

Министерство образования Российской Федерации  
Владимирский государственный университет

В.Р. АСЛАНЯНЦ

**ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ  
И СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

Практикум

Владимир 2003

УДК 621.396.6.001 (076.5)

A90

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой МИТ  
Санкт-Петербургского государственного электротехнического  
университета  
*И.Г. Мироненко*

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой  
автоматики и радиоэлектроники Ивановской государственной  
текстильной академии  
*А.К. Расторгуев*

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Владимирского государственного университета

**Асланянц В.Р.**

A90 Функциональное и схемотехническое моделирование электрон-  
ных средств: Практикум / Владим. гос. ун-т; Владимир, 2003. 76 с.  
ISBN

Рассмотрены особенности математических моделей электронных средств (ЭС) на системном, регистровом, логическом, схемотехническом и конструкторском уровнях проектирования ЭС. Описана структура САПР DesignLab и методы работы с ней. Подробно рассмотрен типовой маршрут подготовки и выполнения моделирования ЭС на функциональном и схемотехническом уровнях.

Содержит перечень заданий к лабораторным работам, курсовому проектированию и УИРС, список из 15 контрольных вопросов.

Предназначен для студентов специальностей 200800 и 220500 ("Проектирование и технология радиоэлектронных средств" и "Проектирование и технология электронно-вычислительных средств") дневного и вечернего отделений, выполняющих лабораторные работы по дисциплине «Информационные технологии проектирования РЭС» и УИРС на 3-м курсе, курсовое проектирование на старших курсах, а также для студентов, выполняющих дипломное проектирование с использованием САПР.

Ил. 1. Библиогр.: 15 назв.

УДК 621.396.6.001 (076.5)

ISBN

© Владимирский государственный  
университет, 2003

## **ВВЕДЕНИЕ**

Настоящий практикум предназначен для студентов специальностей «Проектирование и технология радиоэлектронных средств», «Конструирование и технология электронно-вычислительных средств», выполняющих цикл лабораторных работ по дисциплине «Информационные технологии проектирования ЭС», а также может быть использован в курсовом и дипломном проектировании. Основная цель практикума заключается в изучении методов, математических моделей и инструментальных средств проектирования ЭС на системном, регистровом, логическом, схематехническом и конструкторском уровнях; в освоении различных видов анализа, выполняемых при моделировании на этих уровнях, а также состава и функциональных характеристик САПР DesignLab, получении навыков работы с САПР DesignLab и с симулятором PSpice в частности. Лабораторные работы выполняются фронтальным методом, и предполагается, что студенты выполняют во время лабораторных работ небольшой проект и полученные навыки работы с САПР DesignLab применяют в курсовом и дипломном проектировании. В практикуме приведено краткое описание методики применения достаточно сложного инструмента, которым является САПР DesignLab, и предполагается, что дополнительную информацию студенты получают из литературы, на которую имеются ссылки.

## **1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

### **1.1. Процедуры и уровни проектирования ЭС**

Цель проектирования электронных средств (ЭС) - разработка описания объекта проектирования (технической документации), позволяющего изготовить ЭС. Процесс проектирования состоит в многократном применении проектных процедур, результатом работы каждой из которых является проектное решение, промежуточное или окончательное. Проектные процедуры образуют следующие классы [5]:

1. Структурный синтез – переход от поведенческого описания объекта к его структуре, т.е. связанной совокупности структурных примитивов

(элементов), например электрической схеме ЭС. При этом отыскивается оптимальная в некотором смысле структура, например, оптимальная топология печатной платы.

2. Анализ – исследование свойств описания объекта. Выполняется чаще всего средствами моделирования.

3. Параметрическая оптимизация – определение наилучших значений внешних параметров объекта (например, быстродействия) путем варьирования внутренних параметров элементов структуры (например, параметров логических элементов или электрорадиоэлементов) без изменения структуры.

Обычный шаг процесса проектирования – это структурный синтез некоторого описания объекта с последующим его анализом (и, возможно, параметрической оптимизацией). Сначала для объекта формируется функциональное описание (внешнее описание на основе концепции «черного ящика»). Затем путем декомпозиции это описание преобразуется в систему связанных структурных элементов (например, электрическую схему).

В процессе проектирования после применения очередной проектной процедуры структурного синтеза увеличивается степень детализации описания объекта. Преобразования описания объекта проектирования несут не только количественный, но и качественный характер, что приводит к образованию следующих уровней абстрагирования для описания цифровых ЭС [5, 11]: системный, регистровый, логический (вентильный), схемотехнический, конструкторский аппаратный уровень и конструкторский микроуровень (вентильный).

Основной признак, по которому отличаются уровни друг от друга, – это базовые структурные примитивы каждого уровня. Подробнее этот вопрос будет рассмотрен в п.п. 1.4 – 1.7.

На каждом уровне описание объекта проектирования может быть поведенческим и структурным. Каждый уровень можно охарактеризовать исходными данными и результатами проектирования, а также разновидностями применяемых проектных процедур.

В исходные данные входят поведенческая модель ЭС, критерии качества и ограничения. Электронное средство по существу – преобразователь информации. Поведенческая модель описывается входными  $X$ ,  $Y$  и выходным  $Z$  потоками и оператором преобразования  $F$ :

$$Y=F(X, Z), \quad (1.1)$$

где  $X$  – входной поток (входные воздействия), несущий «полезную» информацию;

$Z$  – входной поток, представляющий собой воздействия внешней среды.

Оператор преобразования  $F$  может быть явно не задан, а поведение объекта может описываться возможными ситуациями и реакцией объекта на них (например, таблицей истинности). Иногда удается получить явное описание оператора  $F$  (например, логические уравнения).

Результаты проектирования на каждом уровне включают документы, содержащие описание структуры объекта проектирования (например, функциональную схему) и параметры базовых структурных примитивов этого уровня (например, временные параметры логических элементов).

Применяемые проектные процедуры на каждом уровне различаются математическими моделями, алгоритмами и языками моделирования.

## 1.2. Математические модели и критерии их оценки

Моделирование – это метод опосредованного познания объекта исследования. При моделировании исследуемый объект замещается его моделью, связанной соотношениями подобия с исходным объектом, при этом реальный объект упрощается, схематизируется.

Обычно используются математические модели (ММ), представляющие собой совокупность математических объектов (чисел, переменных, векторов, матриц, графов, списков, множеств и др.) и связывающих их отношений:

$$Y = F(X, Z, V, t). \quad (1.2)$$

Выражение (1.2) – расширенный вариант (1.1), включающий  $V$  – внутренние параметры ЭС (например, параметры электрорадиоэлементов) и время (если это динамическая модель).

В процессе моделирования определяются или оптимизируются внешние параметры  $W$  объекта проектирования (такие как время задержки логического сигнала, коэффициент усиления, объем ЭС и др.).

Математические модели оцениваются следующими критериями качества:

1. Адекватность – отражение свойств объекта с заданной точностью. Под точностью понимается степень совпадения выходных параметров  $W$  и модели объекта. Относительная погрешность  $j$ -го параметра определяется выражением:

$$\varepsilon_j = |w_j - \bar{w}_j| / w_j,$$

где  $\bar{w}_j$  – значение параметра, рассчитанное с помощью ММ;

$w_j$  - значение параметра, полученное на реальном объекте.

Погрешность модели по совокупности выходных параметров рассчитывается одной из норм вектора  $W=(w_1, w_2, \dots, w_n)$ :

$$\varepsilon_M = \max_{j=1,2,\dots,m} |\varepsilon_j| \quad \text{или} \quad \varepsilon_M = \sqrt{\sum_{j=1}^n \varepsilon_j^2}$$

Если задаться предельно допустимой погрешностью  $\varepsilon_{\text{пред}}$ , то можно выделить область адекватности, где выполняется  $\varepsilon_M < \varepsilon_{\text{пред}}$ . Область адекватности часто трудно определить из-за ее сложной формы. Поэтому применяют простые аппроксимации, обычно гиперпараллелепипед путем задания двухсторонних неравенств

$$w'_j \leq w_j \leq w''_j.$$

Пусть например вектор  $\overline{W}$  содержит выходные параметры логического элемента:  $\overline{W}(E, t_{\phi}, K_p)$ , где

$E$  - напряжение питания;

$t_{\phi}$  - длительность фронта входного сигнала;

$K_p$  - коэффициент разветвления.

Тогда область адекватности может быть задана параллелепипедом:

$$4,47 \leq E \leq 5,28$$

$$3,89 \text{ нс} \leq t_{\phi} \leq 11,2 \text{ нс}$$

$$0 \leq K_p \leq 3.$$

Для оценки адекватности применяют специальные тестовые задачи.

2. Экономичность ММ определяется затратами вычислительных ресурсов (время, память). При этом следует различать:

- экономичность модели: затраты времени при однократном обращении к ММ (время анализа);

- экономичность алгоритма решения задачи: затраты времени, характеризующие алгоритм, который многократно обращается к ММ. Поэтому в алгоритмах синтеза, где происходит многократное обращение к ММ, используются простые и быстрые модели [8].

3. Степень универсальности определяет широту класса объектов, к которым применима модель. Этот критерий обычно не имеет количественной оценки, поэтому при создании ММ четко указывают границы ее применимости.

Противоречивость описанных критериев указывает на две опасности, подстерегающие разработчика ММ: опасность переусложнения, т.е.

возможность увязнуть в подробностях, и опасность преупрощения, т.е. возможность слишком огрубить модель.

### 1.3. Классификация и методы получения ММ

На разных уровнях проектирования ЭС используются различные ММ [5]. ММ могут быть линейными и нелинейными, детерминированными и стохастическими, статическими и динамическими, дискретными и непрерывными, структурными и поведенческими. Структурные ММ определяются моделями структурных примитивов и способами соединения их в систему. Дискретизации может подвергаться время и (или) пространство [6].

По форме представления ММ могут быть следующими:

- Аналитическими: уравнения, формулы (обычно явные зависимости).
- Схемными (графическими): графы, чертежи, схемы и т.д.
- Алгоритмическими. Частный случай алгоритмической модели - имитационная модель, когда на компьютере имитируется поведение объекта при различных воздействиях.

Обобщенная схема моделирования состоит из следующих этапов [6]:

- Построение ММ.
- Разработка алгоритма моделирования, в котором обращение к ММ может быть однократным (задача анализа) или многократным (задачи структурного синтеза или параметрической оптимизации).
- Разработка компьютерной программы.
- Выполнение машинного эксперимента с моделью.
- Обработка результатов.

Построение ММ - в общем случае процедура неформализованная. Эффективность ММ зависит от таланта и опыта разработчика ПО.

Методы построения ММ делятся на теоретические и экспериментальные.

Теоретические методы основаны на изучении физических, технических, информационных закономерностей, определении сопутствующих этим закономерностям математических описаний.

Экспериментальные методы основаны на наблюдении и запоминании свойств объекта во время его эксплуатации (пассивный эксперимент) или проведении целенаправленных экспериментов (активный эксперимент).

На основании экспериментальных данных строится линейная или нелинейная (чаще всего квадратичная) ММ в виде полиномов, коэффициенты которых рассчитываются обычно по методу наименьших квадратов. Вопросом построения таких моделей занимается теория планирования экспериментов.

Нечеткий [10] алгоритм построения ММ состоит из следующих указаний:

1. Определить свойства объекта, которые должны быть учтены в ММ.
2. Собрать априорную информацию о свойствах объекта. Это могут быть справочные данные, результаты эксперимента или эксплуатации, известные ММ аналогичных объектов и др.

3. Выбрать или синтезировать структуру ММ: схему, уравнения, правила преобразования схемы в математические соотношения.

4. Определить числовые значения параметров ММ:

- путем использования специфических соотношений на основе собранных в указании 2 сведений;
- путем решения экстремальной задачи: варьируя параметры модели, добиться максимального приближения параметров модели и объекта;
- путем проведения экспериментов и обработки найденных результатов.

5. Тестировать ММ: подготовить тестовые задачи, оценить адекватность ММ. При неудовлетворительных результатах вернуться к указанию 3.

6. Представить ММ в форме, принятой в библиотеке моделей.

Построение ММ - это процесс формализации описания объекта проектирования. Однако существуют так называемые трудноформализуемые задачи, для решения которых применяют технологию экспертных систем (систем, основанных на знаниях) [10]. Машина вывода таких систем, работая над базой знаний, выполняет автоформализацию. Экспертные системы (экспертные САПР в частности) работают в режиме диалога и выступают в роли консультанта для разработчика.

#### **1.4. Моделирование ЭС на системном уровне**

Описание системного уровня проектирования здесь рассматривается применительно к цифровым ЭС. На этом уровне используются крупные структурные примитивы: процессоры, каналы, запоминающие устройства, шины, периферийные устройства [11].



В результате проектирования получают структурную электрическую схему - основной документ, описывающий структуру ЭС, а также параметры структурных примитивов.

Исходные данные для проектирования - внешнее описание поведения объекта, включающее параметры входного и выходного потоков внешних воздействий и оператор преобразования (обычно это алгоритм работы ЭС).

В зависимости от состава входных и выходных параметров различают две разновидности моделирования на системном уровне:

- моделирование с использованием потоков задач;
- моделирование с использованием потоков цифровых сигналов.

В случае моделирования с использованием потоков задач ставят целью определение таких параметров системы, как ее производительность или пропускная способность и др.

Структурные имитационные модели в этом случае строятся на основе сетей массового обслуживания, сетей Петри и *Pro*-сетей [5, 6]. Для анализа применяют событийный алгоритм. Для описания структуры объекта кроме структурных схем применяют языки моделирования, такие как GPSS.

В случае моделирования с использованием потоков цифровых сигналов применяют методы моделирования, приведенные в п. 1.5.

## **1.5. Моделирование ЭС на регистровом и логическом уровнях**

### **Моделирование цифровых ЭС**

Структурные примитивы логического уровня - это простейшие логические элементы (вентили), реализующие булевы функции И, ИЛИ, И-НЕ и т.д. и триггеры различных типов. Входные и выходные потоки внешних воздействий для этого уровня - двоичные сигналы (биты). Внешнее описание поведения объекта - таблица истинности или логические уравнения.

Цифровые примитивы регистрового уровня - более крупные элементы: регистры, счетчики, сумматоры, дешифраторы, мультиплексоры, цепи межрегистровых передач. Входные и выходные потоки внешних воздействий для этого уровня - машинные слова (двоичные векторы или числа другой системы счисления) определенной разрядности. Внешнее описание объекта - алгоритм его поведения.

Математические модели указанных двух уровней схожи, поэтому их

рассматривают вместе (иногда их объединяют в один функциональный уровень) и моделируют совместно, что позволяют современные средства моделирования.

В результате проектирования получают функциональную электрическую схему - основной документ, описывающий структуру ЭС, а также параметры структурных примитивов.

Двоичные сигналы представляют в дискретной форме как булевы (двухзначные) переменные. Но в ряде случаев применяют многозначную логику (3-, 5-, 9-значную) [5, 2]. Моделирование выполняется в дискретном времени.

Структурная ММ ЭС формируется путем объединения математических моделей элементов (ММЭ) в математическую модель схемы (ММС). ММЭ могут быть описаны таблицами истинности и состояний или конечным автоматом, но это может оказаться громоздким для сложных элементов. Чаще используют логические уравнения. ММС объединяет ММЭ в единую систему за счет отождествления входных и выходных переменных, т.е. именованим цепей передач. Временная задержка может быть задана как фиксированная или случайная величина для элемента или как функция нагрузочной характеристики элемента.

Модель схемы может быть синхронной и асинхронной. Синхронная модель применяется для проверки правильности функционирования ЭС, выявления рисков сбоя (статических и динамических). Асинхронная модель – более универсальная, но менее экономичная.

Логическое моделирование предполагает многократное решение логических уравнений [7]. Для решения логических уравнений применяются методы простой итерации, Зейделя, Зейделя с ранжированием и событийный.

Наиболее известные программные системы логического моделирования – PowerView фирмы ViewLogic, Quick-Sim фирмы Mentor Graphics. Для логического моделирования используется также система PSpice, изначально ориентированная на схемотехническое моделирование.

### **Моделирование аналоговых ЭС**

Для моделирования аналоговых функциональных схем существует два фундаментальных подхода.

1. Схемотехнический подход, основанный на технике макромоделирования (см. п. 2.5).

2. Функциональный подход, когда элементы функциональной схемы представляют собой некоторые функциональные преобразователи (ФП),

выполняющие усиление, фильтрацию, ограничение, кодирование, декодирование, задержку и др. Данный подход использует теорию автоматического управления. Базовые функциональные преобразователи объединяют в четыре класса [7]:

- генераторы сигналов;
- безинерционные элементы;
- линейные инерционные элементы;
- нелинейные инерционные элементы.

Имитационное моделирование ММС заключается в последовательном преобразовании сигнала каждым ФП с помощью алгоритмов, тип которых сильно зависит от класса ФП.

## 1.6. Моделирование ЭС на схемотехническом уровне

Структурные примитивы схемотехнического уровня – резисторы, конденсаторы, диоды, транзисторы и т.д., а также более крупные элементы, такие как интегральные микросхемы, описываемые как макромоделли. Входные и выходные потоки внешних воздействий для этого уровня – электрические сигналы, т.е. изменяющиеся во времени токи и напряжения, несущие полезную информацию, а также воздействия внешней среды (тепловые воздействия в первую очередь). Кроме того, при моделировании учитываются внутренние параметры ЭС (собственные шумы элементов, вариации их параметров). Внешнее описание объекта содержит также параметры оператора преобразования (схемных функций), например, переходной или частотной характеристик и др.

При моделировании исследуются процессы изменения физических переменных (токов и напряжений) в заданных точках схемы.

В результате проектирования получают электрическую принципиальную схему - основной документ, описывающий структуру ЭС, а также параметры структурных примитивов.

В качестве базовых компонентов, из которых строятся ММЭ, применяют следующие:

- резистор  $R$ ;
- конденсатор  $C$ ;
- катушка индуктивности  $L$ ;
- различные виды управляемых источников;
- нелинейный двухполюсный резистивный элемент;

- нелинейные энергоемкие элементы ( $C, L$ ).

ММЭ более сложных элементов (транзисторов, диодов, ИС, распределенных структур и др.) представляются в виде сложных эквивалентных схем, например, модель Гуммеля-Пуна и модель Эберса-Молла для биполярного транзистора.

Интегральные микросхемы описываются как макромоделли (см. подраздел 4.2).

ММС строится путем объединения ММЭ на основе законов Кирхгофа. В большинстве программ схемотехнического моделирования используется базис узловых потенциалов, и в этом случае применяется первый закон Кирхгофа. Может быть использован также базис контурных токов или базис переменных состояния.

ММС может быть представлена системой нелинейных дифференциальных уравнений 1-го порядка (СНДУ). По исходному описанию схемы обычно уравнений не составляют, представляют исходные данные в виде векторов и матриц для реализованного в программах алгоритма решения.

Для решения СНДУ наибольшее применение нашли неявные методы численного интегрирования, когда производные заменяются их конечно-разностными аппроксимациями. В результате СНДУ преобразовывается в систему нелинейных алгебраических уравнений (СНАУ). Этот процесс называется алгебраизацией исходных уравнений.

Для решения СНАУ чаще всего применяется итерационный метод Ньютона, когда на каждой итерации решается система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ), обычно представляемых в методе узловых потенциалов в виде:

$$Y \times V = I,$$

где  $Y = dF / dX$  - матрица узловых проводимостей (Якобиан) схемы;

$V = X^{i+1} - X^i$  - вектор неизвестных узловых потенциалов;

$I = -F$  - вектор задающих токов;

$i$  - номер итерации.

