

Altium Designer – схемотехническое моделирование и типы моделей

Алексей Сабунин (Москва)

В процессе разработки радиоэлектронных устройств важное место занимает схемотехническое моделирование. Большая часть систем, в которых решается данная задача, работает на основе SPICE; не исключением является и модуль *Mixed SIM* в пакете Altium Designer. В данной статье описаны основные этапы и виды моделирования схемы в Altium Designer, а также самый сложный этап моделирования – создание моделей.

Программы-симуляторы стали незаменимыми помощниками разработчиков электронных устройств. С появлением компьютеров появилась возможность обрабатывать большие массивы данных и рассчитывать сложные формулы, которые описывают процессы, протекающие в схеме устройства. В настоящее время существует целый ряд моделирующих программ, и практически все они созданы на основе SPICE, которая была разработана в университете Беркли. Программа PSpice считается образцом схемотехнического моделирования и используется разработчиками всего мира чаще, чем все остальные программы вместе взятые. Модуль *Mixed SIM* комплексной системы Altium Designer является полнофункциональным аналогом пакета PSpice.

При моделировании аналоговых устройств в Altium Designer использу-

ются алгоритмы SPICE 3f5; при моделировании цифровых устройств используется алгоритм XSPICE с описанием моделей цифровых элементов на языке Digital SimCode. Применяемые в пакете усовершенствованные алгоритмы моделирования семейства SPICE, положительно зарекомендовавшего себя в мировой практике на протяжении последних 20 лет, позволяют проводить расчёт широкого класса цифровых, аналоговых и цифро-аналоговых электрических схем и обеспечивают хорошую сходимость итерационных процессов при моделировании без дополнительной настройки.

Принципиальная схема моделируемого устройства создаётся с помощью схемного редактора Altium Designer. При выборе режима моделирования, данные о принципиальной схеме (в виде списка соединений) автомати-

чески передаются в модуль *Mixed SIM* для составления задания на моделирование, собственно моделирования и просмотра его результатов. Основной проблемой при моделировании является разработка моделей радиоэлементов, особенно отечественных, поскольку точность построения модели определяет адекватность моделирования.

Достаточно подробные рекомендации по разработке и использованию моделей приведены в электронной документации, входящей в состав Altium Designer (TR0113 Simulation Models and Analyses Reference.PDF, AP0141 SPICE Model Creation from User Data.PDF, AP0139 Creating and Linking a Digital SimCode Model.PDF, TR0117 Digital SimCode Reference.PDF).

ЭТАПЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ В СИСТЕМЕ ALTIUM DESIGNER

Несмотря на то что практически все программы моделирования имеют примерно одинаковый набор настроек и обязательных действий для симуляции, Altium Designer имеет некоторые характерные особенности.

Шаг 1 – создание проекта. Кроме создания листа схемы, программа требует обязательного наличия файла проекта. Создадим новый проект командой *File > New > Project > PCB Project* и новый лист схемы *File > New > Schematic*. Кроме схемы, в структуру проекта рекомендуется добавить все библиотеки и модели, которые будут использованы при создании схемы (если не используются интегрированные библиотеки).

Шаг 2 – разработка схемы. На созданном листе схемы размещаются компоненты и рисуются линии связей. В рассматриваемом примере последовательно разместим резистор и конденсатор (см. рис. 1), взятые из стандартной библиотеки *Miscellaneous Devices.IntLib*, которая по умолчанию подключена к системе. Линии связей размещаются командой *Place > Wire*.

