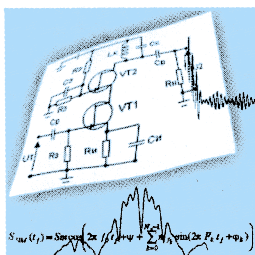


# М ЭЛЕКТРОНИКИ К Р

Р. АНТИПЕНСКИЙ, А. ФАДИН

Схемотехническое  
проектирование  
и моделирование  
радиоэлектронных  
устройств



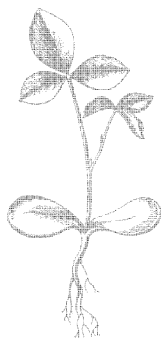
ТЕХНОСФЕРА



# М И Р электроники

Р. АНТИПЕНСКИЙ, А. ФАДИН

Схемотехническое  
проектирование  
и моделирование  
радиоэлектронных  
устройств



Scan AAW

ТЕХНОСФЕРА

Москва

2007

УДК 681.3  
ББК 30.2-5-05  
А22

**Рецензенты:**

Федеральный государственный научно-исследовательский  
испытательный центр РЭБ ОЭСЗ МО РФ:

**Быков В.В.**, д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ

Воронежский государственный технический университет:

**Матвеев Б.В.**, к.т.н., доцент

**Антипенский Р.В., Фадин А.Г.**

**Схемотехническое проектирование и моделирование  
радиоэлектронных устройств**

**Москва:**

**Техносфера, 2007. — 128с. ISBN 978-5-94836-130-7**

В учебном пособии рассматриваются основные понятия схемотехнического проектирования радиоэлектронных устройств и математические основы их моделирования с использованием средств автоматизации.

Излагаются основы практического применения программ системы схемотехнического моделирования DesignLab 8.0 (OrCAD) для построения и моделирования принципиальных схем пассивных РЭУ в режиме анализа временных и частотных характеристик, а также для моделирования активных аналоговых и цифровых устройств. На сопровождающем книгу компакт-диске находятся: демо-версия системы схемотехнического моделирования DesignLab 8.0, модели фильтров, резистивного и резонансного усилителей, делителя частоты, преобразователя кода, а также необходимые для их исследования источники цифровых и аналоговых сигналов.

Учебное пособие предназначено студентам, занимающимся изучением и проектированием РЭУ, а также может быть полезно аспирантам, преподавателям и научным работникам, применяющим средства автоматизированного проектирования РЭУ.

© 2007, Р.В. Антипенский, А.Г. Фадин  
© 2007, ЗАО "РИЦ "Техносфера",  
оригинал-макет, оформление

**ISBN 978-5-94836-130-7**

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Предисловие</b>	<b>5</b>
<b>Глава 1. Основные понятия схемотехнического проектирования радиоэлектронных устройств</b>	<b>7</b>
1.1. Задачи и этапы проектирования РЭУ. Сущность схемотехнического проектирования РЭУ	7
1.2. Методы оптимизации проектных решений	12
1.3. Пакеты прикладных программ автоматизированного проектирования и моделирования РЭУ	15
1.3.1. Пакеты программ схемотехнического проектирования радиоэлектронных средств и устройств	15
1.3.2. Пакеты программ конструкторского проектирования радиоэлектронных средств и устройств	23
1.3.3. Программные системы для лектродинамического моделирования СВЧ-устройств и полей	25
<b>Глава 2. Математические основы моделирования компонентов РЭУ различного уровня сложности</b>	<b>29</b>
2.1. Математические модели РЭУ и их элементов	29
2.2. Алгоритмы анализа аналоговых устройств	40
2.3. Алгоритмы анализа цифровых устройств	47
2.4. Методы моделирования полей	50
<b>Глава 3. Основы использования системы DesignLab для моделирования радиоэлектронных устройств</b>	<b>52</b>
3.1. Состав и возможности системы схемотехнического моделирования РЭУ DesignLab	52
3.1.1. Состав системы, назначение и порядок использования программ	54
3.1.2. Пользовательский интерфейс системы	57
3.1.3. Основные возможности системы	60
3.2. Графический ввод схем радиоэлектронных устройств	62
3.2.1. Ввод и размещение компонентов	63
3.2.2. Редактирование параметров компонентов	66
3.2.3. Построение принципиальных схем	67
3.3. Моделирование радиоэлектронных устройств в режиме анализа частотных характеристик	70

3.3.1.	Ввод источника сигнала, размещение маркеров и проверка схемы на наличие ошибок	70
3.3.2.	Задание параметров директивы моделирования	73
3.3.3.	Проведение моделирования и анализ полученных результатов	75
3.4.	Моделирование радиоэлектронных устройств в режиме анализа временных характеристик	77
3.4.1.	Ввод источника сигнала, размещение маркеров и проверка схемы на наличие ошибок	78
3.4.2.	Задание параметров директивы моделирования	79
3.4.3.	Примеры и порядок выполнения заданий на моделирование схемы в режиме анализа временных характеристик	80
<b>Глава 4. Использование системы DesignLab для моделирования аналоговых и цифровых устройств</b>		<b>89</b>
4.1.	Моделирование активных аналоговых устройств	89
4.1.1.	Ввод источников аналоговых сигналов	90
4.1.2.	Пример и порядок выполнения заданий на моделирование резонансного усилителя	94
4.1.3.	Пример и порядок выполнения заданий на моделирование искажений импульсных сигналов при их прохождении через резистивный усилитель	99
4.1.4.	Статистический анализ по методу Монте-Карло	101
4.1.5.	Статистический анализ методом расчета наихудшего случая	104
4.2.	Пример и порядок выполнения заданий на моделирование цифровых устройств	107
4.2.1.	Ввод источников цифровых сигналов	108
4.2.2.	Моделирование делителя частоты	112
4.2.3.	Моделирование преобразователя кода	114
<b>Приложение.</b>		
<b>Разработка печатной платы делителя частоты</b>		<b>120</b>
	Общие сведения о программе редактирования печатных плат PCBoards	120
	Пример разработки печатной платы делителя частоты	124
<b>Литература</b>		<b>127</b>

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие обобщает накопленный авторами опыт преподавания в рамках действующих учебных программ основ схемотехнического проектирования и моделирования радиоэлектронных устройств (РЭУ) с применением современных средств автоматизации.

Содержание учебного пособия включает четыре раздела и приложение.

В первом разделе рассматриваются задачи и этапы проектирования РЭУ, сущность схемотехнического (функционального) проектирования РЭУ, методы оптимизации проектных решений, а также современные пакеты прикладных программ автоматизированного проектирования РЭУ.

Второй раздел посвящен математическим основам моделирования компонентов РЭУ различного уровня сложности и алгоритмам анализа аналоговых и цифровых устройств.

В третьем разделе дается описание системы автоматизированного проектирования и моделирования РЭУ DesignLab 8.0 (OrCAD), приводятся примеры построения и исследования схем радиоэлектронных устройств в различных режимах анализа.

Четвертый раздел посвящен применению системы DesignLab 8.0 для моделирования активных аналоговых и цифровых устройств с иллюстрацией на конкретных примерах. Третий и четвертый разделы книги сопровождаются компьютерными моделями (12 схем), предназначенными для закрепления изучаемого материала и формирования у читателя определенных навыков в проведении моделирования в системе DesignLab 8.0.

В приложении показан пример разработки печатной платы делителя частоты с использованием системы DesignLab.

Учебное пособие предназначено студентам, занимающимся изучением программных курсов «Основы компью-

терного проектирования и моделирования РЭС», «Схемотехника аналоговых электронных устройств», «Цифровые устройства и микропроцессоры». Книга может быть полезна аспирантам, преподавателям и научным работникам, применяющим средства автоматизированного проектирования РЭУ. При этом предполагается, что читатель знаком с курсами «Основы теории цепей» и «Электроника».

Предисловие, разделы 1, 2 написаны А.Г. Фадиным, разделы 3, 4 и приложение — Р.В. Антипенским.

Авторы выражают искреннюю благодарность рецензентам за замечания и советы, которые были учтены при доработке рукописи.

Ваши замечания, предложения, вопросы направляйте по адресу электронной почты автору Антипенскому Р.В. [antic@vmail.ru](mailto:antic@vmail.ru).

# ГЛАВА I

## ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

### 1.1. Задачи и этапы проектирования РЭУ. Сущность схемотехнического проектирования РЭУ

Необходимость сокращения сроков и повышения качества разработки радиоэлектронных устройств (РЭУ) и систем предопределила широкое применение ЭВМ и методов автоматизации проектирования радиоэлектронной техники различного назначения. При этом целью проектирования является создание более совершенных РЭУ, отличающихся от своих аналогов и прототипов более высокой эффективностью за счет использования новых физических явлений и принципов функционирования, более совершенной элементной базы и структуры.

С учетом степени новизны разрабатываемых изделий различают следующие **задачи проектирования** [1]:

1. Частичная модернизация существующего РЭУ за счет изменения его параметров структуры и конструкции, обеспечивающая сравнительно небольшое (до нескольких десятков процентов) улучшение одного или нескольких показателей качества для решения тех же или новых задач.



2. Существенная модернизация, предполагающая значительное (в несколько раз) улучшение показателей качества.

3. Создание новых РЭУ, основанных на ранее не применявшихся принципах действия, для резкого (на несколько порядков) увеличения показателей качества при решении тех же или существенно новых задач.

С точки зрения последовательности выполнения различают основные **стадии проектирования**:

1. Предварительное проектирование, результатом которого являются **технические предложения (аванпроект)**. Эта стадия в наибольшей степени насыщена элементами научного поиска, теоретическими расчетами, экспериментальными исследованиями. Они завершаются обычно созданием лабораторных макетов.

2. Эскизное проектирование, результатом которого является **эскизный проект**. На этой стадии усилия разработчиков во многом направлены на поиски эффективных конструкторских решений. Она также связана с большим объемом теоретических изысканий, сложных расчетов и заканчивается созданием экспериментального образца проектируемого изделия и его тщательными экспериментальными исследованиями (натурным моделированием).

3. Техническое проектирование, при котором выполняется тщательная проработка всех схемных, конструкторских и технологических решений. На стадии технического проектирования создается техническая документация на разрабатываемую аппаратуру и процессы ее производства. Итогом является **технический проект**, содержащий необходимую документацию и опытный образец изделий, прошедший всесторонние испытания в реальных условиях эксплуатации. При этом следует подчеркнуть чрезвычайную важность и трудоемкость создания технической документации, на основе которой происходит дальнейшее единичное, серийное или массовое производство РЭУ.

По содержанию решаемых задач **процесс проектирования** можно разбить на следующие **четыре этапа** [1]:

1. **Системотехническое проектирование**, при котором выбираются и формулируются цели проектирования, обобщаются исходные данные и определяются принципы

построения системы. При этом формируется структура проектируемого объекта, его составных частей (функционально завершенных блоков), определяются энергетические и информационные связи между составными частями. В результате формируются частные технические задания на проектирование отдельных составных частей объекта.

**2. Схемотехническое (функциональное) проектирование** РЭУ, имеющее целью аппаратную реализацию составных частей устройства. При этом выбор элементной базы, принципиальной схемы, структурный и параметрический синтез радиоэлектронных схем (оптимизация параметров) производится с расчетом обеспечения наилучшего функционирования (и эффективного производства). При выборе элементной базы и синтезе радиоэлектронных схем необходимо учитывать конструкторско-технологические требования.

**3. Техническое проектирование (конструирование)**, решающее задачи компоновки и размещения элементов и узлов, выполнения печатных и проводных соединений, а также задачи теплоотвода, электрической прочности, защиты от внешних воздействий и т. п.

На этом этапе разрабатывается техническая документация для изготовления и эксплуатации РЭУ.

**4. Технологическая подготовка производства**, предполагающая разработку технологических процессов изготовления отдельных блоков и всей системы в целом.

**Схемотехническое проектирование**, как и другие перечисленные этапы, сводится к формированию описаний проектируемого РЭУ и состоит из отдельных проектных процедур, реализуемых с помощью пакетов прикладных программ автоматизированного проектирования и заканчивающихся частным проектным решением. Типичными для схемотехнического проектирования РЭУ проектными процедурами являются **анализ и синтез** их описаний на различных уровнях рассмотрения.

**Процедура синтеза** заключается в создании проектного решения (описания) по заданным требованиям, свойствам и ограничениям. Например, широко используются при проектировании РЭУ процедуры синтеза электронных схем по их заданным характеристикам в частотной или временной

области. При этом проектирование рассматривается как последовательное решение двух задач: выбора структурной схемы, называемого структурным синтезом, и определения параметров ее элементов (обеспечивающих требуемые характеристики), называемого параметрическим синтезом.

**Процедура анализа** состоит в определении свойств заданного описания РЭУ. Примером такой процедуры может служить расчет частотных или переходных характеристик электронных схем, определение реакции схемы на заданное воздействие и др. Анализ позволяет оценить степень удовлетворения проектного решения заданным требованиям и его пригодность.

Процедуры синтеза и анализа в процессе проектирования РЭУ тесно связаны между собой, поскольку обе они направлены на создание приемлемого или оптимального проектного решения.

Типичной **проектной процедурой** является **оптимизация**, которая приводит к оптимальному (по определенному критерию) проектному решению. Например, широко используется оптимизация параметров электронных схем с целью наилучшего приближения частотных характеристик к заданным. Процедура оптимизации состоит в многократном анализе при целевом изменении параметров схемы до удовлетворительного приближения к заданным характеристикам. В сущности, оптимизация обеспечивает создание или синтез проектного решения с поэтапным анализом или оценкой характеристик.

**Проектные процедуры** состоят из отдельных **проектных операций**. Например, в процессе анализа математических моделей РЭУ приходится решать дифференциальные и алгебраические уравнения, осуществлять операции с матрицами и т. п. Такие операции могут иметь обособленный характер, но в целом они образуют единую проектную процедуру.

Проектные процедуры и операции выполняются в определенной последовательности, называемой маршрутом проектирования. Маршруты проектирования могут начинаться с нижних иерархических уровней описаний (восходящее проектирование) или с верхних (нисходящее проектирование).

Между всеми этапами проектирования существует глубокая связь и взаимосвязь. Так, определение окончательной конструкции и разработка всей технической документации часто не могут быть выполнены до окончания разработки технологии. В процессе конструирования и разработки технологии может потребоваться коррекция принципиальных схем, структуры системы и даже исходных данных. Поэтому процесс проектирования является не только многоэтапным, но и многократно корректируемым по мере его выполнения, т. е. процесс носит итерационный характер.

В процессе проектирования необходимо не просто создать аппаратуру, которая будет обеспечивать заданное функционирование, но и оптимизировать ее по широкому спектру функциональных, конструкторско-технологических, эксплуатационных и экономических показателей. На отдельных этапах для отдельных частных задач оптимизацию можно осуществить на основе разработанных формальных математических методов. Однако задача оптимизации часто не поддается формализации. В таких случаях рассматривается несколько вариантов решения поставленной задачи, подсказанных, как правило, предшествующим опытом, интуицией, и выбирается лучший из них. Такой подход называется **эвристическим многовариантным анализом**. Однако в связи с все возрастающей сложностью РЭУ, с повышением требований к ним необходимые расчеты оказываются все более трудоемкими, а количество вариантов, целесообразных для рассмотрения, катастрофически возрастает. Эта ситуация получила название «тирании альтернатив». Часто на этапе проектирования не удается предвидеть некоторые требования, вытекающие из условий эксплуатации. В таких случаях доводка аппаратуры происходит в процессе испытаний, что удорожает и затягивает проектирование во много раз.

Подобное положение является результатом возникшего принципиального несоответствия традиционного подхода к проектированию и сложности современных радиоэлектронных средств. Указанное противоречие и вызвало интенсивное развитие новой технологии проектирования РЭУ, базирующейся на системном подходе и совершен-

ствовании процессов проектирования с применением математических методов и средств вычислительной техники, комплексной автоматизации трудоемких и рутинных проектных работ, замене макетирования и натурного моделирования математическим моделированием, использованием эффективных методов многовариантного проектирования и оптимизации, а также повышением качества управления проектированием.

Системный подход позволяет найти оптимальное, в широком смысле, решение задачи проектирования за счет всестороннего, целостного рассмотрения как проектируемого изделия, так и самого процесса проектирования и способен привести к подлинно творческим новаторским решениям, включая крупные изобретения и научные открытия.

Ниже рассматриваются методы оптимизации проектных решений.

## 1.2. Методы оптимизации проектных решений

**Оптимальные РЭУ** могут быть построены либо **методами классического синтеза**, либо **методами оптимизации на ЭВМ** с применением пакетов прикладных программ автоматизации проектирования.

**Классический синтез** позволяет проектировать относительно несложные, в основном, пассивные устройства, для которых существуют аналитические способы синтеза оптимальных схем. К ним относятся оптимальные частотные фильтры с аппроксимацией Чебышева, Кауэра и др., оптимальные широкополосные согласующие устройства с аппроксимацией Фано, а также различного класса частотно-разделительные и мостовые устройства [1,6].