Этот процесс называется линеаризацией СНАУ.

Таким образом для решения ММС в виде СНДУ необходимо на каждой временной точке решать СНАУ. В свою очередь, для решения СНАУ на каждой итерации метода Ньютона необходимо решать СЛАУ.

Три основные состояния модели схемы: СНДУ, СНАУ и СЛАУ являются основой трех базовых алгоритмов анализа (переходного, статического и линейного режимов) программ схемотехнического моделирования. На основе решения этих базовых задач можно вычислить параметры

импульсных сигналов (фронт, длительность, задержку), выполнить другие виды анализа: рассчитать спектр выходного сигнала, чувствительность схемы к изменению параметров ее элементов, решить задачи статистического анализа схемы, а также провести параметрическую оптимизацию схемы.

Наиболее известная программа схемотехнического моделирования, ориентированная на персональные компьютеры, - программа PSpice фирмы MicroSim. Программа PSpice включена в состав многих САПР ЭС, в том числе и в DesignLab, и работа с ней будет рассмотрена в данном практикуме.

### **1.7. Моделирование ЭС на конструкторском аппаратном уровне и конструкторском микроуровне**

Конструкторский микроуровень иногда называют кремниевым [11]. Структурные примитивы этого уровня - геометрические области материальной среды (полупроводника, диэлектрика, металла) и контакты между ними, выполняющие определенные функциональные преобразования. Входные и выходные потоки этого уровня – изменяющиеся во времени электрические (или другой физической природы) колебания, несущие информацию (т.е. сигналы), воздействия внешней среды (тепловые и механические воздействия, радиация и др.). При моделировании учитываются также внутренние параметры элементов: их геометрические размеры, параметры материальных сред (время жизни неосновных носителей, электропроводность и т.д.). Описание поведения объекта определено на предыдущем схемотехническом уровне.

В результате проектирования получают послойные чертежи и другую конструкторскую документацию, определяющую структуру ЭС.

На этом уровне применяют 2 класса структурных ММ: распределенные и ММ с сосредоточенными параметрами.

Распределенные ММ имеют форму дифференциальных уравнений (ДУЧП) в частных производных (уравнения непрерывности, переноса, Пуассона). Для решения этих уравнений применяют численные методы на основе метода конечных разностей и метода конечного элемента.

Сложность решения ДУЧП обуславливает применение менее точных ММ с сосредоточенными параметрами (макромоделей), когда структура моделируемого объекта представляется в виде эквивалентной электрической схемы, получаемой путем замены макромоделей отдельных участ-

ков материальной среды с заметными перепадами концентраций примесей, электрических потенциалов и др. В дальнейшем к полученной схеме применяют методы схемотехнического анализа.

Структурные примитивы конструкторского аппаратного уровня – электрорадиоэлементы, стандартные ИС и ПЛИС, коммутационные платы, соединители, элементы защиты от механических, тепловых и других воздействий, несущие конструкции и др.

Входные и выходные потоки этого уровня аналогичны потокам конструкторского микроуровня.

Основной результат проектирования – разработанная структура объекта, которую описывают сборочный чертеж и другие конструкторские документы. Описание непокупных структурных элементов представляется чертежами деталей.

Структурные ММ могут быть:

- с распределенными параметрами (ДУЧП) для анализа полей различной физической природы;
- с сосредоточенными параметрами (схемными).

Для решения распределенных задач применяют обычно моделирование на математических сетках [8].

На этом уровне существует большое разнообразие видов анализа: электрический, тепловой, виброударозащищенности, надежности, технологичности и др. Важнейший из них – электрический – носит название *SIA* – анализ целостности сигналов и рассмотрен ниже в разделе 5.

## **2. МОДЕЛИРОВАНИЕ АНАЛОГОВЫХ И ЦИФРОВЫХ ЭС в САПР DesignLab**

### **2.1. Основные и вспомогательные программы системы DesignLab**

#### **Состав и структура САПР DesignLab**

При выполнении проектных операций используются библиотеки, размещенные в файлах:

.lib – ММ компонентов. Создаются программой Parts;

.slb – схемные изображения (символы) компонентов. Создаются программой Schematics;

.plb – информация об упаковке компонентов. Создается программой Schematics;

.flb – конструктивные типы корпусов компонентов. Создаются программой PCBboards.

К САПР DesignLab прилагаются библиотеки примерно 40 тыс. компонентов (цифровых и аналого-цифровых ИС, транзисторов, диодов, стабилитронов, кварцевых резонаторов и др.) и 1000 корпусов компонентов производства фирм США, Западной Европы и Японии.

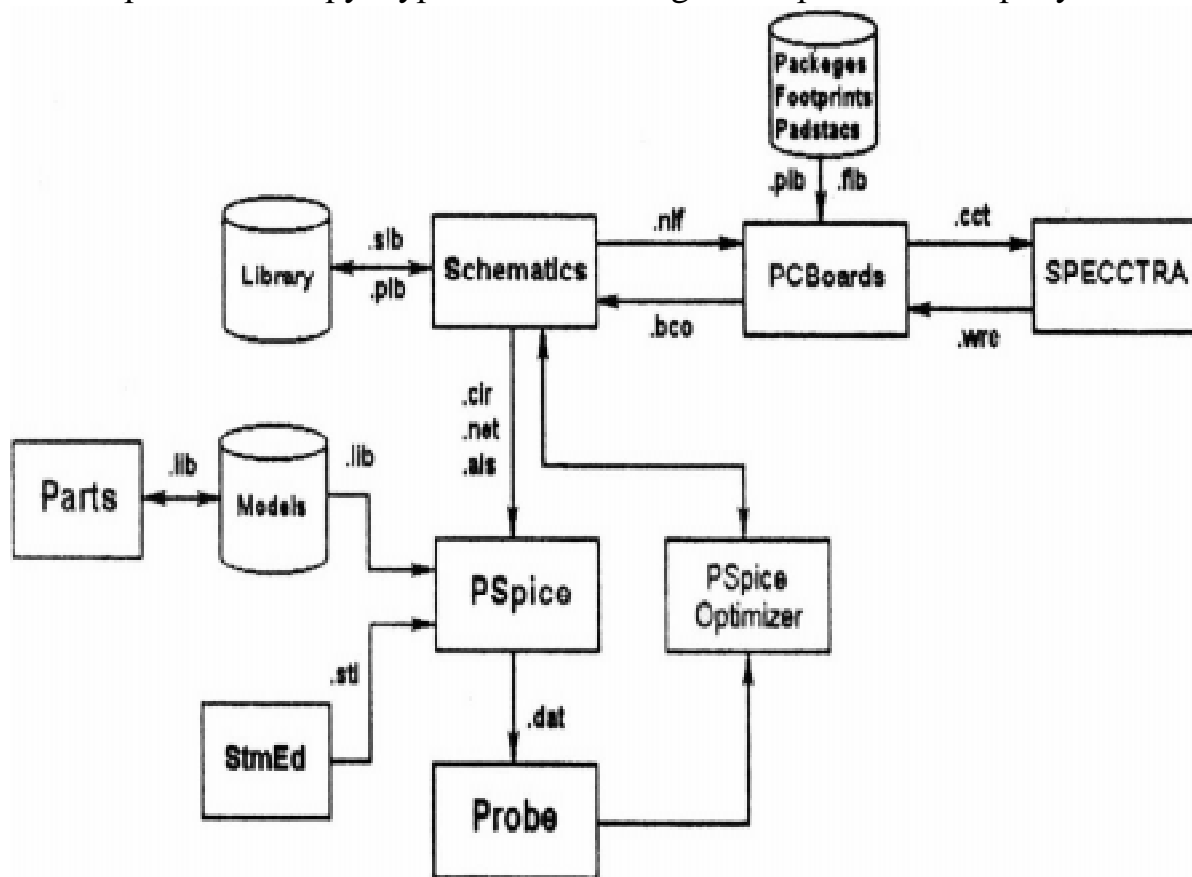
В состав DesignLab входят следующие программы:

- Design Manager – менеджер проектов;
- Schematics – графический редактор схем;
- PSpice A/D – моделирование аналоговых, цифровых и аналого-цифровых устройств;
- Plogic – моделирование цифровых устройств;
- StmEd – редактор входных сигналов (цифровых и аналоговых);
- Probe – графическое отображение, обработка и документирование результатов моделирования;
- Pspice Optimizer – параметрическая оптимизация аналого-цифровых устройств при наличии нелинейных ограничений;
- PCBboards и Autorouter – графический редактор печатных плат и автотрассировщик SPECSTRA фирмы “Cadence” ;
- Parts – идентификация параметров математических моделей (ММ) диодов, транзисторов и др. по их паспортным данным;
- Polaris – проверка целостности сигналов, то есть проведение моделирования с учетом паразитных емкостей и индуктивностей реальных печатных плат (ППл);
- Device Equations – исходный текст встроенных ММ полупроводниковых приборов на языке СИ. В них можно изменять имена параметров, вводить псевдонимы, добавлять параметры и модифицировать уравнения ММ. Можно также создавать модели новых встроенных компонентов, компилировать их и включать в состав системы моделирования в виде библиотечных файлов;
- PLSyn – синтез цифровых устройств на базе ПЛИС PLD/CPLD;
- MicroSim FPGA – интерфейс с программой XACT Step

6.0, предназначенной для проектирования ПЛИС фирмы “Xilinx”(XC2000, XC3000, XC4000, XC5200, X-FLEX);

- Filter Designer – синтез пассивных и активных аналоговых фильтров на переключаемых конденсаторах (только на платформе DOS).

Упрощенная структурная схема DesignLab приведена на рисунке.



Структурная схема системы DesignLab

Работа с системой обычно начинается с формирования принципиальной электрической схемы с помощью редактора схем Schematics, который одновременно является и управляющей оболочкой системы, из которой можно запускать основные модули. Возможен и автономный запуск модулей.

## 2.2. Менеджер проектов

При открытии любой программы системы DesignLab автоматически загружается менеджер проектов (Design Manager). Менеджер проектов



функционирует в фоновом режиме. Каждому проекту назначается определенный раздел (Workspace), в котором размещаются все относящиеся к нему файлы. Эти файлы располагаются в алфавитном порядке (By Name) или сгруппированы по категориям (By Category). Например, возможны следующие категории и подкатегории файлов:

- Schematics (схемы): <имя схемы>.sch — имя файла схемы;
- Simulation Output (результаты моделирования: \*.out, \*.dat);
- Workspace Dependencies (файлы проекта, находящиеся в текущем каталоге: \*.nit, \*.stl, \*.slb);
- External Dependencies (внешние файлы, связанные с текущим проектом);
- System Dependencies (перечень используемых в проекте библиотек, размещенных в системном каталоге);
- System Files (файлы проекта: \*.als, \*.cir, \*.mvl, \*.prb, \*.opt и др.);
- Simulation Stimuli (входные сигналы: \*.stl);
- PCBoards (печатные платы: \*.pca и др.);
- Symbol Libraries (библиотеки символов, размещенных в текущем разделе: \*.slb);
- MicroSim Miscellaneous (вспомогательные файлы);
- Model Libraries (библиотеки математических моделей: \*.lib);
- User Files (файлы, создаваемые пользователями);

Одновременно можно открыть несколько текстовых и графических файлов и затем просматривать их.

## Команды менеджера проектов

### Меню File (Файл)

- 
- Open** - просмотр текущего файла соответствующей программой;
  - New Workspace...** - создание нового раздела;
  - Open Workspace...** - загрузка (открытие) существующего раздела;
  - Close Workspace** - закрытие текущего раздела;
  - Properties** - краткое описание назначения выбранного файла;
  - View Messages (F10)** - просмотр списка ошибок текущей схемы, обнаруженных при составлении списка соединений;
-

Файл 1, ... - список последних загруженных файлов;

Exit - завершение работы с менеджером проектов (с закрытием всех активных программ системы Design Lab).

### **Меню Edit (Редактирование)**

**Cut** (Ctrl+X) - удаление выбранного объекта и помещение его в буфер;

**Copy** (Ctrl+C) - копирование выбранного объекта в буфер;

**Paste** (Ctrl+V) - размещение в раздел объекта, занесенного в буфер;

**Delete** (Del) - удаление выбранного объекта без помещения его в буфер;

**Localize** - перенос в текущий раздел выбранных внешних файлов;

**Go To Definition** - открытие раздела, в котором находятся выбранные внешние файлы, и высвечивание его имени.

### **Меню Workspace (Раздел проекта)**

**Copy...** - копирование выбранного объекта в другой раздел;

**Move...** - перемещение выбранного объекта в другой раздел;

**Delete...** - удаление выбранного объекта;

**Archive...** - создание архива всего текущего раздела или выбранных файлов вместе со связанными с ними файлами (по дополнительному указанию);

**Restore...** - разархивация данных в текущем или любом другом разделе;

**Add Objects...** - добавление файлов в текущий раздел вместе со связанными с ними файлами (по дополнительному указанию).

### **Меню View (Просмотр)**

**By Category** - размещение файлов проекта по категориям;

**By Name** - размещение файлов проекта в алфавитном порядке;

**Refresh** - обновление изображения содержания текущего раздела и закрытие дерева связанных с ним данных;

**Expand Item** - объединение всех файлов текущего раздела в категории и подкатегории однотипных файлов;

**Status Bar** - отображение строки состояний;

**Workspace Toolbar** - отображение меню инструментов;

**Application Toolbar** - отображение меню загрузки прикладных программ;

**Options** - настройка параметров менеджера проектов.

### Меню Tools (Прикладные программы)

- Schematics** - загрузка программы Schematics;
- PSpice A/D** - загрузка программы PSpice A/D;
- PCBoards** - загрузка программы PCBoards;
- PLSyn** - загрузка программы PLSyn;
- Optimizer** - загрузка программы PSpice Optimizer;
- Parts** - загрузка программы Parts;
- Probe** - загрузка программы Probe;
- Stimulus Editor** - загрузка программы Stimulus Editor;
- Text Editor** - загрузка встроенного текстового редактора;
- Close All** - закрытие всех активных программ с сохранением изменений в файлах.

### Меню Window (Окно)

- Cascade** - каскадное размещение открытых окон;
- Tile Vertically** - размещение открытых окон по вертикали;
- Tile Horizontally** - размещение открытых окон по горизонтали;
- Arrange Icons** - упорядочение размещения открытых окон;
- 1, 2, ... - список открытых окон.

### Меню Help (Помощь)

- Search For Help On-Technical** - вывод списка разделов встроенной инструкции;
- Technical Support** - информация о службе технической поддержки MicroSim;
- Using Help** - вывод кратких указаний по работе со встроенной инструкцией;
- About Design Manager** - информация о версии программы и ее регистрационном номере.

**Примечание.** Три точки после имени команды (...) отмечают так называемые расширенные команды, перед выполнением которых необходимо ввести дополнительную информацию.

---

Ряд команд менеджера можно запустить щелчком курсора по соответствующей пиктограмме.

---

Наряду с менеджером проектов в DesignLab 8.0 введено очень удобное средство ведения проектов Design Journal—журнал изменений. При работе со схемным редактором Schematics каждый вариант схемы можно внести в этот журнал по команде **File/Checkpoints**, сопроводив текстовым комментарием. Все варианты одной и той же схемы хранятся в одном файле. При выборе одного из них по команде **Open File** его схема загружается на экран, и можно просмотреть ее характеристики.

### 2.3. Маршрут подготовки и выполнения моделирования

В данном разделе приведено краткое описание этапов подготовки электрической схемы устройства к моделированию и выполнения моделирования. Подробное изложение этих вопросов имеется в [2].

Моделируемая схема может содержать следующие типы компонентов:

- цифровые элементы: вентили, триггеры, ЗУ, ПЛМ и др.;
- резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, трансформаторы;
- транзисторы: биполярные, полевые, МОП, арсенид-галлиевые;
- ключи, управляемые током и напряжением;
- АЦП и ЦАП;
- линии передач с потерями.

Из них можно создавать макромодели или иерархические структуры.

**2.3.1. Создать схему** моделируемого устройства в среде схемного редактора Schematics. Маршрут ввода схемы подробно описан в [1].

**2.3.2. Ввести символы источников сигналов**, которые находятся в двух библиотеках: Sourcestm.slb и Source.slb.

**Внимание!** Просмотреть форму аналоговых и цифровых источников сигналов, отредактировать их или создать вновь можно с помощью редактора входных сигналов StmEd (Stimulus Editor). Подробная работа с редактором StmEd описана в п. 2.4. Прежде чем двигаться дальше, ознакомьтесь с работой редактора Stimulus Editor.

В библиотеке Sourcestm.slb находятся символы тех источников сигналов, которые создаются с помощью программы Stimulus Editor:

DigStim - символ источника цифрового сигнала. После двойного щелчка по такому символу ввести имя сигнала (по умолчанию имя сигнала совпадает с позиционным обозначением символа). Далее управление передается программе Stimulus Editor.

Выбрать тип сигнала, предназначенного для анализа переходных процессов, и ввести его параметры. Наиболее часто эти возможности используются для задания цифровых сигналов.

VSTIM и ISTIM – символы источников напряжения и тока аналоговых сигналов, которые имеют два атрибута DC и AC, определяющих постоянную составляющую напряжения или тока и амплитуду сигнала при анализе в частотной области. Значения этих атрибутов устанавливаются командой **Edit/Attribute** (или щелчком по пиктограмме).

В библиотеке Source.slb находятся символы цифровых и аналоговых сигналов, параметры которых определяются с помощью атрибутов, описание которых приведено в [2, пп. 5.1.3, 6.3].

Просмотреть форму аналоговых и цифровых источников сигналов, отредактировать их или создать вновь можно с помощью редактора входных сигналов StmEd (Stimulus Editor). С помощью мыши задаются форма аналогового источника кусочно-линейного сигнала и временные диаграммы логических сигналов.

### 2.3.3. Проставить позиционные обозначения компонентов (Reference Designator).

Позиционные обозначения обычно вводятся при расстановке компонентов на схеме.

Проставить на схеме позиционные обозначения символов компонентов, состоящие из позиционного обозначения корпуса компонента (Package Reference Designator), к которому добавляется имя секции (Gate), например, U1A, U1B, U1C, ... . Редактировать позиционные обозначения с учетом распределения секций по корпусам (так называемая упаковка) по окончании рисования схемы.

Однако, если в процессе редактирования часть компонентов получила совпадающие позиционные обозначения или не для всех компонентов проставлены эти обозначения, то выполнить следующую доработку:

В разделе **Set values for** выбрать метод простановки позиционных обозначений компонентов:

**All Except User-Assigned** - автоматическая простановка позиционных обозначений имен секций и типов корпусов за исключением тех, что проставлены пользователем;

**Only Unpackaged** - простановка позиционных обозначений имен секций и типов корпусов, которые еще не назначены ;

**All** - простановка позиционных обозначений имен секций и типов корпусов всем компонентам (с переопределением существующих).

Затем выбрать команду **Tools/Annotate**. В появившемся диалоговом окне в пункте **Function** выбрать тип операции упаковки:

**Package and Assign Reference Designator** – упаковка компонентов в физически существующие корпуса путем простановки номеров секций компонентов и указания типа корпуса в соответствии с данными раздела **Set Value for**. Заметим, что упаковка необходима при разработке печат-

ных плат и не обязательна для моделирования;

**Assign Reference Designator Only** – назначение позиционных обозначений компонентов без проведения их упаковки, что достаточно для проведения моделирования;

**Undo Packaging** – удаление всех атрибутов, проставленных в процессе обратной корректировки схемы по команде **Tools/Back Annotate** (необходимо при возникновении проблем при генерации цепей).