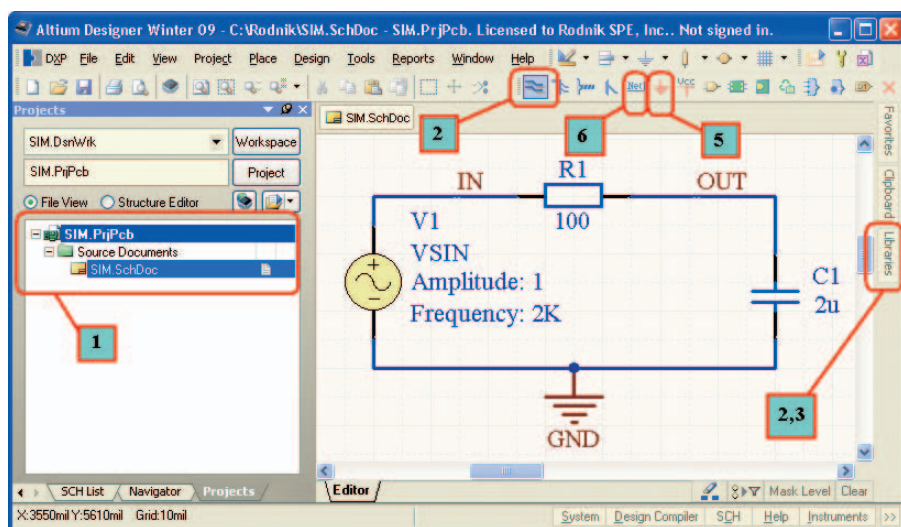


Рис. 1. Пример проекта для моделирования

Шаг 3 – размещение источников сигналов. Все источники сигналов и питания, которые могут быть использованы при моделировании схем, расположены в библиотеках, находящихся в папке *...Library\Simulation* в директории установки программы Altium. В нашем случае следует подключить библиотеку *Simulation Sources.IntLib*, для чего на вкладке *DXP > Preferences > System > Installed Libraries* нажимаем кнопку *Install* и выбираем указанную библиотеку. Установка источников сигналов ничем не отличается от размещения обычных компонентов.

Шаг 4 – установка параметров компонентов схемы. В рассматриваемом примере в качестве источника сигнала выступает компонент VSIN, который расположен в подключенной библиотеке *Simulation Sources.IntLib* и представляет собой источник синусоидального сигнала. После установки источника выполняем на нём двойной щелчок мыши и в поле *Models* нажимаем кнопку *Edit* (см. рис. 2). Здесь на вкладке *Parameters* указываем параметры источника (амплитуду и частоту сигнала). Аналогично, в свойствах резистора и конденсатора задаём параметры номинального сопротивления и ёмкости. Подробно все параметры компонентов и источников описаны в [1, 2].

Шаг 5 – описание цепи GND. Все процессы моделирования выполняют расчёты относительно некоторого нулевого уровня, в качестве которого в Altium Designer по умолчанию принята цепь GND. В нашем случае поместим знак цепи заземления на нижний вывод источника командой *Place > Power Port*.

Шаг 6 – именование цепей. Все цепи, с узлов которых будут сниматься характеристики для анализа, следует поименовать командой *Place > Net Label*. В данном случае на первый вывод резистора устанавливаем метку *IN* (вход), на второй – *OUT* (выход).

Шаг 7 – установка параметров анализа. Для моделирования используется специальная панель *Mixed Sim*, которая в Altium Designer по умолчанию скрыта. Чтобы отобразить эту панель в рабочей области, необходимо нажать правой кнопкой мыши на любой панели инструментов и в выпадающем списке указать нужную панель (см. рис. 3).

В появившейся панели имеются три кнопки:

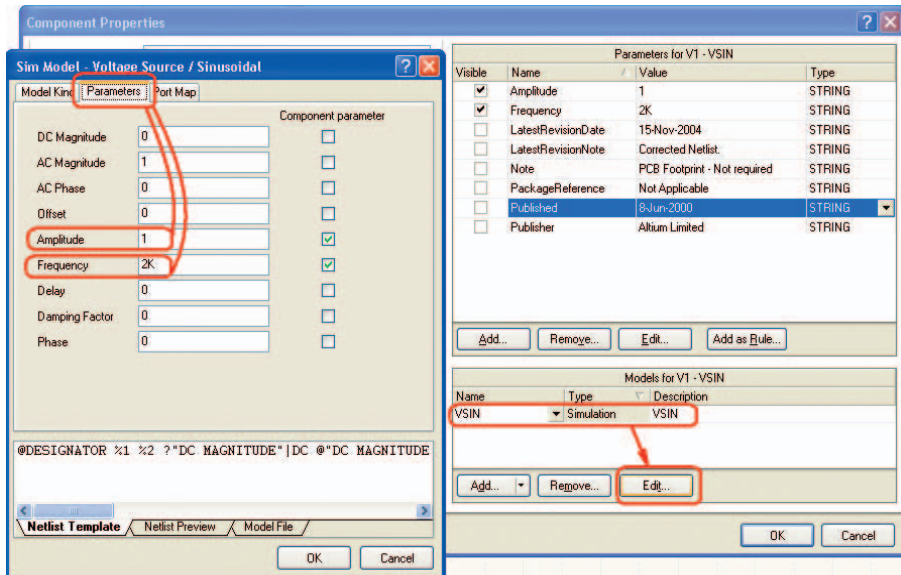


Рис. 2. Установка параметров сигналов

- *Run Mixed Signal Simulation* – запуск процесса моделирования (клавиша F9);
- *Setup Mixed-Signal Simulation* – настройки моделирования;
- *Generate XSpice Netlist* – формирование общей модели схемы (с проверкой).