Большинство же устройств из-за отсутствия аналитических методик синтеза проектируется **методами оптимизации на ЭВМ**. При этом различают **структурную и параметрическую оптимизацию**.

При **структурной оптимизации** определяется наилучшая структура РЭУ, удовлетворяющая заданным требованиям.

При **параметрической оптимизации** определяется такая совокупность внутренних параметров РЭУ, при которой заранее выбранные выходные параметры принимают наилучшие возможные значения. Полное решение задачи проектирования РЭУ методами параметрической оптимизации на ЭВМ производится в три этапа:

- моделирование устройства;
- составление целевой функции с выбором тех или иных критериев его качества;
- минимизация (максимизация) целевой функции для получения оптимальных внутренних параметров устройства.

При проектировании РЭУ широко применяются методы оптимизации проектных решений, основанные на решении задач **математического** (линейного и нелинейного) **программирования**. В этих задачах производится поиск минимума или максимума некоторой целевой функции, зависящей от многих переменных при наличии ограничений на эти переменные.

При проектировании РЭУ целевая функция отображает качество работы, стоимость аппаратуры и иные характеристики, зависящие от параметров компонентов, оптимальные значения которых требуется найти в результате решения задачи. Ограничения же формулируются в виде системы соотношений, сужающих допустимую область изменения параметров компонентов при решении задачи оптимизации РЭУ.

Если минимизируемая (максимизируемая) целевая функция и ограничения линейно зависят от переменных, то оптимизация проектных решений может быть выполнена на основе известных из курса математики **методов линейного программирования**. К этим методам относятся симплекс-метод и методы целочисленного линейного программирования.

При нелинейной зависимости целевой функции и ограничений от переменных оптимальное проектирование РЭУ производится на основе решения **задачи нелинейного программирования** методами одномерного поиска оптимального решения, а также градиентными или статистическими методами оптимизации.

Проектирование РЭУ в соответствии с новой технологией основывается на следующих пяти принципах.

**Первый принцип** предполагает комплексное решение общей задачи проектирования за счет взаимной увязки процедур решения частных задач и этапов проектирования. При этом установление тесной информационной связи между этапами и процедурами позволяет создавать более эффективные РЭУ с точки зрения комплекса функциональных и конструкторско-технологических требований.

**Второй принцип** заключается в интерактивном режиме проектирования, при котором осуществляется непрерывный процесс диалога «человек-машина». При этом системы автоматизации проектирования выступают в качестве мощного средства обеспечения творческой активности проектировщика, а не заменяют его. Ибо невозможно создать или модернизировать сложную радиоэлектронную аппаратуру без творческого участия специалиста, сколь ни велика была бы мощность вычислительных средств и сколь ни сложны (и изощрены) были бы формальные методы проектирования.

**Третий принцип** заключается в широком применении имитационного моделирования радиоэлектронных систем и средств с воспроизведением условий работы, близких к реальным. Имитационное моделирование дает возможность предвидеть реакцию проектируемого объекта на самые различные возмущения, позволяет специалисту в процессе проектирования «видеть» плоды своего труда в действии без макетирования и натурного моделирования. Имитационное моделирование дает возможность проводить испытания различных вариантов проектных решений и в приемлемые сроки выбирать лучший из них с учетом всевозможных случайных факторов и помех.

**Четвертый принцип** состоит в привлечении для решения задач проектирования новейших высокоэффективных аппаратурных и информационно-программных средств обеспечения проектирования и моделирования РЭУ.

И, наконец, **пятый принцип** состоит в замкнутости процесса автоматизированного проектирования РЭУ.

Под этим подразумевается, что проектировщик вводит в ЭВМ информацию на уровне замысла, а в результате диалогового процесса проектирования выдается техническое решение и документация для изготовления РЭУ. Ниже рассматриваются типовые программные средства автоматизированного проектирования и моделирования РЭУ.

### **1.3. Пакеты прикладных программ автоматизированного проектирования и моделирования РЭУ**

Системы программ, предназначенные для автоматизации проектирования РЭУ, можно разделить на две основные группы: системы схемотехнического проектирования и конструкторского проектирования РЭУ. Это деление является весьма условным, особенно для систем проектирования микроэлектронной аппаратуры, а также СВЧ- и излучающих устройств. В последнее десятилетие наметилась явная тенденция интеграции пакетов программ для схемотехнического и конструкторского проектирования радиоэлектронных устройств.

Кроме этих основных групп пакетов программ в системах автоматизированного проектирования РЭУ широко используются различные вспомогательные пакеты: математические пакеты, базы данных, графические и текстовые редакторы, электронные таблицы и т. п.

#### **1.3.1. Пакеты программ схемотехнического проектирования радиоэлектронных средств и устройств**

В настоящее время известно большое число пакетов программ, предназначенных для выполнения схемотехнического проектирования радиоэлектронных средств (РЭС).

Системы схемотехнического моделирования аналоговых и цифровых устройств и проектирования печатных плат DesignCenter и DesignLab разработаны корпорацией



MicroSim [1,8]. В основу этих систем положен известный пакет программ PSPICE, первые версии которого были разработаны в начале 70-х годов прошлого века в Калифорнийском университете. Возможности этих систем существенно зависят от варианта поставки и операционной системы. Они позволяют выполнять моделирование аналоговых, смешанных аналого-цифровых и просто цифровых радиоэлектронных устройств, синтез цифровых устройств на базе интегральных схем с программируемой логикой, а также моделирование с учетом паразитных емкостей и индуктивностей, присущих реальным печатным платам.

Системы DesignCenter и DesignLab оснащены графическим редактором принципиальных схем РЭУ, который одновременно является управляющей оболочкой для запуска программных модулей на всех стадиях работы с системами. Системы позволяют выполнять расчет режимов радиоэлектронных устройств по постоянному и переменному току, спектральный анализ, моделирование переходных процессов в РЭУ, расчет уровней шума, статистический анализ с учетом вариации температуры при работе устройства. Моделирование аналого-цифровых и цифровых устройств выполняется на логическом уровне с подключением аналого-цифровых и цифро-аналоговых интерфейсов для обеспечения связи аналоговой и цифровой частей РЭУ.

В системах может выполняться параметрическая оптимизация аналого-цифровых устройств по заданным критериям при наличии нелинейных ограничений на параметры варьируемых компонентов.

Системы имеют графический редактор печатных плат, который в автономном режиме воспринимает информацию о соединениях в формате P-CAD, а в составе системы — от графического редактора принципиальных схем. Компоненты РЭУ автоматически или вручную размещаются на одной или двух сторонах печатной платы, после чего возможна трассировка многослойных соединений в автоматическом или интерактивном режиме. По результатам трассировки создаются командные файлы для изготовления фотошаблонов и сверлильных станков с ЧПУ.

Возможна передача данных в систему AutoCAD для выпуска конструкторской документации.

К системам DesignCenter и DesignLab прилагаются многочисленные библиотеки графических символов элементов РЭУ и банки данных с более чем восемью тысячами математических моделей компонентов (диодов, тиристоров, биполярных и полевых транзисторов, оптопар, операционных усилителей, компараторов напряжения, кварцевых резонаторов, магнитных сердечников, цифровых и аналого-цифровых микросхем) производства различных фирм США, Западной Европы и Японии. Имеется возможность пополнения библиотек.

Примерно такими же возможностями с точки зрения схемотехнического проектирования обладает система ICAP, разработанная фирмой Intusoft. В основу этой системы также положен пакет программ PSPICE. Система ICAP отличается удобным оконным редактором, возможностью работы с измерительным оборудованием, совместимостью выходных файлов с пакетом P-CAD.

Получившая широкое распространение в конце 70-х—начале 80-х годов первая версия программ Super-Compact выдвинула фирму Compact Software в одну из ведущих в мире по разработке программного обеспечения для проектирования радиочастотных устройств, особенно СВЧ-диапазона. Пакет Super-Compact оказался очень удачным. Достаточно точные математические модели широкого круга элементов СВЧ-цепей, удобство входного языка и ряд других достоинств привели к широкому распространению этого пакета, ориентированного на проектирование фильтров, согласующих цепей и цепей связи СВЧ-диапазона.

В пакете используются базовые элементы в виде двух-, четырех-, шести- и восьмиполюсников, характеризующихся A-, S-, Y-параметрами. Допускается включение произвольных многополюсников. Пакет позволяет анализировать СВЧ-цепи, содержащие наиболее употребительные конфигурации элементов с распределенными и сосредоточенными параметрами. Распределенные элементы могут представлять различные типы связанных и одиночных отрезков линий передачи: микрополосковые

и полосковые, линии с подвешенной подложкой и коаксиальные, компланарные и щелевые, прямоугольные и круглые волноводы. Распределенные элементы могут характеризоваться как геометрическими, так и электрическими параметрами. При моделировании СВЧ-устройств учитываются электрические неоднородности, влияние дисперсии, излучения, многослойной металлизации проводников, шероховатости поверхности, потери в проводниках и диэлектриках.

Модели полупроводниковых приборов описываются параметрами рассеяния либо матрицами классической теории цепей. Моделирование СВЧ-цепей выполняется на основе аппарата Y-матрицы, причем отдельные части цепи могут описываться с помощью аппарата A-матриц.

Описание устройства производится покомпонентно, причем в одной строке указываются аббревиатурой тип компонента, способ его подключения в цепи и параметры компонента с допустимыми границами изменения параметров в процессе оптимизации.

Оптимизация параметров устройства может выполняться одновременно для нескольких характеристик и в нескольких состояниях. Например, СВЧ-диодный переключатель может одновременно оптимизироваться в режимах «Включено» и «Выключено». Для оптимизации используется одна из разновидностей градиентного метода и случайный поиск с самообучением. Процесс оптимизации параметров устройства ведется в границах изменения варьируемых параметров, определяемых их физической реализуемостью и точностью моделей компонентов.

Для обеспечения разработчика информацией о параметрах полупроводниковых компонентов, проводников и диэлектрических материалов в пакет включено несколько банков данных, которые могут вызываться на командном уровне для отыскания компонента с заданными техническими характеристиками. Пакет позволяет разработчику формировать свои банки данных.

Вывод информации осуществляется на экран монитора, печать, графопостроитель и может включать схему устройства и ее различные частотные характеристики

в табличном виде либо в виде графиков в полярных или декартовых координатах. По требованию разработчика Super-Compact может построить линии равного усиления, уровня шума, стабильности устройства. Для точного изучения отдельные участки характеристик могут быть представлены в увеличенном масштабе.

Дальнейшим развитием пакета Super-Compact является вышедшая в середине 80-х годов и полностью с ним совместимая система Microwave Harmonica, позволяющая выполнять моделирование и ряда нелинейных СВЧ-устройств, таких как малошумящие усилители и усилители большого уровня мощности, смесители, генераторы, переключатели и другие устройства радиочастотных трактов. Для моделирования нелинейных устройств в этой системе используется метод гармонического баланса. В начале 90-х годов появляется версия системы Microwave Harmonica, ориентированная на платформу Windows. Различные версии системы Microwave Harmonica широко используются в России разработчиками радиоаппаратуры различного назначения.

В последние годы эту линию программ развивает фирма Ansoft, которой были разработаны новые программные системы:

Serenade, позволяющая выполнять моделирование и оптимизацию не только СВЧ-, но и оптоэлектронных устройств и имеющая много версий, в числе которых есть версии, ориентированные на топологическое представление моделируемого устройства. Имеются версии этой системы, ориентированные на платформы Windows 95 и Windows NT;

Super-Spice, в которой путем подключения известной программы Spice решена задача моделирования СВЧ-устройств во временной области;

Microwave Success, позволяющая выполнять моделирование систем радиотелефонии;

Microwave Explorer — система для моделирования электромагнитных полей в различных элементах радиоэлектронных устройств.

Кроме разработки программного обеспечения фирмой Ansoft поддерживаются банки данных с линейными и не-

линейными моделями элементов СВЧ- и оптоэлектронной техники.

В последние годы широкое распространение получила система APLAC 7.0, предназначенная для проектирования и моделирования электрических схем РЭУ. В состав схем могут входить как цифровые, так и аналоговые компоненты, в том числе устройства СВЧ-диапазона. Предусмотрены следующие виды расчетов: режим по постоянному току, частотные характеристики, спектральная плотность и коэффициент шума, чувствительность и параметрическая оптимизация, переходные процессы, спектры сигналов, анализ периодических режимов, статистический анализ по методу Монте-Карло. В основном этот набор опций стандартен, однако аналогичные расчеты проводятся обычно с помощью нескольких разных программ, а система APLAC 7.0 предоставляет пользователям интегрированную среду разработки радиоэлектронной аппаратуры. Другая важная особенность APLAC 7.0 — наличие большого набора библиотек элементов принципиальных схем и отдельных блоков, применяемых в аналоговых и цифровых системах связи. По своему функциональному составу эти библиотеки превосходят библиотеки других систем. Кроме того, в состав APLAC 7.0 входит подпрограмма расчета трехмерных электромагнитных полей микрополосковых конструкций и других устройств диапазона СВЧ. Система APLAC 7.0 также предоставляет возможность ввода результатов измерений и вывода управляющих сигналов с помощью интерфейсных плат стандарта IEEE-488 [10].

Система Electronics Workbench в отличие от других программ схемотехнического моделирования изображает на экране измерительные приборы с органами управления, максимально приближенными к реальности. Пользователь освобождается от изучения довольно абстрактных правил составления заданий на моделирование. Достаточно на схему поместить двухканальный осциллограф и генератор сигналов — и программа сама сообщает, что нужно анализировать переходные процессы. Если же на схеме разместить анализатор спектра, то бу-

дет рассчитан режим по постоянному току, выполнена линеаризация нелинейных компонентов и затем произведен расчет характеристик схемы в частотной области. Диапазон анализируемых частот, коэффициент усиления и характер оцифровки данных (в линейном или логарифмическом масштабе) устанавливаются на лицевой панели с помощью мыши. Чтобы начать моделирование, достаточно щелкнуть выключателем. После этого на устройствах индикации цифровых вольтметров и амперметров будет зафиксирован режим по постоянному току, на экране измерителя нарисованы частотные характеристики (амплитудно- или фазочастотные), а на экране осциллографа будут непрерывно изображаться эпюры напряжений до тех пор, пока не заполнится буферная память, а затем можно прекратить моделирование или обнулить память и продолжить наблюдения [10].

Система Micro-Cap фирмы Spectrum Software нашла наибольшее распространение в студенческой среде как наиболее простая и доступная в изучении, однако перечень ее возможностей достаточно широк [9]. Программа имеет удобный многостраничный редактор принципиальных схем, поддерживающий различные структуры. Имеется возможность описания цифровых компонентов с помощью логических выражений, что в сочетании с библиотекой графических символов типовых операций (суммирование, вычитание, умножение, интегрирование, применение преобразований Лапласа и др.) позволяет моделировать динамические системы, заданные не только принципиальными, но и функциональными схемами. Кроме того, в системе Micro-Cap имеется специальная программа MODEL для расчета параметров математических моделей аналоговых компонентов по справочным или экспериментальным данным.

Пакет программ Micro-LOG разработан также фирмой Spectrum Software и предназначен для моделирования цифровых устройств на логическом уровне. При моделировании в пакете используются базовые логические элементы и макрорасширения, представляющие собой ранее созданные схемы на основе базовых логических

элементов — отдельных триггеров, регистров, линий для соединения входов и выходов отдельных элементов, программируемых генераторов входных сигналов, тактовых генераторов, задающих шкалу модельного времени.

Моделирование цифровых устройств возможно без учета задержек срабатывания (синхронными алгоритмами) и с учетом задержек срабатывания (асинхронными алгоритмами), которые для отдельных вентилях могут выбираться равными максимальными или минимальными для данной технологии, либо фиксированными из банка данных по конкретной серии микросхем. Пакет позволяет одновременно создавать и моделировать до девяти различных цифровых блоков, каждый из которых может содержать до 200 вентилях.

Результатами моделирования являются временные диаграммы сигналов на различных узлах цифрового устройства на протяжении модельного времени, определенного числом тактов. Программируемые генераторы входных сигналов могут включать до 1024 тактов, минимальная длительность такта равна 1 нс.

Описание моделируемого цифрового устройства осуществляется с помощью интерактивной машинной графики с рисованием схемы устройства на экране монитора. Система вложенных меню позволяет легко выбирать текущие элементы, редактировать схему устройства, выполнять операции с файлами, изменять представление результатов моделирования и выполнять другие операции.

Для обеспечения разработчика информацией о параметрах цифровых устройств в пакет включен банк данных, содержащий информацию о сериях ТТЛ и КМОП микросхем, наиболее широко используемых в практике, стандартные генераторы входных сигналов и тактовые генераторы. Банк может расширяться пользователем.

