

Окончание. Начало в № 3'2003

Моделирование на функциональном уровне в OrCAD 9.2

Иосиф Златин

Элементы, задаваемые математическими выражениями

Эти элементы могут быть настроены для выполнения разнообразных функций в зависимости от ваших потребностей. Каждый из этих элементов имеет уставку четырех выражений EXPn, где n = 1, 2, 3 или 4.

Во время создания списка соединений полное выражение формируется, связывая выражения EXPn в числовом порядке, определяя, таким образом, функцию преобразования. Следовательно, первый фрагмент выражения должен быть назначен атрибутом EXP1, второй — атрибутом EXP2 и так далее.

Таблица 1. Перечень арифметических операторов

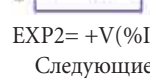
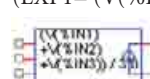
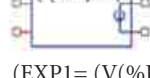
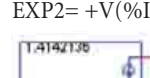
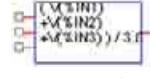
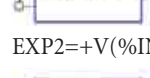
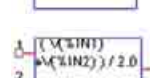
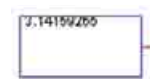
Оператор	Выполняемая функция
+	суммирование
-	вычитание
*	умножение
/	деление
**	возведение в степень

Таблица 2. Математические выражения

Аббревиатура	Функция	Определение
ABS(x)	x	Абсолютное значение
SQRT(x)	x ^{1/2}	Квадратный корень
EXP(x)	e ^x	Экспонента
LOG(x)	ln(x)	Натуральный логарифм от x
LOG10(x)	log(x)	Десятичный логарифм от x
PWR(x,y)	x ^y	Возведение в степень
PWRS(x,y)	+ x ^y (если x > 0) - x ^y (если x < 0)	Возведение в степень
SIN(x)	sin(x)	Синус (x – в радианах)
ASIN(x)	sin ⁻¹ (x)	Арксинус (результат в радианах)
SINH(x)	sinh(x)	Гиперболический синус (x – в радианах)
COS(x)	cos(x)	Косинус (x – в радианах)
ACOS(x)	cos ⁻¹ (x)	Аркосинус (результат – в радианах)
COSH(x)	cosh(x)	Гиперболический косинус (x – в радианах)
TAN(x)	tan(x)	Тангенс (x – в радианах)
ATAN(x) ARCTAN(x)	tan ⁻¹ (x)	Арктангенс (результат – в радианах)
ATAN2(y,x)	tan ⁻¹ (y/x)	Арктангенс (результат – в радианах)
TANH(x)	tanh(x)	Гиперболический тангенс (x – в радианах)
M(x)	Модуль x	Эквивалентно ABS(x)
P(x)	фаза x	Равна 0 для вещественных чисел
R(x)	действительная часть x	
IMG(x)	мнимая часть x	Применяется только при анализе АС
DDT(x)	производная от x по времени	Применяется только при анализе переходных процессов
SDT(x)	интеграл от x по времени	Применяется только при анализе переходных процессов

Свойства выражения могут быть определены с помощью комбинации арифметических операторов и математических выражений. Можно использовать любой стандартный арифметический оператор (табл. 1) и математические выражения PSpice A/D (табл. 2).

Элементы, задаваемые математическими выражениями, показаны в таблице 2 (см. начало статьи в № 3'2003). Опишем их более подробно.



Следующие примеры поясняют возможности элементов, задаваемых математическими выражениями.

Пример 1. Предположим, что вы хотите установить выходное напряжение элемента, равное 10 В, умноженное на корень квадратный из напряжения между двумя входами этого элемента. Вы могли бы использовать элемент AVM2 (который имеет два входа и обеспечивает напряжение на выходе).

Параметры настройки атрибутов для этого элемента следующие:

$$EXP1 = 10V * \\ EXP2 = SQRT(V(\%IN2, \%IN1))$$

Пример 2. Создадим модель генератора для модулятора фазоманипулированных колебаний (Phase Shift Keyed). Выходной сигнал должен быть синусои-

дальним током с амплитудой 20 мА и частотой 100 кГц. Напряжение на входе должно сдвигать фазу генератора на 1 рад/В. Обратите внимание на параметр TIME в выражении EXP2. Это — внутренняя переменная, используемая в PSpice A/D при анализе переходных процессов. Для любого другого анализа TIME = 0.