Для редактирования позиционных обозначений вручную применить команду **Edit/Label** или щелкнуть курсором по позиционному обозначению. Вокруг него появится рамка и одновременно пунктирной линией будет выделен компонент, которому принадлежит позиционное обозначение.

Заметим, что в процессе нанесения символов компонентов на схему командой **Option/Auto-Naming** можно включить режим автоматической простановки позиционных обозначений компонентов (пометив курсором панель **Enable Auto-Naming** и задав начальный номер позиционных обозначений **Starting Designator**). К сожалению, в этом режиме, как и при выполнении команды **Tools/Annotate** позиционные обозначения расставляются неупорядоченно. Поэтому перед выпуском документации по ЕСКД приходится редактировать позиционные обозначения компонентов вручную.

**2.3.4. Проименовать цепи** командой **Edit/Label** или двойным щелчком мыши на выбранной цепи.

При выполнении некоторых видов анализа (например, при спектральном анализе по методу Монте-Карло, расчете уровня шума) необходимо указывать имена выходных переменных, в качестве которых могут быть потенциалы и разности потенциалов узлов и токи ветвей. При записи выходных переменных можно пользоваться всеми правилами программы PSpice, однако ссылки на имена узлов цепи (имена проводников) возможны, если они обозначены на схеме.

При использовании специальных маркеров именовать цепи не обязательно - достаточно маркером пометить (командами меню **Markers** или щелчком по соответствующим пиктограммам) цепи или вывод компонента и на график будет выведена соответствующая характеристика.

**2.3.5. Нанести на схему нужные маркеры и символы** для визуализации результатов моделирования (временных диаграмм, частотных характеристик и др.).

**Внимание!** Этот пункт при первоначальном ознакомлении с системой можно пропустить.

Для построения в дальнейшем программой Probe графиков напряжений или логических уровней цепей выбрать команду **Markers/MarkVoltage/Level** или нажать на соответствующую пиктограмму. Затем

разместить маркеры в любой точке нужной электрической цепи или конце вывода компонента.

Аналогично командой **Markers/Mark Current unto Pin** разместить маркеры, помечающие выводы компонентов, токи которых наносятся на графики программой Probe.

Другие типы маркеров, которые можно нанести с помощью меню команды **Markers**, приведены в [2, стр. 124].

Для отображения (или удаления) на схеме результатов анализа режима по постоянному току с помощью команды **Analysis/Display Results/Show/Hide/Selected Voltages** (или путём нажатия соответствующей пиктограммы) разместить маркеры в узлах нужных электрических цепей.

Аналогичным образом размещаются маркеры для вывода на схему постоянного тока выбранных участков цепей схемы.

Для отображения на экране программы PSpice в текстовой строке (в нижней части экрана) текущих значений напряжений узлов (не более трёх) нужные узлы помечаются символами WATCH1 (в виде глаза), которые используются для контроля правильности процесса моделирования, чтобы прервать расчёты при наличии явно неверных результатов, не дожидаясь их окончания (полезно при проведении длительных расчетов).

**2.3.6. Выполнить проверку схемы** командой **Analysis/Electrical Rule Check** на наличие в схеме не подсоединённых (плавающих) выводов компонентов, совпадающих позиционных обозначений и других ошибок. Полнота и правильность проверки тем больше, чем больше информации о типе компонентов и их выводов занесено в библиотеку символов. При обнаружении ошибок на экран выводится информационное сообщение. Перечень ошибок (с указанием координат) просматривается командой **File/View Messages**.

**2.3.7. Задать директивы моделирования** и их параметры командой **Analysis/Setup** (или нажатием соответствующей пиктограммы) путём отметки нужных директив моделирования в открывшемся окне (галочка в графе **Enable**).

**Внимание!** Подробнее директивы моделирования рассмотрены в подразделе 2.4.

Затем после нажатия соответствующей кнопки на панели с именем вида анализа открывается диалоговое меню задания директив параметров моделирования:

**AC Sweep...** – расчет характеристик линеаризованной схемы в частотной области и уровня её внутреннего шума;

**Load/Save Bias Points** – запоминание/ чтение режима схемы по постоянному току;

**DC Sweep** – расчет режима по постоянному току при вариации входного напряжения, тока или температуры;

**Monte Carlo/Worst Case...** – статический анализ по методу Монте-Карло и расчет наихудшего случая;

**Bias Point Detail** – вывод подробной информации о режиме схемы по постоянному току;

**Digital Setup** – спецификация дополнительных данных при анализе переходных процессов цифровых и смешанных устройств (тип задержек, тип аналогово-цифрового интерфейса, установка начальных состояний триггеров);

**Options...** – задание параметров, контролирующих точность результатов моделирования и характер вывода данных в текстовый файл результата моделирования .out;

**Parametric...** – задание варьируемых параметров;

**Sensitivity** – расчет малосигнальных чувствительностей в режиме по постоянному току;

**Temperature...** – установка температуры (по умолчанию 27 °C);

**Transfer Function** – расчет малосигнальных передаточных функций по постоянному току;

**Transient...** – расчет переходных процессов и спектральный анализ по Фурье.

По команде **Setup** задаются не все возможные директивы программы PSpice. Остальные директивы задаются с помощью атрибутов, присваиваемых на схеме с помощью специальных символов из библиотеки Special.slb, при этом каждой директиве соответствует отдельный символ. Например, (см. [2], рис. 1.2) символ PARAM задаёт директиву определения глобальных параметров. С помощью символов PARAM, OPTPARAM задаётся перечень варьируемых параметров и их начальные значения для программы PSpice Optimizer.

**2.3.8. Создать список соединений** командой **Analysis/Create Netlist**, при этом список соединений и задание на моделирование заносится в файл с расширением .cir и ряд вспомогательных файлов с расширениями .net, .als, .par. Эти файлы включаются в задание на моделирование. Все указанные файлы заносятся также в выходной файл с расширением .out при переходе к режиму моделирования.

С текстовым описанием схемы и текстовым описанием задания на моделирование имеет смысл знакомиться только при поиске сложных ошибок. В обычном режиме работают только со схемами.

При наличии ошибок в схеме или в директивах моделирования выводятся информационное сообщение (INFO), предупреждения (WARNING) и ошибки (ERROR). Если курсором щелкнуть на строке ошибок, то это



окно закроется и курсор покажет на схеме связанной с этой ошибкой вывод компонента. Вернуться в информационное окно можно командой **File/View Messages** или нажатием клавиши F10.

Файлы списков соединений можно просмотреть командой **Analysis/Examins Netlist** с помощью встроенного текстового редактора MicroSim Text Editor. Однако необходимость в этом возникает крайне редко, например, при отладке новых схем и моделей компонентов.

**2.3.9.** Убедиться, что подключены файлы с математическими моделями компонентов схемы. Поставляемые вместе с системой фирменные библиотеки находятся в файле NOM.LIB (его не редактировать!).

**Подключить дополнительные библиотеки** и другие необходимые для моделирования файлы командой **Analysis/Library and Include Files**. Сначала в строке указать имя файла (которое проще отыскать нажатием кнопки **Browse**). Затем в зависимости от типа файла нажать одну из кнопок:

**Add Library** - библиотеки математических моделей (файлы .lib, .mod и др.);

**Add Include** – файлы, подключаемые по директиве INCLUDE;

**Add Stimulus** - внешние воздействия (файлы .stl).

Эти файлы будут доступны при моделировании любых схем.

Если нажать аналогичные кнопки, не имеющие символов "\*", файлы будут доступны только для текущей схемы.

**2.3.10. Выполнить конфигурирование** графического постпроцессора Probe командой **Analysis/Probe Setup**.

**Внимание!** Предварительно познакомьтесь с описанием программы Probe, которое приведено в п. 2.6.

Меню команды **Analysis/Probe Setup** имеет 3 раздела:

### 1. Раздел Probe StartUp

**Auto-Run Option** (параметры автоматического запуска программы):

**Automatically Run Probe After Simulation** - автоматический запуск программы Probe после завершения моделирования;

**Monitor Waveforms (auto update)** - построение графиков в процессе моделирования. Обеспечивает возможность оперативного вывода на экран текущих результатов моделирования. После начала моделирования автоматически запустится программа Probe, и по мере поступления данных будут выводиться графики переменных, помеченных маркерами или указываемых по команде **Trace/Add**. Графики выводятся на экран порциями в соответствии с размерами кэш памяти компьютера;

**Do not auto-run Probe** - не запускать программу Probe автоматически после выполнения моделирования.

### **At Probe Startup (спецификация выводимых графиков):**

**Restore last Probe session** - вывод данных о последнем сеансе Probe;

**Show all markers** - вывод графиков соответствующих всем маркерам;

**Show select markers** - вывод графиков, соответствующих выбранным на схеме маркерам;

**None** - графики не выводятся.

### **2. Раздел Data Collection**

**Data Collection (перечень данных, помещаемых в выходной файл):**

**All markers only** – данные, отмеченные маркерами;

**All** - все данные о схеме;

**All except internal subcircuit data** - все данные о схеме, за исключением данных о подсхемах;

**None** – ничего;

**Text data file format (CSDF)** - текстовый формат файла данных (расширение имени .txt.).

### **3. Раздел Checkpoint**

Содержит две группы команд:

1. **Automatically load data for open checkpoints** - автоматическая загрузка данных для открытых вариантов схем.

2. **Show Result in** - окна для показа результатов:

**Same window for all schematics(working and checkpoint)** - в одном и том же окне для всех схем;

**A separate window for each schematic include its checkpoints** - в отдельных окнах для каждой основной схемы, в том числе и для ее вариантов;

**A separate window for each schematic (working or checkpoint)** - в отдельных окнах для каждой схемы (основная схема и ее варианты).

**2.3.11. Запустить программу моделирования PSpice командой Analysis/Simulate** (либо нажатием клавиши F11 или щелчком по пиктограмме). При этом автоматически выполняются команды **Electrical Rule Check** и **Create Netlist**, если они не были выполнены заранее. В верхней части экрана помещена строка меню для запуска файлов, изменения цвета и шрифта, вызова подсказки.

#### **Команды меню программы PSpice**

Ниже строки меню выводится название задания на моделирование, имя файла, название выполняемой команды, значения варьируемых параметров и др., включая номер реализации при статистических испытаниях по методу Монте-Карло. Кроме того, приводятся данные об объеме памяти в строке Memory Used.

В средней части экрана указываются название вида анализа и приво-

дятся информационные сообщения о фазах выполнения задания на моделирование и сообщения об ошибках (последние выделяются красным цветом).

В нижней части экрана в реальном масштабе времени выводятся текущие значения от одной до трех переменных, указанных директивой WATCN. На схеме эта директива задается установкой символа в виде глаза. Кроме того, здесь же приводится информация о шаге изменения независимых переменных и диапазона их значений.

После завершения моделирования его результаты в табличной форме заносятся в текстовый файл. Данные для построения графиков заносятся в файл .dat, который загружается в программу Probe.

**2.3.12. Просмотреть графики результатов моделирования с помощью программы Probe.**

Графический постпроцессор Probe выводит на экран графики результатов моделирования, производит их математическую обработку и выводит на экран в табличной форме их важнейшие характеристики, наносит на графики поясняющие надписи и позволяет получать жесткие копии результатов моделирования в графической форме. Математические преобразования под графиками заключаются в выполнении арифметических операций, вычислении различных функций, взятии интегралов, расчёте спектров, гистограмм, измерении параметров формы импульсов, частотных характеристик, построении зависимостей любой характеристики графика от любого варьируемого параметра схемы (например, зависимость длительности импульса автогенератора от значения ёмкости указанного конденсатора). Эти характеристики рассчитываются с помощью целевых функций, записанных в файл Msim.prb.

При моделировании аналого-цифровых устройств графики переходных процессов в цифровой и аналоговой части схемы выводятся на одном экране с одинаковым масштабом времени.

Программа Probe вызывается автоматически после завершения моделирования, если в меню команды **Analysis/Probe Setup** включена опция **Auto Run Option: Automatically run Probe after simulation**.

Если выбрана опция **Auto Run Option: Monitor waveforms**, построение графиков выполняется в процессе моделирования.

Автономный вызов Probe выполняется командой **Analysis/Run Probe waveforms** (или нажатием клавиши F12).

Программу Probe можно вызвать в отдельном окне и одновременно просматривать графики результатов и принципиальную схему анализируемого устройства. В многооконном режиме, когда одновременно (или поочередно) на экране находятся окна графического редактора Schematics и программы Probe, удобно пользоваться маркерами, проставляемыми ко-

мандами **Markers** (или щелчком по соответствующим пиктограммам). По этим командам специальными значками на схеме помечаются цепи или выводы компонентов, потенциалы или токи которых нужно вывести в окне программы Probe. Маркеры можно наносить на схему как до завершения моделирования, так и после него. В последнем случае необходимо дополнительно выполнить команду **Show All** или **Show Selected** (вывести на экран графики всех отмеченных или только выбранных переменных). Вывод маркеров завершается нажатием правой кнопки мыши. После этого выводится экран программы Probe с построенными графиками. Если окна Probe не видно, то переключиться (Alt+Tab) открытые окна до появления нужного.

Более подробно работа с программой Probe описана в п. 2.6.

**2.3.13. Просмотреть результаты моделирования**, представленные в текстовом файле .out, командой **Analysis/Examine Output**.

*Внимание!* Этот пункт при первоначальном ознакомлении с системой можно пропустить.

В этом файле содержится текстовое описание схемы и директив моделирования, параметры математических моделей компонентов, карта режима по методу Монте-Карло и др. Пример файла .out приведен в [2, приложение 4].

В некоторых случаях, например, при моделировании схемы большого размера или выполнении статистического моделирования файл данных .dat приобретает большие размеры. Для его уменьшения рекомендуется включить опции **Data Collection All Markers Only** команды **Analysis/Probe Setup** - тогда в этот файл заносятся данные только о переменных отмеченных маркером.

## 2.4. Редактор входных сигналов Stimulus Editor

С помощью редактора Stimulus Editor (StmEd) создаются аналоговые и цифровые сигналы, которые просматриваются и редактируются в графическом виде на экране и записываются в файл с расширением имени .stl для подключения внешних воздействий к моделируемой схеме. Каждому сигналу присваивается уникальное имя.

Типы аналоговых сигналов, поддерживаемые редактором StmEd:

SIN (sinusoidal) – гармоническое колебание;

PULS – импульсный сигнал;

EXP – сигнал экспоненциальной формы;

PWL (piecewise linear) – кусочно-линейный сигнал;  
SFFM (single-frequency FM) – сигнал с синусоидальной частотной модуляцией.

Примеры других аналоговых сигналов описаны в [2, п.5.1.3].

Параметры гармонического сигнала:

- постоянная составляющая;
- амплитуда;
- частота;
- задержка;
- коэффициент затухания;
- фаза.

Параметры импульсного сигнала:

- Initial value – начальное значение сигнала;
- Pulse value – максимальное значение сигнала;
- Delay - задержка;
- Rise time – длительность переднего фронта;
- Fall time - длительность заднего фронта;
- Pulse width - длительность плоской части импульса;
- Period – период.

Типы цифровых сигналов, поддерживаемые редактором StmEd:

- Signal – временная диаграмма логических состояний, задаваемых пользователем с помощью мыши;
- Clock – сигнал синхронизации. Характеризуется частотой повторения (Frequency), скважностью (Duty Cycle), значением начального состояния (Initial Value) и задержкой (Time Delay);
- Bus – многоразрядные сигналы (шины). Вводятся по тому же принципу, что и Signal, но дополнительно нужно задавать количество выходов источника сигналов (Bus width).

Моменты времени изменения логического состояния задаются командой **Add Transition**, которая имеет опции:

- **To Value** – выбрать вид системы исчисления Radix (Binary, Decimal, Hexadecimal, Octal) и указать новое значение сигнала New Value;
- **Incr by (Decr by)** – задать приращение изменения состояния и курсором последовательно отметить моменты времени увеличения (уменьшения) кода состояния многоразрядного сигнала.

Цифровые сигналы имеют вид периодических сигналов и сигналов произвольной формы. Цифровые сигналы и кусочно-линейные аналого-

вые сигналы редактируются непосредственно на экране с помощью курсора мыши.

Рассмотрим основные фазы работы с редактором сигналов StmEd на примере цифрового сигнала.

**2.4.1. Вызвать программу StmEd** двойным щелчком мыши по символу генератора сигналов на экране Schematics (генераторы изображаются символами DigStim, ISTIM, STIM, DigClock, FileSime из библиотек Source.slb, Sourcestm.slb). Редактор StmEd может также загружаться автономно.

**2.4.2. Открыть новый файл библиотеки сигналов** командой **File/New**.

**2.4.3.** Командой **Stimulus/New** на открывшейся панели **выбрать тип сигнала** (например Signal) и в строке **Name** указать его имя (например Signal 5). Нажать **Ok**.

**2.4.4.** Для аналоговых сигналов **ввести параметры сигнала** на открывшейся панели.

**2.4.5.** При выборе цифрового сигнала Signal на экране вычерчивается поле графика, помеченное слева именем сигнала, окрашенным в красный цвет (признак активности сигнала и его доступности для редактирования).

**2.4.6.** Командой **Plot/Axis Setting /Minimum Resolution** установить **необходимую дискретность изменения времени** .

**2.4.7.** Командой **Add Transition**, имеющей опции **To 0/1, To X ,To Z** (курсор принимает форму карандаша), щелчком мыши **отметить точки перехода** в новое состояние. Моменты времени текущего положения курсора указываются в левой части нижней строки экрана.

В описанной команде *X* означает неопределенное состояние, *Z* – состояние высокого выходного сопротивления (логический уровень в неопределенном состоянии).

В данном режиме точки изменения состояний цифровых сигналов помечены метками в виде квадратиков – их можно перемещать с помощью курсора и удалять нажатием клавиши **Del**.

**2.4.8.** После ввода всех параметров **нажать клавишу Apply**, при этом на экране вычерчивается график сигнала (график сигнала Signal уже существует). Панель ввода параметров не закрывается, что дает возможность изменить другой параметр.

**2.4.9. Закончить ввод параметров** и снова просмотреть форму графика сигнала нажатием клавиши **OK**.

**2.4.10.** Командами **File /Save** или **File/Save As** и **File/Exit** завершить

создание сигналов записью библиотеки сигналов в файл. По умолчанию принимается расширение имени файла библиотеки сигналов .stl.

## Команды программы Stimulus Editor Меню File (Файл)

**New...** - очистка рабочего окна для создания нового файла библиотеки воздействий;

**Open...**(Ctrl+P12) - открытие (загрузка) существующего файла воздействий для просмотра формы сигналов и последующего редактирования. Построение графиков сигналов из текущей библиотеки воздействий в новом окне выполняется по команде **Window/New**;

**Close** - закрытие текущего окна (если библиотека воздействий была изменена, предлагается ее сохранить);

**Save** (Shift+F12) - сохранение внесенных изменений в текущем файле;

**Save As...** (F12) - сохранение внесенных изменений в новом файле, имя которого указывается по дополнительному запросу;

**Log Commands...** - включение/выключение режима составления файла протокола команд (расширение имени .cmd);

**Run Commands...** - выполнение файла протокола команд;

**Close** - закрытие текущего окна (если данные из текущего файла используются в других окнах, выводится предупреждающее сообщение);

**Print...** (Ctrl+Shift+F12) - вывод твердой копии одного или нескольких активных окон;

**Print Preview** - просмотр размещения графиков перед печатью;

**Page Setup...** - настройка параметров страницы:

- **Margins** - размеры четырех полей в дюймах;
- **Plots Per Page** - количество графиков на странице;
- **Orientation** - горизонтальная (Landscape) или вертикальная (Portrait) ориентация;
- **Cursor Information** - ориентация расположения информации относительно курсора (Top, Bottom, Left, Right, None);
- **Draw Border** - заключение графика в рамку;
- **Draw Plot Title** - вывод заголовка графика;
- **Header and Footer** - вывод текущей даты, времени и номера страницы;
- **Set Default** - сохранение информации **Header and Footer** для установки по умолчанию;
- **Reset Default** - задание типа принтера по умолчанию.