Начальным этапом проектирования является процесс составления задания на моделирование, для чего нажатием кнопки *Setup Mixed-Signal Simulation* на экран выводится диалоговое окно *Analyses Setup* (см. рис. 4); в нём задаются необходимые виды анализа и выбираются схемные переменные (напряжения в узлах схемы, токи в цепях схемы, комплексные сопротивления, рассеиваемые мощности на элементах схемы) для их сохранения в файле результатов и графического отображения. Виды и параметры анализа указаны в таблице 1.

На вкладке *General Setup* необходимо указать названия цепей, с которых необходимо получить сигналы, и в поле *SimView Setup* выбрать вариант *Show Active Signal*. В поле *Available Signals* приводится перечень сигналов, графики которых строятся по результатам моделирования. Из одного поля в другое все сигналы переносятся нажатием клавиш «>>>» и «<<<». Выбранные правой кнопкой мыши сигналы переносятся нажатием кнопок «>>» и «<<». Позже, при необходимости, состав выводимых графиков можно изменить.

Дополнительные обозначения в поле *Available Signals*:

- #branch – ток через источник напряжения;

- [i] – ток через двухполюсный компонент;
- [p] – рассеиваемая мощность;
- [z] – модуль комплексного сопротивления (равного отношению э.д.с. сигнала к току через источник сигнала);
- [ib] – ток базы транзистора;
- [ic] – ток коллектора транзистора;
- [ie] – ток эмиттера транзистора.

Остальные настройки здесь следует оставить по умолчанию. Далее в списке *Analyses/Options* выбираем вид анализа *Transient Analysis* (анализ переходных процессов). После выбора вида анализа в правой части окна *Analyses Setup* необходимо указать настройки выбранного вида анализа (см. рис. 4). Здесь по умолчанию включен параметр *Use Transient Defaults*, который предлагает использовать временной интервал в виде конечного числа полных периодов входного сигнала. В данном случае количество циклов равно 5 (*Default Cycles Displayed*), и в каждом периоде для расчёта используются данные в 50 точках (*Default Points Per Cycle*). При необходимости можно выключить параметр *Use Transient Defaults* и задать временной интервал моделирования с помощью параметров *Start, Stop, Step Time* (время начала, окончания и шага моделирования).

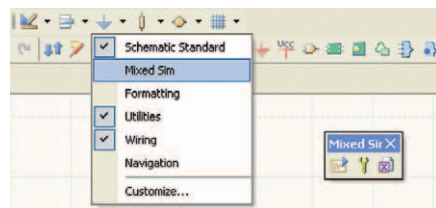


Рис. 3. Добавление панели Mixed Sim

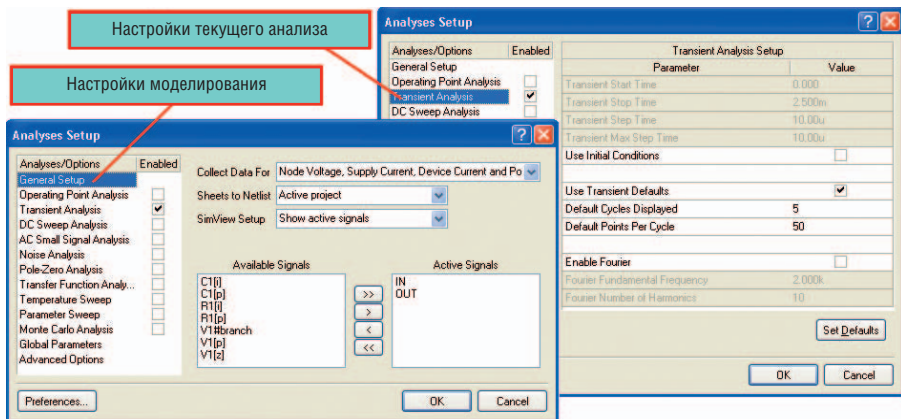


Рис. 4. Настройки моделирования

Шаг 8 – запуск моделирования. После установки параметров нажимаем кнопку *Run Mixed Signal Simulation* в ранее открытой панели инструментов. В итоге на экране будут показаны два графика, отображающие сигналы в указанных узлах. Результаты моделирования в системе Altium Designer сохраняются в отдельный файл с расширением *.SDF, в нижней части которого показаны вкладки выполненных видов моделирования.