Генератор может быть представлен элементом АВМ1/1 (один вход, ток на выходе). Этот элемент характеризуется следующими атрибутами:

$$\begin{aligned} \text{EXP1} &= 20\text{ma} * \text{SIN}(\text{TIME}) \\ \text{EXP2} &= 6,28 * 100\text{kHz} * \text{TIME} \\ \text{EXP3} &= + \text{V}(\% \text{IN}) \end{aligned}$$

Пример 3. Моделирование лампового триода. До сих пор для построения радиотехнических устройств используются электронные лампы: высоковольтные триоды для построения модуляторов, магнетроны, клистроны и лампы бегущей волны для построения выходных каскадов мощных передатчиков. Модели этих устройств отсутствуют в стандартных библиотеках OrCAD, но могут быть созданы при использовании элементов библиотеки АВМ. Рассмотрим создание модели электронной лампы на примере лампового триода.

Известно, что анодный ток лампового триода описывается выражением:

$$I_{\text{анод}} = k_0 * (\text{V}_{\text{сетка-катод}} + k_1 * \text{V}_{\text{анод-катод}})^{1,5}$$

Для типового триода $k_0 = 200 \times 10^{-6}$ и $k_1 = 0,12$.

Для создания электродов лампы используем элемент АВМ3, входные выводы которого используются в качестве анода, сетки и катода. Ванод свяжем с V(%IN1), Vсетка свяжем с V(%IN2), Vкатод свяжем с V(%IN3).

Свойство выражения EXP1 тогда представляет Vсетка-катод, а свойство выражения EXP2 представляет $0,12 * \text{V}_{\text{анод-катод}}$.

Элемент АВМ3 определим следующими атрибутами:

$$\begin{aligned} \text{EXP1} &= \text{V}(\% \text{IN2}, \% \text{IN3}) + \\ \text{EXP2} &= 0,12 * \text{V}(\% \text{IN1}, \% \text{IN3}), \end{aligned}$$

что эквивалентно следующему:

$$\text{V} = \text{V}_{\text{сетка-катод}} + 0,12 * \text{V}_{\text{анод-катод}}$$

Этот элемент не моделирует случай, при котором ток становится равным 0, когда комбинация сеточного и анодного напряжения становится отрицательной. Мы можем добавить элемент LIMIT со следующими характеристиками:

$$\begin{aligned} \text{HI} &= 1\text{E3} \\ \text{LO} &= 0 \end{aligned}$$

Этот элемент LIMIT преобразовывает все отрицательные значения $\text{V}_{\text{сетка}} + 0,12 * \text{V}_{\text{анод}}$ в 0 и оставляет только все положительные значения (до 1 кВ). Для создания более реалистичной модели мы могли бы использовать элемент TABLE, так как лампа выключается при 0 или при малых отрицательных напряжениях на сетке.

Мы также должны удостовериться, что ток становится нулевым, когда напряжение на аноде становится отрицательным. Чтобы сделать это, мы можем использовать элемент DIFF (сразу после устройства АВМ3) для вычисления $\text{V}_{\text{анод-катод}}$ и передачи его на вход элемента TABLE.

Атрибуты элемента TABLE следующие:

$$\begin{aligned} \text{ROW1} &= 0\ 0 \\ \text{ROW2} &= 3\ 0\ 1 \end{aligned}$$

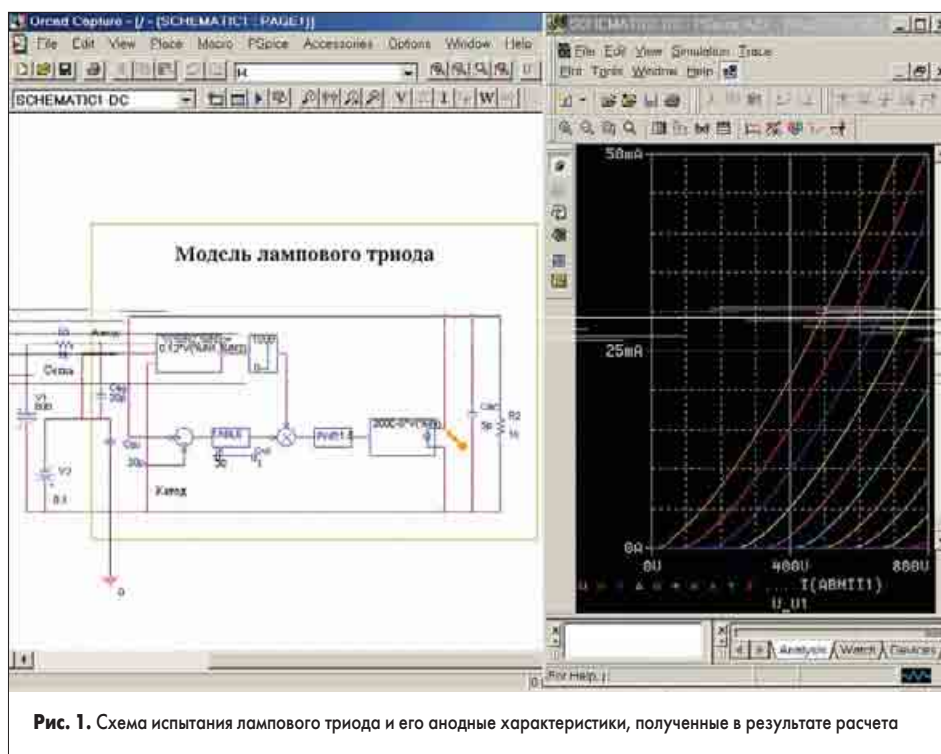


Рис. 1. Схема испытания лампового триода и его анодные характеристики, полученные в результате расчета

Элемент TABLE гарантирует, что только нулевое значение выводится к перемножителю для отрицательных анодных напряжений. Все значения между 0 и 30 линейно интерполированы.

Выходы элементов TABLE и LIMIT присоединяются к элементу MULT (перемножитель). Выходное напряжение элемента MULT — произведение этих двух входных напряжений. Его значение возводится в степень 1,5 с помощью элемента PWR. Атрибут элемента PWR определен следующим образом:

$$\text{EXP} = 1,5$$

Последний элемент, АВМ1/1, преобразовывает входное напряжение в ток. Атрибут этого элемента определен следующим образом:

$$\text{EXP1} = 200\text{e-6} * \text{V}(\% \text{IN})$$

В заключение в модель лампового триода необходимо добавить паразитные элементы. Например, чтобы обеспечить необходимое выходное сопротивление, может использоваться резистор. В модель добавлены также паразитные емкости между сеткой, катодом и анодом. Расчет осуществлялся по директивам .DC (расчет режима по постоянному току). Схема испытания лампового триода и полученные в результате моделирования анодные характеристики приведены на рис. 1 (модель триода выделена зеленым прямоугольником).

Эквивалентные элементы

Эквивалентные элементы отражают структуру устройств управляемых источников E и G. Элементы типа E обеспечивают выходное напряжение, а устройства типа G — выходной ток. Эквивалентным элементам соответствуют дифференциальный вход и наличие двунаправленного выхода. Передаточная функция устройства может содержать любой набор входных напряжений и токов. Следовательно, имеется некоторое различие между элементами, управляемыми напряжением и управляемыми током. Тип элемента в значительной степени определяется только требованиями к виду выходного сигнала. Если требуется выходное напряжение, используйте элемент типа E, если на выходе необходим ток, используйте элемент типа G.

В библиотеке элементов нет никаких эквивалентов элементов типа «F» или «H», потому что устройства «F» и «H» (табл. 1 — см. начало статьи в № 3'2003) не предназначены для создания библиотек АВМ.

Каждый элемент типов E или G в библиотеке АВМ.OLB в файле УГО определен шаблоном, который обеспечивает специальные передаточные функции. Другие атрибуты в описании модели выбранной передаточной функции могут быть отредактированы.