**Printer Setup...** - установка параметров принтера: разрешающая спо-

способность, размер бумаги, горизонтальное (**Landscape**) или вертикальное (**Portrait**) расположение изображения на бумаге;

**Log Commands...** - включение/выключение режима составления файла протокола команд (расширение имени .cmd);

**Run Commands...** - выполнение файла протокола команд;

Файл 1, ... - список последних загруженных файлов;

**Exit** (Alt+F4) - завершение работы;

**Attributes...** (Ctrl+T) - изменение атрибутов выбранного сигнала (сигнал выбирается щелчком курсора по его имени, двойной щелчок открывает окно редактирования атрибутов);

**Activate PWL...** - изменение масштабных коэффициентов по осям  $X$ ,  $Y$  сигналов PWL (диалоговое окно открывается также двойным щелчком по имени сигнала);

**Add** (Alt+A) - добавление точек излома выбранного сигнала *PWL*. У выбранного аналогового сигнала точки излома помечаются квадратиками. Для цифровых сигналов логические состояния 0/1 заменяются на 1/0, а состояния  $X$  или  $Z$  на 0.

### Меню Stimulus (Сигналы)

**New...** (Alt+N) - создание нового сигнала в текущем активном окне. Вид сигнала выбирается в меню **New Stimulus**. После ввода имени сигнала выбирается тип сигнала, затем в открывшемся меню **Attributes** - его параметры;

**Get...** (Ins) - добавление в текущее активное окно графика ранее определенного сигнала. Имя сигнала выбирается из списка;

**Copy...** - копирование сигнала из другого библиотечного файла;

**Remove...** (Alt+Delete) - удаление выбранного объекта с экрана и из библиотечного файла;

**Rename...** - переименование сигнала;

**Change Type...** - изменение типа выбранного сигнала.

### Меню Plot (Изображение графиков)

**Axis Settings ...** - задание диапазонов значений по осям  $X$  и  $Y$ :

- **Displayed Data Range** - установка значений, которые высвечены на панели диалога. Их начальные значения те же, что устанавливаются по команде **View/Fit**;
- **Extent of the Scrolling Range** - установка пределов линейек прокрутки по осям  $X$  и  $Y$ ;
- **Auto Range** - автоматическое масштабирование пределов линейек прокрутки;



- **User Defined** - задание пределов линеек прокрутки пользователем;
- **Minimum Resolution** - минимальное разрешение по осям  $X$  и  $Y$ .

**Add Plot** - добавление нового окна графиков в верхней части текущего окна;

**Delete Plot** - удаление текущего окна (помечено символом SEL>>).

**Unsync Plot** - задание собственной оси  $X$  для каждого окна.

### Меню View (Просмотр)

**Fit** (Ctrl+N) - изменение масштаба изображения так, чтобы на полном экране разместились все графики;

**In** (Ctrl+I) - увеличение масштаба изображения в 2 раза (центр поля зрения указывается курсором);

**Out** (Ctrl+O) - уменьшение масштаба изображения в 2 раза (центр поля зрения указывается курсором);

**Area** (Ctrl+A) - вывод на весь экран окаймленной части изображения;

**Previous** (Ctrl+P) - возвращение к предыдущему масштабу изображения;

**Pan-New Center** - расположение схемы симметрично относительно точки расположения курсора без изменения масштаба;

**Redraw** (Ctrl+L) - перечерчивание экрана;

**Toolbar** - вывод в основное меню пиктограмм инструментов;

**Status Bar** - вывод в основное меню строки состояний.

### Меню Tools (Инструменты)

**Label** - нанесение на графики текстовых и графических символов:

- **Text** – текст;
- **Line** - отрезок линии;
- **Poly-line** - линейно-ломаная линия;
- **Arrow** – стрелка;
- **Box** – прямоугольник;
- **Circle** – окружность;
- **Ellips** – эллипс.

**Parameters...** - открытие окна диалога для задания, редактирования или удаления имен и значений параметров, которые могут использоваться при определении сигналов (при ссылке на них они заключаются в фигурные скобки  $\{\}$ ). В Schematics необходимо еще раз задать определения этих же параметров, чтобы провести моделирование.

**Options...** - задание параметров:

- **Default Plot Ranges** - установка масштабов по осям графиков по умолчанию;

- **Use Symbols on Analog Trace** - использование символов для различия аналоговых сигналов (автоматически, никогда, всегда);
- **Bus Display Defaults** - установка системы счисления шин (бинарная, восьмеричная и др.);
- **Width** - количество разрядов шины;
- **Display repeat bars** - отображение периодических сигналов (периодические сигналы создаются в текстовом виде и в программе StmEd только отображаются);
- **Show  $n$  iterations for infinite loops** - задание количества отображаемых периодов периодических сигналов.

### Меню Window (Окно)

**New** - открытие нового окна;

**Close** - закрытие текущего окна;

**Arrange...** - упорядочение размещения открытых окон;

**Title** - редактирование заголовка текущего окна;

**Tile Horizontal** - последовательное расположение открытых окон по горизонтали;

**Tile Vertical** - последовательное расположение открытых окон по вертикали;

**Cascade** - каскадное расположение открытых окон;

1 <заголовок>, ... - список открытых окон.

## 2.5. Директивы моделирования для симулятора PSpice

Директивы моделирования задаются в схемном редакторе Schematics по команде **Analysis/Setup** (или выбором пиктограммы). В раскрываемом окне выбирают нужный вид анализа, затем после щелчка мыши по панели видов анализа задают параметры моделирования в раскрывшемся меню.

**2.5.1. Расчет режима по постоянному току** (анализ статического режима) всегда выполняется в начале моделирования автоматически перед выполнением остальных видов анализа: расчетов переходных процессов (Transient), для определения начальных условий перед анализом в частотной области (AC Sweep), для линеаризации нелинейных компонентов в окрестности режима по постоянному току. При расчете принимаются во внимание параметры DC всех независимых источников напряжения и тока. Результаты расчетов выводятся в текстовый файл .out в виде таблицы узловых потенциалов и списка токов независимых источников.

Нажатием кнопки **Bias Point Default** выводится подробная информация о режиме по постоянному току, дополнительно рассчитываются мало-сигнальные параметры линеаризованных схем замещения полупроводниковых приборов и нелинейных управляемых источников, которые также выводятся в выходной файл .out.

Режим по постоянному току рассчитывается итерационным методом Ньютона-Рафсона.

Посредством директив **Save Bias Point** и **Load Bias Point** можно сохранить в файле с указанным именем значения узловых потенциалов, чтобы использовать их в качестве начальных в следующем сеансе работы с программой PSpice. Это полезно при анализе больших схем, для которых расчет режима по постоянному току занимает значительное время.

**2.5.2. Расчет режима по постоянному току при вариации одного или нескольких параметров** осуществляется после выбора директивы **DC Sweep**. В качестве параметров могут выступать источники постоянного напряжения или тока, температура, параметры моделей компонентов схем и др.

При работе с управляющей оболочкой Schematics имя файла узловых потенциалов и другие параметры указываются в диалоговых окнах, открывающихся после нажатия на кнопку **DC Sweep** в меню выбора директив моделирования.

В основном окне задаются следующие параметры.

В разделе **Sweep Var. Type** задается тип варьируемого параметра:

*Voltage Source* — источник напряжения;

*Temperature* — температура;

*Current Source* — источник тока;

*Model Parameter* — параметр модели компонента;

*Global Parameter* — глобальный параметр.

В зависимости от выбранного типа параметра заполняются одна или несколько строк:

**Name** — имя варьируемого параметра (для параметров типа *Voltage Source*, *Current Source*, *Global Parameter*);

**Model Type** — тип модели, например RES, DIODE, NPN (для **Mode/Parameter**);

**Model Name** — имя модели, например KT315A (для *Model Parameter*);

**Param. Name** — имя параметра (для *Model Parameter*, *Global Parameter*).

В разделе **Sweep Type** задается тип вариации параметра:

*Linear*—линейный масштаб;

*Octave* —логарифмический масштаб октавами;

*Decade* —логарифмический масштаб декадами;

*Value List* — в виде списка параметров.

Пределы изменения параметров задаются на строках:

*Start Value* — начальное значение;

*End Value* — конечное значение;

*Increment* — приращение;

*Pts/Decade (Octave)* — количество точек на одну декаду (октаву);

*Values*—список параметров.

Параметры вложенного цикла задаются после нажатия кнопки **Nested Sweep** в диалоговом окне, в котором должна быть отмечена панель **Enable Nested Sweep**.

**2.5.3. Расчет частотных характеристик** (анализ линейного режима) и уровня шума выполняется по директиве **AC Sweep**.

В диалоговом окне задания параметров режима **AC Sweep** имеются три раздела.

В разделе **AC Sweep Type** определяется характер изменения частоты:

*Linear* —линейная шкала;

*Octave* —изменение частоты октавами;

*Decade* — изменение частоты декадами.

В разделе **Sweep Parameters** задаются параметры диапазона частот:

*Total Pts.*, *Pts/Decade*, *Pts/Octave*— общее количество точек при выборе линейного масштаба или количество точек по частоте на одну декаду или октаву;

*Start. Freq.* — начальная частота;

*End Freq.* — конечная частота.

В разделе **Noise Analysis** устанавливаются параметры расчета спектральной плотности внутреннего шума:

*Noise Enabled* —включение режима расчета уровня шума;

*Output Voltage* — выходное напряжение;

*I/V Source* — имя входного источника напряжения или тока;

*Interval* — интервал расчета парциальных уровней шума.

Расчет характеристик в частотной области производится после определения режима по постоянному току и линеаризации нелинейных компонентов (это делается автоматически, никаких дополнительных директив не требуется). Все независимые источники напряжения  $V$  и тока  $I$ , для которых заданы параметры АС-сигналов (амплитуды и фазы), являются входными воздействиями. При проведении АС-анализа остальные спецификации этих источников, в том числе параметры синусоидального сигнала SIN, не принимаются во внимание, они учитываются при анализе переходных процессов. Результаты расчета комплексных амплитуд узловых напряжений и токов ветвей выводятся по директивам .PRINT, .PLOT или .PROBE.

**2.5.4. Установка параметров цифровых устройств** выполняется директивой **Digital Setup**.

Параметры цифровых устройств, устанавливаемые по умолчанию, задаются в диалоговых окнах, открываемых при нажатии кнопки **Digital Setup** в окне выбора директив моделирования. В основном окне задаются следующие параметры.

В разделе **Timing Mode** устанавливается тип времени запаздывания во всех компонентах:

*Minimum* — минимальное;

*Typical* — типичное;

*Maximum* — максимальное.

*Worst-case (Min/Max)* — вариация задержки при расчете наихудшего случая (минимальная/максимальная).

В разделе **Default A/D Interface** задается тип модели интерфейсов вход/ выход, назначаемый по умолчанию.

В разделе **Flip-flop Initialization** задаются начальные значения выходным состояниям триггеров:

*All X*—присвоить неопределенное состояние X;

*All 0* —присвоить состояние логического "0";

*All 1* — присвоить состояние логической "1".

В разделе **PLSyn** задаются параметры, используемые при синтезе ПЛИС:

*Capture Test Vectors* — создание в процессе моделирования вектора тестов, содержащего входные и выходные сигналы для каждой ПЛИС. В дальнейшем вектор тестов включается в JEDEC-файл конфигурирования ПЛИС;

*Sample Window* — длительность интервала времени. Если разности моментов времени изменения сигналов на входах каких-нибудь устройств

меньше этого интервала, они считаются происходящими одновременно. Это используется при генерации векторов тестов ПЛИС, например, при проектировании смешанных аналого-цифровых устройств.

При нажатии на кнопку **Advanced** открывается диалоговое окно задания параметров, используемых только при моделировании ПЛИС.

В разделе **Timing Mode** устанавливается тип времени запаздывания в ПЛИС:

*System Default*— принятое по умолчанию для цифровых компонентов (задается в диалоговом окне **Digital Setup**);

*Minimum* — минимальное;

*Typical* —типичное;

*Maximum* —максимальное;

*Worst-case (Min/Max)* — вариация задержки при расчете наихудшего случая (минимальная/максимальная).

В разделе **Default A/D Interface** задается тип модели интерфейсов вход/ выход ПЛИС, назначаемый по умолчанию:

*System Default*— принятый по умолчанию для цифровых компонентов (задается в диалоговом окне **Digital Setup**);

*Level 1 — Level 4* — уровень макромоделли интерфейса вход/выход ПЛИС.

В разделе **Power Supply Nodes** указываются имена узлов подключения источника питания ПЛИС (по умолчанию указываются стандартные имена \$G\_DPWR, \$G\_DGND).

**2.5.5. Расчет переходных процессов** (анализ переходного режима) выполняется по директиве **Transient**. В открывшемся меню выбора директив моделирования в разделе **Transient Analysis** необходимо задать по крайней мере два параметра:

**Print Step** – шаг вывода данных;

**Final Time** – конечное время.

Остальные параметры **N<sub>0</sub>–Print Delay** (начальный момент вывода данных) и **Step Ceiling** (максимальный шаг) являются необязательными.

На панели **Detailed Bias Pt.** отмечается необходимость вывода полной информации о режиме по постоянному току, на панели **Skip initial transient solution** – отмена расчета режима по постоянному току перед моделированием переходных процессов.

Спектральный анализ выполняется выбором панели **Enable Fourier** с помощью быстрого преобразования Фурье после завершения расчета переходного процесса. Шаг интегрирования выбирается автоматически.

При моделировании смешанных аналого–цифровых схем шаги ин-

тегрирования выбираются разными независимо друг от друга. Шаг интегрирования, указываемый для информации на экране программы PSpice, равен шагу интегрирования аналоговой части цепи. Шаг интегрирования цифровой части определяется значениями задержек в цифровых компонентах.

Для возбуждения устройств, работающих в режиме автогенерации, после расчета режима по постоянному току можно имитировать включение напряжения питания или задать начальное значение напряжений на конденсаторах, отличное от значений в состоянии равновесия.

**2.5.6. Параметры моделирования** устанавливаются директивой **Options** в окне выбора директив. В период начального этапа работы с системой DesignLab рекомендуется воспользоваться установкой параметров по умолчанию.

**2.5.7. Многовариантный анализ** выполняется по директиве **Parametric**. В открывающемся диалоговом окне специфицируются варьируемые параметры. На каждом шаге вариации параметров по очереди выполняются все виды анализа характеристик схемы, которые заданы. Варьироваться могут практически все параметры модельных компонентов и глобальные параметры.

Например, можно выполнить многовариантный анализ переходных процессов при изменении амплитуды гармонического сигнала или при изменении сопротивления резистора и т.д.

**2.5.8. Вариация температуры** выполняется директивой **Temperature**. Список температур указывается в открывающемся диалоговом окне. Тогда все виды анализа проводятся для каждой указанной температуры. Если список температур пуст, то по умолчанию расчеты проводятся для номинальной температуры 27°C.

**2.5.9. Малосигнальные передаточные функции** по постоянному току определяются по директиве **Transfer Function**. Они рассчитываются после линеаризации цепи в окрестности рабочей точки. В открывающемся диалоговом окне указываются имена выходной и входной переменных. Если выходная переменная должна быть током, то это ток через независимый источник напряжения. В качестве входной переменной может быть использовано напряжение или ток источника напряжения (или тока).

**2.5.10. Чувствительность** режима по постоянному току рассчитывается после линеаризации в окрестности рабочей точки по директиве **Sensitivity**. При этом рассчитывается чувствительность каждой из указанных в диалоговом окне выходных переменных к изменению параметров всех компонентов и моделей. Поэтому объем результатов расчета может быть огромным. Результаты расчета выводятся в файл .out.

**2.5.11. Статистический анализ и анализ на наихудший случай**

выполняется по директиве **Monte Carlo / Worst Case**. Вид анализа - **Monte Carlo** или **Worst Case** – выбирается в верхней строке диалогового окна. Здесь же указываются количество статистических испытаний **MS Runs**, имя выходной переменной и др.

Статистические испытания по методу Монте-Карло проводятся при расчете режима по постоянному току, переходных процессов или частотных характеристик при статистическом разбросе параметров компонентов, заданных в их моделях (директива **.Model**). Случайные величины создаются с помощью генераторов случайных чисел.

При выборе опции **Worst Case** в верхней строке диалогового окна проводятся расчеты характеристик цепи при изменении всех параметров по методу наихудшего случая. При исследовании цифровых устройств наиболее актуально оценить влияние случайного разброса временных задержек цифровых ИС на характеристики устройства в целом. Сначала исследуются характеристики при номинальных значениях задержек, а затем интересно проверить работоспособность устройства при вариации задержек в заданных пределах.

Расчет наихудшего случая при моделировании смешанных аналого-цифровых устройств отличается от моделирования чисто аналоговых устройств. При моделировании по методу наихудшего случая аналого-цифровых устройств аналоговые секции моделируются при номинальных значениях параметров. В цифровых компонентах варьируются задержки, имеющие в моделях динамики ненулевые минимальные и максимальные значения. При подаче на вход цифрового компонента воздействия выходной узел имеет неопределенное логическое состояние на интервале времени, равном разности между максимальной и минимальной задержкой. После прохождения сигнала через второй цифровой компонент длительность неопределенного состояния увеличивается и т.д. Это так называемое моделирование "с нарастающей неопределенностью".

## 2.6. Графический постпроцессор Probe

Результаты моделирования, полученные с помощью программы PSpice, заносятся в файлы данных (.dat или .txt) для построения графиков. Перечень переменных, данные которых заносятся в этот файл, устанавливаются по команде **Analysis/Probe Setup** программы Schematics (либо все переменные, либо переменные, отмеченные на схеме маркерами).

Программа Probe не только отображает графики полученных результатов, но и может выполнять их обработку, включая сложные арифмети-



ческие и алгебраические вычисления, взятие интегралов, преобразование Фурье, измерение параметров импульсов, частотных характеристик, расчеты спектров, гистограмм, построение зависимостей любой характеристики графика от любого варьируемого параметра схемы и т.п.

При моделировании аналого-цифровых устройств графики переходных процессов в цифровой и аналоговой части схемы выводятся на одном экране с одинаковым масштабом по времени.

На графики можно наносить произвольные надписи и графические символы и выводить их на принтер или плоттер.

При вводе переменных в программе Probe соблюдаются следующие правила. Символы в верхнем и нижнем регистрах не различаются, за исключением суффиксов  $m=10^{-3}$  и  $M=10^6$ , используемых при назначении масштабов по осям координат. Остальные суффиксы имеют те же значения, что и в PSpice, причем суффиксы используются только для обозначения масштабов осей переменных и их нельзя применять в арифметических выражениях.

В программе Probe пользуются следующими суффиксами для постановки единиц размерности по осям координат:

$V$ - вольты ;	$d$ - градусы;
$A$ - амперы ;	$s$ - секунды;
$W$ - ватты ;	$H$ - герцы.

Перечень команд программы Probe и краткое их описание приведены в конце подраздела.