Виды моделей в ALTUM DESIGNER

Не останавливаясь на методах обработки и интерпретации результатов моделирования (см. ниже), вернёмся на начальный этап – создание схемы. Чтобы перейти к схеме от результатов моделирования, необходимо выбрать схему в списке документов в структуре панели *Project* или выбрать соответствующую вкладку в верхней части интерфейса. При создании схемы в нашем случае были использованы компоненты, на которые имелись модели в формате SPICE (см. рис. 5). Что делать, когда такой модели нет?

Встроенные модели. Для моделирования можно использовать модели, со-

держатся во внутреннем аппарате симулятора, внутри интегрированных библиотек Altium Designer, а также пользовательские модели компонентов. Рассмотрим назначение моделей разного типа и особенности их использования.

Самыми простыми в использовании являются модели, встроенные в SPICE, параметры которых задаются через интерфейс программы. Для использования таких моделей необходимо указать, к какой функциональной группе относится данный компонент, и задать параметры, характерные для компонентов данной группы. В рассматриваемом примере, чтобы указать для резистора встроенную модель, необходимо зайти в окно свойств модели (как было показано в описании источника сигнала и на рисунке 2), которое содержит три вкладки (см. рис. 6):

- *Model Kind* – описание модели; здесь указывается одна из встроенных моделей либо дается ссылка на пользовательскую модель;
- *Parameters* – параметры, которые задаются только для встроенных моделей;
- *Port Map* – установка соответствия номеров выводов на символе и на-

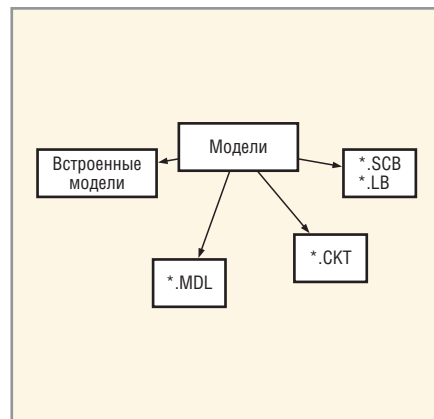


Рис. 5. Виды моделей SPICE

званий выводов в тексте модели; задаётся в основном для пользовательских моделей.

Чтобы установить пользовательскую модель, необходимо сначала указать тип модели в строке *Model Kind*, затем из следующего списка выбрать конкретную модель. В строке *Spice Prefix* появляется буквенное обозначение модели (см. таблицу 2), которое определяет набор характерных параметров. Часть параметров этих моделей доступны на вкладке *Parameters*, другие имеют стандартные значения, которые во встроенной модели изменять нельзя! Описание всех встроенных моделей и параметров приведено в документе TR0113. Так, для резистора, в результате поиска по документу TR0113 фразы «prefix R» будет найдено описание параметров, где показаны сопротивление (*Value*), длина, ширина и температура, а в дополнительных параметрах – линейный температурный коэффициент (*TC1*) и др.

Если выбрать встроенную модель, то при анализе можно изменять лишь открытые параметры. При использовании пользовательских моделей возникает необходимость более гибко варьировать параметры модели.

*Формат *.MDL.* Для создания пользовательских моделей компонентов, которые имеются среди встроенных моделей, используется формат *.MDL, основанный на директиве «MODEL» языка SPICE. Например, для используемого резистора опишем его температурную зависимость, которая во встроенной модели по умолчанию имеет значение, равное нулю, т.е. сопротивление резистора не зависит от температуры.