Таблица 3. Эквивалентные элементы

Группа элементов	Название элемента	Описание	Атрибуты
Задаваемые с помощью математических выражений	EVALUE	Универсальный	EXPR
	GVALUE	Универсальный	EXPR
	ESUM	Специальный	Нет
	GSUM	Специальный	Нет
	EMULT	Специальный	Нет
Таблицы	GMULT	Специальный	Нет
	GTABLE	Универсальный	EXPR, TABLE
Частотные таблицы	ETABLE	Универсальный	EXPR, TABLE
	EFREQ	Универсальный	EXPR, TABLE
Преобразование Лапласа	GFREQ	Универсальный	EXPR, TABLE
	ELAPLACE	Универсальный	EXPR, XFORM
	GLAPLACE	Универсальный	EXPR, XFORM

Выполнение эквивалентных элементов

Для создания пользовательских эквивалентных ABM-элементов полезно знать синтаксис командного языка PSpice A/D для устройств «G и «E».

Пользовательские элементы PSpice A/D «E» и «G» задаются по формату:

```
E <name> <connecting nodes>
<ABM keyword> <ABM function>
G <name> <connecting nodes>
<ABM keyword> <ABM function>
```

где

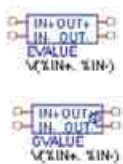
<name> — название устройства, добавленное к характеристикам устройств типа E или G; <connecting nodes> — определяет пару узлов <(имя положительного узла, имя отрицательного узла)>, между которыми устройство включено;

<ABM keyword> — определяет форму передаточной функции, которую нужно использовать, как одну из:

- VALUE (математическое выражение)
- TABLE (считывание данных из таблицы)
- LAPLACE (преобразование Лапласа)
- FREQ TABLE (считывание данных из частотной таблицы)
- CHEBYSHEV (характеристики фильтра Чебышева)

<ABM function> определяет передаточную функцию как формулу или таблицу, как это требует указанное <ABM keyword>.

Элементы EVALUE и GVALUE



EVALUE и GVALUE позволяют записать передаточную функцию как математическое выражение в стандартной форме записи. Эти элементы выполняют над входным сигналом действие, определяемое атрибутом EXPR, и выдают результат на выходные выводы. В управляемых источниках EXPR может содержать константы и параметры, такие, как напряжения, токи или время. Напряжения могут быть или напряжением в цепи, таким, как V (5), или напряжением между двумя цепями, такими, как V (4,5). Токи должны быть током через источник напряжения (Устройство, например, VSENSE). Наряду с арифметическими операторами, указанными в таблице 1, в выражениях могут использоваться и функции, указанные в таблице 2.

Элементы EVALUE и GVALUE определяются как элементы со следующими атрибутами (по умолчанию):

```
EVALUE EXPR V(%IN+, %IN-)
GVALUE EXPR V(%IN+, %IN-)
```

Источники управляются выражениями, которые могут содержать напряжения, токи или то и другое. Следующие примеры поясняют создание пользовательских элементов EVALUE и GVALUE.

Пример 4. Предположим, что вы хотите установить выходное напряжение элемента, равное 7 В, умноженное на десятичный логарифм напряжения между выводами %IN+ и %IN-. Вы могли бы использовать элемент EVALUE.

Параметры настройки атрибутов для этого элемента следующие:

$$EXPR = 7v * LOG10(V(%IN+,%IN-))$$

Элементы EMULT, GMULT, ESUM и GSUM



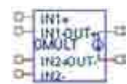
EMULT — перемножитель напряжений. Поведение этого устройства встроено в атрибут PSPICETEMPLATE следующим образом:

```
TEMPLATE=E^@REFDES %OUT+ %OUT- VALUE
{V(%IN1+,%IN1-)*V(%IN2+,%IN2-)}.
```

Если вы хотите, чтобы элемент EMULT выполнял операцию деления, то вы должны в шаблоне заменить оператор умножения (*) на оператор деления (/):

```
TEMPLATE=E^@REFDES %OUT+ %OUT- VALUE
{V(%IN1+,%IN1-)/IN2+,%IN2-}.
```