## Основные фазы работы с постпроцессором Probe

**2.6.1. Выполнить конфигурирование программы Probe** в среде редактора Schematics так, как это описано в п.2.3.10.

**2.6.2. Загрузить программу Probe** из редактора Schematics командой **Analysis/Probe** (имеется пиктограмма) или нажатием клавиши F12. Возможна и автономная загрузка программы. Если в процессе конфигурирования программы Probe установлена опция **Automatically Run Probe After Simulation**, то программа Probe загружается автоматически после окончания моделирования. После загрузки в верхней части основного экрана программы Probe размещается имя файла данных, на следующей строке - горизонтальное меню команд, а ниже - набор пиктограмм для быстрого вызова наиболее употребительных подкоманд. При моделировании нескольких режимов предлагается выбрать один из них: AC, DC, Transient.

Если загрузка программы Probe производилась из редактора Schematics, то после появления основного экрана программы следует загрузить файл с результатами моделирования командой **File/Open**.

**2.6.3. Для построения графиков выбрать команду Trace/Add.** После этого появляется окно выбора переменных. Типы переменных, перечень которых приведен в окне, определяются положением выключателей:

- Digital – цифровые переменные;
- Analog – аналоговые переменные;
- Voltages – напряжения;
- Currents – токи;
- Noise ( $V^2/Hz$ ) – спектральная плотность напряжения выходного шума;
- Alias Names – псевдонимы;
- Subcircuit Nodes – внутренние узлы макромоделей (только напряжения).

Пометить переменные курсором. При этом их имена переносятся в командную строку **Trace Expression**.

Нажать кнопку **OK**. На экран выводится координатная сетка графика, по горизонтальной оси которого откладывается независимая переменная, соответствующая выбранному режиму, например Time (эту переменную пользователь может изменить в дальнейшем).

В расположенном справа окне **Function or Macros** можно выбрать математическую функцию или макрос. Например, можно выбрать несколько переменных и отредактировать образованную строку для записи математических выражений.

На экране можно организовать несколько окон, в которые можно вывести схему и несколько графиков, например, график переходного процесса и частотные характеристики.

В окне схем можно пометить любую цепь или вывод компонента и в окне программы Probe будет построен соответствующий график. Возможность переключения с графиков на схему и наоборот помогает осмыслению результатов моделирования.

Активное окно помечается слева символами “Sel>>”. В каждом окне может быть от 1 до 3 осей  $Y$  с разными масштабами.

### **Особенности построения графиков аналоговых переменных**

На одном графике можно поместить несколько кривых, которые на цветном мониторе выделяются цветом, а при выводе на черно-белый монитор, принтер или плоттер – различными значками.

В дополнение к напряжениям и токам доступны варьируемые переменные. В режиме DC это имя варьируемого источника напряжения или тока. В режиме AC – частота, имеющая имя “Frequency”. В режиме TRAN – время “Time”.

В строке **Trace Expression** можно указать имя одной или нескольких переменных или математических выражений, допустимые операции в которых можно выбрать в окне **Functions or Macros**. Например, можно вывести графики переменных  $V(5)$ ,  $V(\text{INOISE}) \text{SIN}(V(5))/7.536$ ,  $V(3.5)*I(D2)$ .

При вводе имени только одной переменной по оси  $Y$  автоматически проставляются единицы измерений в соответствии с типом переменной. Например, в режиме AC при построении графика модуля напряжения  $V(1)$  ось  $Y$  получит размерность в вольтах, фазы этого напряжения  $VP(1)$  - в градусах, а групповое время запаздывания  $VG(1)$  - в секундах.

Для одновременного построения двух и более графиков их переменные перечисляют на одной строке, разделяя их пробелом или запятой.

### Особенности построения графиков цифровых переменных

В программе Probe выводятся временные диаграммы логических состояний отдельных цифровых узлов или шин, объединяющих не более 32 цифровых сигналов.

На временной диаграмме одной переменной соответствует:

- двойная линия – неопределенному состоянию  $X$ ;
- тройная – состоянию высокого импеданса  $Z$ ;
- нарастающий фронт – состоянию  $R$ ;
- спадающий фронт – состоянию  $F$ .

Имя переменной, вводимой по запросу команды **Trace/Add**, может быть именем цифрового узла или булевыми выражением, содержащим имена таких узлов.

Шина (многоразрядное число) формируется в виде заключенного в фигурные скобки списка цифровых узлов, разделенных пробелами или запятыми, например:

$\{D3 D2 D1 D0\}$ .

В начале списка помещается старший разряд шины, в конце – младший. Шины с помощью логических и арифметических операторов могут образовывать выражения. Результат арифметической или логической операции с шиной и цифровым сигналом представляется в виде шины с тем же количеством разрядов.

Операнды могут содержать логические константы:

$\`0, \`1, \`F, \`R, \`X, \`Z$ .

Выражения с шинами могут содержать многозначные числа, записанные в виде текстовой строки с указанием системы счисления ( $x$ ,  $h$ ,  $d$ ,  $o$ ,  $b$ ):

$X`3FFFF$

$h`5a$

$d`$

**2.6.4.** Если в процессе моделирования выявлены ошибки, то сообщения о них включаются в файл данных. Программа Probe выводит сообщение об их количестве и предлагает посмотреть их на экране (нажмите для этого кнопку ОК) или пропустить их (Cancel).

Текст сообщения об ошибках содержит:

- Section - номер секции;
- Time - значение момента времени;
- Message-Type – тип сообщения;
- Device - позиционное обозначение компонента.

В строке Minimum Severity выбрать класс просматриваемых сообщений об ошибках:

FATAL – фатальные (моделирование прекращается);

SERIOUS – серьезные;

WARNING – предупреждения;

INFO – информационные.

В графе **Sort by** выбрать принцип сортировки сообщений: по секциям (Section), по моментам времени (Time), по типам (Type), по устройствам (Device).

Нажать кнопку **Plot** для открытия окна с фрагментами временной диаграммы, содержащими выбранную ошибку.

Перечень сообщений об ошибках приведен в конце п. 2.6.5.

**2.6.5.** Если в выбранном режиме проводился **многовариантный анализ** (варьировалась температура или другой параметр, выполнялся статистический анализ по Монте-Карло), выбрать одну или несколько секций из перечня на панели:

**All** – выбор всех секций (режим установки по умолчанию);

**None** (ничего) - после нажатия этой кнопки курсором пометить нужные строки и нажать ОК;

**Cancel** - отмена выбора и возврат в предыдущее меню.

### Команды программы Probe Меню File (Файл)

**Open...** (Ctrl+F12) - открытие нового окна построения графиков и загрузка файла данных с результатами моделирования. Если в файле данных

имеется несколько секций, выбор одной из них производится на панели диалога;

**Append** - добавление к текущему окну данных из файла (при этом загружаются данные из той же секции, которая открыта в текущем окне: DC, AC или Transient);

**Close** - закрытие текущего окна (если данные из текущего файла используются в других окнах, выводится предупреждающее сообщение);

**Print...** (Ctrl+Shift+F12) - вывод твердой копии одного или нескольких активных окон;

**Print Preview** - просмотр размещения графиков перед печатью;

**Page Setup...** - настройка параметров страницы:

- **Margins** - размеры четырех полей в дюймах;
- **Plots Per Page** - количество графиков на странице;
- **Orientation** - горизонтальная (Landscape) или вертикальная (Portrait) ориентации;
- **Cursor** - ориентация расположения;
- **Information** - информации относительно курсора (Top, Bottom, Left, Right, None);
- **Draw Border** - заключение графика в рамку;
- **Draw Plot Title** - вывод заголовка графика;
- **Header and Footer** - вывод текущей даты, времени и номера страницы;
- **Set Default** - сохранение информации **Header and Footer** для установки по умолчанию;
- **Reset Default** - задание типа принтера по умолчанию.

**Printer Setup...** - установка параметров принтера: разрешающая способность, размер бумаги, горизонтальное (Landscape) или вертикальное (Portrait) расположение изображения на бумаге;

**Log Commands...** - включение/выключение режима составления файла протокола команд (расширение имени .cmd);

**Run Commands...** - выполнение файла протокола команд;

Файл 1... - список последних загруженных файлов;

**Exit** (Alt+F4) - завершение работы.

### **Меню Edit (Редактирование)**

**Cut** (Ctrl +X) - удаление выбранного объекта (объектов) из текущего окна. Удаленные объекты заносятся в окно буфера обмена и могут быть

использованы по команде **Past** для переноса из одного окна в другое. Если выбрать курсором имя графика и выполнить команду **Cut** (или **Copy**), то, вставив содержимое буфера обмена в текстовый редактор типа TextEdit или Notepad, получим таблицу отсчетов графика в текстовом виде;

**Copy** (Ctrl+C) - копирование выбранного объекта (объектов) в текущее окно (см. команду **Cut**);

**Past** (Ctrl+V) - размещение одной или нескольких копий содержимого буфера обмена;

**Delete** (Del) - удаление выбранного графика или метки. Проще всего выбрать объект щелчком мыши и удалить нажатием клавиши Del. Для удаления нескольких объектов они выбираются щелчком мыши при нажатой клавише Shift;

**Modify Object...** - разрешение модификации выбранного объекта - имени переменной графика или метки в виде текста или эллипса;

**Modify Title ...** - разрешение модификации заголовка текущего окна.

### Меню Trace (Построение графика)

**Add...** (Insert) - добавление графиков одной или нескольких аналоговых или цифровых переменных в текущее окно. Имена переменных выбираются из списка доступных переменных, помещенных в файл данных. Допускается выполнение математических преобразований;

**Delete All** (Ctrl+Del) - удаление всех графиков текущего окна;

**Undelete** (Ctrl+U) - восстановление удаленных графиков;

**Fourier** - вычисление преобразования Фурье;

**Performance Analysis...** - построение зависимостей целевых функций от варьируемой переменной (если проводился многовариантный анализ) или построение гистограмм (если проводился анализ по методу Монте-Карло). Использование Мастера задания целевых функций (Мастер доступен только при выборе команды **Performance Analysis** через меню, при активизации этой команды щелчком по пиктограмме он недоступен — все операции выполняются вручную);

**End Performance Analysis** - завершение режима **Performance Analysis**;

**Macros...** - определение макрокоманд. Введенные макрокоманды помещаются в файл Msim.prb и выводятся на экран в виде списка, доступного для редактирования;

**Goal Functions** - просмотр и редактирование целевых функций, ввод новых функций, загрузка файлов целевых функций, проведение пробных расчетов;

**Eval Goal Function...** - вычисление целевых функций (или выражений, содержащих целевые функции) одного или нескольких графиков из одной секции файла данных. При необходимости вычислить целевые функции при многовариантном анализе выполняется команда **Performance Analysis**.

### Меню **Plote** (Отображение графиков)

**X Axis Settings...** - задание диапазонов значений по оси  $X$ , выбор линейной или логарифмической шкалы, выполнение преобразования Фурье или построение зависимости от варьируемого параметра:

- **Data Range** - автоматическая установка диапазона значений (Auto Range) или по указанию пользователя (User Defined);
- **Scale** - установка линейной (Linear) или логарифмической (Log) шкалы (при загрузке Probe по оси  $X$  всегда устанавливается логарифмический масштаб);
- **Use Data** - установка диапазона переменных по оси  $X$  для вычисления преобразования Фурье и других функций, таких как  $s(x)$ ,  $AVG(x)$ ,  $RMS(x)$ ,  $MIN(x)$  и  $MAX(x)$  (Restricted), или отмена этого ограничения (Full);
- **Processing Options** - вычисление преобразования Фурье (Fourier), построение гистограмм (если проводился анализ по методу Монте-Карло) или построение зависимостей от варьируемой переменной (Performance Analysis);
- **Axis Variable ...** - выбор переменной, откладываемой по оси  $X$ ;

**Y Axis Settings...** - задание диапазонов значений по оси  $Y$ :

- **Data Range** - диапазон изменения (Auto - выбираемый автоматически, User Defined – назначаемый пользователем);
- **Scale** - установка линейной (Linear) или логарифмической (Log) шкалы (при загрузке Probe по оси  $Y$  устанавливается шкала, соответствующая типу поставленного на схеме маркера);
- **Y Axis Number** - выбор номера оси  $Y$ , на которую наносится текстовое название;
- **Axis Title** - ввод текстового названия, располагаемого вертикально вдоль оси  $Y$  (допускаются символы кириллицы);

**Add Y Axis** (Ctrl+Y) - добавление на график еще одной оси  $Y$ ;

**Delete Y Axis** (Shift+Ctrl+Y) - удаление выбранной оси  $Y$ ;

**Add Plot** - добавление нового окна графиков в верхней части текущего окна;

**Delete Plot** - удаление текущего окна (помеченного символом SEL>>);

**Unsync Plot** - задание собственной оси  $X$  для каждого окна;

**Digital Size...** - размер окна построения временных диаграмм логических устройств:

- **Percentage of Plot to be Digital** - задание размера окна для построения временных диаграмм в процентах (по умолчанию 33%);
- **Length of Digital Trace Name** - длина отображаемого на экране имени цифрового сигнала;
- **AC...** - загрузка данных анализа AC;
- **DC...** - загрузка данных анализа DC;
- **Transient...** - загрузка данных анализа Transient.

### Меню View (Просмотр)

**Fit** (Ctrl+N) - изменение масштаба изображения так, чтобы на полном экране разместились все графики;

**In** (Ctrl+1) - увеличение масштаба изображения в 2 раза (центр поля зрения указывается курсором);

**Out** (Ctrl+0) - уменьшение масштаба изображения в 2 раза (центр поля зрения указывается курсором);

**Area** (Ctrl+A) - вывод на весь экран окаймленной части изображения;

**Previous** (Ctrl+P) - возвращение к предыдущему масштабу изображения;

**Redraw** (Ctrl+L) - перечерчивание экрана;

**Pan-New Center** - расположение схемы симметрично относительно точки расположения курсора без изменения масштаба;

**Toolbar** - отображение пиктограмм инструментов.

### Меню Tools (Инструменты)

**Label** - нанесение на графики текстовых и графических символов:

- **Text** - текст (символы кириллицы не допускаются);
- **Line** - отрезок линии;
- **Poly-line** - линейно-ломаная линия;
- **Arrow** – стрелка;
- **Box** – прямоугольник;
- **Circle** - окружность;
- **Ellips** – эллипс;
- **Mark** - вывод на экран координат точки, помеченной курсором в режиме **Tools/Cursor**.



**Cursor** - выбор координат определенных точек на графиках с помощью электронного курсора:

- **Display** (Ctrl+Shift+C) - включение/выключение режима электронного курсора;
- **Freeze** (Ctrl+Shift+F) - фиксация положения электронных курсоров;
- **Peak** (Ctrl+Shift+P) - перемещение курсора к следующему локальному максимуму на графике;
- **Trough** (Ctrl+Shift+T) - перемещение курсора к следующему локальному минимуму на графике;
- **Slope** (Ctrl+Shift+L) - перемещение курсора к следующей точке с максимальной по модулю производной;
- **Min** (Ctrl+Shift+M) - перемещение курсора к точке с минимальным значением  $Y$ ;
- **Max** (Ctrl+Shift+X) - перемещение курсора к точке с максимальным значением  $Y$ ;
- **Point** (Ctrl+Shift+1) - перемещение курсора к точке следующего отсчета;
- **Search Command** (Ctrl+Shift+S) - ввод одной или нескольких команд поиска;
- **Next Transition** (Ctrl+Shift+N) - перемещение курсора к точке следующего изменения состояния на временной диаграмме;
- **Previous Transition** (Ctrl+Shift+R) - перемещение курсора к точке предыдущего изменения состояния на временной диаграмме.

**Simulation Messages...** - открытие окна с сообщениями программы моделирования;

**Display Control...** - сохранение конфигурации текущего окна программы Probe для последующего построения;

**Copy to Clipboard** - копирование содержания текущего окна в буфер обмена (для переноса графиков в другие программы, например, в Win-Word);

**Options...** - установка дополнительных параметров программы Probe:

- **Mark Data Points** - отображение на графиках точек отсчетов;
- **Display Evaluation** - включение/выключение режима отображения результатов расчета целевых функций в дополнительных окнах;

- **Display Statistics** - включение/выключение режима отображения на экране результатов статистических испытаний;
- **Number of Histogram Divisions** - количество градаций при построении гистограмм;
- **Use Symbols** - разрешение нанесения на графики специальных значков (Auto — при необходимости различить большее количество графиков, Never—никогда, Always — всегда);
- **Trace Color Scheme** - выбор цвета раскраски графиков;
- **Use ScrollBars** - разрешение прокрутки графиков;
- **Auto-Update Interval** - выбор режима обновления графиков;
- **Reset** - установка конфигурации по умолчанию;
- **Save** - сохранение текущей настройки в файле Msim.ini.

### Сообщения об ошибках моделирования

#### Timing violations (Нарушение временных соотношений)

- SETUP (WARNING) - недостаточное время установки;
- HOLD (WARNING) - недостаточное время удерживания;
- RELEASE (WARNING) - недостаточное время нахождения сигнала в неактивном состоянии (обычно необходимого для выполнения контроля типа CLEAR);
- WIDTH (WARNING) - недостаточная длительность импульса сигнала;
- FREQUENCY (WARNING) - частота переключения сигнала находится вне допустимых пределов;
- GENERAL (INFO) - обнаружение ошибки устройством контроля, заданного в секции GENERAL примитива CONSTRAINT с помощью булевских выражений.

#### Hazards (Гонки сигналов)

- AMBIGUITY CONVERGENCE (WARNING) - временная неопределенность, связанная с одновременным поступлением на один вход импульсов совпадающим и нарастающим фронтами;
- CUMULATIVE AMBIGUITY (WARNING) - неопределенности уровней сигналов, связанные с суммированием частично перекрывающихся фронтов импульсов;

**SUPRESSED GLITCH (WARNING)** - длительность импульса входного сигнала меньше минимального значения времени задержки переключения, игнорируемого программой моделирования;

**NET-STATE CONFLICT (WARNING)** - при подаче на один вход одновременно нескольких сигналов различного уровня программа PSpice заменяет его неопределенным сигналом X;

**ZERO-DELAY OSCILLATION (FATAL)** - при изменении логического уровня выходного узла более чем 50 раз за единичный временной дискрет узел считается осциллирующим и моделирование прекращается;

**DIGITAL INPUT VOLTAGE (SERIOUSE)** - предупреждающее сообщение о том, что входной сигнал находится вне допустимого диапазона напряжений. Моделирование продолжается при замене входного напряжения граничным значением;

**PERSISTENT HAZARD (SERIOUSE)** - появление гонок сигналов на внешних портах.

### **3. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭС**

Параметрическая оптимизация ЭС в системе DesignLab выполняется методом наискорейшего спуска. В процессе оптимизации модуль PSpice Optimizer взаимодействует с графическим редактором Schematics, с программой моделирования PSpice и постпроцессором Probe. Критерий оптимизации - обеспечение заданного значения целевой функции при выполнении ряда линейных и нелинейных ограничений. Процесс подготовки и выполнения параметрической оптимизации состоит из следующих шагов.

**3.1. Создать схему оптимизируемого устройства** в среде Schematics. На схеме с помощью символа OPTPARAM из библиотеки Special.slb определить оптимизируемые параметры. Щелчком по заголовку этого символа открыть панель спецификации оптимизируемых параметров и задать следующие величины:

Name - имя параметра;

Initial Value - начальное значение;

Current Value - текущее значение (вводится либо начальное значение, либо текущее, либо оба);

Lower Limit - нижняя граница изменения параметра;

Upper Limit - верхняя граница изменения параметра;

Tolerance - допуск стандартизованного ряда значений параметров, используемый при округлении значений параметров, в процентах.

