность донной части перехода подложка-сток (исток)
FC	Коэффициент нелинейности барьерной емкости прямосмещенного перехода подложки

Уравнения для токов MOSFET

Ниже показаны только уравнения для модели уровня 1 n-канального транзистора.

$$K = \frac{KP \cdot W}{L - 2 \cdot LD}$$

$$V_{TH} = V_{TO} + GAMMA \cdot (\sqrt{PHI - V_{BS}} - \sqrt{PHI})$$

Область отсечки: для $V_{gs} < V_{TH}$

$$I_d = 0.0$$

Линейная область: для $V_{gs} > V_{TH}$ и $V_{ds} < (V_{gs} - V_{TH})$

$$I_d = K \cdot (V_{gs} - V_{TH} - 0.5 \cdot V_{ds}) \cdot V_{ds} \cdot (1 + LAMBDA \cdot V_{ds})$$

Область насыщения: для $V_{gs} > V_{TH}$ и $V_{ds} > (V_{gs} - V_{TH})$

$$I_d = 0.5 \cdot K \cdot (V_{gs} - V_{TH})^2 \cdot (1 + LAMBDA \cdot V_{ds})$$

Уравнения приведены для n-канального прибора.

6.7.6. Операционный усилитель

Таблица 6.22. Основные параметры моделей операционных усилителей (ОУ)

LEVEL	Уровень модели (1, 2, 3)
TYPE	Тип входного транзистора: 1 — NPN, 2 — PNP, 3 — JFET
A	Коэффициент усиления без обратной связи на постоянном токе
ROUTAC	Выходное сопротивление по переменному току
ROUTDC	Выходное сопротивление по постоянному току
VOFF	Напряжение смещения нуля
IOFF	Разность входных токов смещения
SRP	Максимальная скорость нарастания выходного напряжения
SRN	Максимальная скорость спада выходного напряжения
IBIAS	Входной ток смещения
VCC	Положительное напряжение питания
VEE	Отрицательное напряжение питания
VPS	Максимальное выходное положительное напряжение
VNS	Максимальное выходное отрицательное напряжение
CMRR	Коэффициент подавления синфазного сигнала
GBW	Площадь усиления (равна произведению коэффициента усиления A на частоту первого полюса)
PM	Запас по фазе на частоте единичного усиления

VCC и VEE — это напряжения двуполярного питания, для которого указаны величины VPS и VNS — насыщения передаточной характеристики. Величины напряжений источников питания влияют только на рассеиваемую мощность и максимальное выходное напряжение ОУ.