На выходе этого устройства — напряжение, равное отношению напряжений на входном выводе 1 и входном выводе 2. Если V (%IN2+, %IN2-) = 0, то выходные данные зависят от V(%IN1+, %IN1-) следующим образом: если V(%IN1+, %IN1-) > 0, выход = 0 если V(%IN1+, %IN1-) > 0, выход = MAXREAL если V(%IN1+, %IN1-) < 0, выход = -MAXREAL, где MAXREAL — внутренняя константа PSpice A/D, представляющая собой очень большое число (порядка 10³⁰).

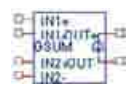


GMULT — перемножитель напряжений (источник тока).



ESUM — сумматор напряжений. Поведение этого устройства встроено в атрибут PSPICETEMPLATE следующим образом:

```
TEMPLATE=E^@REFDES %OUT+ %OUT-VALUE
{V(%IN1+,%IN1-)+V(%IN2+,%IN2-)}.
```



GSUM — сумматор напряжений (источник тока).

Полная передаточная функция всех этих элементов может также включать другие математические выражения, как это показано на примере элемента EMULT.

Элементы ETABLE и GTABLE



ETABLE и GTABLE используют передаточную функцию, описанную таблицей. Они очень удобны для моделирования устройств, характеристики которых определены экспериментально.

Поведение устройства GTABLE встроено в атрибут PSPICETEMPLATE следующим образом:

```
E^@REFDES %OUT+ %OUT-TABLE
{ @EXPR } \n+ ( @TABLE )
```

Поведение устройства GTABLE встроено в атрибут PSPICETEMPLATE следующим образом:

```
G^@REFDES %OUT+ %OUT-TABLE
{ @EXPR } \n+ ( @TABLE )
```

Элементы ETABLE и GTABLE определены как элементы со следующими атрибутами (по умолчанию):

```
ETABLE
TABLE (-15, -15), (15,15)
EXPR V(%IN+, %IN-)
GTABLE
```

TABLE (-15, -15), (15,15)
EXPR V(%IN+, %IN-)

EXPR — функция входных данных (тока или напряжения) и подчиняется тем же правилам, что и выражение VALUE.

Таблица состоит из пар чисел, первое из которых является значением входных данных, а второе — выходными данными. Между опорными точками выполняется линейная интерполяция.

Для значений EXPR вне области таблицы выходные данные устройства — константы со значениями, соответствующими наименьшему (или наибольшему) значению, записанному в таблице. Эта характеристика может использоваться для наложения на выходные данные верхнего и нижнего предела.

Пример 5. Реализуем с помощью таблицы GTABLE вольтамперную характеристику туннельного диода. Она может быть задана в виде: TABLE (0, 0) (.01, 1mA) (.02, 1.1mA) (.05, 2mA) (.06, 3mA) (.065, 3.2mA) (.8, 1.5mA) (1, 3mA) (1.5, 5mA)

Остальные атрибуты примем по умолчанию. Расчет осуществлялся по директиве .DC. Схема и результаты моделирования приведены на рис. 2. Для того чтобы получить плавную вольтамперную характеристику, необходимо в таблице задать большее количество опорных точек.

Модели элементов в частотной области (ELAPLACE, GLAPLACE, EFREQ и GFREQ)

Модели элементов в частотной области характеризуются выходными данными, которые зависят не только от текущего значения входного воздействия, но и от предыстории.

Например, выходные данные могут быть равны интегралу от входных данных за какое-то время. В процессе анализа в режиме AC частотная характеристика определяет комплексное усиление на каждой частоте. Во время анализа DC вычисляется усиление устройства на нулевой частоте. При анализе переходных процессов выходной сигнал — свертка входного воздействия и импульсной передаточной функции устройства.