Вывод информации о результатах моделирования осуществляется на экран монитора, печать либо графопостроитель и включает схему цифрового устройства и временные диаграммы сигналов на выбранных пользователем узлах.

### 1.3.2. Пакеты программ конструкторского проектирования радиоэлектронных средств и устройств

В большинстве из рассмотренных выше пакетов схемотехнического проектирования РЭУ предусмотрены операции конструкторского проектирования.

Однако существуют чисто конструкторские пакеты, обеспечивающие более полное решение различных задач конструкторского проектирования РЭУ.

Пакет программ P-CAD фирмы Personal CAD Systems Inc. — это полное комплексное программное решение для проектирования электронных устройств, в частности для ввода схемы и проектирования схемной печатной платы. Комплексное решение предполагает, что логика, описанная в схеме, воплощается в топологию печатной платы, а программы осуществляют функции логического моделирования, проверяют соблюдение правил проектирования, создают список соединений для моделирования, автоматически размещают компоненты и трассируют печатную плату, создают документы для автоматизированных производственных систем. Пакет содержит взаимодействующие средства проектирования, удобную для пользователя оболочку и интеллектуальную базу данных, обширную библиотеку, диалоговые редакторы, средства сопряжения с популярными средствами анализа. Пакет имеет открытую архитектуру, обеспечивает выдачу готовых документов для технологии монтажа и другой проектной документации.

Вывод документации после контроля на дисплее может осуществляться на принтер, плоттер или фотоплоттер. Оболочка системы помогает пользователю двигаться сквозь процесс проектирования с помощью меню, подсказок и правок. Система проектирования печатной платы обеспечивает средства для полной разработки топологии от диалогового редактора до автоматического размещения компонентов, автотрассировки, проверки соблюдения правил проектирования и сопряжения с производством.

Библиотека пакета содержит обширную информацию о компонентах электронных схем от дискретных и элек-



троемеханических деталей до существующих и заказных микросборок интегральных схем. Программные средства сопряжения превращают данные из списка соединения компонентов схемы в формат, необходимый для конкретной программы моделирования цифровой и аналоговой схемы (типа PSPICE и др.). Пакет позволяет проектировать печатные платы, имеющие до 500 элементов и 2000 связей.

Пакет программ OrCAD фирмы OrCAD Sistem Corp. является законченным и гибким программным блоком схемотехнического и конструкторского проектирования. Он обеспечивает ввод и вывод на печать принципиальных схем, трассировку печатной платы и другие операции. Пакет управляется с помощью иерархической разветвленной системы меню, легок в обучении, обладает многими дополнительными возможностями ввода и вывода схем.

Библиотека пакета содержит 2700 изображений компонентов РЭУ и позволяет легко создавать собственные начертания элементов. Простым нажатием клавиши легко выполняются многие графические операции при вводе и выводе схем: увеличение и уменьшение масштаба, преобразование (вращение, перенос, отображение и пр.) элементов и любых заданных фрагментов схемы. В системе предусмотрено создание перечня элементов (спецификаций), возможность разводнения проводников, шин, входов модулей.

Пакет OrCAD в настоящее время является самым удобным и богатым по своим возможностям для ввода и вывода графических изображений принципиальных схем РЭС. В его состав с 2003 года включен пакет схемотехнического проектирования DesignLab, имеющий удобный выход на подсистемы моделирования и анализа РЭУ, а также другие графические пакеты (PSPICE, P-CAD и др.).

Пакет универсального назначения AutoCAD фирмы Autodesk разработан на самом современном уровне машинной графики и представляет разработчику исключительно широкие возможности проектирования разнообразных объектов, технических систем и устройств. Пакет представляет собой систему автоматизированной разработки чертежей, причем чертежи, рисунки и схемы создаются в интерактивном режиме, управляемом систе-

мой иерархических меню. В любой чертеж может быть вставлен поясняющий текст. В набор функций входит панорамирование, увеличение, масштабирование, поворот, секционирование, штриховка и другие операции преобразования изображений. В системе предусмотрены подсказки в любом состоянии и для любой команды.

В пакете разработан богатый выбор драйверов графических устройств — графических дисплеев, матричных принтеров, графических планшетов и плоттеров. Одним из важнейших достоинств пакета является возможность работы с трехмерной графикой, позволяющей строить реальные объекты, которые можно наблюдать в различных ракурсах (при желании невидимые линии на изображении стираются). В этом пакете применен специальный метод полилиний для вывода сложных кривых контуров деталей.

Система AutoCAD непрерывно совершенствуется. Так, в последние версии системы включен интерпретатор языка AutoLisp — одной из версий языка LISP, широко применяемого в символьной обработке и в системах искусственного интеллекта. Использование этого языка позволяет пользователю, с одной стороны, определять собственные функции и команды в среде AutoCAD, с другой — обеспечивать связь AutoCAD с другими приложениями. Сейчас начинают применяться еще более сложные системы, включающие не только язык программирования, но и экспертные системы (экспертные настройки) для принятия решений и подсказок конструктору в процессе разработки. В эти настройки включен набор правил и математических моделей, с помощью которых конструктор в процессе работы может получить «советы» по оптимальному выбору тех или иных параметров разрабатываемой системы.

### 1.3.3. Программные системы для электродинамического моделирования СВЧ-устройств и полей

Для электродинамического моделирования СВЧ-устройств и полей в настоящее время широко применяется программная система Microwave Office. Эта система

включает два основных программных модуля: EMSight и Voltaire XL, которые позволяют решать широкий круг задач, возникающих при проектировании высокочастотных интегральных и монолитных СВЧ-микросхем, антенн, СВЧ-согласующих цепей и фильтров, усилителей, смесителей и автогенераторов [1].

В пакете EMSight для анализа полей используется метод моментов Галеркина, представляющий точный и устойчивый алгоритм электродинамического моделирования. Здесь также используется алгоритм быстрого частотного свипирования, позволяющий на порядок сократить время моделирования по сравнению с обычным поточечным методом частотного анализа.

Пакет EMSight позволяет анализировать поля в слоистых средах с проводниками произвольной формы, рассчитывать поля антенны в дальней зоне и т. п. Пакет имеет расширенные графические возможности, которые позволяют разработчикам наблюдать реалистичное анимационное изображение токов высокой частоты, показывающее как амплитуду тока, так и его направление в трехмерном пространстве. Пакет также имеет обширные возможности для обработки и представления полученных при моделировании результатов.

В пакете программ Voltaire XL используются самые последние разработки методов схемотехнического моделирования. Модуль пакета, предназначенный для линейного моделирования в частотной области, содержит более 500 моделей сосредоточенных и распределенных элементов СВЧ-цепей, включая микрополосковые, копланарные и шелевые элементы, полые и диэлектрические волноводы.

Для анализа нелинейных устройств используются одно- и многочастотные методы гармонического баланса, для анализа интермодуляционных искажений — ряды Вольтера, конверсионно-матричный метод для анализа смесителей. В пакете используется высокоскоростной метод шумового анализа, а также интегрированная система описания схем со встроенной поддержкой для файлов систем Spice и MMICAD. Пакет позволяет выполнять нелинейный анализ усилителей, смесителей и автогене-

раторов, нелинейный шумовой анализ, включая анализ фазовых шумов, шумов смесителей, а также нелинейный анализ их устойчивости.

EMSiight и Voltaire XL написаны на объектно-ориентированном языке C++, имеют общий дружественный пользователю интерфейс, могут интегрировать в себя новые методы моделирования по мере их появления.

Microwave Office работает под управлением 32-разрядных операционных систем, таких как Windows 95, Windows 98, Windows NT, и оптимизирован для работы под ними.

Фирмой EAGLEWARE создана универсальная программная система Genesys, предназначенная для проектирования LC-фильтров, усилителей, смесителей и автогенераторов, распределенных СВЧ-согласующих цепей и фильтров, активных фильтров, выравнивателей группового времени задержки и других элементов РЭУ. Система Genesys включает множество программных модулей, основными из которых являются SuperStar Pro, Schemax, Layout, Filter, Oscillator, Match, T/Line и др.

Пакет SuperStar Pro представляет собой высокоскоростную программу для моделирования радиочастотных цепей, содержащую множество моделей пассивных компонентов цепей как СВЧ, так и более низкочастотных диапазонов. Активные компоненты радиочастотных цепей моделируются с использованием S-параметров. При моделировании допускается произвольное число портов в цепи. В процессе работы программы могут вычисляться различные импедансные и адмиттансные характеристики рассеяния, а также распределения полей по проводникам моделируемого устройства.

Пакет Schemax позволяет на интуитивном уровне создавать графические образы моделируемых элементов РЭУ для передачи описания в SuperStar Pro. Программа импортирует файлы описания цепей из систем DesignCenter, DesignLab и других стандартных форматов описания цепей СВЧ.

Пакет Layout позволяет по описанию моделируемого устройства в SuperStar Pro и Schemax синтезировать его топологию и представить трехмерную анимационную

картину распределения токов по проводникам. Он обеспечивает возможность использования в устройстве до 128 слоев, включая металлизацию, диэлектрические подложки, монтажные слои и т. п. Программа содержит большую библиотеку геометрических образов пассивных и активных компонентов СВЧ-цепей. Выходной файл программы Layout соответствует DXF-файлу системы AutoCAD.

Различные модификации пакетов Filter и программы Oscillator позволяют синтезировать разнообразные типы СВЧ-, LC- и активных фильтров, автогенераторов и усилителей с выполнением анализа шумов.

Пакет Match предназначен для синтеза сосредоточенных и распределенных согласующих цепей, включенных между двумя произвольными комплексными нагрузками. Пакет позволяет решать задачи максимизации полосы пропускания при заданном уровне отражения сигнала либо минимизации отражения в заданной полосе частот.

Пакет T/Line позволяет выполнять анализ и синтез одиночных и связанных передающих линий различной конфигурации по их геометрическим или электрическим характеристикам.

В системе Genesys используется совершенный графический интерфейс, поддерживается библиотека для нескольких тысяч выпускаемых промышленностью активных и пассивных компонентов. Система Genesys имеет пользовательский интерфейс, полностью совпадающий со стандартным интерфейсом программного обеспечения фирмы Microsoft, снабжена многочисленными файлами помощи, что делает ее удобной для использования и легкой для освоения.

# ГЛАВА 2

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПОНЕНТОВ РЭУ РАЗЛИЧНОГО УРОВНЯ СЛОЖНОСТИ

### 2.1. Математические модели РЭУ и их элементов

Компьютерное проектирование радиоэлектронных устройств предполагает предварительное описание этих средств на языке математики в виде, удобном для его алгоритмической реализации.

Математическое описание проектируемого объекта называется его математической моделью. **Математическая модель** — это совокупность математических элементов (чисел, переменных, векторов, множеств и т. п.) и отношений между ними, которые с требуемой для проектирования точностью описывают свойства проектируемого объекта. На каждом этапе проектирования используется свое математическое описание проектируемого объекта, сложность которого должна быть согласована с возможностями анализа на ЭВМ. Поэтому при проектировании одного объекта может применяться несколько моделей различного уровня сложности.

В общей теории математического моделирования математическая модель любого объекта характеризуется внутренними, внешними, выходными параметрами и фазовыми переменными [4].

**Внутренние параметры** модели определяются характеристиками компонентов, входящих в проектируемый объект, например, номиналами элементов принципиальной схемы. Если проектируемый объект содержит  $n$  элементарных компонентов, то и его математическая модель будет определяться параметрами  $w_1 \dots w_n$ , которые образуют вектор внутренних параметров  $\vec{W} = |w_1 \dots w_n|^T$ . Каждый из параметров  $w_i$ , в свою очередь, может быть функцией, вектором или еще более сложным математическим функционалом в зависимости от объекта проектирования.

**Выходные параметры** модели — это показатели, характеризующие функциональные, эксплуатационные, конструкторско-технологические, экономические и другие характеристики проектируемого объекта. К таким показателям могут относиться коэффициенты передачи, масса и габариты проектируемого объекта, надежность, стоимость и т. п.

Понятия **внутренних и выходных параметров** инвариантны, так как при моделировании на более высоком уровне выходные параметры могут стать внутренними и наоборот. Например, сопротивление резистора является внутренним параметром при моделировании усилительного устройства, компонентом которого он является. Но это же сопротивление будет являться выходным параметром при моделировании самого резистора при пленочном его исполнении. Вектор выходных параметров модели принято обозначать  $\vec{F} = |f_1 \dots f_k|^T$ .

**Внешние параметры** модели — это характеристики внешней по отношению к проектируемому объекту среды, а также рабочие управляющие воздействия. Вектор внешних параметров в общем случае содержит множество самых различных составляющих. К его составляющим с полным правом можно отнести все, что говорилось ранее о составляющих вектора внутренних параметров.

Вектор внешних параметров модели принято обозначать  $\overline{Q} = |q_1 \dots q_m|^T$ .

Уравнения математической модели могут связывать некоторые физические характеристики компонентов, которые полностью характеризуют состояние объекта, но не являются выходными или внутренними параметрами модели (например, токи и напряжения в радио-электронных устройствах, внутренними параметрами которых являются номиналы элементов электрических схем, а выходными параметрами — выходная мощность, коэффициент передачи и т. п.). Такие характеристики называют **фазовыми переменными**. Минимальный по размерности вектор фазовых переменных  $\overline{V} = |v_1 \dots v_r|^T$ , полностью характеризующий работу объекта проектирования, называется **базисным вектором**. Например, при составлении уравнений математической модели радио-электронных устройств в качестве базисного вектора  $\overline{V}$  можно использовать переменные их состояния в виде вектора узловых потенциалов или вектора напряжений на конденсаторах и токов в индуктивностях. Использование вектора фазовых переменных позволяет упростить программирование уравнений математической модели устройства.

В общем случае **выходные параметры**  $\overline{F}$  представляются операторами от векторов  $\overline{V}$ ,  $\overline{W}$ ,  $\overline{Q}$  и могут быть определены из решения системы уравнений математической модели устройства. С учетом вышесказанного математическая модель любого радиотехнического объекта может быть представлена в виде следующих систем уравнений:

$$\overline{\varphi}(\overline{V}, \overline{W}, \overline{Q}) = 0; \quad (2.1)$$

$$\overline{F} = \overline{\psi}(\overline{V}), \quad (2.2)$$

где  $\overline{\varphi}$  и  $\overline{\psi}$  — операторы, определяющие вид систем уравнений модели.

**Система уравнений** (2.1) может представлять собой систему линейных алгебраических уравнений, нели-



нейных уравнений различного вида, дифференциальных уравнений в полных или частных производных и является **собственно математической моделью проектируемого объекта**. В результате решения системы (2.1) определяются действующие в устройстве фазовые переменные  $\bar{V}$ .

**Система уравнений** (2.2) определяет **зависимость выходных параметров объекта от фазовых переменных  $\bar{V}$** .

В частных случаях составляющие вектора  $\bar{V}$  могут являться внутренними или выходными параметрами объекта, и тогда системы уравнений (2.1), (2.2) упрощаются.

Часто **моделированием** называют лишь составление системы (2.1). Решение уравнений (2.1) и отыскание вектора  $\bar{F}$  с помощью уравнения (2.2) называют **анализом математической модели**.

На каждом уровне моделирования различают **математические модели** проектируемого радиотехнического объекта и **компонентов**, из которых состоит объект.

**Математические модели компонентов** представляют собой системы уравнений, устанавливающих связь между фазовыми переменными, внутренними и внешними параметрами, относящимися к данному компоненту. Эти уравнения называют **компонентными**, а соответствующую модель — **компонентной**.

**Математическую модель объекта** проектирования, представляющего объединение компонентов, **получают на основе математических моделей компонентов**, входящих в объект. Объединение компонентных уравнений в математическую модель объекта осуществляется на основе фундаментальных физических законов, выражающих условия непрерывности и равновесия фазовых переменных, например, законов Кирхгофа. Уравнения, описывающие эти законы, называют **топологическими**, так как они отражают связи между компонентами в устройстве. **Совокупность компонентных и топологических уравнений** для проектируемого объекта и **образует его математическую модель** в виде системы (2.1).



Исходя из задач конкретного этапа проектирования, математическая модель проектируемого объекта должна отвечать самым различным требованиям:

- отражать с требуемой точностью зависимость выходных параметров объекта от его внутренних и внешних параметров в широком диапазоне их изменения;
- иметь однозначное соответствие физическим процессам в объекте;
- включать необходимые аппроксимации и упрощения, которые позволяют реализовать ее программно на ЭВМ с различными возможностями;
- иметь большую универсальность, то есть быть применимой к моделированию многочисленной группы однотипных устройств;
- быть экономичной с точки зрения затрат машинных ресурсов и т. п.

Эти требования в своем большинстве являются противоречивыми, и удачное компромиссное удовлетворение этих требований в одних задачах может оказаться далеким от оптимальности в других. По этой причине для одного и того же компонента или устройства часто приходится иметь не одну, а несколько моделей. В связи с этим классификация моделей радиоэлектронных устройств должна выполняться по множеству признаков, чтобы охватить все возможные случаи.