Нажатие кнопки **Add Param** добавляет введенные значения к списку параметров. После ввода последнего параметра нажимается кнопка **Save Param** для их сохранения.

Определенные таким образом параметры должны быть использованы для обозначения параметров компонентов схемы и их моделей (сопротивлений резисторов, параметров транзисторов и т. п.)

Далее в меню **Analysis** по команде **Setup** (или щелчком по пиктограмме) открывают диалоговое окно для задания вида анализа и диапазона изменения текущей переменной (частоты, времени, источника постоянного напряжения или глобального параметра).

**3.2. Задать критерий оптимизации** непосредственно в программе PSpice Optimizer, которая вызывается из меню **Tools** программы Schematics по команде **Run Optimizer** (программа Pspice Optimizer может быть также загружена автономно щелчком по пиктограмме для создания или редактирования файла задания на оптимизацию .opt).

В правой верхней части этого окна помещен список значений функций, которые могут быть целевыми функциями или ограничениями (раздел Specifications), в нижней – перечень варьируемых параметров (раздел Parameters).

Значения целевых функций рассчитываются с помощью программы Probe . Они задаются следующим образом:

- Как целевые функции Goal Function программы Probe , записанные в файл с расширением имени .prb;
- Как выражения, заданные в программе Pspice Optimizer.

Целевые функции программы Probe позволяют рассчитать минимум или максимум функции, расстояние между выделенными точками, центральную частоту, полосу пропускания и т.п. (стандартные целевые функции размещены в файле Msim.prb) .

В выражениях программы Pspice Optimizer разрешается использовать математические операции и функции: арифметические, тригонометрические и др.

По команде **Parameters** меню **Edit** открывается окно со списками спецификаций функций. Нажатием кнопки **Add** открывается меню спецификации новой функции. Это же окно открывается щелчком по имени функции из списка. В окно спецификации вводятся следующие данные:

*Name* - имя функции;

*Enabled* - включение режима расчета функций на следующей итерации;

*Reference* - выбор между внутренней спецификацией (Internal), задаваемой в диалоговом окне, внешней (External), адресуемой к имени файла данных;

*Weight* - весовой коэффициент целевой функции (с его помощью устанавливается важность каждой целевой функции и учитываются различия их абсолютных значений).

#### **Внутренняя спецификация задается параметрами:**

*Target* - желаемое значение функции;

*Range* - ширина допустимого диапазона значений функции;

*Constraint* - включение/выключение режима учета ограничений. Если режим *Constraint* включен, задаваемая в этом окне функция является ограничением, в противоположном случае - целевой функцией;

*Type* - тип ограничения: =target – равно, >=target - больше или равно, <=target - меньше или равно заданному значению функции.

#### **Внешняя спецификация задается параметрами:**

*File* - имя файла данных, содержащего значения функции;

*X Column Name* - заголовок столбца данных, содержащего значения отчетов переменной *X*;

*Y Column Name* - заголовок столбца данных, содержащего значения отчетов переменной *Y*;

*Tolerance* - класс допуска при округлении результатов вычислений до стандартных значений.

#### **Остальные параметры имеют следующий смысл:**

*Analysis* - выбор вида анализа (AC, DC или Tran);

*Circuit File* - имя файла схемы, к которому обращаются при моделировании (если оно не указано, то математические выражения вычисляются непосредственно);

*Probe File Containing Goal Functions* (.prb) - имя файла целевых функций для программы Probe (расширение имени по умолчанию .prb);

*Evaluate* - спецификация математического выражения для функции. В нее могут входить имена переменных, Goal Function и любых параметров.

*Замечание.* Обратите внимание, что для разных целевых функций можно задавать разные виды анализа и даже разные имена схем. Например, при оптимизации фильтра можно в режиме AC контролировать его резонансную частоту, а в режиме Tran - величину выброса в переходном процессе.

## **Команды программы PSpice Optimizer**

### **Меню File (Файл)**

**New** – очистка рабочего окна для создания нового файла задания на оптимизацию .opt;

**Open** – открытие (загрузка) существующего файла задания на оптимизацию;

**Save** – сохранение внесенных изменений в текущем файле;

**Save As...** – сохранение внесенных изменений в новом файле, имя которого указывается по дополнительному запросу;

**Report** – создание текстового файла отчета об оптимизации (.oot);

**Exit** – завершение работы;

Файл 1,... - список последних четырех загруженных файлов.

### **Меню Edit (Редактирование)**

**Parameters...** - редактирование списка целевых функций и ограничений;

**Specifications...** - редактирование спецификаций целевых функций и ограничений;

**Store Values** – копирование текущих значений в качестве начальных значений спецификаций и параметров;

**Reset Values** – копирование начальных значений в качестве текущих значений;

**Round Nearest** – замена значения каждого параметра, соответствующего номиналу компонента, ближайшим стандартным значением (погрешность округления задается параметром Tolerance);

**Round Calculated** – замена значения каждого параметра ближайшим стандартным значением, если новые значения целевых функций находятся в заданных пределах (расчет проводится на основе производных без повторения моделирования);

**Update Schematic** – перенос на схему оптимальных значений параметров.

### **Меню Tune (Настройка)**

**Update Performance** – расчет характеристик схемы для начальных и текущих значений каждого параметра;

**Update Derivatives** – вычисление чувствительности каждой целевой функции к изменению каждого параметра;

**Show Derivatives** – отображение матрицы чувствительностей;

**Auto** – управление процессом оптимизации в автоматическом режиме;

**Start** – начало оптимизации;

**Terminate** – прекращение оптимизации.

### **Меню Options (Параметры)**

**Defaults...** - установка параметров оптимизации:

- **Delta** - относительное приращение параметров для расчета производных, в процентах;

- **Max. Iterations** - максимальное количество итераций в процессе оптимизации;
- **Probe File** - задание имени файла целевых функций .prb для программы Probe;
- **Display** - имя конфигурации дисплея программы Probe, предварительно сохраненной по команде **Tools/Display Configuration**.
- **Advanced Options** - дополнительные параметры:
- **Cutback** - минимальная доля внутреннего шага изменения параметров;
- **Threshold** - минимальный шаг изменения параметров;
- **One Goal** - выбор метода минимизации при задании значения функции в одной точке.

*Recalculate...* - режим расчета новых значений параметров и функций:

- **Auto** – автоматическое обновление результатов;
- **Manual** – расчет параметров после нажатия кнопки **Parameters**, целевых функций – кнопки **Results**.

## 4. МОДЕЛИ АНАЛОГОВЫХ И ЦИФРОВЫХ КОМПОНЕНТОВ

### 4.1. Модели аналоговых компонентов

Компоненты, входящие в электрическую схему проекта, имеют атрибуты со строго определенными именами, которые определены для схемного редактора Schematics [1, п. 4.2]. Среди них атрибут **TEMPLATE** – это шаблон для назначения соответствий графических обозначений выводов компонента с их реальным физическим смыслом, что необходимо для правильного составления списка соединений (например, для транзистора необходимо указать, какие выводы на его графическом обозначении соответствуют коллектору, базе и эмиттеру).

В задании на моделирование для симулятора PSpice каждый компонент описывается в строке, в ней в определенном порядке перечисляются имена цепей, к которым подключаются выводы компонента. В частности, выводы биполярного транзистора должны быть перечислены в порядке коллектор – база – эмиттер.

Кроме того, в шаблоне задается математическая модель (**MODEL**) компонента. В библиотеках САПР DesignLab содержатся описания математических моделей (расширения имени .lib) для около 10 тысяч компо-

нентов. ММ имеют структуру и описываются параметрами, имеющими некоторые значения по умолчанию. Эти значения можно менять в соответствии с паспортными данными реальных компонентов.

Параметры компонентов задаются двумя способами.

1. Непосредственно в предложении, описывающем включение компонента в схему. Например, резистор R9, подключенный к цепям 15 и 0 и имеющий сопротивление 2 КОм, можно описать предложением:

R9 15 0 2 K

Аналогично для конденсатора:

C1 15 0 56 pF

2. С помощью директивы MODEL, например:

R12 30 RTEMP 5K

.MODEL RTEMP RES (DEV = 5% TC1 = 0.01)

Здесь:

RTEMP – имя модели;

DEV – допуск;

TC1 – линейный температурный коэффициент сопротивления.

После имени модели может помещаться ключевое слово АКО (A Kind Of) и ссылка на имя модели прототипа, что позволяет указывать только значения различающихся параметров.

В директиве MODEL в круглых скобках указывается список значений параметров модели компонента. Если этот список отсутствует или неполный, то отсутствующие значения параметров модели назначаются по умолчанию.

Для полупроводниковых диодов используется схема замещения, которая состоит из идеального диода, представленного в виде зависимого источника тока  $I(V)$ , емкости  $p$ - $n$ -перехода  $C$  и объемного сопротивления  $RS$ .

Пример описания модели диода D104A имеет вид:

```
.model D104A D (IS=5.81 e-12 RS=8.1 N=1.15 TT=8.28 ns  
+ CJO=41.2 pF VJ=0.71 M=0.33 FC=0.5 EG=1.11 XTI=3),
```

где IS – ток насыщения при температуре 27<sup>0</sup>С;

RS – объемное сопротивление;

N – коэффициент инжекции;

TT – время переноса заряда;

CJO – барьерная емкость при нулевом смещении;

VJ – контактная разность потенциалов;

M – коэффициент лавинного умножения;

FC – коэффициент нелинейности барьерной емкости прямосмещенного перехода;

EG – ширина запрещенной зоны в эВ;



ХТІ – температурный коэффициент тока насыщения.

Биполярные транзисторы в симуляторе PSpice описываются встроенной адаптированной моделью Гуммеля - Пуна, которая по сравнению с исходной моделью позволяет учесть эффекты, возникающие при больших смещения на переходах. Эта модель автоматически упрощается до более простой модели Эберса - Молла, если опустить некоторые параметры.

Полевые транзисторы с управляющим *p-n*-переходом (Junction FET) описываются моделью Шихмана - Ходжеса.

МОП-транзисторы (MOSFET) описываются шестью разными системами уравнений, выбор которых определяется параметром LEVEL, принимающим значения от 0 до 6. На практике чаще всего используется не дающая высокой точности модель первого уровня (LEVEL=1). Эта модель используется в тех случаях, когда не предъявляются высокие требования к точности моделирования вольт-амперных характеристик транзистора, в частности при моделировании МОП-транзистора с коротким или узким каналом.

#### **Достоинства и недостатки этой модели:**

- наименьшее время вычисления из всех моделей благодаря простоте уравнений;
- не учитывается зависимость подвижности носителей от электрического поля;
- не рассматривается подпороговый режим;
- не учитывается зависимость порогового напряжения от размеров затвора и д.р.;
- все емкости рассчитываются упрощенно;
- не учитывается неоднородность легирования.

Модель LEVEL=2 основывается на более точных теоретических построениях, однако ряд ее параметров трудно оценить по экспериментальным данным. Модель достаточно сложна, требует больших затрат на моделирование, и возникают проблемы сходимости метода Ньютона-Рафсона при расчете режима по постоянному току.

Полуэмпирическая модель LEVEL=3 требует меньших вычислительных затрат, и ее рекомендуется использовать для практических расчетов мощных вертикальных МОП-транзисторов с коротким каналом. Ее недостаток состоит в сложности оценки параметров ММ по экспериментальным данным (но все равно это проще, чем для модели LEVEL=2).

Модель LEVEL=4 (BSIM1) основана на физике работы транзисторов с малыми размерами и рассчитана на получение параметров моделей изготовленных образцов с помощью специальной программы идентифика-

ции, управляющей работой тестера полупроводниковых приборов.

Модели LEVEL=5 и 6 (BSIM3) более точно описывают субмикронные МОП-транзисторы и непрерывно модифицируются. Из них модель LEVEL=6 предпочтительнее.

Математические модели операционных усилителей (ОУ) в отличие от встроенных ММ диодов и транзисторов представлены в виде макромоделей (подсхем), которые описываются на входном языке программы Pspice с помощью директивы .SUBCKT. В этой модели из реальной схемы ОУ исключены все транзисторы, кроме 2-х транзисторов входного дифференциального каскада, что повышает скорость моделирования за счет некоторого снижения точности. Параметры этой модели рассчитываются с помощью программы Parts по паспортным данным ОУ.

Компараторы напряжения представлены в симуляторе Pspice также с помощью макромоделей.

## 4.2. Программа расчета параметров моделей компонентов Parts

Программа Parts рассчитывает по паспортным данным параметры моделей полупроводниковых приборов (диодов, биполярных, полевых, статически индукционных биполярных транзисторов и мощных МОП-транзисторов), макромоделей операционных усилителей, компараторов напряжения, регуляторов напряжения и моделей магнитных сердечников.

Математические модели компонентов записываются в библиотечные файлы с расширением имени \*.lib. При желании можно составить файлы отдельных моделей, имеющие расширение имени \*.mob. Помимо ввода параметров математических моделей в файлы \*.lib, программа Parts заносит их также в протокол ввода паспортных данных, так что при уточнении отдельных параметров нет необходимости вводить все паспортные данные. В файлах отлаженных библиотек протокол паспортных данных обычно удаляется, чтобы уменьшить объем файлов и сделать их удобочитаемыми.

Программа Parts вызывается щелчком мыши по одноименной пиктограмме. Она управляется с помощью команд ниспадающего меню. Кроме того, имеется набор пиктограмм для быстрого вызова наиболее употребляемых подкоманд. Краткое описание команд программы Parts приведено ниже.

### Меню File (Файл)

**Open/Create** (Ctrl+O) – загрузка/создание файла библиотеки моделей для последующего редактирования;

**Save Library** (Ctrl+S) – сохранение внесенных изменений в текущей библиотеке;

**Save AS Library...** – сохранение внесенных изменений в новом библиотечном файле, имя которого указывается по дополнительному запросу;

**Print** (Ctrl+P) – печать графиков одного или нескольких окон;

**Print Select...** – выбор типа принтера;

**Log Commands...** – включение/выключение режима составления файла протокола команд (расширение имени \*.cmd);

**Page Setup...** – настройка параметров страницы;

**Run Commands...** – выполнение файла протокола команд;

**Exit** (Alt+F4) – завершение работы с графическим редактором;

Файл 1... – список последних четырех загруженных файлов.

### **Меню Edit (Редактирование)**

**Cut** (Ctrl+X, Del) – удаление одного из дополнительных графиков (для выбора графика курсором отмечается его имя);

**Parameter** (Ctrl+R, двойной щелчок по имени параметра) – редактирование выбранного параметра модели (параметры расположены в правом списке основного окна). Возможно задание диапазона допустимых значений параметра (**Upper, Lower**). Щелчок по панели **Freez current value from extraction** не позволяет изменить введенное значение параметра в процессе обработки паспортных данных;

**Spec** (Ctrl+Q, двойной щелчок по названию спецификации) – редактирование выбранной спецификации паспортных данных компонента (расположены в левом списке основного окна).

### **Меню Part (Компонент)**

**New...** - создание новой модели компонента: указывается имя модели на строке **Part Name** и выбирается из списка **Select Part Type**;

**Copy...**(Ctrl+C) - копирование параметров существующей модели из выбранной библиотеки под новым именем в текущую библиотеку;

**Get...**(Ctrl+G) - загрузка параметров выбранной модели из текущей библиотеки;

**IBIS transistor...**(Ctrl+B) - трансляция модели формата IBIS (из файла с расширением имени .ibs) в формат Pspice;

**Export...** - запись параметров текущей модели в отдельный текстовый файл .mod;

**Import...** - импортирование в файл текущей библиотеки .lib текстового файла .mod.

### **Меню Trace (Построение графика)**

**Add...**(Ctrl+T) - добавление графика в текущем окне. По умолчанию

предлагается построить график при другом значении температуры. Имя варьируемого параметра изменяется по команде **Plot/X Axis Settings/Trace Variable**.

### **Меню Plot (Отображение графиков)**

**Display** (Ctrl+D) - построение графика, соответствующего выбранной спецификации.

**X Axis Settings...** (Ctrl+Z) - задание диапазонов значений по оси X:

- **Data Range** – диапазон изменения (Auto – выбираемый автоматически, User Defined – назначаемый пользователем);
- **Linear/Log** – линейная/логарифмическая шкала;
- **Trace Variable** – выбор имени независимой переменной.

**Y Axis Settings...** (Ctrl+Y). Задание диапазонов значений по оси Y:

- **Data Range** – диапазон изменения (Auto – выбираемый автоматически, User Defined – назначаемый пользователем);
- **Linear/Log** – линейная/логарифмическая шкала.

### **Меню View (Просмотр)**

**Fit** (F) - изменение масштаба изображения так, чтобы на полном экране разместились все имеющиеся на схеме компоненты, проводники и соединители;

**In** (I) - увеличение масштаба изображения (центр поля зрения указывается курсором). Степень увеличения назначается с помощью параметра ZOOMFACTOR в файле msim.ini;

**Out** (O) - уменьшение масштаба (центр поля зрения указывается курсором);

**Area** (A) - вывод на весь экран окаймленной части изображения;

**Previous** (P) - возвращение к предыдущему масштабу изображения;

**Redraw** (L) - перечерчивание экрана;

**Pan-New Center** - расположение схемы симметрично относительно точки расположения курсора без изменения масштаба;

**Toolbar** - выключение/включение линейки пиктограмм.

### **Меню Extract (Расчет параметров)**

**Parameters** (Ctrl+E) - расчет параметров математической модели на основании введенных паспортных данных.

### **Меню Options (Параметры конфигурации)**

**Symbol Creation Setup...** - автоматическое создание символов компонентов после составления математической модели:

- **Always Create Symbol** – включение/выключение режима символов;
- **Save Symbol to Symbol library path same as model library** –

сохранение символов в библиотеке, располагаемой в том же каталоге, что и библиотека моделей, и с тем же именем;

- **User-defined symbol library** – задание имени библиотеки символов;
- **Based symbols on MicroSim's default symbol or an existing symbol library** – использование стандартной графики символа или копирование ее из существующей библиотеки.

Поясним принцип работы с Parts на примере создания модели диода. Сначала по команде **File/Open/Create Library** указывается имя файла библиотеки моделей диодов (если такого файла не существует, то создается новый файл с расширением имени .lib). Далее по команде **Part/New** (или выбором пиктограммы) вводится имя модели диода и в предлагаемом списке типов моделей указывается его тип DIODE. Доступны следующие типы моделей:

- BJT (NPN, PNP) – биполярные  $n - p - n$  и  $p - n - p$  транзисторы;
- CORE – магнитный сердечник;
- DIODE – диод;
- IGBT (N-CHANNEL) – статически индуцированный биполярный транзистор;
- JFET (N-, P-CHANNEL) – полевые транзисторы с каналами  $n$ - и  $p$ -типа;
- OPAMP – операционный усилитель;
- POWER MOSFET (NMOS, PMOS) – мощные МОП-транзисторы с каналами  $n$ - и  $p$ -типа;
- VOLT. COMPARATOR – компаратор напряжения;
- VOLT. REFERENCE – стабилизатор напряжения;
- VOLT. REGULATOR – регулятор напряжения.

К введенному в панели **Name** имени встроенной модели программа добавляет префикс в соответствии с типом модели: к имени диода – букву *D*, биполярного транзистора – *Q*, полевого транзистора – *J*, МОП-транзистора – *M*, статически индуцированного биполярного транзистора – *Z*, магнитного сердечника – *K*. Например, если ввести имя модели 522A, то программа Parts присоединит к нему префикс *D* и в библиотеку будет занесена модель D522A. К именам макромоделей, к которым относятся операционные ускорители, компараторы, регуляторы и стабилизаторы напряжения, префикс не прибавляется.