Преобразование Лапласа (LAPLACE)



Элементы ELAPLACE и GLAPLACE



позволяют описать передаточную функцию преобразованием Лапласа. Для примера приведем шаблон элемента ELAPLACE:

```
E^@REFDES %OUT+ %OUT-LAPLACE
{ @EXPR } = { @XFORM }
```

Элементы ELAPLACE и GLAPLACE определяются как элементы со следующими атрибутами (по умолчанию):

```
ELAPLACE
EXPR V(%IN+, %IN-)
XFORM 1/s
GLAPLACE
EXPR V(%IN+, %IN-)
XFORM 1/s
```

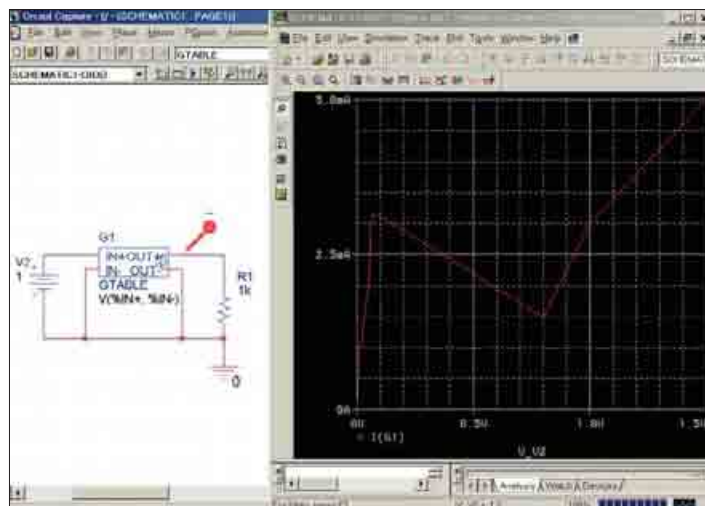


Рис. 2. Использование таблицы GTABLE для моделирования вольт-амперной характеристики туннельного диода и результаты расчета

Преобразованные входные данные — значение EXPR, где EXPR подчиняется тем же правилам, что и выражения VALUE (см. элементы EVALUE и GVALUE, описанные выше). XFORM — выражение для переменной Лапласа (s). Отсюда следуют правила для стандартных выражений, как это описано для выражений VALUE, с добавлением переменной s.

Выходная реакция устройства зависит от вида анализа. Для режима DC выходные данные — это просто усиление на нулевой частоте, умноженное на значение EXPR. Усиление на нулевой частоте — значение XFORM при s = 0. Для анализа AC EXPR линейризуется вокруг рабочей точки (так же, как у элементов VALUE). Тогда выходные данные — это входное воздействие, умноженное на усиление EXPR и умноженное на значение XFORM. Значение XFORM на частоте рассчитывается при подстановке jω вместо s, где ω = 2πf. При анализе переходных процессов значение EXPR оценивается каждый раз в точке на оси времени. Тогда выходные данные являются сверткой предыдущих значений EXPR с импульсной передаточной функцией XFORM. Из этих правил следует стандартный метод использования преобразования. Напряжения, токи и время не могут фигурировать в преобразовании Лапласа.

Входные данные преобразования Лапласа — это напряжение между входными выводами, то есть V(%IN+, %IN-). Атрибут EXPR может быть отредактирован включением константы или функций (табл. 2).

Пример 6. Зададим с помощью элемента ELAPLASE полосовой фильтр Баттерворта с нижней граничной частотой 15 Гц и верхней граничной частотой 30 Гц, передаточная функция которого в области S получена с помощью программы SystemView [1] и имеет вид:

$$\frac{35,5058e+3 + 266,573S + 5S^2 + 15,00527e-3S^3 + 112,5791e-6S^4}{S^2}$$

Используя редактор элементов, вы можете определить XFORM и атрибуты EXPR следующим образом:

$$\begin{aligned} XFORM &= (PWR(S, 2))/(35505.8 + 266.573*S+5*PWR(S, 2) \\ &+ .01500527*PWR(S, 3)+.0001125791*PWR(S, 4)) \\ EXPR &= V(%IN+, %IN-) \end{aligned}$$

Расчет осуществлялся по директиве .TRAN. Схема и полученные в результате расчета АЧХ и ФЧХ фильтра приведены на рис. 3.