По уровню сложности различают *полные модели* и *макромодели*. *Полные модели* объекта проектирования получают путем непосредственного объединения компонентных моделей в общую систему уравнений. *Макромодели* представляют собой упрощенные математические модели, аппроксимирующие полные.

В свою очередь, макромодели делят на две группы: *факторные* и *фазовые*.

*Факторные* модели предназначены для использования на последующих этапах проектирования в качестве компонентных моделей. Их выходными параметрами являются фазовые переменные полных математических моделей для следующего этапа проектирования.

*Фазовые* макромодели используются на том же этапе проектирования, на котором их получают, и предназначены для сокращения размерности решаемой задачи.

По способу получения математические модели радиотехнических объектов делятся на *физические* и *формальные*.

*Физические* модели получают на основе изучения физических закономерностей функционирования проектируемого объекта, так что структура уравнений и параметры модели имеют ясное физическое толкование.

*Формальные* модели получают на основе измерения и установления связи между основными параметрами объекта в тех случаях, когда физика работы его известна недостаточно полно. Как правило, формальные модели требуют большого числа измерений и по своей природе являются локальными, справедливыми вблизи тех режимов, в которых производились измерения. Такие модели иногда называют моделями «черного ящика».

В современных системах автоматизированного проектирования формирование системы уравнений математической модели проектируемого объекта выполняется автоматически с помощью ЭВМ. В зависимости от того, что положено в основу алгоритма формирования системы уравнений, модели радиотехнических объектов можно разделить на три группы: *электрические*, *физико-топологические* и *технологические*.

Понятие *электрической модели* включает либо систему уравнений, связывающих напряжения и токи в электрической схеме, являющейся моделью объекта, либо саму электрическую схему, составленную из базовых элементов (резисторов, конденсаторов и т. п.). На основе электрической модели можно в ЭВМ получить систему уравнений, связывающих напряжения и токи в модели объекта.

В *физико-топологических моделях* исходными параметрами являются геометрические размеры определяющих областей проектируемого объекта и электрофизические характеристики материала, из которых они состоят. В результате решения системы уравнений этой модели определяются потенциалы внутри и на внешних выводах



устройства. Такие модели применяются при разработке полупроводниковых приборов, СВЧ-устройств и в ряде других случаев.

*Технологические модели* основываются на параметрах технологических процессов изготовления проектируемого объекта (температуре и времени диффузии, концентрации диффузанта и т. п.). Выходными параметрами такой модели является совокупность физико-топологических либо технологических параметров.

По способу задания внутренних и внешних параметров математические модели делятся на две группы: *дискретные* и *непрерывные*.

Различают модели *статические* и *динамические* в зависимости от того, учитывают ли уравнения модели инерционность процессов в проектируемом объекте или нет.

*Статические модели* отражают состояние объекта проектирования при неизменных внешних параметрах и не учитывают его переходные характеристики.

*Динамические модели* дополнительно отражают переходные процессы в объекте, происходящие при изменении во времени внешних параметров.

Существуют и другие варианты классификации математических моделей элементов и узлов радиоустройств.

При проектировании радиотехнических объектов наиболее широкое распространение получили электрические модели.

Программа моделирования радиотехнических и других объектов должна автоматически формировать систему уравнений математической модели из базового набора элементарных схемных элементов, компонентные уравнения для которых хранятся в библиотеке программы.

Для синтеза адекватных реальному объекту моделей большинства радиотехнических устройств базовый набор должен содержать, по крайней мере, пять типов сосредоточенных схемных элементов, перечисленных в таблице 2.1. В таблице приведены и компонентные уравнения для каждого из элементов базового набора.

Табл. 2.1. Схемные элементы радиотехнических устройств и их компонентные уравнения

Базовые элементы	Компонентные уравнения		
	в операторной форме	во временной форме	в частотной форме
1. Резистор:			
линейный	$u = R i(s)$	$u(t) = R i(t)$	$u(\omega) = R i(\omega)$
управляемый током	$u = r(i) i(s)$	$u(t) = R[i(t)] \cdot i(t)$	$u(\omega) = R[i(\omega)] i(\omega)$
управляемый напряжением	$i = G(u) u(s)$	$i(t) = G[u(t)] u(t)$	$i(\omega) = G[u(\omega)] u(\omega)$
2. Конденсатор:			
линейный	$i = Csu(s)$	$i(t) = cd u/dt$	$i(\omega) = j\omega C u(\omega)$
управляемый током	$u = \frac{i(s)}{sC(i)}$	$u(t) = \int \frac{i(t)}{C(i)} dt$	$u(\omega) = \frac{i(\omega)}{j\omega C(i)}$
управляемый напряжением	$i = sC(u)u(s)$	$i(t) = \frac{d[C(u)u(t)]}{dt}$	$i(\omega) = j\omega C(u) u(\omega)$
3. Индуктивность:			
линейная	$u = Ls i(s)$	$u(t) = L \frac{di(t)}{dt}$	$u(\omega) = j\omega L \cdot i(\omega)$
управляемая током	$u = sL(i) i(s)$	$u(t) = \frac{d[L(i) i(t)]}{dt}$	$u(\omega) = j\omega L(i) i(\omega)$
управляемая напряжением	$u = s\Phi(s)$	$u(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt}$	$u(\omega) = j\omega \Phi(\omega)$



4. Источник напряжения:			
независимый	$u = E(s)$	$U = E(t)$	$u(\omega) = E(\omega)$
управляемый током $i_{ab}$	$u = E[i_{ab}(s)]$	$u(t) = E[i_{ab}(t)]$	$u(\omega) = E[i_{ab}(\omega)]$
управляемый напряжением $u_{ab}$	$u = E[u_{ab}(s)]$	$u(t) = E[u_{ab}(t)]$	$u(\omega) = E[u_{ab}(\omega)]$
5. Источник тока:			
независимый	$i = I(s)$	$i = I(t)$	$i(\omega) = I(\omega)$
управляемый током $i_{ab}$	$i = I[i_{ab}(s)]$	$i(t) = I[i_{ab}(t)]$	$i(\omega) = I[i_{ab}(\omega)]$
управляемый напряжением $u_{ab}$	$i = I[u_{ab}(s)]$	$i(t) = I[u_{ab}(t)]$	$i(\omega) = I[u_{ab}(\omega)]$

Компонентные уравнения могут связывать мгновенные значения напряжений и токов, действующих на базовом элементе, либо их комплексные амплитуды. В первом случае говорят о моделировании во временной области, во втором — в частотной. Чем больший набор базовых компонентов позволяет использовать система автоматизированного проектирования, тем более многофункциональной она является.

При проектировании и моделировании РЭУ в качестве входных величин используются различные виды детерминированных и случайных сигналов.

К **детерминированным** относятся следующие сигналы [5]:

- немодулированные гармонические и модулированные по заданному закону колебания;
- ступенчатый (постоянный) сигнал;
- линейно возрастающий (убывающий) сигнал;
- дискретный импульсный сигнал;
- сигналы, задаваемые двузначными (двоичными) и многозначными алфавитами.

К **случайным** сигналам относятся гармонические сигналы с изменяющимися по случайному закону параметрами (амплитудой, фазой), сигналы в виде последовательностей случайных чисел, дискретные сигналы случайной амплитуды, сигналы в виде «белого шума» и др.

Основной принцип моделирования детерминированных (в первую очередь, колебательных) сигналов базируется на утверждении о том, что любую функцию времени можно рассматривать как решение некоторого дифференциального уравнения. Поэтому сущность моделирования любого сигнала, описываемого некоторой функцией времени, заключается в синтезе по этой функции дифференциального уравнения, решение которого на ЭВМ при заданных начальных условиях и дает искомый сигнал.

К настоящему времени накоплен большой опыт в создании типовых блоков и программ, выполняющих функции генераторов гармонических колебаний с постоянными и управляемыми параметрами, амплитудных фазовых и частотных модуляторов и демодуляторов, интеграторов, сумматоров, корреляторов, линий задержки, ограничителей амплитуды, генераторов колебаний специальной формы и др. Комбинации перечисленных блоков позволяют получать модели различных видов сигналов.

Случайные сигналы при анализе и синтезе РЭУ используются для формирования начальных условий, для воспроизведения значений случайных параметров, от которых зависит моделируемая функция, а также для формирования случайных функций времени. Во всех перечисленных случаях исходным является получаемый от специального шумового генератора стандартный случайный процесс с заданными статистическими характе-



ристиками. Обычно в качестве стандартного применяется генератор белого шума с равномерным или нормальным законом распределения с нулевым средним значением и единичной дисперсией.

Случайные сигналы с другими распределениями и требуемыми статистическими характеристиками формируются на основе нелинейных безынерционных преобразований или линейной фильтрации исходного сигнала в виде белого шума. В [12] приводятся модели случайных сигналов для их использования в инженерных и научных целях.

При проектировании РЭУ в области радиосвязи важное значение имеет исследование характеристик устройств в условиях воздействия преднамеренных помех, создаваемых средствами радиоэлектронной борьбы. Некоторые модели преднамеренных помех и способы их разработки приводятся в [3].

Применяемые при имитационном моделировании и статистической оптимизации РЭУ сигналы в виде последовательностей случайных чисел с любым заданным законом распределения моделируются с помощью программных генераторов (датчиков) случайных чисел.

В основе таких программных генераторов различных распределений случайных чисел лежит генератор равномерного распределения на интервале от нуля до единицы, входящий в состав стандартного программного обеспечения ЭВМ.

В современных системах автоматизированного проектирования РЭУ и системах автоматизации математических расчетов могут применяться аппаратные и программные блоки, формирующие модели детерминированных и случайных сигналов в виде:

- постоянной (скалярной, векторной или матричной) величины;
- непрерывного сигнала произвольной формы;
- единичного дискретного сигнала с заданными параметрами;
- линейно возрастающего (убывающего) сигнала;
- гармонического колебания постоянной частоты;



- гармонического колебания переменной частоты;
- дискретного импульсного сигнала;
- непрерывного временного сигнала;
- дискретного временного сигнала;
- дискретного сигнала случайной амплитуды, распределенной по нормальному закону;
- «белого шума» с ограниченной полосой пропускания и др.

Ниже рассматриваются алгоритмы анализа аналоговых и цифровых устройств, а также методы моделирования полей.

## 2.2. Алгоритмы анализа аналоговых устройств

Математическая модель любого аналогового радиоэлектронного устройства может быть представлена в виде двух систем уравнений. Первая система является собственно математической моделью проектируемого объекта в виде линейных алгебраических, нелинейных, дифференциальных и других уравнений. Решение этой системы позволяет определить действующие в устройстве фазовые переменные. Вторая система уравнений определяет зависимость выходных параметров радиотехнического устройства от фазовых переменных. Конкретный вид алгоритма формирования системы уравнений математической модели зависит от выбранного вектора фазовых переменных.

В зависимости от того, являются ли фазовые переменные функциями времени или комплексной частоты, различают математические модели радиоэлектронных устройств и систем во временной и частотной областях. В обоих случаях при формировании системы уравнений математической модели обычно используется операторная форма записи компонентных уравнений для базовых элементов электрических моделей. Это объясняется удобством алгоритмического преобразования системы интегро-дифференциальных уравнений, записанных в операторной форме, к виду, наиболее удобному для численного решения, а также удобством перехода от опе-



раторной формы записи к частотным моделям заменой оператора  $s$  на мнимую частоту  $j\omega$  и целесообразностью использования обратного преобразования Лапласа.

Модели во временной области наиболее удобны для анализа переходных процессов в радиоэлектронных устройствах, а также при исследовании статического режима и проектировании нелинейных устройств.

При проектировании радиоэлектронных устройств и электронных схем применяются следующие алгоритмы формирования системы уравнений их математических моделей во временной области [4]:

- табличный метод;
- метод узловых потенциалов и контурных токов;
- метод переменных состояния;
- моделирование статического режима РЭУ;
- моделирование переходных процессов в РЭУ.

**Табличный метод** обеспечивает формирование системы уравнений математической модели на основе использования в качестве фазовых переменных токов ветвей, напряжений на них, а также узловых потенциалов, отсчитанных от заземленного узла электрической модели. Недостатком этого метода является большая размерность системы уравнений, что затрудняет его использование при автоматизированном проектировании РЭУ.

**Метод узловых потенциалов** предполагает преобразование всех источников напряжения электрической модели радиоэлектронного устройства в источники тока в соответствии с теоремой об эквивалентном генераторе. В результате электрическая модель будет содержать только пассивные базовые элементы и источники тока. Это дает возможность выразить для всей совокупности пассивных базовых элементов связи между токами ветвей и напряжениями на них через проводимость в матричной операторной форме. В конечном итоге математическая модель РЭУ представляется в виде системы дифференциально-алгебраических уравнений относительно узловых потенциалов, являющихся неизвестными фазовыми переменными. В [6] читатель может найти достаточно полное описание данного метода.

При моделировании по **методу контурных токов** в качестве вектора фазовых переменных выбирается вектор токов в хордах графа электрической модели. При этом все зависимые и независимые источники тока в модели устройства должны быть преобразованы в эквивалентные источники напряжения. В результате математическая модель устройства будет представлять собой удобную для реализации на ЭВМ систему уравнений относительно токов, протекающих через пассивные элементы и через источники напряжения.

**Метод переменных состояния** позволяет представить математическую модель устройства в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка относительно переменных, называемых переменными состояния, вектора входных воздействий и вектора выходных параметров. При этом численное решение системы уравнений относительно вектора фазовых переменных является самым простым в сравнении с другими методами моделирования.

**Моделирование статического режима** (режима работы по постоянному току) РЭУ предполагает построение модели устройства в виде системы нелинейных уравнений относительно выбранного вектора фазовых переменных (узловых потенциалов или переменных состояния).

**Моделирование переходных процессов РЭУ** производится на основе определения временной зависимости выходного параметра модели в виде формулы приближенного обратного преобразования Лапласа, используемой для описания переходных процессов в линейных электрических цепях.

При моделировании РЭУ в частотной области наиболее широко применяется **метод комплексных амплитуд**. При моделировании РЭУ методом комплексных амплитуд (**спектрального анализа**) в качестве фазовых переменных применяются напряжения и токи на отдельных элементах, входах четырехполюсников (многополюсников) и линейные комбинации напряжений и токов цепи. В качестве выходных параметров РЭУ используются входные и передаточные комплексные сопротивления и проводимости, коэффициенты отражения и передачи по напряжению



и току, коэффициенты усиления радиоэлектронных устройств и др.

Рассматриваемые методы делятся на две группы, в первой из которых используется связь между временными и частотными характеристиками цепей, а во второй — выполняется непосредственное моделирование выходных параметров РЭУ.

Методы первой группы обеспечивают определение частотного коэффициента передачи с помощью прямого преобразования Фурье, расчет спектров выходных сигналов по заданным входным сигналам и нахождение временных характеристик выходных сигналов с помощью обратного преобразования Фурье.

В методах второй группы для анализа РЭУ используется зависимость спектра выходного сигнала от произведения спектра входного сигнала и частотной передаточной функции. При этом частотные функции цепей моделируются по внутренним параметрам устройств. Методы второй группы позволяют для различных значений рабочих частот производить вычисления значений частотных характеристик устройств, то есть реализовывать так называемый **численный спектральный подход**. Поэтому они используются значительно чаще.

По сравнению с временными **методы частотного анализа и моделирования РЭУ** обладают высоким быстродействием и возможностью оценки устойчивости. Особенно проявляются их достоинства, если для моделирования РЭУ, радиочастотных и излучающих устройств, радиоэлектронных систем применяются **матрицы классической и волновой теории четырехполюсников**.

**При проектировании и моделировании радиоэлектронных устройств и радиоэлектронных систем** воздействия на входах и выходах их функциональных элементов рассматриваются как фазовые переменные математической модели. Способ описания фазовых переменных, оказывающий существенное влияние на состав модели и макро-модели функциональных блоков, определяет фактически **метод перехода от математической модели к цифровой**. Существует множество методов перехода от математической

модели к цифровой, к наиболее распространенным среди которых в настоящее время относятся [1]:

- **метод несущей**, когда используются мгновенные значения фазовых переменных, входных сигналов и их смеси с помехами;
- **метод комплексной огибающей**, когда фазовые переменные и входные сигналы описываются с точностью до их комплексных огибающих;
- **метод статистических эквивалентов**, когда реальные случайные процессы в радиоэлектронной системе представляются своими статистическими характеристиками, например математическими ожиданиями и дисперсиями, либо когда реальные процессы заменяются другими, но статистически адекватными им в рамках выбранного критерия, например, по совпадению определенного числа моментов;
- **метод информационного параметра**, когда вместо исследования прохождения реального сигнала в модели системы рассматривается прохождение через модель информационного параметра, для приема и обработки которого эта система предназначена;
- **комбинированные методы**.