После ввода имени и типа модели на экран выводится список пара-

метров модели. В левой части экрана приведен перечень спецификаций паспортных данных, в правой – перечень параметров математической модели, рассчитанной на основе введенных паспортных данных. Первоначально всем параметрам модели присваиваются значения по умолчанию.

Паспортные данные вводятся порциями, характеризующими различные режимы работы компонентов. Перечень этих режимов приведен в окне **Model Spec**. В расположенном справа окне **Parameters** приведен список параметров математической модели компонента. Параметры, которые оцениваются в каждом конкретном режиме, помечают звездочками «\*». Выбор курсором одной из строк в окне **Model Spec** открывает экран ввода данных. Эти данные вводятся в двух режимах:

1. Ввод координат отдельных точек характеристик, например ВАХ диода, зависимости барьерной емкости  $p$ - $n$ -перехода от напряжения смещения и т.п. При вводе данных можно пользоваться масштабными множителями. На экране одновременно помещаются координаты 10 точек; если их больше, то появляется линейка прокрутки. Координаты новой точки вводятся по команде **Add**. Эти данные рекомендуется вводить в порядке возрастания независимой переменной. Ввод точек завершается командой **OK**. По команде **Plot/Display** (или выбором пиктограммы) на экране вычерчивается аппроксимирующая функция и значками отмечаются введенные точки, на основании которых она построена;

2. Ввод значений отдельных параметров устройства.

На основании порции введенных данных по команде **Extract/Parameters** (или после выбора пиктограммы) рассчитываются ряд параметров математической модели, значения которых отображаются в окне **Parameters**. Редактирование значения отдельных параметров математической модели выполняется после двойного щелчка по его имени. По команде **Plot/Display** (или выбором пиктограммы) на экране высвечивается график соответствующей характеристики. Переход из режима отображения графиков в режим ввода параметров выполняется по команде **Window/ Close** или нажатием на кнопку.

По команде **Trace/Add** возможно построить семейство характеристик при вариации температуры или других параметров модели. По умолчанию предлагается построить графики характеристик при изменении температуры. Имя варьируемой переменной изменяется по команде **Plot/X Axis Settings/Trace Variable**. Например, для диодов возможна вариация параметров IS, N, RS, IKF, EG и XTI.

Построение модели завершается командой записи обновленных данных в библиотечный файл **File/Save Library**.

### 4.3. Модели цифровых компонентов

Начиная с версии 4, симулятор PSpice обеспечивает принципиально новую возможность моделирования произвольных смешанных аналогово-цифровых схем с обратными связями.

В частности схема может быть чисто цифровой и не содержать аналоговых подсхем.

Обычно смешанные схемы моделируются в режиме TRAN (расчет переходных процессов), но другие виды анализа также доступны.

Реальная цифровая ИС представляется в программе PSpice тремя составляющими:

- примитив (логика), отражающий функционирование ИС на логическом уровне;
- аналого-цифровой А/Ц интерфейс, отображающий входной каскад;
- цифро-аналоговый Ц/А интерфейс, отображающий выходной каскад.

Причем в задании на моделирование указывается только примитив цифровых устройств.

Устройства интерфейса выполняют две функции.

Во-первых, с их помощью при моделировании электрических процессов в аналоговой части цепи задаются схемы замещения входных и выходных каскадов, соединенных непосредственно с аналоговыми компонентами.

Во-вторых, они обеспечивают преобразование электрического напряжения в логический уровень и наоборот, чтобы обеспечить обмен данными между подпрограммами моделирования электрических процессов в аналоговой части схемы и логического моделирования цифровой части.

Если аналоговые и цифровые компоненты взаимодействуют в процессе моделирования, устройства интерфейса включаются автоматически. Для этого предварительно в библиотеки цифровых компонентов включаются ассоциируемые с компонентом модели цифровых устройств интерфейсов, оформленные в виде макромоделей.

При включении устройства интерфейса программа PSpice расщепляет соответствующий узел (электрическую цепь) и создает новый цифровой узел, который характеризуется уже только логическим состоянием.

Перечень этих новых узлов помещается в выходном файле \*.out в разделе **Generated A to D and D to A**.

Итак, каждому реальному цифровому компоненту в программе PSpice ставятся в соответствие:

- 1) два устройства интерфейса для сопряжения с аналоговыми

устройствами, которые могут подключиться к его входу и выходу, названные нами для краткости интерфейсами Ц/А и А/Ц; они осуществляют обмен данными между подпрограммами моделирования аналоговых и цифровых устройств программы Pspice;

2) модели вход/выход, отображающие его входные и выходные комплексные сопротивления;

3) модели динамики, учитывающие запаздывания сигналов. Модели цифровых компонентов и ассоциируемые с ними соответствующие модели помещаются в специальные библиотеки.

Логические уровни цифровых узлов принимают одно из шести значений:

*I* – высокий уровень;

*O* – низкий уровень;

*R* – положительный фронт (Raise, переход из состояния «0» в «1»);

*F* – отрицательный фронт (Fall, переход из состояния «1» в «0»);

*X* – неопределенное состояние (может принимать значение «0», «1», промежуточное или нестабильное состояние);

*Z* – состояние высокого выходного сопротивления (логический уровень может быть высоким, низким, промежуточным или нестабильным).

При вычислении логических уровней узлов, к которым подключено несколько цифровых компонентов, принимаются во внимание выходные сопротивления источников сигналов.

Если цифровые ИС соединяются непосредственно друг с другом, то устройства интерфейсов игнорируются.

Описание цифрового компонента (примитива), включенного в схему, состоит из частей:

- тип логического устройства (например AND);
- список параметров в круглых скобках (например, количество входов для схемы И);
- список узлов (цепей) подключения в схеме;
- модель динамики (VUGATE – стандартный вентиль);
- модель вход/выход (UIO).

Запаздывание сигнала в примитивах цифровых устройств определяется в двух моделях: динамики и вход/выход. Этими двумя моделями определяются задержки сигнала в цифровых примитивах.

Модель динамики определяет задержки распространения и такие временные ограничения, как время установки (setup) и удерживания (hold).

Модель вход/выход задает входные и выходные сопротивления, емкости и время переключения.



Когда выход примитива соединяется с другим примитивом, общее время задержки распространения первого примитива равно сумме времени установления напряжения на его нагрузке и времени распространения сигнала, указанного в модели динамики. Время установления напряжения на нагрузке (loading delay) рассчитывается по формуле:

$$\tau_{\text{нагр}}=0,69R_{\text{вых}}C_{\text{нагр}},$$

где  $R_{\text{вых}}$  – выходное сопротивление устройства, равное  $DRVH$  или  $DRVL$  в зависимости от логического уровня на выходе;  $C_{\text{нагр}}$  – сумма входных и выходных емкостей цифровых устройств  $INLD$ ,  $OUTLD$ , подключенных к данному выводу.

Когда цифровой примитив подключен к аналоговому устройству, задержка распространения уменьшается на величину, равную времени переключения, заданного в модели вход/выход.

Минимальная длительность сигнала на входе цифрового примитива, необходимая для изменения его логического состояния, должна превышать время задержки, приведенное в модели динамики (это ограничение не относится к цифровым линиям задержки). Более короткие входные импульсы не вызовут на выходе никакого эффекта.

## 5. АНАЛИЗ ЦЕЛОСТНОСТИ СИГНАЛОВ

Термин «целостность сигналов» означает способность сигнала генерировать корректный отклик в электрической схеме [15]. Цифровой сигнал с хорошей целостностью достигает нужного уровня в течение заданного времени в заданной точке схемы.

Нарушение целостности сигнала проявляется в следующем:

1. Задержка сигнала между выводами может оказаться больше допустимой. Под задержкой понимают промежуток времени между моментом изменения сигнала в источнике и соответствующим изменением сигнала в приемнике. Факт изменения уровня констатируется по пересечению фронтом порогового значения, равного половине напряжения питания.

2. Дребезг - ложное срабатывание пороговых устройств.

3. Сбой (срыв) синхронизации, проявляющийся в случае пересечения порогового уровня фронтом синхроимпульса раньше или позже заданного момента времени.

4. Гонки сигналов, заключающиеся в том, что сигналы, проходящие в один и тот же момент времени, на выходах схемы (или в промежуточных точках) имеют недопустимо большое временное рассогласование.

5. Электрический пробой ЭРЭ.

Проявления нарушений целостности сигналов характеризуются изменением временных параметров сигналов:

1. Затягивание фронтов сигнала, количественно определенное скоростью нарастания сигнала, то есть временем нарастания между верхним и нижним заданным уровнем.

2. «Звон» цепи, то есть затухающие колебания в цепи. Время, необходимое для полного затухания паразитных колебаний или ослабления их амплитуды до заданного уровня, называют временем установления сигнала. Первый импульс этих колебаний, направленный вверх на переднем (нарастающем) фронте и вниз на заднем (спадающем) фронте, называют положительным выбросом импульса (overshoot). Аналогично определяется отрицательный выброс импульса (undershoot).

Причины изменения целостности сигналов следующие:

1. Реактивные паразитные распределенные параметры (емкости, индуктивности) линий передач, приводящие к уменьшению скорости нарастания сигнала и его задержке.

2. Перекрестные искажения, заключающиеся в электромагнитном взаимодействии сигналов в двух различных электрических цепях. Одно из них – «агрессор» – является источником помех, а другое – «жертва» – принимает наведенную помеху. Как правило, обе цепи являются жертвой и агрессором по отношению друг к другу.

3. Отражение - явление возникновения эхо-сигналов в электрических цепях. Некоторая часть мощности сигнала попадает из сигнала через линию передачи в нагрузку, другая часть отражается и возвращается в линию. Степень отражения зависит от соотношения сопротивления нагрузки и импеданса линии передачи. В случае совпадения нагрузки импеданса линии отражение отсутствует, такой случай называется режимом идеального согласования или согласованным режимом.

4. Электромагнитные помехи (EMI) - результат проявления эффектов излучения электромагнитных волн различными линиями передач сигналов, такими как кабели, проводники на платах и выводы компонентов. Все печатные платы, интегральные схемы и кабели в той или иной степени излучают электромагнитные волны в эфир и наоборот являются чувствительными к внешним помехам. Максимальные уровни излучения на различных частотах регламентируются соответствующими правительственными органами.

Анализ целостности сигналов (SIA - Signal Integrity Analysis) заключается в оценке влияния конструкции спроектированной печатной платы и конструкции блока на электрические характеристики ЭС. Оценка этого влияния предполагает три этапа, в которых этапы схематического моде-

лирования и разработки технологии печатной платы разделены:

1. Моделирование электронной схемы без учета паразитных эффектов реальной печатной платы (предтопологический этап проектирования).
2. Разработка конструкции печатной платы.
3. Повторное моделирование ЭС с учетом конструктивных параметров платы (и, возможно, корпуса) и паразитных эффектов ее элементов (посттопологический этап проектирования).

Рассмотрим этот этап на примере программного модуля Signal Integrity, входящего в состав системы Protel 99 SE [15]. Аналогичный модуль имеется и в системе PCAD 2001.

В этой программе все сигналы проводников представляются в виде отрезков линий передач, для которых имеются соответствующие математические модели.

Электронные компоненты заменяются IBIS-моделями (Input/Output Buffer Information Specification) по стандарту EIA/ANSI для описания входных и выходных буферов (комплексных сопротивлений) цифровых ИС. В этом случае устройство характеризуется кривой переходного процесса, а по постоянному току – вольт-амперной характеристикой.

Согласно этому стандарту резисторы, конденсаторы индуктивности считаются идеальными элементами, разъемы заменяются линиями передачи, а диоды и транзисторы - PSpice-моделями. Все эти модели хранятся во встроенной библиотеке и автоматически подключаются к проекту.

В начале сеанса моделирования задаются параметры конфигурации:

- система единиц;
- максимальное расстояние между параллельными проводниками, для которых рассчитываются взаимные связи;
- минимальная длина проводника, который принимается во внимание при расчете взаимных наводок.

Затем выбирается метод численного интегрирования системы обыкновенных дифференциальных уравнений (метод трапеций и методы Гира трех типов) и задаются параметры алгоритмов численного интегрирования.

Следующий шаг – выбор цепей, для которых следует выполнить анализ целостности сигналов. Все цепи проекта выбирать нецелесообразно из-за больших затрат времени на анализ.

Затем необходимо загрузить информацию о стеке слоев печатной платы: тип и толщина диэлектрика, относительная диэлектрическая проницаемость, толщина слоя металлизации.

Настройка конфигурации завершается самой сложной операцией – указанием типов компонентов, их номинальных значений и IBIS-моделей.

Затем выбирается тип тестового сигнала (например: одиночный переменный импульс, периодическая последовательность импульсов или постоянное напряжение). Источники тестовых сигналов автоматически подключаются ко всем выводам компонентов, имеющих тип буфера Out.

Результаты анализа отображаются в окне просмотра формы сигнала или его спектра. Расчет формы сигнала выполняется в узлах каждого проводника с учетом отражений от нагрузок. Программа позволяет также производить анализ перекрестных искажений.

Замечательное свойство системы Protel 99 SE – функция анализа целостности сигналов на уровне проверки правил проектирования (DRC), например, таких:

- максимально допустимое время задержки заднего (или переднего) фронта сигнала;

- минимально допустимое значение напряжения сигнала высокого уровня;

- минимально и максимально допустимый импеданс цепи и ряд других правил.

В ходе проверки правил формируется список нарушений (наихудший случай). Далее следует уточнить место, где возникло нарушение, для этого следует запустить программу анализа целостности сигнала, выбрав упомянутую в списке цепь. Затем, возможно, внести изменение в конструкцию (например, изменив ширину проводника данной цепи).

Другая программа анализа целостности сигнала Polaris, включенная в состав системы DesignLab, оказалась несовместимой с графическим редактором PCBboards, поэтому ее использование требует некоторых преобразований проекта [2].

Еще одним примером программ, предназначенных для пред- и посттопологического моделирования высокоскоростных печатных плат и многокристальных модулей (MCM), служат программные продукты HyperLynx компании Innoveda.

Эти продукты ориентированы, главным образом, на пользователя системы Power PCB (ранее известной как САПР PADS) [15]. Исследование паразитных эффектов с помощью программ HyperLynx помимо выше сказанного может проводиться с помощью сценариев «что, если», когда можно варьировать различные параметры, например, зазор между проводниками, длину проводников, свойства материалов и др. и получать результаты анализа.

Более того, имеется возможность построения пользовательской экспертной системы, призванной генерировать рекомендации по устранению обнаруженных нарушений на основе общепринятой практики и/или корпоративных знаний.

## **6. УЧЕБНЫЕ ЗАДАНИЯ**

### **6.1. Подготовка к лабораторным работам**

При подготовке к лабораторным работам необходимо изучить настоящий практикум и соответствующие разделы из конспекта лекций, ознакомиться с рекомендуемой литературой, составить краткий план действий в процессе подготовки и выполнения моделирования заданного преподавателем узла ЭС, подготовить входные данные. Разобраться с работой этого узла ЭС и определить, предполагаемые результаты моделирования.

### **6. 2. Перечень заданий к лабораторным работам и курсовому проектированию**

Приведенные ниже задания имеют разную сложность. На основании имеющегося опыта использования САПР DesignLab в учебном процессе, рекомендуется следующая методика выполнения заданий. Сначала следует выполнить задания 6.2.1 и 6.2.2, предписывающие выполнить весь маршрут моделирования для предельно простых цифровой и аналоговой схем. И только затем переходить к более сложным заданиям.

6.2.1. Выполнить покрытие заданной преподавателем функциональной схемы цифрового узла ЭС заданным набором (серией) ИС. Индивидуализация заданий заключается в следующем: для каждого студента или бригады (не более двух человек) выдается функциональная схема узла ЭС.

6.2.2. Выполнить логическое моделирование простейшего цифрового узла ЭС, содержащего одну ИС малой степени интеграции (например, 555ЛА3) и один соединитель с небольшим числом контактов.

6.2.3. Выполнить схемотехническое моделирование во временной области простейшего аналогового узла ЭС, содержащего компоненты: резистор, конденсатор и соединитель с небольшим числом контактов. По указанию преподавателя это может быть дифференцирующая или интегрирующая цепочка. Параметры компонентов задает также преподаватель.

6.2.4. Выполнить цифровое моделирование заданного преподавателем узла ЭС (например, сумматора, счетчика, дешифратора и т.д.) с использованием библиотечных элементов, имеющихся в библиотеках САПР DesignLab.

6.2.5. Выполнить схемотехническое моделирование заданного преподавателем аналогового узла ЭС (например, усилителя низкой частоты).

ты, фильтра, модулятора и т. п. ). Виды анализа (во временной или частотной области или др.) задаются также преподавателем.

6.2.6. Подготовить библиотеку элементов для заданного проекта. Для этого определить западные аналоги отечественных элементов проекта. Найти эти аналоги в библиотеках элементов системы DesingLab и скопировать их в директорию, предназначенную студентам для данного проекта. Затем путем редактирования преобразовать их в описания отечественных элементов в соответствии с ЕСКД. Математические модели элементов оставить без изменения.

6.2.7. Выполнить задание 6.2.4 с использованием собственной библиотеки элементов.

6.2.8. Выполнить задание 6.2.5 с использованием собственной библиотеки элементов.

### **6.3. Перечень заданий на УИРС**

6.3.1. Провести исследование узла ЭС путем многовариантного анализа заданного вида.

6.3.2. Выполнить параметрическую оптимизацию заданного узла ЭС с использованием программы PSpice Optimizer по одному из возможных оптимизируемых параметров.

6.3.3. Выполнить анализ целостности сигналов для выполненного проекта ЭС с помощью доступной программы SIA.

6.3.4. Провести сравнительное исследование 2-х заданных программ анализа целостности сигналов.

6.3.5. Разработать и проверить библиотеку элементов для заданной отечественной серии ИС.

6.3.6. Провести сравнительное исследование процесса моделирования для 2-х заданных САПР ЭС.

6.3.7. Выполнить идентификацию параметров заданного элемента по его паспортным данным с помощью программы Parts. Проанализировать влияние применения параметров модели элементов на результаты моделирования схемы, в которой этот элемент используется.

6.3.8. Провести сравнительный анализ наиболее известных систем моделирования ЭС по литературным источникам и подготовить реферат.

6.3.9 Провести сравнительный анализ наиболее известных САПР ЭС по литературным источникам и подготовить реферат.

## 6.4. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- Цель работы.
- Краткие теоретические сведения. Эта часть отчета не обязательна, но сведениями, содержащимися в отчете, студент имеет право воспользоваться при защите лабораторной работы.
- Задание на лабораторную работу. Здесь следует указать книгу или журнал, из которого взята электрическая схема ЭС, и номер страницы; заданный вид анализа; заданный вариант параметров технологического процесса изготовления печатной платы и др.
- Распечатку электрической схемы ЭС, назначение и описание работы схемы.
- Протокол выполнения лабораторной работы по шагам.
- Распечатки результатов моделирования ЭС.
- Распечатку результатов конструкторского проектирования: на одной распечатке совместить оба слоя трассировки проводников и размещенные элементы с их именами и контактными площадками.
- Do-file с комментариями.
- Перечень элементов (в том варианте, в котором его формирует САПР).
- Анализ результатов, где следует объяснить результаты моделирования, оценить полученные результаты конструкторского проектирования, описать допущенные в процессе проектирования ошибки и т.д.