Для создания пользовательской температурно-зависимой модели резистора выполним *File > New > Mixed-Signal Simulation > AdvancedSim Model*. Про-

Таблица 1. Виды анализа в системе Altium Designer

Вид анализа	Описание
Operating Point Analysis	Расчёт режима работы по постоянному току (расчёт «рабочей точки») при линеаризации моделей нелинейных компонентов
Transient/Fourier Analysis	Анализ переходных процессов и спектральный анализ
AC Small Signal Analysis	Частотный анализ в режиме малых сигналов (для нелинейных схем выполняется в линеаризованном режиме в окрестности рабочей точки по постоянному току)
DC Sweep Analysis	Расчёт режима по постоянному току при вариации одного или двух источников постоянного напряжения или тока
Noise Analysis	Расчёт спектральной плотности внутреннего шума
Transfer Function Analysis	Расчёт передаточных функций в режиме малых сигналов
Temperature Sweep	Режим изменения температуры
Parameter Sweep	Изменение параметров элементов
Monte Carlo Analysis	Статистический анализ по методу Монте-Карло

грамма создаст в структуре текущего проекта файл с расширением *.MDL, который следует сохранить под уникальным именем, соответствующим названию компонента. Далее с созданным файлом работа ведётся в режиме обычного текстового редактора, где набирается описание модели:

```
.MODEL RTEMP RES (TC1=0. 2
TC2=0.02) ,
```

где: .MODEL – директива описания данной модели; RTEMP – название пользовательской модели; может иметь произвольный набор символов, но для удобства должно совпадать с названием файла; RES – название встроенной модели, на которую ссылается пользовательская модель; (TC1=0.2 TC2=0.02) – описание параметров пользовательской модели.

При написании модели нельзя оставлять пробел перед директивой «.MODEL». Основная сложность при создании пользовательских моделей возникает из-за того, что заранее известны не все параметры. Чтобы узнать параметры конкретной модели, необходимо выполнить поиск её описания в файле справки TR0113 или просмотреть русскоязычные источники [2, 3].

Для использования модели в формате MDL её необходимо подключить к компоненту, причём целесообразно это делать на уровне библиотеки. О создании библиотек и подключении моделей было подробно рассказано в СЭ № 6, 2008. В нашем случае подключим модель непосредственно к компоненту на схеме. При подключении модели рекомендуется, чтобы она находилась в структуре того проекта, в котором находится схема или библиотека, в зависимости от того, где подключается модель. Причём, если модель будет подключена к интегрированной библиотеке, то после её компиляции она будет находиться в ней, как в архиве. При подключении модели в схеме, на неё будет дана только ссылка! В нашем случае в свойствах модели резистора (см. рис. 6) на вкладке Model Kind выбираем тип модели Resistor(Semiconductor), после чего становятся доступны настройки расположения модели:

- Any – любая модель из проекта и в подключенных библиотеках;
- In File – любой файл модели, находящийся в директории проекта;
- Full Path – любая модель на диске компьютера;