Таблицы частотных характеристик (EFREQ и GFREQ)

Элементы EFREQ и GFREQ описываются таблицей частотных характеристик в одной из двух областей: амплитуда/фаза или в области комплексных чисел. Полная таблица считывается и преобразовывается в амплитуду в дБ и фазу в градусах. Между опорными точками выполняется линейная интерполяция.

Фаза интерполируется линейно; амплитуда интерполируется логарифмически. Для частот вне диапазона таблицы амплитуда равна нулю. Максимальное количество точек 2048.

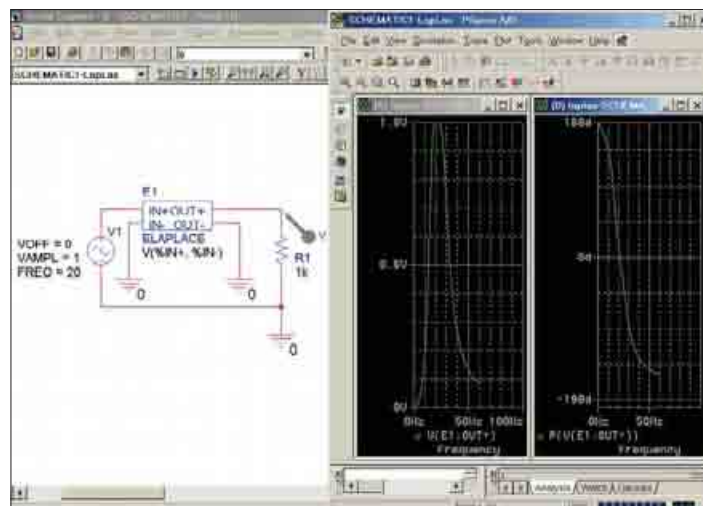


Рис. 3. Схема фильтра Баттерворта, заданная с помощью элемента ELAPLASE, и результаты расчета

Атрибуты EFREQ и GFREQ определяются следующим образом: EXPR — функция входных данных и подчиняется тем же правилам, что и выражение VALUE — по умолчанию V(%IN+, %IN-).

TABLE — та или иная последовательность из трех параметров — «входная частота, амплитуда, фаза» или «входная частота, действительная часть, мнимая часть» — описывает комплексную величину; значения по умолчанию (0, 0, 0) (1Meg, -10,90).

DELAY — приращение группового времени задержки; значение по умолчанию — 0.

R_I — тип таблицы; по умолчанию частотная таблица интерпретируется в формате «входная частота, амплитуда, фаза»; если она определена словом YES, то интерпретируется в формате «входная частота, действительная часть, мнимая часть».

MAGUNITS — единицы измерения для амплитуды, где значение может быть в децибелах (DB) или в абсолютных единицах (MAG); размерность по умолчанию — децибелы.

PHASEUNITS — единицы измерения для фазы, где значение может быть в градусах (DEG) или радианах (RAD); размерность по умолчанию — DEG.

Ключевое слово DELAY задает дополнительную задержку, которая принимается во внимание при расчете фазовой характеристики фильтра.

Выходные данные устройства зависят от проведенного анализа. Для режима DC и расчета режимов по постоянному току выходные данные — просто величина амплитуды при нулевой частоте, умноженная на значение EXPR. При AC-анализе EXPR линейризовано вокруг рабочей точки (подобно элементам EVALUE и GVALUE). Тогда выходные данные для каждой частоты — это входное воздействие, умноженное на усиление EXPR и на значение XFORM. При анализе переходных процессов значение EXPR вычисляется в каждый момент времени. Тогда выходные данные — свертка предыдущих значений EXPR с импульсной передаточной функцией частотной характеристики.

Пример 7. Рассмотрим устройство EFREQ, используемое как фильтр низких частот. Зададим с помощью таблицы фильтр нижних частот с коэффициентом передачи 1 (0 дБ) для частот ниже 5 кГц и коэффициентом передачи 0,001 (-60 дБ) для частот больших, чем 6 кГц.