### Контрольные вопросы и задания

1. Охарактеризуйте структурные примитивы, поведенческое описание (входные и выходные потоки внешних воздействий, оператор преобразования), документ, содержащий описание структуры, структурные математические модели и методы их получения, виды анализа и алгоритмы анализа объекта проектирования на указанном преподавателем уровне проектирования ЭС.
2. Что такое проектная процедура? Опишите классы проектных процедур разработки ЭС.
3. Что такое математическая модель (ММ)? Каковы критерии оценки и сравнения ММ? Приведите примеры.

4. Расскажите о классификации и методах получения ММ. Изложите нечеткий алгоритм построения ММ.
5. Изобразите структурную схему САПР DesignLab и расскажите о взаимодействии программ системы в процессе моделирования ЭС. Расскажите о содержании библиотек системы DesignLab.
6. Расскажите об атрибутах и шаблонах схемных символов электронных компонентов.
7. Какие ММЭ на системном, регистровом, логическом и схемотехническом уровнях вы знаете? Что такое макромоделли? Каким образом получают ММС? Какие разновидности ММС на каждом уровне вам известны?
8. Опишите три базовых вида анализа ЭС на схемотехническом уровне. Какие еще виды анализа на этом уровне можно выполнить с помощью симулятора PSpice?
9. Как выполняет моделирование смешанных аналого-цифровых схем симулятор PSpice?
10. В чем заключается дискретизация и алгебраизация ММС на схемотехническом уровне?
11. Расскажите о методе Ньютона. На чем он основан?
12. Расскажите о возможностях постпроцессора Probe.
13. Что такое параметрическая оптимизация? Расскажите о возможностях программы Pspice Optimizer.
14. Какие стандартные языки описания ЭС применяют на указанном преподавателем уровне проектирования. Охарактеризуйте их.
15. В чем заключается анализ целостности сигналов? Какие модели структурных примитивов используются в SIA?



## ПРИЛОЖЕНИЯ

### Приложение 1

#### Стандартные расширения имен файлов

.als – список соответствий номеров выводов компонентов именам подсоединенных к ним цепей. Создаётся автоматически при выполнении команд **Analysis/Simulate** или **Create Netlist**.

.cdf – описания компонентов для переноса их в файлы отчетов. Создаются пользователем и используются при составлении перечня компонентов по команде **File/Reports**.

.cir – текстовые входные файлы задания на моделирование для программы PSpice. Создаются автоматически при выполнении команд **Analysis/Simulate** или **Create Netlist** или создаются пользователем.

.cmd – командные файлы для программ Probe, StmEd и Parts (их имена указываются после ключа /C в командной строке). Создаются при наличии опции /L в командной строке (требуется их дополнительное редактирование).

.dat – двоичные файлы результатов моделирования, передаваемых программе Probe. Автоматически создаются в процессе моделирования режимов DC, AC и TRAN (если по команде **Analysis/Probe Setup** не выбрана опция CSDF).

.dxf – файл в формате AvtoCAD. Создается графическими редакторами Schematics и PCBoars.

.log – файлы протоколов команд программ Probe, Parts и StmEd. Автоматически создаются при наличии опции /L в командной строке.

.mvl – сообщения системы. Создаются при наличии ошибок в схеме.

.net – список соединений схемы для выполнения моделирования. Создается при выполнении команд **Analysis/Simulate** или **Create Netlist**.

.nlf – список соединений схемы для выполнения моделирования. Создается при выполнении команд **Tools/Create Layout Netlist**.

.out – текстовые файлы результатов моделирования. Генерируются в процессе моделирования.

.prb – файлы, состоящие из трех секций: команд управления экраном, макрокоманд и целевых функций, используемых в программе Probe. Макрокоманды и целевые функции создаются с помощью текстового редактора или по команде **Trace/Macro**.

.sch – файл принципиальной схемы. Создается программой Schematics.

.scv – предыдущие версии файлов схем. Создаются программой Schematics.

.txt – текстовые файлы результатов моделирования, передаваемых программе Probe. Автоматически создаются в процессе моделирования режимов DC, AC и TRAN, если по команде **Analysis/Probe Setup** выбрана опция CSDF.

.vec – текстовые файлы состояний цифровых узлов. Создаются программой PSpice при наличии на схеме символов VECTOR.

.vpt – списки меток переменных, графики которых выводятся в программе Probe. Создаются по команде **Markers**.

.xrf – файлы перекрестных ссылок. Составляются при упаковке схемы по команде **Tools/Annotate** и используются при обратной корректровке.

### Файлы библиотек

.flb – библиотеки типовых корпусов компонентов. Создаются программой PCBoards в режиме Footprint Editor.

.ibs – модели транзисторов в формате IBIS. Создаются специальной программой, не входящей в состав DesignLab.

.ind – индексные файлы библиотек. Автоматически создаются программой моделирования (составляется после внесения в библиотеку изменений).

.lib – текстовые файлы библиотек моделей, представляющие собой объединение файлов с расширением .mod и .sub. При установке системы подключается стандартная библиотека моделей; новые библиотеки создаются в программе Parts или с помощью текстовых редакторов.

.lst – каталоги библиотек символов, корпусов и информации об упаковке. Создаются утилитой LCXWin.exe.

.mif – списки используемых файлов математических моделей. Создаются при выполнении команды **Edit/Model**.

.mod – файлы моделей отдельных компонентов. Создаются программой Parts.

.pkg – информация об упаковке компонентов. Создается по команде **Packaging/Export** программы Schematics в режиме редактирования символов.

.plb – библиотеки компонентов – содержат списки компонентов и их упаковочную информацию (количество секций, количество выводов в секции, имена выводов и др.). При установке системы подключается стандартная библиотека компонентов; новые данные вводятся при задании упаковочной информации в программе Schematics в режиме редактирования символов компонентов.

.rdm – информация о библиотеках, используемых в проекте, и другие данные о нем. На схеме размещается символ README из библиотеки Special.slb, и атрибуту filename присваивают имя файла, которое отображается на схеме. Щелчком курсора на этом имени вызывается редактор MicroSim Text Editor, с помощью которого пользователь вводит необходимые сведения о проекте.

.slb – библиотеки графических символов компонентов. При установке системы подключается стандартная библиотека символов, дополнительные библиотеки подключаются по команде **Options/Editor Configuration/Library Settings**. Новые данные вводятся в режиме редактирования символов, который активизируется по команде **File/Edit Library**.

.stl – библиотеки входных сигналов. Создаются программой StmEd при выполнении команды **Edit/Stimulus**, если на схеме имеются символы VSTIM, ISTIM или DIGSTIM.

.sub – описания макромоделей. Создаются по команде **Tools/Create Subcircuit**.

.sym – информация о символе компонента, используемая при передаче данных в другие системы. Создается по команде **Part/Export** редактора символов.

### Файлы для программы PSpice Optimizer

.mdp – внешние текстовые файлы данных для программы PSpice Optimizer. Создаются пользователем (расширение не является стандартным и может быть изменено).

.olg – протокол оптимизации. Создается программой Optimizer.

.oot – отчеты о результатах оптимизации. Создаются программой Optimizer при выполнении команды **File/Report**.

.opt – задание на оптимизацию. Создается автоматически после нанесения на схему символа OPTPARAM и дополняется при настройке конфигурации программы оптимизации.

Opt\_0.dat, Opt\_1.dat - – текущие результаты моделирования, передаваемые программе Probe для расчета целевых функций. Создаются программой PSpice на каждом шаге моделирования.

.par – перечни варьируемых параметров для программы оптимизации. Создаются автоматически после нанесения на схему символа OPTPARAM.

### **Файлы для программы Polaris**

.bst – стеки контактных площадок для программы Polaris. Создаются пользователем (с помощью текстового редактора).

.dmp – перечни компонентов. Создаются программой Polaris.

.err – сообщения об ошибках. Создаются программой Poltran.

.pwr – текстовые входные файлы задания на моделирование для программы PSpice с информацией о паразитных элементах печатной платы (аналог файла .cir). Создаются программой Polaris.

.pdf – текстовые файлы печатных плат в PDF формате системы P-CAD, предназначенные для программы Polaris. Создаются программой Pdifout.exe системы P-CAD (любой версии) и M2S.

.pdt – двоичные файлы результатов моделирования с учётом паразитных параметров печатных плат, передаваемые программе Probe (аналог файла .dat). Создаются программой PSpice при передаче на моделирование файла с расширением .pwr.

.pdx – сообщения об ошибках. Создаются программой Polaris.

.pnt – списки соединений с учетом паразитных элементов. Создаются программой Polaris.

.pot – текстовые файлы результатов моделирования с учётом паразитных параметров печатных плат (аналог файла .out). Создаются программой PSpice.

.psm – список соединений печатной платы. Создается программой Poltran.

## *Приложение 2*

### **Сообщения программы PSpice**

#### **Информационные сообщения**

Bias point calculated - завершен расчет режима по постоянному току.

Calculating bias point - рассчитывается режим по постоянному току.

Calculating of DC(AC, Transient) finished - завершен расчет передаточных функций по постоянному току (расчет в частотной области переходных процессов).

Circuit has errors...run aborted, see output file for details - в схеме имеются ошибки, выполнение программы прекращено, см. подробности в выходном файле с расширением.out.

Computing impulse response for<...> is non-causal. It should be delayed by at least <...> sec - в указанном компоненте не выполняется принцип причинности; необходимо ввести задержку не менее чем на<...> секунд.

Library file has changed since index file was created - после создания индексного файла файл библиотеки изменился.

Making new index file for library file - создание индексного файла для библиотечного файла.

No errors - в схеме нет ошибок.

Only xx columns can be printed at one listing - на одном листе можно печатать только xx колонок.

PSpice aborted - выполнение программы PSpice прекращено.

Reading and checking circuit - чтение входного файла и проверка схемы.

This evaluating copy of xxx has past its expiration date - просрочено время пользования демонстрационной (evaluation) версией.

Two library files used by this circuit have the same index file - два файла библиотеки имеют один и тот же индексный файл.

XXX percent of E LAPLASE impulse response is non-causal. It should be delayed by at least ууу sec - при расчете импульсной характеристики управляемого источника по его передаточной функции нарушен принцип причинности. Импульсную характеристику нужно сдвинуть вправо по оси времени на ууу секунд.

## **Ошибки при моделировании**

All terminals are grounded in the circuit - в схеме заземлены выводы всех компонентов.

Bad characters is func name - неверный символ в имени функции.

Bad digital data format - неверен формат цифровых данных.

Bad logic state - неверное логическое состояние.

Bad expression - ошибочное выражение.

Cant find parameter index - не найден индекс параметра.

Cant use with DEC or OCT sweeps - при вариации в масштабе DEC или OCT ключевое слово LIST недопустимо.

Character 'xx' not allowed - указанные символы недопустимы.

Converge problem in Power supplies cut back to...- возникла проблема сходимости режима по постоянному току при наращивании напряжения питания.

Coupling coefficient out of range:  $0 < K < 1$  - коэффициент связи не находится в допустимых пределах.

CPU Time limit exceeded - превышено ограничение на время работы центрального процессора.

Duplicate Name: *xx* - указанное имя компонента встречается дважды.

Expression must fit on one line - выражение должно размещаться на одной строке.

Expression too complicated - выражение очень сложное.

File name too long - имя файла слишком длинное.

Filter order too high - порядок фильтра очень большой.

Funk expansion too large - выражение функции очень велико.

Illegal name to funk - недопустимое имя функции.

Invalid analysis type - неверен тип анализа.

Invalid global parameter name - неверное имя глобального параметра.

Invalid filter type - неверен тип фильтра.

Invalid Range - неверен диапазон.

Invalid Option - неверна опция.

Laplace expression for filter too large - выражение для передаточной функции фильтра слишком длинное.

Less than 2 connection at node *xx* - к указанному узлу подключено менее двух компонентов.

Less than two states defined for DINPUT model - в модели DINPUT указано менее двух логических состояний.

Line too long. Limits 132 characters - длина строки текстового файла задания на моделирование содержит более 132 символов.

Missing or mismatched () - пропущены или не согласованы скобки.

Model type unknown - тип модели неизвестен.

Must be "I" or "V" – должен быть компонент типа *I* или *V*.

Must be a voltage source name – должно быть имя источника напряжения.

Mutual inductance out of range – недопустимое значение взаимной индуктивности.

No model had tolerances ( .MC or .WCASE ignored) - режимы .MC или .WCASE игнорируются, так как ни в одной модели компонента не указан разброс параметров.

No more than 10 args allowed - недопустимо более 10 аргументов.

Node *xx* is not present in the circuit file - в схеме отсутствует узел с указанным именем.

Node *xx* is floating - указанный узел “плавающий” .

Node Table Overflow - таблица узлов переполнена.

Not valid for .WCASE (. MC) - не может использоваться при наличии директивы .WCASE (. MC).

Number of harmonics must be less then *xx* – количество гармоник превышает указанный предел.

Only A-Z permitted - размещены только символы A-Z.

Only one circuit allowed per file *xx* when using Parallel Analog/Digital Simulation – при выполнении аналого-цифрового моделирования во входном файле может быть описание только одной схемы.

Only one .PROBE and .PROBE/CSDF allowed per circuit file - в файле схемы может быть только одна директива .PROBE или .PROBE/CSDF.

Only one .TEMP value allowed with .STEP – при наличии директивы STEP в директиве .TEMP можно указать значение только одной температуры.

Pivot not in DC – при итерационном расчете режима по постоянному току нет ведущего элемента при решении системы линейных уравнений.

Resistor has zero value - резистор имеет нулевое сопротивление.

Symbol Table Overflow - таблица символов переполнена.

Subcircuits *xx* is undefined - указанная подсхема не определена.

Text value must fit on one line - текстовая переменная должна размещаться на одной строке.

Time must not be negative - время должно быть положительным.

Time must be increasing - время должно увеличиваться.

The circuit matrix is singular and can't be solved. The diagonal entry fit *xx* is 0 - не может быть найдена обратная матрица для сингулярной матрицы схемы. Диагональный элемент матрицы равен нулю.

There are no devices in this circuit - в схеме нет компонентов.

Too many inductors - слишком много индуктивностей.

Too many parameters (limit=49) - слишком много параметров (максимальное значение равно 49).

Too many PWL corners – в описании функции PWL слишком много точек излома.

Transient Analysis must be at least 1/frequency second long. Fourier analysis aborted – длительность переходного процесса должна быть по крайней мере больше периода первой гармоники спектра. Преобразование Фурье невозможно.

Transfer function too complicated – передаточная функция очень сложная.

Unable to finish bias point calculation (DC Analyses, AC Analyses, Transient Analyses) - невозможно завершить расчет по постоянному току (или другие виды анализа).

Unable to create mailbox to communicate with digital simulator - невозможно создать буферный блок для передачи данных цифровому моделировщику.

Undefined parameter - неопределенный параметр.

Value may not be 0 - значение не может быть равным нулю.

Values must be monotonic increasing - значения должны увеличиваться монотонно.

Voltage loop involving <имя компонента> - указанный компонент входит в состав контура из источников напряжения (см. ниже).

Voltage source and/or inductor loop involving. You may break the loop by addind a series resistance - источники напряжения и/или индуктивности образуют замкнутый контур. Его можно разорвать включением последовательного сопротивления.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Асланянц В.Р., Кандауров Ю.Г. Автоматизированное конструкторское проектирование электронных средств: Практикум / Владим. гос. ун-т; – Владимир, 2000. - 60 с.
2. Разевиг В.Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0.– М.: Солон, 1999. - 698 с.
3. Разевиг В.Д. Система проектирования цифровых устройств OrCAD. – М.: Солон-Р, 2000. – 160 с.
4. Асланянц В.Р. Системы автоматизированного проектирования электронных средств: Практикум / Владим. гос. ун-т; – Владимир, 1996. - 56 с.
5. Норенков И.П., Маничев В.Б. Основы теории и проектирования САПР: Учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 1990. - 335 с.
6. Ланцов В.Н. Моделирование: Учеб. пособие. В 2 ч. Часть 1 / Владим. гос. ун-т; – Владимир, 1999. - 88 с.
7. Ланцов В. Н. Моделирование: Учеб. пособие. В 2 ч. Часть 2 / Владим. гос. ун-т; – Владимир, 2001. - 72 с.
8. Модели в автоматизированном конструкторском проектировании РЭА: Метод. указания к практ. занятиям / Сост. В.Р. Асланянц; Владим. гос. ун-т. – Владимир, 1987. - 48 с.
9. Асланянц В.Р. Методы оптимизации в автоматизированном конструировании: Учеб. пособие.– Владимир, 1980. - 108 с.
10. Асланянц В.Р. Системы искусственного интеллекта на Прологе: Практикум / Владим. гос. ун-т; – Владимир, 1998. - 60 с.
11. Армстронг Дж.Р. Моделирование цифровых систем на языке VHDL. – М.: Мир, 1992. - 175 с.
12. Бибило П.Н. Основы языка VHDL. – М.: Солон – Р, 2000.- 200 с.
13. Угрюмов Е.П. Цифровая схемотехника. – СПб.: БХВ – Санкт – Петербург, 2000. - 528 с.
14. Ланцов В.Н. Проектирование ПЛИС на VHDL: Учеб. пособие / Владим. гос. ун-т. – Владимир, 2000. – 120 с.
15. Потапов Ю.В., Разевиг В.Д. Анализ целостности сигналов в системе Protel 99 SE. – Научно–техн. журнал EDA Express, N 4, 2001.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ.....	3
1.1. Процедуры и уровни проектирования ЭС.....	3
1.2. Математические модели и критерии их оценки.....	5
1.3. Классификация и методы получения ММ.....	7
1.4. Моделирование ЭС на системном уровне.....	8
1.5. Моделирование ЭС на регистровом и логическом уровнях...	9
1.6. Моделирование ЭС на схемотехническом уровне.....	11
1.7. Моделирование ЭС на конструкторском аппаратном уровне и конструкторском микроуровне.....	13
2. МОДЕЛИРОВАНИЕ АНАЛОГОВЫХ И ЦИФРОВЫХ ЭС В САПР DesignLab.....	14
2.1. Основные и вспомогательные программы системы DesignLab.....	14
2.2. Менеджер проектов.....	16
2.3. Маршрут подготовки и выполнения моделирования.....	20
2.4. Редактор входных сигналов Stimulus Editor.....	28
2.5. Директивы моделирования для симулятора PSpice.....	34
2.6. Графический постпроцессор Probe.....	40
3. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ЭС.....	51
4. МОДЕЛИ АНАЛОГОВЫХ И ЦИФРОВЫХ КОМПОНЕНТОВ...	55
4.1. Модели аналоговых компонентов.....	55
4.2. Программа расчета параметров моделей компонентов Parts.	58
4.3. Модели цифровых компонентов.....	63
5. АНАЛИЗ ЦЕЛОСТНОСТИ СИГНАЛОВ.....	65
6. УЧЕБНЫЕ ЗАДАНИЯ.....	69
6.1. Подготовка к лабораторным работам.....	69
6.2. Перечень заданий к лабораторным работам и курсовому проектированию.....	69
6.3. Перечень заданий на УИРС.....	70
6.4. Содержание отчета.....	71
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ.....	71
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	73
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	81

Учебное издание

**Аслаянц Виктор Рубенович**

**ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ И СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ  
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

Практикум

Редактор Е.В. Невская

Корректор Е.В.Афанасьева

Компьютерная верстка А.Ю. Сергеева

ЛР № 020275. Подписано в печать 28.04.03.

Формат 60x84/16. Бумага для множит. Техники. Гарнитура Таймс  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 4,88. Уч.-изд. л. 5,20. Тираж 100 экз.

Заказ

Редакционно-издательский комплекс  
Владимирского государственного университета  
600000, Владимир, ул. Горького, 87.