**Метод несущей** используется для построения моделей высокочастотных и низкочастотных звеньев радиоэлектронных систем. Математические модели по методу несущей могут строиться на основе как принципиальных, так и структурных (функциональных) схем. При этом для описания преобразований сигналов и помех в элементах схемы могут использоваться спектральные или временные преобразования, а также дифференциальные уравнения. Наиболее широко (как указывалось ранее) используются при описании сигналов и помех дифференциальные уравнения. Этот метод позволяет с необходимой полнотой и заданной точностью реализовывать в цифровой модели операции, выполняемые каждым элементом.

**Метод комплексной огибающей** применяется тогда, когда информационный процесс  $\lambda = \lambda(t)$ , характеризующий преобразование информации в системе, заключен в комплексной огибающей сигнала. При этом необходимость воспро-



изведения в модели несущей, не содержащей информации, отпадает. Формирование модели в этом случае состоит в отыскании алгоритмов, позволяющих получать комплексные огибающие различных сигналов и помех и вычислять мгновенные значения комплексной огибающей на выходе любого элемента системы по мгновенным значениям на входе. Для моделирования методом комплексной огибающей разработан ряд способов математического описания типовых элементов (звеньев), сигналов и помех на основе метода медленно меняющихся амплитуд Ван-дер-Поля.

Сущность метода комплексной огибающей сводится к замене элемента (звена) радиоэлектронной системы с узкополосным входным воздействием эквивалентным низкочастотным звеном с входным воздействием в виде комплексной огибающей узкополосного сигнала. При известных описаниях типовых элементов радиоэлектронных систем (генераторов, модуляторов, демодуляторов, усилителей, сумматоров, интеграторов и т. д.) моделирование методом комплексной огибающей сводится к комбинированию известных алгоритмов в соответствии с функциональной схемой моделирующей системы.

**Метод статистических эквивалентов** состоит в замене реального элемента (звена) радиоэлектронной системы математической моделью, являющейся эквивалентом этого звена. При этом статистический эквивалент элемента системы обеспечивает адекватность выходного сигнала лишь в статистическом смысле, с точностью до заданных статистических характеристик. Наиболее часто в качестве оцениваемых статистических характеристик используются первые два момента (выборочные средние и дисперсии).

Замена реальных элементов системы их статистическими эквивалентами может производиться на основе метода статистической линеаризации, формульного метода, метода гармонической статистической реализации и др. Так, например, метод статистической линеаризации применяется для моделирования низкочастотных нелинейных элементов путем замены их линейными статистическими эквивалентами. Он обеспечивает адекватность математического ожидания и флуктуации сигнала относительно

математического ожидания. Этот метод является достаточно совершенным лишь при нормально распределенных случайных воздействиях.

**Метод информационного параметра** применяется для построения математических моделей таких радиоэлектронных систем и средств, в которых осуществляется преобразование информационного параметра. Он широко применяется при моделировании следующих типов радиоэлектронных систем и средств:

- измерителей параметров движения объектов (дальности, скорости, направления, местоположения и т. п.);
- РЛС-слежения за целью систем самонаведения;
- устройств автоматического слежения за фазой или частотой сигнала.

В качестве информационного параметра  $\lambda(t)$  может быть любой параметр, отслеживаемый системой: амплитуда, частота или фаза сигнала, угловое отклонение по азимуту и углу места, дальность цели и др. Сущность метода информационного параметра заключается в замене структурной схемы реальной системы с входным сигналом в виде смеси  $x(t, \lambda)$  структурой эквивалентной системы автоматического регулирования с входным воздействием в виде информационного параметра  $\lambda(t)$ . При этом главным вопросом является обеспечение статистической адекватности модели и реальной системы. Как правило, адекватность модели и системы обеспечивается идентичностью дифференциальных уравнений, позволяющих найти оценку информационного параметра  $\hat{\lambda}(t)$ , или величиной сигнала ошибки в виде  $\varepsilon(t) = \lambda(t) - \hat{\lambda}(t)$ .

Метод информационного параметра является универсальным для радиоэлектронных систем следающего типа, так как он позволяет осуществить их моделирование с единых позиций.

**Комбинированные методы** применяются в тех случаях, когда целью моделирования является выявление влияния параметров отдельных элементов радиоэлектронной системы на ее эффективность (показатели качества), например, при оптимизации систем.

При комбинированном методе разработки цифровой модели часть элементов радиоэлектронной системы (не-



существенно влияющая на ее эффективность) представляется функциональными моделями входящих в нее элементов, а другая часть воспроизводится в модели более точно, в виде дифференциальных уравнений, составленных, например, по принципиальной схеме. Комбинированные методы позволяют упростить модель радиоэлектронной системы в целом, существенно расширяя при этом возможности при исследовании наиболее важных с точки зрения вклада в эффективность системы характеристик.

### 2.3. Алгоритмы анализа цифровых устройств

В основе анализа цифровых устройств лежит использование их физических и логических моделей для получения картины логико-временного поведения устройства при различных входных воздействиях. Модели цифровых устройств, используемые при проектировании РЭУ, можно разделить на две основные группы: физические и логические [1].

При **физическом моделировании** отдельные элементы, из которых состоит цифровое устройство (ЦУ), представляются их электрическими макромоделями, состоящими из базовых элементов теории цепей (пленочных резисторов и конденсаторов, диффузных резисторов и конденсаторов, биполярного или МДП-транзистора, полупроводникового диода). На основании системы этих макромodelей формируется полная электрическая модель ЦУ.

Физические модели ЦУ позволяют наиболее полно представить работу устройства во времени с учетом реальных задержек срабатывания элементов. Эти модели целесообразно использовать на заключительном этапе проектирования РЭУ из-за больших затрат времени на моделирование, когда необходимо иметь данные об устройстве, которые нельзя получить с помощью более простых моделей.

При **логическом моделировании** каждый элемент ЦУ представляется упрощенной формальной моделью в виде логического соотношения, описывающего логику его функционирования [1]. При меньшей детализации работы в сравнении с физическими логические модели обладают



во много раз большим быстродействием и позволяют решать ряд важных практических задач:

- проверять правильность логического функционирования ЦУ;
- сравнивать характеристики различных вариантов схемных решений;
- разрабатывать процедуры тестового контроля ЦУ и проверять их правильность и полноту;
- проверять работу цепей установки ЦУ в начальном состоянии.

В настоящее время разработано много алгоритмов, пакетов прикладных программ и даже специализированных языков для анализа и моделирования ЦУ на логическом уровне.

При моделировании на логическом уровне физическая природа сигналов (ток или напряжение) в ЦУ не конкретизируется. **Сигналы задаются символами**, совокупность которых описывает состояние и работу элементов, из которых состоит ЦУ. Совокупность используемых при этом символов называется **алфавитом логического моделирования**. При этом между реальными сигналами и символами устанавливается однозначное соответствие.

Простейшим является двоичный алфавит, включающий всего два символа: 0 и 1. Он обеспечивает максимальную скорость моделирования, но не позволяет выявлять неоднозначность работы ЦУ и характер переходных процессов.

Моделирование ЦУ с помощью многозначных (троичных, пятизначных, девятизначных, бесконечных) алфавитов обеспечивает возможность получения большей информации о ЦУ. При этом отдельные элементы моделируются многозначными таблицами истинности, что приводит к увеличению требуемого времени моделирования. В качестве моделей элементов ЦУ используются формальные модели «черного ящика», в которых связь между входными и выходными сигналами элемента задается с помощью булевых уравнений либо таблиц истинности. Так, например, любое цифровое устройство может быть реализовано на основе комбинаций простейших базовых элементов цифровых схем И, ИЛИ, НЕ, операции сложения по модулю два и др.



При моделировании ЦУ на основе микросхем средней и большой степени интеграции более сложные элементы (триггеры, регистры, устройства памяти) могут представляться в одних случаях комбинациями простейших базовых элементов, а в других случаях описываться в терминах выполняемых ими операций (без разложения на составляющие их простейшие элементы).

Таким образом, математическая модель цифрового устройства представляет собой систему булевых уравнений, каждое из которых описывает один элемент ЦУ либо систему многомерных таблиц истинности. Такие математические модели могут быть реализованы на ЭВМ различными способами.

Алгоритмы анализа ЦУ в зависимости от учета или неучета задержек в их срабатывании делятся на *синхронные* и *асинхронные*, а по способу организации процесса решения системы уравнений — на *сквозные* и *событийные*.

Модели, реализующие *синхронный алгоритм* анализа, соответствуют работе синхронного автомата, в котором сигналы на входы ЦУ поступают только в моменты подачи синхросигналов. В остальное время входные сигналы не могут изменять состояние ЦУ. Переходные процессы в устройстве обязательно заканчиваются к моменту прихода следующего синхросигнала.

В моделях, реализующих *асинхронный алгоритм* анализа, модель каждого элемента представляется в виде каскадного соединения идеального безынерционного логического элемента и линии задержки на время (срабатывания элемента)  $t$ . Независимой переменной при этом является время  $t$ , продвигаемое с шагом, равным минимальной задержке срабатывания элемента в устройстве  $t$ .

Алгоритмы *сквозного моделирования* реализуются в пакетах прикладных программ автоматизации проектирования РЭУ на основе метода простой итерации, а также на основе методов итерации Зейделя с ранжированием и без ранжирования уравнений.

Алгоритмы *событийного моделирования* также реализуются методами простой итерации и итерации Зейделя. Они применяются в тех случаях, когда выигрыш от

уменьшения числа решаемых уравнений на всех итерациях превышает затраты на анализ элементов ЦУ.

## 2.4. Методы моделирования полей

При проектировании РЭУ может решаться задача моделирования полей, возникающих в радиоаппаратуре. При этом могут моделироваться как динамические (электромагнитные, тепловые), так и статические (электрические, магнитные, механические и др.) поля.

Как и в любой физической системе, между полями существуют причинно-следственные связи. Поэтому здесь также можно говорить о *внутренних* параметрах модели (конфигурации элементов, создающих поля), *внешних* параметрах (воздействиях, возмущающих поля) и *выходных* параметрах — реакциях результирующего поля на возмущения. Законы сохранения энергии и непрерывности применимы к любому виду поля — электрическому, тепловому, акустическому и т. д. Поэтому топологические уравнения для моделирования системы полей будут инвариантны относительно физической природы поля.

Как правило, при моделировании электронных схем используются фазовые переменные только одного типа, и математическая модель получается в виде обыкновенных дифференциальных (либо алгебраических) уравнений. Решение их сводится к разделению переменных и определению реакции на заданное воздействие.

При моделировании полей используются фазовые переменные двух типов: скалярные и векторные, так как изменение фазовых переменных по пространству и времени имеет сравнимую величину. Обычно, если внешние воздействия заданы в виде переменных одного типа, фазовые переменные, определяющие реакцию системы, относятся к другому типу, и наоборот.

При моделировании электродинамических объектов (антенн, устройств СВЧ и др.) используется система уравнений Максвелла в дифференциальной форме и материальные уравнения, зависящие от свойств среды.



Решение всех этих уравнений с учетом граничных условий (краевая задача математической физики) возможно аналитически только для простейших объемов, когда поверхности раздела совпадают с координатными плоскостями.

Реальные объекты электродинамики достаточно сложны, и усложнение их конфигурации ведет к быстрому росту трудоемких вычислительных процессов при решении единой краевой задачи.

Поэтому наиболее универсальным методом моделирования и анализа СВЧ-устройств является декомпозиционный подход — разбиение сложного устройства на ряд более простых устройств, допускающих независимый анализ и характеризуемых теми или иными матрицами параметров [1]. Эти простые устройства называют базовыми элементами (блоками).

Используется два способа анализа базовых элементов. По первому из них каждый базовый элемент заменяется некоторой схемой замещения, состоящей из сосредоточенных элементов  $L$ ,  $C$  и  $R$ , а также регулярных отрезков линии передачи, четырехполюсников и многополюсников. Электродинамические расчеты каждого из базовых элементов выполняются заблаговременно, а результаты представляются в виде приближенных формул и справочных таблиц, определяющих связь номиналов элементов схемы замещения с геометрическими размерами базового элемента, частотой, свойствами среды.

По второму способу — СВЧ-устройство разбивается на автономные блоки в виде определенных геометрических конфигураций, допускающих аналитическое или численное решение краевой задачи и определение матриц параметров. Далее, как и по первому способу, составляется модель всего устройства.

К другим методам моделирования полей относятся:

- проекционные методы решения электродинамических задач для отдельных базовых блоков СВЧ-устройств;
- метод конечных разностей (численный метод решения электродинамических задач);
- метод конечных элементов (проекционно-сеточный метод).

# ГЛАВА 3

## ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ DESIGNLAB ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

### 3.1. Состав и возможности системы схемотехнического моделирования РЭУ DesignLab

Проектирование электронной аппаратуры представляет собой итерационный процесс, состоящий из этапов функционального проектирования, разработки принципиальной схемы, разработки печатной платы, ее изготовления, проведения испытаний, доработки по их результатам принципиальной или функциональной схемы, внесения изменений в печатную плату и т. д., и осуществляемый до тех пор, пока не будут удовлетворены все требования технического задания. С повышением сложности аппаратуры, переходом к более высоким диапазонам частот, применением смешанных аналого-цифровых устройств число итераций моделирования схем увеличивается. Связано это с тем, что аналитически трудно учесть паразитные эффекты, присущие как электронным компонентам, так

и проводникам печатных плат, и их взаимное влияние. Единственный выход из положения заключается в организации сквозного цикла автоматизированного проектирования аппаратуры, включающего в себя моделирование как идеальной схемы, так и реальной конструкции и ее испытаний при действии различных дестабилизирующих факторов с учетом разброса параметров.

На платформе персональных компьютеров в настоящее время имеется достаточно много систем, обеспечивающих сквозное проектирование радиоэлектронной аппаратуры. Наибольшее распространение среди разработчиков радиоэлектронной аппаратуры получила система DesignLab корпорации MicroSim. Основу системы DesignLab составляет программа PSpice, которая является наиболее известной модификацией программы схемотехнического моделирования SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), разработанной в начале 70-х годов в Калифорнийском университете г. Беркли. Она оказалась очень удачной, с тех пор интенсивно развивается и де-факто стала эталонной программой моделирования аналоговых устройств. Принятые в ней математические модели полупроводниковых приборов используются во многих аналогичных программах, а списки соединений схемы в формате SPICE поддерживаются большинством систем моделирования РЭУ (Micro-Cap, Dr. Spice, OrCAD, P-CAD, ACCEL EDA, Viewlogic, COMPASS, Design Architect и др.). Первая версия программы PSpice для IBM PC создана в 1984 г. корпорацией MicroSim. С 2003 г. система DesignLab включена в состав пакета OrCAD. Системы DesignLab, DesignCenter и программа PSpice достаточно известны в России и используются на многих предприятиях промышленности и в технических университетах [8]. В связи с этим дальнейшее изложение основ моделирования радиоэлектронной аппаратуры авторам представляется наиболее целесообразным, базируясь на возможностях пакета прикладных программ системы схемотехнического моделирования DesignLab.

### 3.1.1. Состав системы, назначение и порядок использования программ

В состав системы DesignLab входят следующие основные программы [8]:

- графический редактор принципиальных схем Schematics;
- программа моделирования аналоговых и цифровых устройств PSpice;
- программа графической обработки результатов моделирования Probe;
- программа создания и редактирования входных сигналов Stimulus Editor;
- графический редактор многослойных печатных плат MicroSim PCBoards.

На рис. 3.1 приведена упрощенная структурная схема системы, отражающая взаимосвязь входящих в нее программ.

Редактор Schematics позволяет создавать чертежи принципиальных схем в среде Windows и осуществлять запуск других программ (PSpice, PLogic, Probe, StmEd, Parts, Polaris, PSpice Optimizer, PLSyn, XACTstep и PCBoards). Моделируемая схема может включать следующие типовые компоненты: резисторы, конденсаторы, индуктивности, трансформаторы (в том числе с магнитными сердечниками), диоды (включая стабилитроны и варикапы), биполяр-

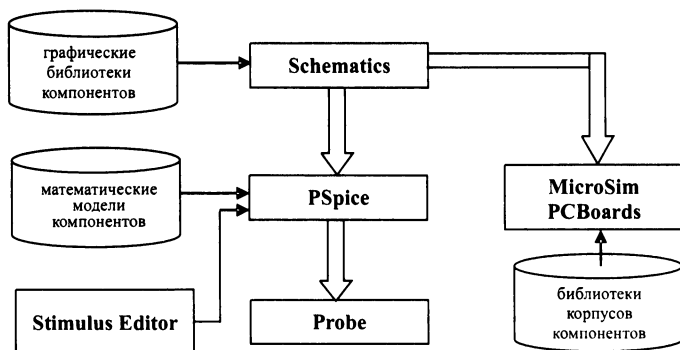


Рис. 3.1. Состав системы DesignLab

ные, арсенид-галлиевые, полевые, МОП- и биполярные статически индуцированные транзисторы, ключи, управляемые током и напряжением, линии передачи с потерями, аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, цифровые элементы (вентили, триггеры, устройства контроля, запоминающие устройства и программируемые логические матрицы). Кроме того, из этих компонентов можно создать макромоделли или иерархические структуры более сложных компонентов и устройств, например, операционных усилителей, компараторов напряжения, регуляторов напряжения и др.