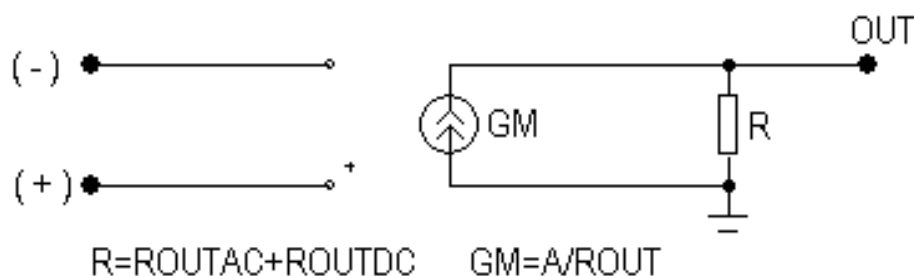


Рис. 6.29. Эквивалентная схема модели ОУ LEVEL1

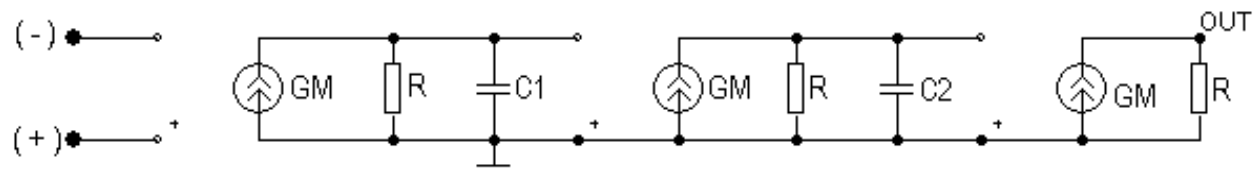


Рис. 6.30. Эквивалентная схема модели ОУ LEVEL2

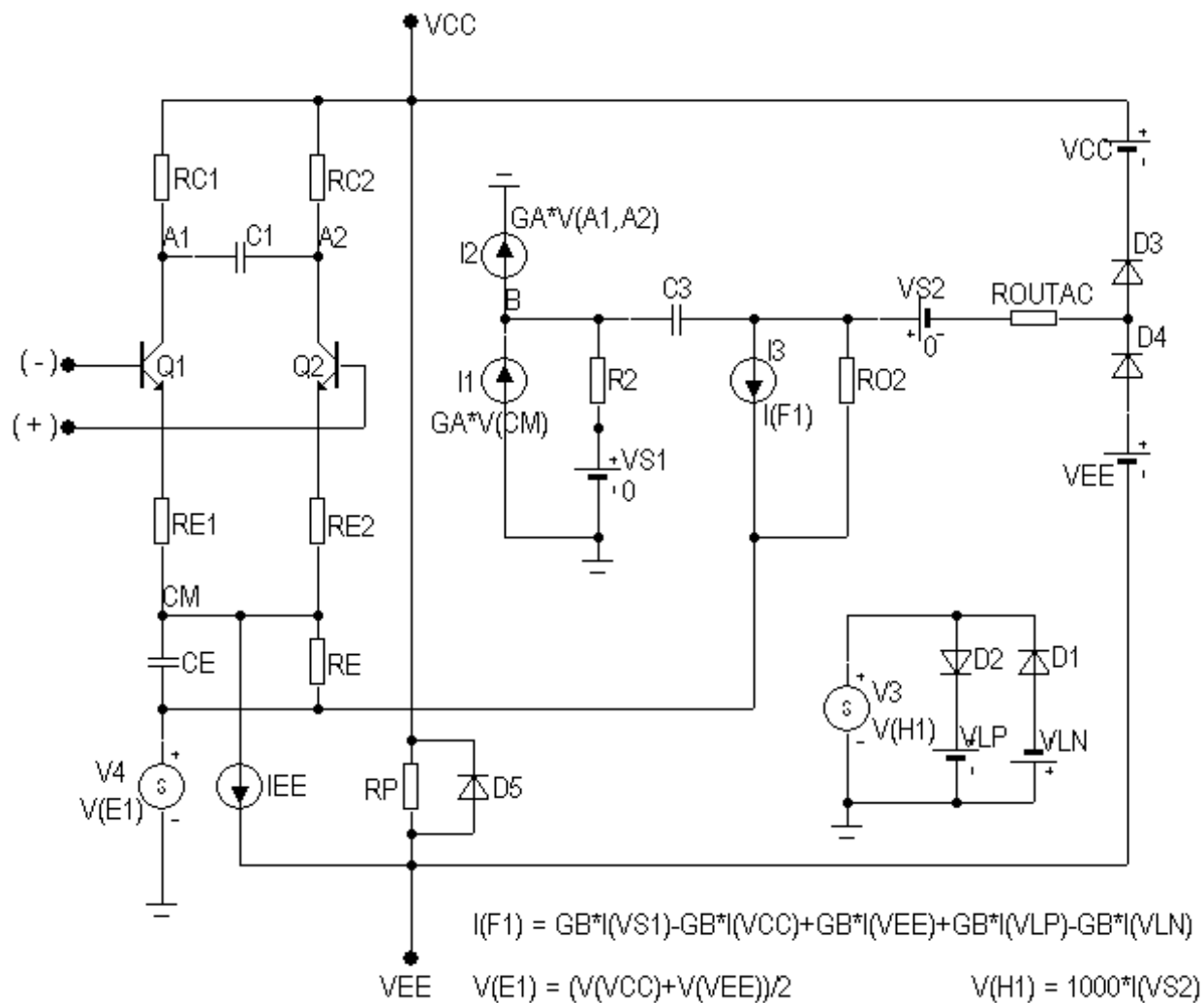


Рис. 6.31. Эквивалентная схема модели ОУ с npn-транзисторами на входе LEVEL3