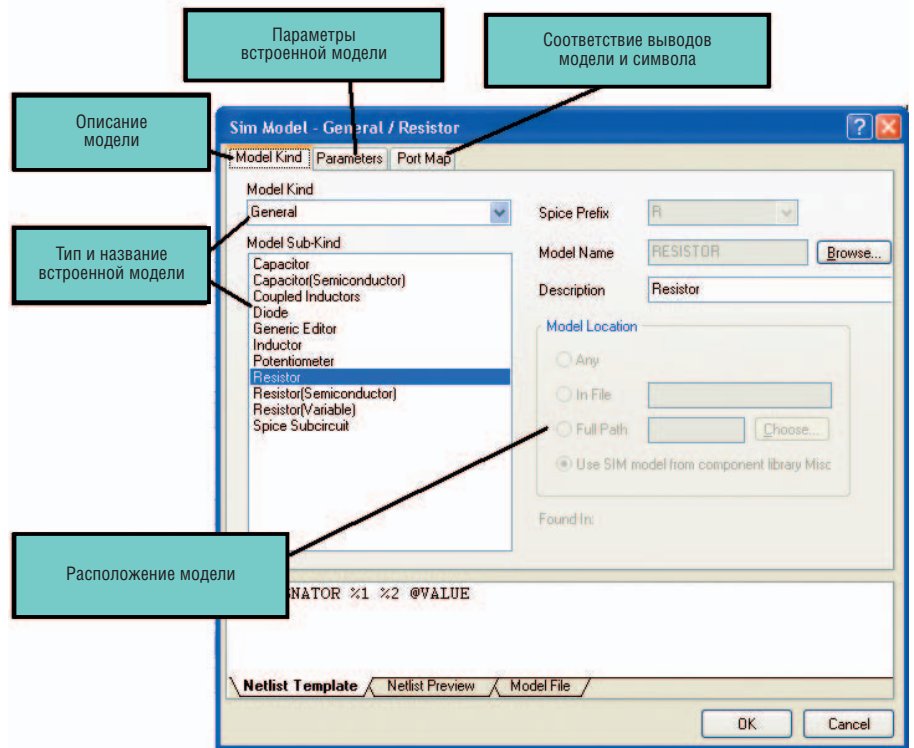


Рис. 6. Окно свойств модели

- Use SIM from... – модель из интегрированной библиотеки.
- Выбираем вариант Any, после чего при нажатии кнопки Browse будут доступны все модели в подключенных библиотеках и внутри проекта (см. рис. 7). В выпадающем списке Libraries выбираем созданную модель RTEMP и нажимаем кнопку OK во всех открытых окнах. Теперь проведём рассмотренный ранее анализ переходных процес-

сов при изменении температуры окружающей среды. Сначала зададим параметры анализа в окне Analyses Setup, которое вызывается кнопкой Setup Mixed-Signal Simulation. Здесь необходимо указать тип анализа Transient Analysis с параметрами, указанными на рисунке 4, и дополнительно выбрать Temperature Sweep (режим изменения температуры). Для выбранного режима устанавливаются параметры температурного

Таблица 2. Описание буквенных обозначений встроенных моделей

Spice Prefix	Описание компонента
B	Арсенид-галлиевый полевой транзистор с каналом n-типа
C	Конденсатор
D	Диод
E	Источник напряжения, управляемый напряжением
F	Источник тока, управляемый током
G	Источник тока, управляемый напряжением
H	Источник напряжения, управляемый током
I	Независимый источник тока
J	Полевой транзистор с управляющим p–n-переходом и каналом n-типа
J	Полевой транзистор с управляющим p–n-переходом и каналом p-типа
K	Магнитный сердечник трансформатора
L	Индуктивность
M	МОП-транзистор с каналом n-типа
M	МОП-транзистор с каналом p-типа
Q	Биполярный p–p–n-транзистор
Q	Биполярный p–n–p-транзистор
R	Резистор
T	Линия задержки
V	Независимый источник напряжения
S	Ключ, управляемый напряжением
W	Ключ, управляемый током
X	Макромодель