Программа PSpice обеспечивает расчет характеристик схемы на основе задания, составленного программой Schematics, и с использованием математических моделей компонентов схем.

Программа Probe выводит на экран результаты моделирования, производит их математическую обработку и отображает в табличной форме их важнейшие характеристики, наносит на графики поясняющие надписи и позволяет получать жесткие копии результатов моделирования в графической форме. Математические преобразования над графиками заключаются в выполнении арифметических операций, вычислении различных функций, взятии интегралов, расчете спектров, гистограмм, измерении параметров формы графиков, построении зависимостей любой характеристики графика от любого варьируемого параметра схемы.

Редактор входных сигналов Stimulus Editor позволяет просмотреть форму аналоговых и цифровых сигналов, используемых в качестве входных, отредактировать их или создать вновь. С помощью мыши задаются форма аналогового кусочно-линейного сигнала и временные диаграммы логических сигналов.

Графический редактор многослойных печатных плат MicroSim PCBoards позволяет исследовать взаимное влияние компонентов на плате спроектированного устройства и на основе этого оптимизировать их расположение, произвести трассировку схемы (прорисовку электрических соединений компонентов).



При создании принципиальных схем и печатных плат, проведении моделирования, синтеза программируемых логических матриц и выполнении других проектных операций используются разнообразные библиотеки, размещаемые в файлах со следующими расширениями имени:

lib — математические модели компонентов, создаются программой *Parts*;

slb — символы графических изображений компонентов на схеме, создаются программой *Schematics*;

plb — информация об упаковке корпусов компонентов, создается программой *Schematics*;

fib — конструктивы типовых корпусов компонентов, создаются программой *PCBoards*.

Все эти библиотеки поставляются вместе с системой *DesignLab* и могут расширяться и дополняться пользователями. Многие фирмы-производители электронных компонентов, например, *Analog Devices*, *Philips*, *Precision Monolithics*, *Siemens* и др., публикуют сведения о параметрах моделей компонентов в формате *SPICE* и свободно их распространяют, в частности через Интернет.

Работа с системой *DesignLab* обычно начинается с создания принципиальной схемы с помощью редактора схем *Schematics*. Из управляющей оболочки *Schematics* возможен вызов других модулей системы (их перечень указывается в файле *Msim.ini*), что не исключает и их автономного запуска.

Выбрав соответствующий режим моделирования, проектировщик запускает программу моделирования *PSpice*, которая выдает результаты моделирования в графический процессор *Probe*. Используя различные возможности этой программы, пользователь производит анализ полученных характеристик и корректирует номиналы компонентов схемы, после чего вновь выполняет моделирование для контроля внесенных изменений.

По завершении моделирования устройства имеется возможность спроектировать печатную плату. Для этого в программе *Schematics* сначала выполняется «упа-

ковка» схемы, затем создается список соединений схемы в формате выбранного редактора печатных плат. Перенос информации о схеме на печатную плату производится в программе MicroSim PCBoards, после задания имени файла соединений (имеет расширение имени .nlf) на поле печатной платы переносятся изображения корпусов компонентов, линии электрических связей. Изготовив печатную плату устройства, проектировщик приступает к физическому моделированию, при этом работа с системой DesignLab заканчивается.

### 3.1.2. Пользовательский интерфейс системы

Интерфейс пользователя интегрирован в программу Schematics, которая является связующим звеном системы. В этой программе осуществляются графический ввод схемы, задание директив моделирования и запуск процесса моделирования, по окончании которого автоматически запускается программа графического анализа полученных характеристик Probe. В оболочке программы Schematics также задаются основные параметры системы, поэтому изучение интерфейса пользователя начинается именно с программы Schematics.

Редактор Schematics имеет главное меню и панель инструментов с кнопками быстрого запуска, как и большинство Windows-приложений. В верхней части экрана располагается горизонтальное меню, состав пунктов которого зависит от выбранного режима редактирования (редактирование принципиальных электрических схем либо редактирование символов, т. е. условных графических обозначений компонентов). На рис. 3.2 показан фрагмент окна программы Schematics.

Группа меню File содержит команды для работы с файлами — создание новой схемы, открытие ранее созданной схемы, сохранение файла на диск и т. д. Группа меню Edit предназначена для редактирования схемы (копирования в буфер, вставки фрагмента из буфера в активное окно редактора и др.). Ниже приводится назначение основных команд главного меню системы по группам.

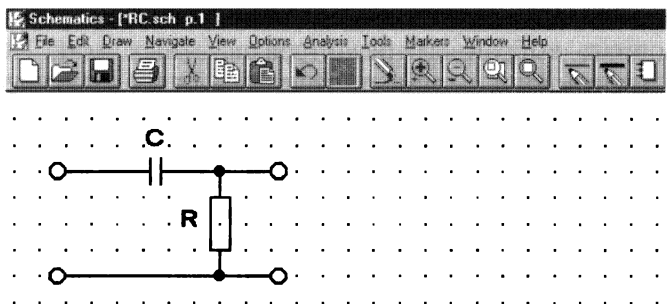


Рис. 3.2. Фрагмент окна программы Schematics

Группа команд File включает следующие основные команды:

- File/New — создание нового файла;
- File/Open — открытие существующего на диске файла;
- File/Close — закрытие файла;
- File/Save — сохранение файла на диск;
- File/Print — печать файла (схемы) на принтер;
- File/Exit — завершение работы системы.

Группа команд Edit включает следующие основные команды:

- Edit/Undo — отмена последнего выполненного действия;
- Edit/Redo — повтор отмененного командой Undo действия;
- Edit/Cut — перемещение выделенного фрагмента в буфер обмена;
- Edit/Copy — копирование выделенного фрагмента в буфер обмена;
- Edit/Paste — вставка содержимого буфера обмена в схему;
- Edit/Delete — удаление выделенного фрагмента;
- Edit/Attributes — вывод списка атрибутов выделенного компонента;
- Edit/Symbol — редактирование графического изображения выделенного компонента;
- Edit/Rotate — поворот на 90 градусов выделенного фрагмента;
- Edit/Flip — зеркальное отображение выделенного фрагмента.

Группа команд Draw (графический ввод в схему) включает следующие основные команды:

- Draw/Place Part — поместить на схему компонент;
- Draw/Text — поместить на схему надпись;
- Draw/Wire — активизировать режим рисования электрических проводников;
- Draw/Bus — активизировать режим рисования сигнальных шин (для цифровых компонентов).

Группа команд Navigate (работа с листами проекта) включает следующие основные команды:

- Navigate/Previous Page — переход к предыдущей странице;
- Navigate/Next Page — переход к следующей странице;
- Navigate/Select Page — выбор страницы;
- Navigate/Create Page — создать новую страницу проекта;
- Navigate/Delete Page — удалить текущую страницу проекта;
- Navigate/Copy Page — копировать содержимое текущей страницы в буфер обмена.

Группа команд View (вид текущей страницы) включает следующие основные команды:

- View/Fit — вывод на весь экран всей схемы;
- View/In — увеличение масштаба;
- View/Out — уменьшение масштаба;
- View/Area — вывод на весь экран окаймленной части схемы (выделенной мышью);
- View/Previous — восстановление предыдущего вида текущей страницы;
- View/Entire Page — вывод на весь экран всей страницы, включая угловой штамп;
- View/Redraw — обновление изображения на экране (перерисовка);
- View/Pan — New Center — установка курсором позиции на схеме для вывода в центр окна.

Группа команд Options (настройка параметров системы) включает следующие основные команды:

- Display Options — установка опций отображения (вывод сетки, привязка объектов к узлам сетки);

Page Size — выбор формата чертежа, системы единиц (дюймы, миллиметры);

Auto-Repeat — автоматическое размещение на схеме копии предыдущего объекта, смещенной на заданное расстояние;

Auto-Naming — автоматическое назначение позиционных обозначений компонентов и имен проводников;

Set Display Level — установка уровня детализации при выводе графической и текстовой информации;

Editor Configuration — ввод списка имен загружаемых библиотек символов, путей доступа к ним и всех других параметров конфигурации (в т. ч. установка шрифтов).

Остальные группы команд Analysis, Tools, Markers главного меню системы будут рассмотрены ниже при изложении порядка моделирования схем в различных режимах анализа.

### 3.1.3. Основные возможности системы

Проиллюстрируем основные возможности системы на примере моделирования резонансного усилителя. Для этого в программе Schematics осуществляется графический ввод схемы и задаются параметры компонентов в соответствии с расчетными данными. Затем в схему вводится источник сигнала (это обязательный объект, который определяет входное воздействие), маркеры для получения выходных зависимостей в контрольных точках схемы, после чего схема проверяется на предмет отсутствия ошибок. На рис. 3.3 показан фрагмент окна программы Schematics со схемой резонансного усилителя.

Далее выбирается режим моделирования (частотный, временной анализ или анализ по постоянному току), задаются параметры соответствующей директивы моделирования и выполняется моделирование, по окончании которого результаты автоматически передаются в программу Probe. На рис. 3.4 представлен фрагмент окна программы Probe с амплитудно-частотной характеристикой резонансного усилителя.

Изменив частотный режим анализа на временной и задав необходимые параметры директивы моделирования,

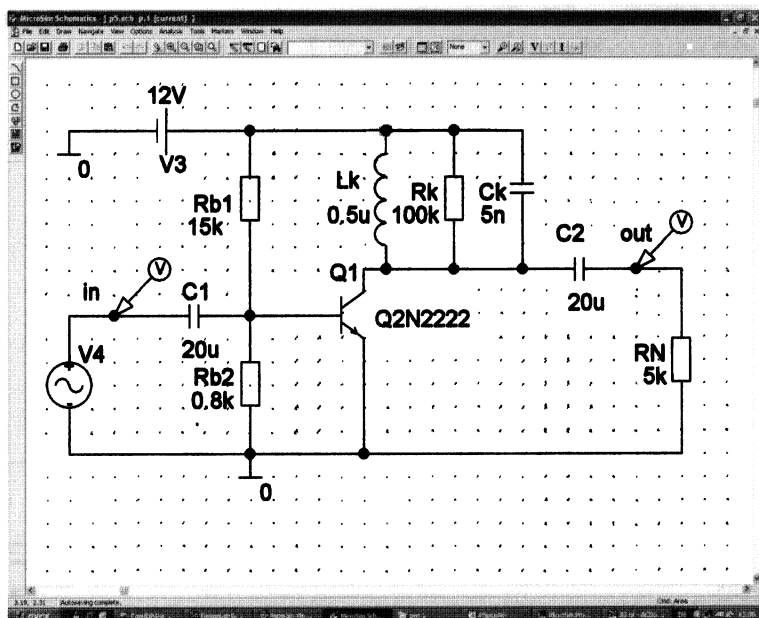


Рис. 3.3. Окно программы Schematics со схемой резонансного усилителя

получим результаты, представленные на рис. 3.5. Перед выполнением моделирования мы ввели в схему маркер (на вход схемы) для того, чтобы посмотреть вид входного сигнала и сравнить его с сигналом на выходе. Из рисунка видно, что выходной сигнал имеет больший уровень по сравнению с уровнем входного, характеризуя тем самым коэффициент усиления.

Ниже рассматриваются порядок создания схем различных устройств, последовательность операций для задания директив моделирования и анализа полученных результатов. Материал излагается в следующем порядке: сначала приводятся подробные инструкции по выполнению тех или иных операций, а затем предлагается задание для закрепления материала и получения практических навыков работы с системой. Читатель может выполнять моделирование собственных схем или использовать схемы из каталога для проверки



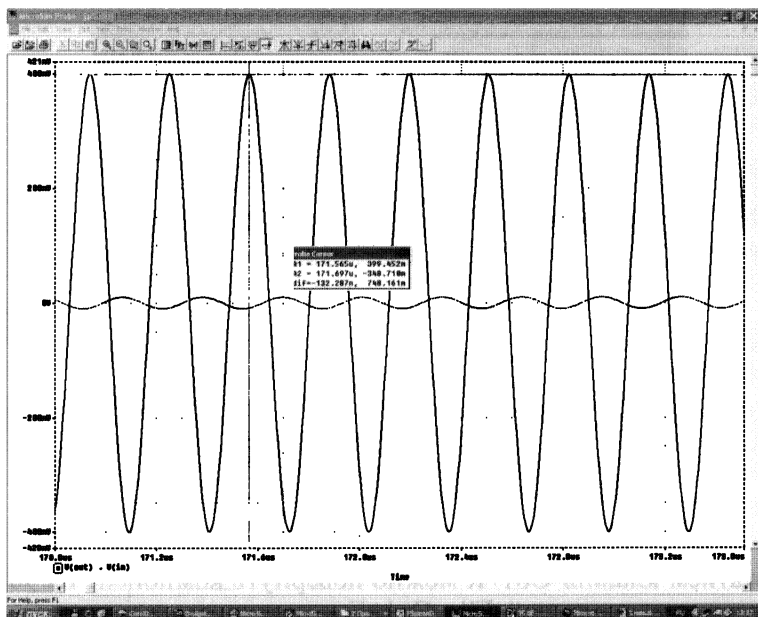



Рис. 3.5. Результаты моделирования резонансного усилителя в режиме временного анализа

### 3.2.1. Ввод и размещение компонентов

Создание схемы начинается с размещения компонентов. Выбор компонента можно осуществить из алфавитного списка в отдельной библиотеке либо путем поиска по ключевым словам по всем компонентам. Наиболее удобным является способ выбора компонентов из соответствующих библиотек. Для этого следует нажать кнопку выбора компонентов  или выполнить команду Draw/Get New Part, в раскрывшемся окне Part Browser Basic нажать кнопку Libraries (библиотеки), в поле Library выбрать библиотеку Analog.slb (аналоговые компоненты), а в поле Part — нужный компонент (рис. 3.6).

При нажатии кнопки Place (поместить компонент) или Place & Close (поместить и закрыть окно выбора компонентов) компонент размещается на схеме. Командой Rotate (вращение) в меню Edit или одновременным на-



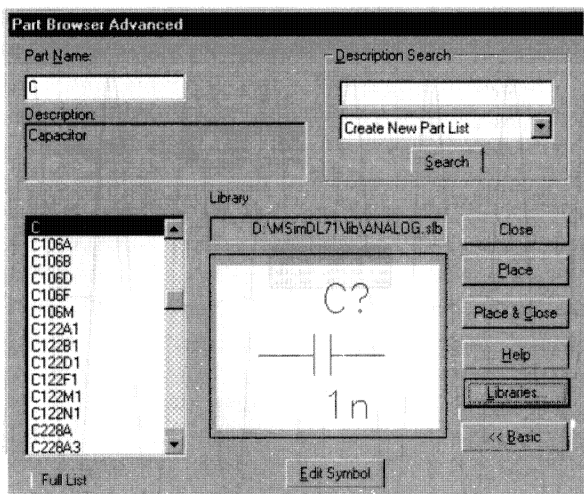


Рис. 3.6. Диалоговое окно для выбора библиотеки и компонента

жатием клавиш **Ctrl+R** можно повернуть компонент на 90 градусов, командой **Flip Ctrl+F** — получить его зеркальное отображение. Щелчок левой кнопки мыши фиксирует компонент на схеме, при этом он приобретает зеленый цвет (по умолчанию), и после этого можно разместить на схеме еще одну его копию. Щелчок правой кнопки мыши прекращает ввод данного компонента. Используя рассмотренный способ, введите аналоговые компоненты (резистор (R1), конденсатор (C1), индуктивность (L1)), как это показано на рис. 3.7.

Имена последних 10 размещенных на схеме символов заносятся в стек для ускорения поиска и повторного ввода наиболее распространенных компонентов. Содержимое этого стека раскрывается по команде **Place Part** или щелчком по стрелке списка, размещенного на основной панели инструментов:



Выбранный в раскрывшемся внизу списке символ компонента размещается на схеме щелчком левой кнопки мыши.