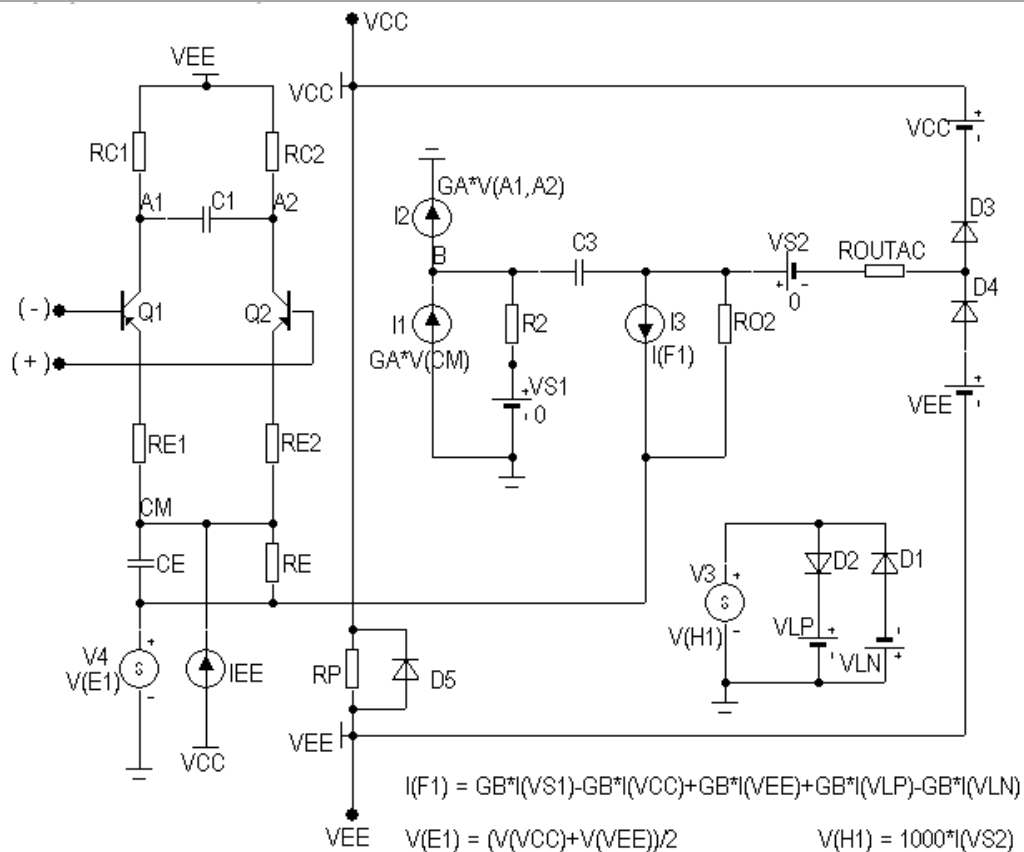


Рис. 6.32. Эквивалентная схема модели ОУ с rnp-транзисторами на входе LEVEL3

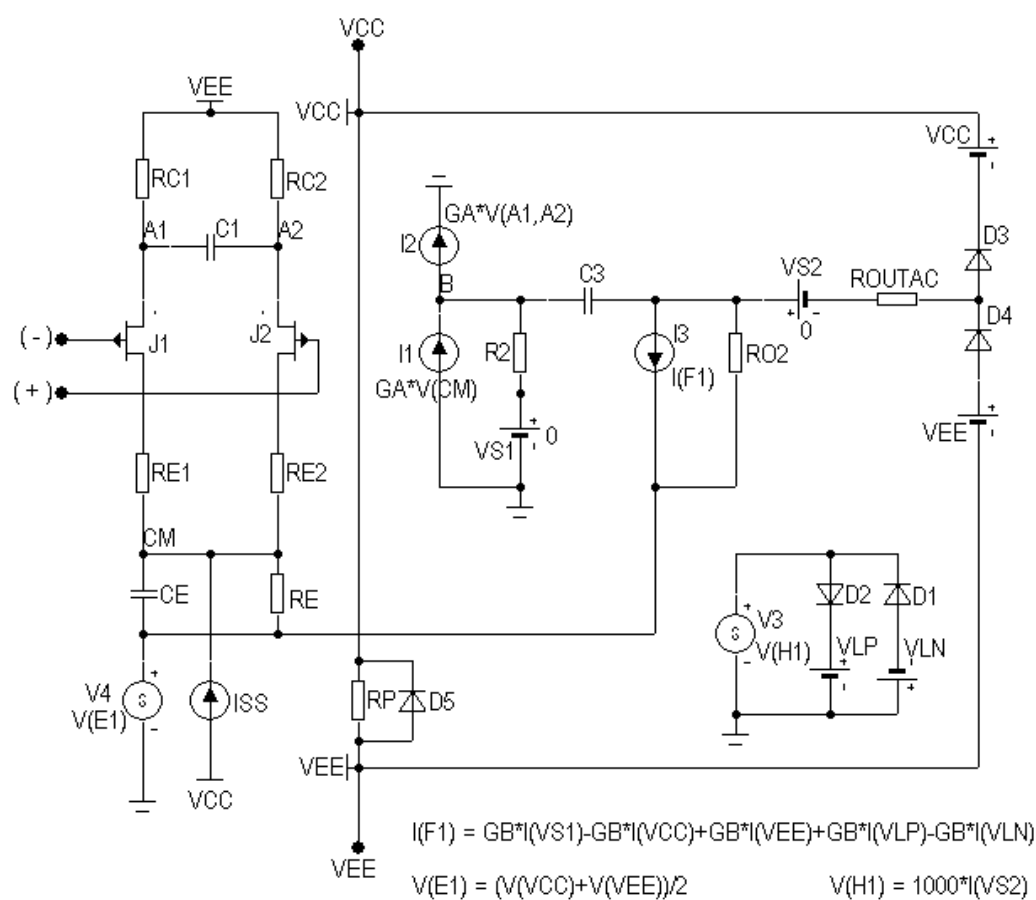


Рис. 6.33. Эквивалентная схема модели ОУ с полевыми транзисторами на входе LEVEL3