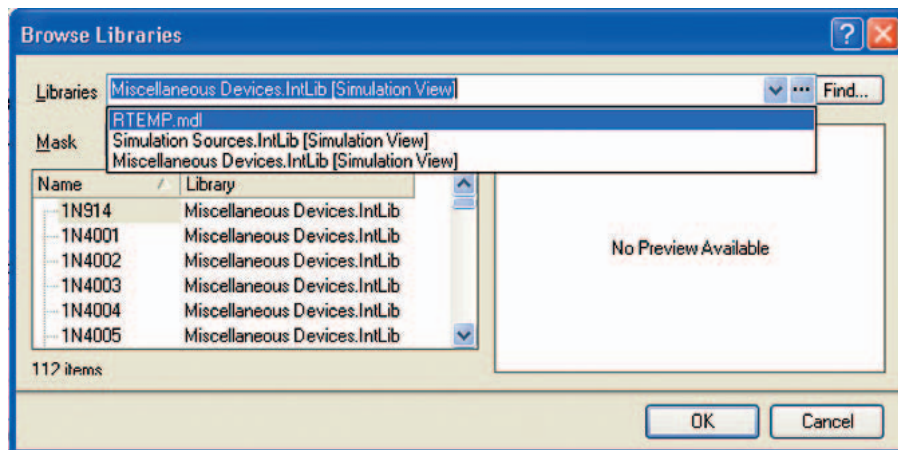


Рис. 7. Подключение пользовательской модели

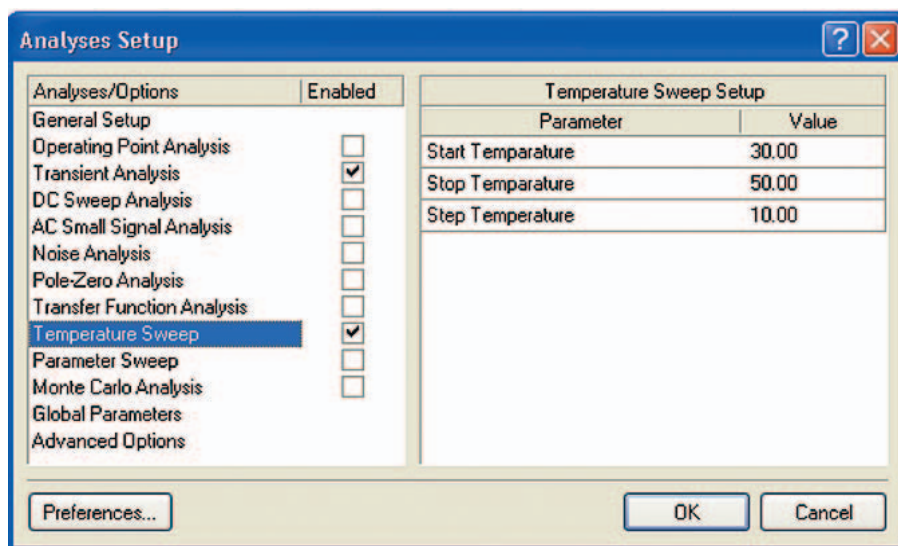


Рис. 8. Настройки режима изменения температуры

```
SIM
*SPICE Netlist generated by Advanced Sim server on 17.06.2009 11:19:55
*Schematic Netlist:
C1 0 OUT 2u
R1 IN OUT 100 RTEMP
V1 IN 0 DC 0 SIN(0 1 2K 0 0 0) AC 1 0
.SAVE 0 IN OUT V1#branch @V1[z] @C1[i] @R1[i] @C1[p] @R1[p] @V1[p]
*PLOT TRAN -1 1 A=IN A=OUT
.OPTION KeepLastSetup=False
*Selected Circuit Analyses:
.TRAN 1E-5 0.0025 0 1E-5
.CONTROL
SWEEP OPTION[TEMP] 30 50 10
.ENDC
*Models and Subcircuits:
.MODEL RTEMP RES (TC1=0.2 TC2=0.02)
.END
```

Рис. 9. Spice Netlist для задания на моделирование

диапазона в градусах Цельсия (см. рис. 8):

- Start Temperature = 30 – нижний предел изменения температуры;
- Stop Temperature = 50 – верхний предел изменения температуры;
- Step Temperature = 10 – шаг изменения температуры.

После запуска моделирования данной схемы на экран выводится не-

сколько графиков (в соответствии с заданными настройками), и на одном из графиков будут изображены сигналы при изменяющейся температуре с метками *OUT_t1*, *OUT_t2* и *OUT_t3*, которые показывают значения при заданных температурах.

При проведении любого вида анализа программа Altium Designer формирует отчетный файл (*Spice Netlist*) с

расширением *.nsx, который для рассматриваемого примера имеет вид, показанный на рисунке 9.

Здесь текстовые поля, начинающиеся со знака *!*, являются комментарием и не обрабатываются программой. Опишем назначение некоторых разделов данного файла:

- **Schematic Netlist*. Всю схему программа разбивает на простейшие элементы, которые перечислены в данном разделе. Для каждого элемента перечислены узлы, которые подключены к его выводам, а также параметры элемента и ссылка на модель. Например, строка «R1 IN OUT 100 RTEMP» говорит о том, что элемент R1 подключен к цепи IN первым выводом и к цепи OUT вторым выводом, сопротивление резистора равно 100 Ом и используется модель RTEMP;
- **Selected Circuit Analyses*. Здесь показаны выбранные виды анализа. В нашем случае метка .TRAN означает анализ переходных процессов, а метка .CONTROL задает температурный разброс;
- **Models and Subcircuits*. Список подключенных моделей в формате *.MDL и *.CKT.

Проведение моделирования возможно без наличия схемы (по списку соединений). Так, в упрощенном виде можно изменять параметры компонентов в текстовом файле *.nsx и командой *Simulate > Run* запускать процесс моделирования непосредственно из текстового редактора. Описанную эквивалентную схему в разделе **Schematic Netlist* можно сохранить в виде отдельного файла и использовать в дальнейшем как самостоятельное устройство в виде «черного ящика». Модель, созданная таким образом, является моделью второго уровня и имеет расширение *.CKT. Описание таких моделей и моделей цифровых микросхем будет рассмотрено в следующей статье цикла.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Сабунин А.Е.* Altium Designer. Новые решения в проектировании электронных устройств. Солон-Пресс, 2009.
2. *Разевиг В.Д.* Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7. Горячая линия – Телеком, 2003.
3. *Петраков О.М.* Создание аналоговых PSPICE-моделей радиоэлементов. РадиоСофт, 2004.