Простановка позиционных обозначений при их вводе может осуществляться автоматически или вручную. Для ав-

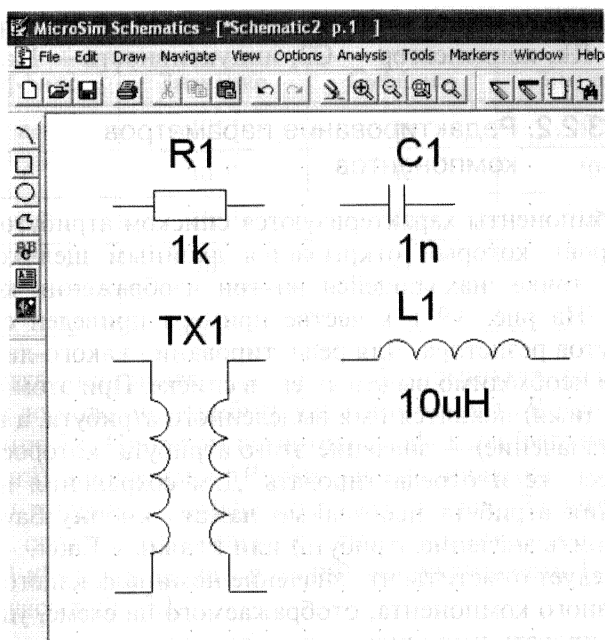


Рис. 3.7. Пример для графического ввода компонентов

томатической простановки нужно в меню команды Options/Auto Naming включить режим и проставить начальный номер позиционного обозначения. Соответственно для ручной простановки позиционных обозначений этот режим следует отключить, при этом после префикса компонента будет проставляться знак вопроса (например, R?).

Для редактирования позиционного обозначения введенного компонента необходимо щелчком мыши выбрать компонент. Двойной щелчок левой кнопкой мыши по позиционному обозначению компонента открывает диалоговое окно для редактирования (рис. 3.8).

Используя рассмотренный способ, переопределите позици-

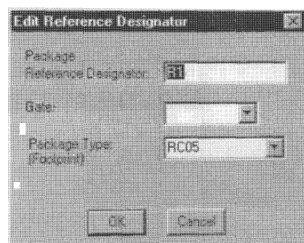


Рис. 3.8. Вид окна редактирования позиционного обозначения компонента

онные обозначения введенных ранее компонентов: резистор — Rk, конденсатор — C2, индуктивность — Lk.

### 3.2.2. Редактирование параметров компонентов

Все компоненты характеризуются списком атрибутов (параметров), который открывается двойным щелчком по любой точке, находящейся внутри изображения компонента. На рис. 3.9 в качестве примера приведен список атрибутов резистора. Для редактирования какого-либо атрибута необходимо выделить его в списке. При этом в поле Name (имя) появится имя выделенного атрибута, а в поле Value (значение) — значение этого атрибута, которое можно здесь же и отредактировать. Для сохранения нового значения атрибута необходимо нажать кнопку Save Attr (сохранить значение атрибута) или клавишу Enter.

Следует отметить, что значение номинала какого-либо пассивного компонента, отображаемого на схеме, удобнее редактировать индивидуально, дважды щелкнув по нему левой кнопкой мыши (по отображаемому значению).

При задании значений пассивных компонентов указывать единицу измерения (размерность) не нужно (программа уже знает, что для резистора, например, единица измерения — 1 Ом). Необходимо лишь указать множитель в буквенном виде. Для этого в системе предусмотрено масштабирование чисел (величин напряжений, токов, сопротивлений и т. д.) с помощью суффиксов, приведенных в таблице 3.1.

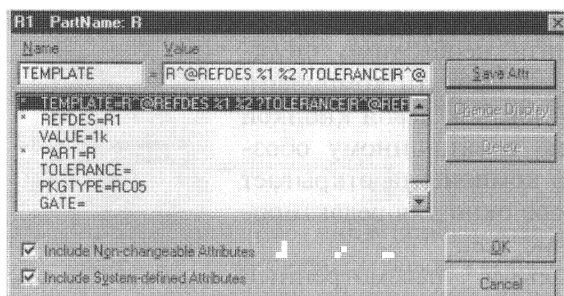



Рис. 3.9. Список атрибутов компонента R1

Табл. 3.1.

Суффикс	Значение	Суффикс	Значение
a	$10^{-18}$	m	$10^{-3}$
f	$10^{-15}$	K	$10^3$
p	$10^{-12}$	Meg	$10^6$
n	$10^{-9}$	G	$10^9$
u	$10^{-6}$	T	$10^{12}$

Тогда, например, для задания номинала резистора 7 кОм достаточно атрибуту Value компонента R присвоить значение 7k. При этом регистры суффиксов (верхний или нижний) программой PSpice не различаются, пробелы между цифрой и суффиксом не ставятся. Задайте значения следующих введенных Вами компонентов: резистор 10 кОм, конденсатор 15 пФ, индуктивность 170 мГн, пользуясь табл. 3.1.

### 3.2.3. Построение принципиальных схем

Размещение соединительных линий осуществляется после активизации команды Draw/Wire или нажатием на пиктограмму . При этом курсор приобретает форму карандаша. Начало цепи, точка излома, точка соединения с другой цепью или выводом компонента фиксируется щелчком левой кнопки мыши. Щелчок правой кнопкой прекращает рисование цепи. Если на проводник или вывод будут делаться ссылки (в этой точке необходимо будет, например, измерять напряжение), имеет смысл присвоить ему имя. Для этого после двойного щелчка левой кнопкой мыши на проводнике в появившемся окне укажите имя проводника (рис. 3.10).

Как правило, в технической документации соединительные линии проводятся только по го-

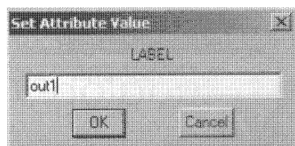


Рис. 3.10. Диалоговое окно задания имени проводника




Рис. 3.11. Пример образования Т-образных соединений

ризонтالي и вертикали. Поэтому следует в меню Options/Display Options активизировать опцию Orthogonal (рисовать только перпендикулярные проводники).

Электрические соединения пересекающихся проводников обозначаются жирной точкой.

Если провести два проводника, не останавливаясь в точке их пересечения, то электрическое соединение не образуется. Точка соединения для Т-образных пересечений (рис. 3.11) образуется автоматически. Используя рассмотренный способ, можно соединить введенные ранее компоненты с помощью проводников, ввести Т-образное и перекрестное пересечение проводников с соединением и без соединения, присвоить имя input1 какому-либо из проводников.

Размещение на схеме произвольного текста (например, представленного на рис. 3.12), который выводится на печатную копию чертежа, но не участвует в моделировании, производится по команде Draw/Text (Ctrl+T) либо нажатием на пиктограмму .

Изменение стиля и размера шрифта текущего текста производится по команде Edit/Text Properties. Имя типа шрифта указывается в строке Font Name, где можно выбрать и кириллицу.

Пользуясь изложенной выше методикой, введите одну из схем, представленных в таблице 3.2. Последние два поля



Рис. 3.12. Окно ввода текста

таблицы приводятся в качестве проверочных сведений, которые Вам возможно понадобятся при моделировании представленных схем. Это параметры фильтров, построенных для каждого варианта:  $F_n$  — частота среза фильтра (на уровне 0,707 от максимума полосы пропускания),  $F_v$  — частота, на которой обеспечивается требуемый уровень затухания.

Табл. 3.2.

Принципиальная схема	L	$C_2$	$C_1C_3$	$R_0R_1$	$F_n$	$F_v$
	мГн	пф	нф	кОм	кГц	кГц
<b>ФНЧ Баттерворта</b> 	151		1	8,5	15	75
	8,1		2,1	1,4	45	170
	32,9		2,2	2,7	22	88
	5,33		3,2	1	45	180
	11,7		3,3	1,3	30	130
	30,7		15	2,2	10,6	26,5
<b>ФНЧ Золотарева</b> 	151	47	1	18	18	55,3
	8,1	260	1,5	3,6	55,5	96,5
	32,9	57	2,2	5,8	26,1	89,2
	5,33	157	2	2,5	64	142
	11,7	1400	6,3	2,2	22	33
	30,7	520	6,9	3,2	15	40
<b>ФВЧ Баттерворта</b> 	151		1	17	2	12
	8,1		1,5	3,2	8	38
	32,9		2,2	5,5	5	16
	5,33		2	2,2	8	41
	11,7		8	1,7	5	14
	30,7		6	3,2	2	10

Следует обратить внимание на то, что на схеме (это правило распространяется для всех аналоговых устройств) обязательно должен присутствовать компонент AGND (аналоговая «земля») из библиотеки PORT.slb. После окончания графического ввода схемы не забудьте сохранить файл (имя файла должно содержать только ла-

тинские буквы и цифры!) для продолжения работы с ним по заданиям, приведенным в последующих параграфах.

### 3.3. Моделирование радиоэлектронных устройств в режиме анализа частотных характеристик

В ходе моделирования радиоэлектронных устройств осуществляется проверка различных характеристик устройств на предмет удовлетворения заданным требованиям. Например, для фильтровых устройств проверяется соответствие рассчитанной теоретически и полученной в результате моделирования полосы пропускания — в этом случае следует выбирать режим анализа частотных характеристик. При анализе искажений импульсных сигналов в радиоэлектронных устройствах необходимо воспользоваться режимом моделирования временных характеристик. Система DesignLab позволяет осуществлять моделирование радиоэлектронных устройств в различных режимах, при этом наиболее часто используемыми являются режимы анализа частотных характеристик (AC Sweep), временных характеристик (Transient) и режим анализа характеристик активных компонентов по постоянному току (DC Sweep). Материал параграфа раскрывает порядок подготовки и проведения моделирования РЭУ в режиме анализа частотных характеристик.

#### 3.3.1. Ввод источника сигнала, размещение маркеров и проверка схемы на наличие ошибок

Выбор источника сигнала осуществляется в зависимости от того, какие его характеристики необходимо исследовать. Так, например, для моделирования временных и частотных характеристик устройств следует в качестве источника сигналов выбирать компонент VSIN (источник синусоидального напряжения, размещенный в библиотеке SOURCE), имеющий следующие атрибуты, обязательные для заполнения:

AC — амплитуда напряжения при анализе в частотной области;

VOFF — постоянная составляющая напряжения;

VAMPL — амплитуда напряжения;

FREQ — частота колебания;

TD — задержка колебания;

DF — коэффициент затухания;

PHASE — начальная фаза колебания.

Тогда, например, для задания источника синусоидального напряжения с частотой 50 кГц и амплитудой 0,5 Вольт необходимо указать следующие значения соответствующих параметров: FREQ=50k, VAMPL=0,5. Следует обратить внимание на то, что для задания десятичных значений номиналов компонентов можно использовать только точку в качестве разделителя целой и дробной частей. Аналогично в созданную ранее схему можно ввести источник сигнала VSIN и заполнить атрибуты источника в соответствии с данными, приведенными на рис. 3.13, б).

После ввода источника сигнала и задания его атрибутов выполняется команда Analysis/Electrical Rule Check для проверки схемы на наличие неподсоединенных (плавающих) выводов компонентов, совпадающих позиционных обозначений и других ошибок. При обнаружении ошибок на экран выводится информационное сообщение и перечень ошибок. В сообщениях приводятся информация (INFO), предупреждения (WARNING) и ошибки (ERROR). Если курсором щелкнуть по строке ошибок, то это окно закроется и курсор покажет на схеме связанный с этой ошибкой вывод компонента. В случае наличия ошибок их необходимо устранить, после чего следует

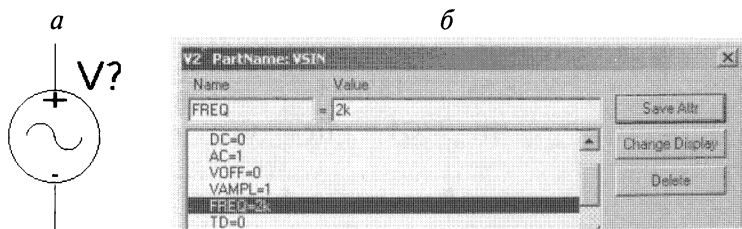


Рис. 3.13. Условное графическое обозначение компонента VSIN (а) и окно для задания значений его атрибутов (б)



разместить маркеры в узлах схемы (обычно на входе и выходе схемы) для анализа напряжений и других характеристик.

Ввод маркеров осуществляется путем простановки на схеме соответствующих маркеров в контрольных точках. Маркеры могут размещаться в любой точке проводника или в конце вывода компонента. Выбор маркера для анализа напряжений (или логических уровней цепей для цифровых устройств) осуществляется по команде **Markers/ Mark Voltage/Level**, при этом курсор приобретает вид щупа. Разместив курсор на схеме, следует щелкнуть левой кнопкой мыши. На рис. 3.14 показана схема фильтра с маркером напряжения.

В каталоге схем имеется модель фильтра Баттерворта, для загрузки которой следует из программы Schematics открыть файл **pl.sch**. Далее мы рассмотрим, каким образом устанавливаются параметры директив моделирования и запускается сам процесс моделирования. Пока же Вы можете проверить себя, правильно ли выполнен ввод схемы и задание параметров компонентов.

Для анализа других характеристик схемы следует воспользоваться маркерами, вызываемыми по команде **Mark Advanced...** (расширенный выбор маркеров). При этом на экран выводится диалоговое окно, в котором следует указать тип маркера. Ниже приводится расшифровка обозначений некоторых маркеров, доступных по команде **Mark Advanced**:

vdb — напряжение в децибелах;

idb — ток в децибелах;

vphase — фаза напряжения;

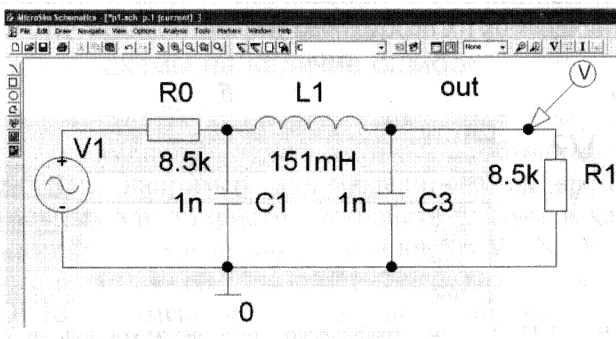


Рис. 3.14. Схема фильтра с маркером напряжения

iphase — фаза тока;

vgroudelay — групповое время запаздывания напряжения;

igroudelay — групповое время запаздывания тока;

vreal — действительная часть напряжения;


ireal — действительная часть тока;

vimaginary — мнимая часть напряжения;

iimaginary — мнимая часть тока.

Разместив маркер напряжения на выходе схемы с помощью команды **Markers/ Mark Voltage/Level**, необходимо сохранить файл, после чего перейти к заданию параметров директивы анализа частотных характеристик схемы.

### 3.3.2. Задание параметров директивы моделирования

Выбор режима моделирования осуществляется по команде **Analysis/Setup** или нажатием на кнопку .

В открывшемся окне необходимо отметить нужный режим щелчком мыши в поле **Enabled**-включено (рис. 3.15), а нажатием соответствующей кнопки в открывшемся окне задать параметры данного режима моделирования (директивы).

В системе DesignLab предусмотрены следующие директивы моделирования:

**AC Sweep** — расчет частотных характеристик;

**Load Bias Point** — загрузка данных режима по постоянному току;

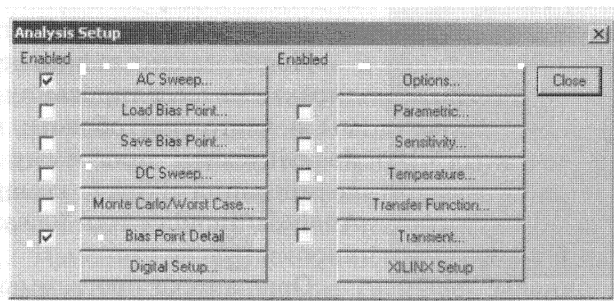


Рис. 3.15. Окно выбора и задания параметров директивы моделирования

Save Bias Point — сохранение данных режима по постоянному току;  
DC Sweep — расчет режима по постоянному току;  
Monte Carlo/Worst Case — статистический анализ и наихудший случай;  
Bias Point Detail — подробная информация о режиме по постоянному току;  
Digital Setup — задание параметров цифровых устройств;  
Parametric — многовариантный анализ;  
Sensitivity — чувствительность по постоянному току;  
Temperature — вариации температуры;  
Transfer Function — расчет передаточных функций по постоянному току;  
Transient — расчет переходных процессов (временной анализ).

Можно активизировать несколько режимов анализа одновременно, при этом время расчета значительно возрастает. В связи с этим следует включать один из режимов. Например, для включения режима анализа частотных характеристик следует нажать на кнопку AC Sweep и в открывшемся диалоговом окне установить параметры директивы моделирования в соответствии с рис. 3.16.

В группе AC Sweep Type указывается характер изменения частоты (тип шага для оси частот): линейный, октавами или декадами. В группе Sweep Parameters задаются параметры диапазона частот для анализа: количество точек расчета (Total Pts), начальная и конечная частоты.

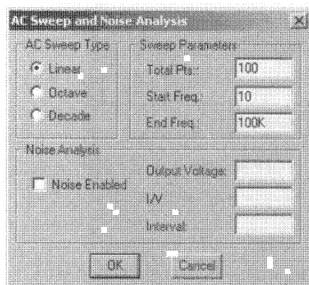



Рис. 3.16. Окно задания параметров директивы частотного анализа

После задания параметров директивы моделирования схемы в частотной области можно запускать программу моделирования PSpice командой Analysis/Simulate или нажатием кнопки .