Этот элемент определяется следующими атрибутами:
TABLE = (0, 0, 0) (5kHz, 0, -5760) (6kHz, -60, -6912)
DELAY =

R_I =
MAGUNITS =
PHASEUNITS =

Расчет осуществлялся по директиве .AC. Схема и рассчитанные АЧХ и ФЧХ фильтра, заданного таблицей EFREQ, приведены на рис. 4.

Так как R_I, MAGUNITS и PHASEUNITS не определены, все данные таблицы интерпретируются как содержащие частоту, значение амплитуды в дБ и значение фазы в градусах. Значение задержки по умолчанию равно 0.

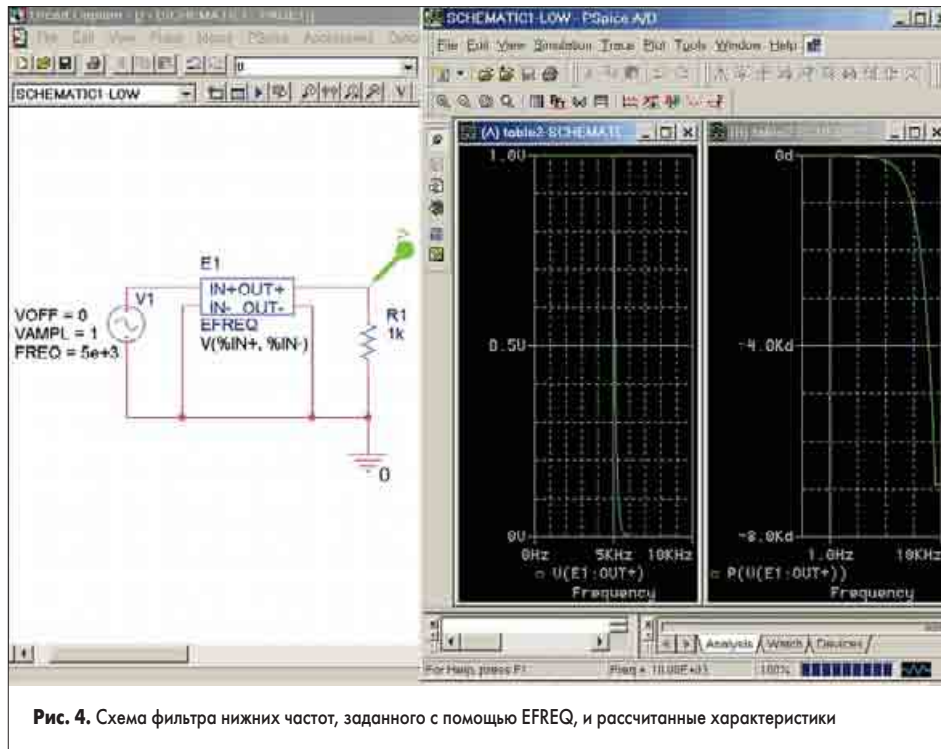


Рис. 4. Схема фильтра нижних частот, заданного с помощью EFREQ, и рассчитанные характеристики

Сдвиг фазы линейно зависит от частоты, что означает, что эта таблица обеспечивает постоянное групповое время задержки.

Постоянное групповое время задержки рассчитывается по следующей формуле:

Групповая задержка = фаза/360/частота

Для этого примера групповое время задержки — 3,2 мс ($6912/360/6$ кГц = $5760/360/5$ кГц = 3,2 мс). Альтернативные технические требования для этой таблицы могли быть:

TABLE = (0, 0, 0) (5kHz, 0, 0) (6kHz, -60, 0)

DELAY = 3,2ms

R_I =

MAGUNITS =

PHASEUNITS =

Литература

1. Разевиг В. Д., Лаврентьев Г. В., Златин И. Л. SystemView — средство системного проектирования радиоэлектронных устройств/ Под ред. В. Д. Разевига. М.: Горячая линия-Телеком, 2002.
2. Разевиг В. Д. Система проектирования OrCAD 9.2. М.: Солон-Р, 2001.