При запуске программы моделирования на экран выводится окно с результатами (рис. 3.17),

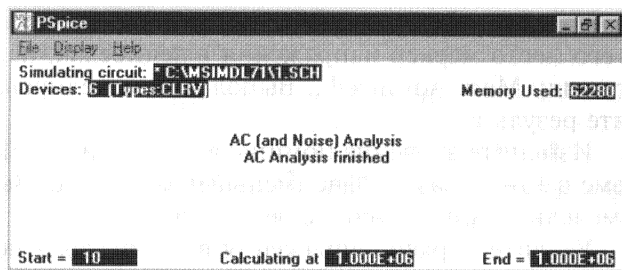


Рис. 3.17. Окно сообщения программы PSpice

в верхней части которого помещена строка меню, ниже выводится имя файла, количество компонентов схемы и объем использованной памяти. В средней части экрана указывается режим анализа и приводятся информационные сообщения о фазах выполнения задания и ошибках, если таковые имеются (последние выделяются красным цветом).

По окончании моделирования автоматически вызывается программа Probe для просмотра результатов моделирования.

### 3.3.3. Проведение моделирования и анализ полученных результатов

Для исследования частотных характеристик фильтра нам следует установить параметры директивы моделирования AC Sweep: Total Pts. = 1000, End Freq. = 4 meg, проверить схему на наличие ошибок с помощью команды Analysis/Electrical Rule Check. Моделирование производится выполнением следующей последовательности действий:

1. Запустите моделирование введенной Вами схемы командой Analysis/Simulate и наблюдайте результаты расчета амплитудно-частотной характеристики фильтра. Если график характеристики получается ломаный (недостаточно точек расчета или выбран слишком большой диапазон частот), следует скорректировать параметры директивы Total Pts, Start — End Frequency.

2. Измените значение номинала какой-либо емкости на схеме в 10—50 раз больше (меньше) заданного. Выполните моделирование, оцените результат. Ответьте на вопрос, как изменилась полоса пропускания фильтра.

3. Удалите маркер напряжения на схеме и поместите на его место маркер напряжения в децибелах, используя команду Mark Advanced... Выполните моделирование, оцените результат.

4. Измените значение номинала какой-либо емкости на схеме в 10—50 раз больше (меньше) заданного. Выполните моделирование, оцените результат.

5. Удалите маркер напряжения в децибелах и поместите на его место маркер фазы напряжения, используя команду Mark Advanced... Этот маркер позволит нам получить фазочастотную характеристику фильтра. Выполните моделирование, оцените результат.

6. Измените значение номинала какой-либо емкости на схеме в 10—50 раз больше (меньше) заданного. Выполните моделирование, оцените результат. Ответьте на вопрос, как изменилась фазочастотная характеристика фильтра.

7. Удалите маркер фазы напряжения и поместите на его место маркер группового времени запаздывания напряжения, используя команду Mark Advanced... Характеристика группового времени запаздывания (ГВЗ) является производной от фазочастотной характеристики и показывает, насколько задерживаются частотные составляющие сигналов в полосе пропускания фильтра. Для безыскаженной обработки сигналов следует добиваться максимально плоского характера ГВЗ в полосе пропускания фильтра. Выполните моделирование, оцените результат.

8. Измените значение номинала какой-либо емкости на схеме в 10—50 раз больше (меньше) заданного. Выполните моделирование, оцените результат. Ответьте на вопрос, как изменилась характеристика группового времени запаздывания фильтра.

9. Удалите маркер ГВЗ и поместите последовательно на выход схемы маркеры реальной части напряжения и мнимой части напряжения, используя команду Mark Advanced..., и маркер напряжения, используя команду Markers/Mark Voltage/Level. На рис. 3.18 представлен фрагмент схемы, демонстрирующий пример размещения маркеров.

10. Выполните моделирование. АЧХ, построенная с помощью маркера напряжения, рассчитывается как мо-

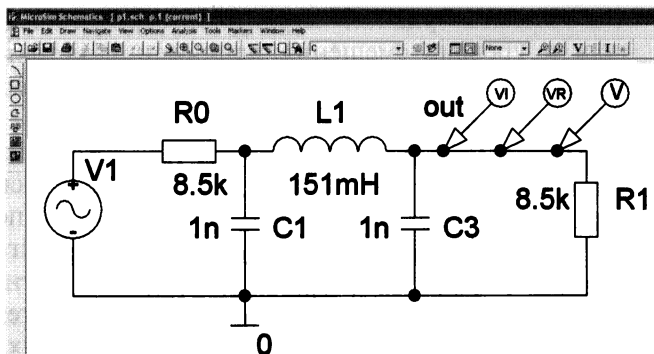


Рис. 3.18. Схема фильтра с дополнительными маркерами

доль комплексного напряжения (реальной и мнимой части) по формуле:

$$ACH(f) = \sqrt{v_{real}(f)^2 + v_{imaginary}(f)^2}.$$

Оцените вклад реальной и мнимой части напряжения в формирование АЧХ-фильтра.

11. Измените значение номинала какой-либо емкости на схеме в 10—50 раз больше (меньше) заданного. Выполните моделирование, оцените результат.

### 3.4. Моделирование радиоэлектронных устройств в режиме анализа временных характеристик

После окончания моделирования частотных характеристик и внесения необходимых изменений (в случае необходимости) приступают к моделированию схемы во временной области. При этом проверяется отсутствие видимых искажений временного представления входных сигналов, варьируемыми параметрами являются частота, уровень и форма входных сигналов. В общем случае используется компонент VSIN (источник синусоидального напряжения), задание параметров которого осуществляется исходя из следующих соображений:

- частота источника сигнала должна находиться в пределах полосы пропускания устройства;

- для активных радиоэлектронных устройств амплитуда и уровень смещения напряжения источника сигнала должны быть такими, чтобы не смещать рабочую точку на нелинейный участок.

Для получения более достоверных результатов моделирования, приближенных к реальным условиям эксплуатации проектируемого устройства, необходимо использовать в качестве входного сигнала реальный сигнал, упакованный в файл, или фрагмент реального сигнала, полученный путем моделирования в других системах. В [3] рассматриваются принципы построения таких математических моделей и способы их программной реализации.

#### 3.4.1. Ввод источника сигнала, размещение маркеров и проверка схемы на наличие ошибок

Для изучения особенностей моделирования радиоэлектронных устройств в режиме временного анализа необходимо выполнить несколько подготовительных операций. Сначала надо открыть файл со схемой фильтра, созданный ранее, и установить частоту источника сигнала, которая попадает в полосу пропускания фильтра (для определения полосы пропускания фильтра следует запустить моделирование в режиме частотного анализа). Для изменения частоты источника сигнала необходимо дважды щелкнуть на символе источника сигнала и в раскрывшемся окне в поле Value (значение) атрибута Freq (частота) задать новое значение, сохранив его путем нажатия на кнопку Save Attr (сохранить значение атрибута).

Затем следует выполнить команду Analysis/Electrical Rule Check для проверки схемы на наличие неподсоединенных (плавающих) выводов компонентов, совпадающих позиционных обозначений и других ошибок. В случае наличия ошибок их необходимо устранить, после чего следует разместить маркеры напряжения на входе и выходе схемы. На рис. 3.19 показана схема фильтра с маркерами напряжения на входе и выходе устройства.

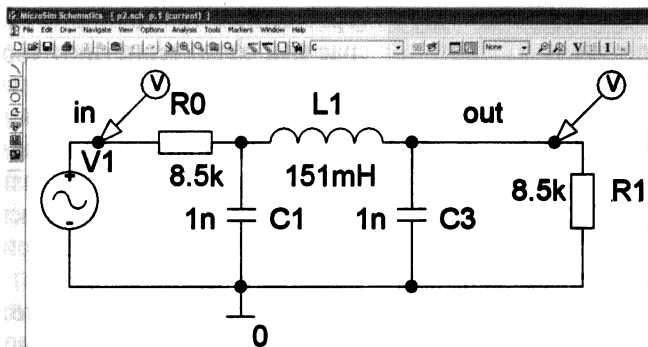


Рис. 3.19. Схема фильтра с маркерами напряжения на входе и выходе устройства

Далее можно приступать к заданию параметров директивы моделирования переходных процессов (режим временного анализа).

### 3.4.2. Задание параметров директивы моделирования

Выбор режима моделирования осуществляется по команде Analysis/Setup или нажатием на кнопку

В открывшемся окне необходимо выбрать режим Transient щелчком мыши в поле Enabled (включено), а нажатием соответствующей кнопки в открывшемся окне задать параметры данного режима моделирования (директивы) в соответствии с рис. 3.20.

В группе Transient Analysis указываются:

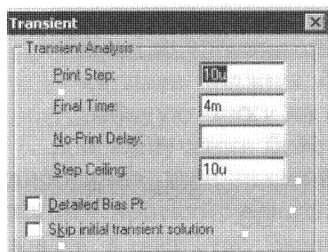
Print Step — шаг дискретизации характеристики при выводе на экран;

Final Time — конечное время расчета;

No-Print Delay — интервал по оси времени, в течение которого не выводится на график рассчитанная характеристика;

Step Ceiling — шаг дискретизации при расчете характеристики. Этот параметр влияет на точность отображения графика, поэтому его надо устанавливать таким образом, чтобы одновременно с удовлетворением






**Рис. 3.20.** Окно задания параметров директивы временного анализа

требования по точности время расчета характеристики (время моделирования) не было слишком большим (более 20 секунд).

В группе Fourier Analysis задаются параметры, детализирующие процесс расчета спектров сигналов с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье. После задания параметров директивы моделирования временных характеристик мож-

но запускать программу моделирования PSpice командой Analysis/Simulate или нажатием кнопки .

### 3.4.3. Примеры и порядок выполнения заданий на моделирование схемы в режиме анализа временных характеристик

При выполнении следующего задания Вы можете использовать введенную Вами схему или использовать файл r2.sch из каталога схем, в котором уже установлены соответствующие параметры директивы моделирования, значения параметров источника сигнала, а также необходимые маркеры.

#### Задание 1

1. Запустите командой Analysis/Simulate моделирование схемы, представленной на рис. 3.19, и наблюдайте результаты расчета временного представления входного и выходного сигналов. Из графика видно, что фильтр уменьшает уровень входного сигнала приблизительно в 2 раза (это характерно для пассивных фильтров) и сигнал на выходе фильтра появляется с некоторой задержкой (результат влияния фазочастотной характеристики фильтра).

2. Измените значение частоты входного сигнала, увеличив его в 10 раз. Для этого дважды щелкните по символу источника сигнала и в раскрывшемся окне установите новое значение атрибута Freq (частота). Выполни-

те моделирование, оцените результат. Из графика видно, что уровень выходного сигнала (по сравнению с постоянным уровнем входного сигнала) уменьшился более чем в 2 раза. Это и есть результат фильтрации: частоты, не попадающие в полосу пропускания фильтра, значительно ослабляются.

3. Выполните графический ввод схемы, представленной на рис. 3.21 (или воспользуйтесь файлом в каталоге схем p3.sch). В данном примере рассмотрим процесс фильтрации сигналов, поступающих на вход фильтра нижних частот из источников V1 (частота=10 кГц) и V2 (частота=80 кГц). Сигнал с частотой 80 кГц будет отфильтрован (подавлен), то есть на выходе фильтра будет только сигнал с частотой 10 кГц, попадающий в полосу пропускания фильтра.

4. Задайте значения атрибутов источников сигналов в соответствии с рис. 3.22.

5. Задайте имена проводников input1, input2, output (как показано на рис. 3.21) и установите маркеры напряжения на этих проводниках. Сохраните схему.

6. Задайте параметры директивы моделирования: Print Step=1u, Final Time=0,5m, Step Ceiling=1u и выполните моделирование.

7. Проанализируйте результат, выведенный программой Probe. На входе фильтра присутствуют 2 сигнала

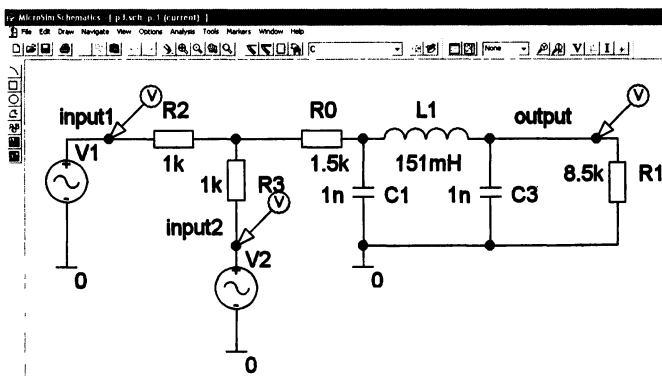


Рис. 3.21. Схема фильтра с двумя источниками входных сигналов

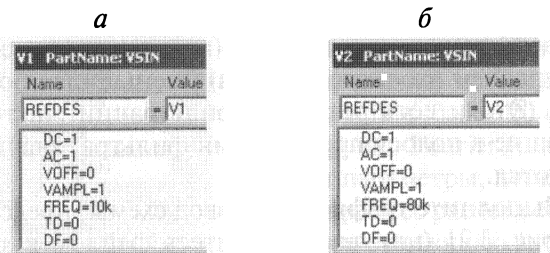


Рис. 3.22. Значения атрибутов источников: а — V1, б — V2

с разными частотами. На выходе — только сигнал с частотой, попадающий в полосу пропускания фильтра.

8. Реально на входе фильтра присутствует смесь сигналов. Чтобы увидеть временное представление смеси сигналов — гармоническое колебание с биениями — переместите один из входных маркеров в точку соединения резисторов R2, R3, R0, а другой маркер удалите. Выполните моделирование, оцените результат.

9. Измените частоту второго источника сигнала, установив ее равной 60 кГц (затем 40, 30, 20 кГц). Выполните моделирование, оцените результат.

Программа Probe не только может отображать графики полученных результатов, но и выполнять их обработку, включая сложные алгебраические операции, вычисления интегралов, преобразование Фурье и т. д. Выбор соответствующего действия осуществляется с помощью команды Trace/Add (график/добавить). После чего в открывшемся окне в правом списке необходимо выбрать функцию, применяемую к данной характеристике, а в левом списке указать требуемую характеристику, щелкнув по ней левой кнопкой мыши. В нижней строке выводится математическая запись обработки для указанной характеристики. Так, например, для расчета и вывода графика суммы сигналов (напряжение в точке input1 + напряжение в точке input2) окно задания обработки будет иметь следующий вид (см. рис. 3.23).

Удаление характеристики с графика осуществляется следующим образом: необходимо выделить имя характеристики (имена расположены в левом углу под графиком), щелкнув по нему мышкой, и затем нажать на клавиатуре клавишу Delete.

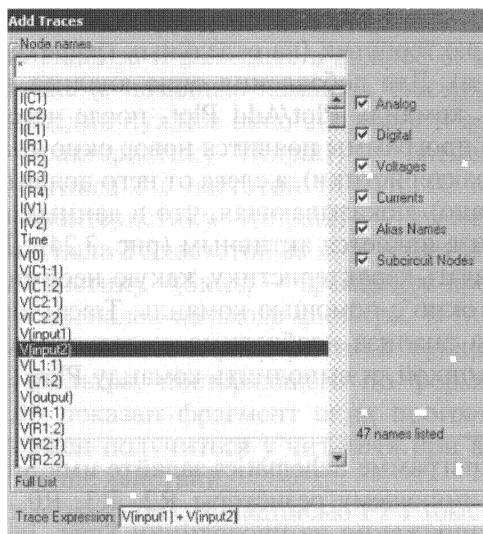


Рис. 3.23. Диалоговое окно выбора выводимой характеристики и задания ее математической обработки

## Задание 2

1. С помощью команды Trace/Add добавьте на график характеристику, вычисляемую с помощью выражения  $V(\text{input1}) + V(\text{input2})$ . Для этого на схеме обязательно должны быть присвоены имена input1 и input2 проводникам, как показано на рис. 3.21.

2. Оцените результат. На графике появилась новая характеристика  $V(\text{input1}) + V(\text{input2})$ , вычисленная математически и повторяющая характеристику, снятую в точке соединения резисторов R2, R3, R0 и вычисленную другим методом. Имеется лишь различие в уровне биений.

3. Подведите курсор к имени характеристики  $V(\text{input1}) + V(\text{input2})$  (внизу графика) и дважды щелкните мышкой. Появится окно, в котором Вы первоначально задавали математическое выражение для новой характеристики. В поле Trace Expression (выражение для построения характеристики) отредактируйте выражение, взяв его в скобки и разделив на 2:  $(V(\text{input1}) + V(\text{input2}))/2$ . Оцените результат, характеристики почти совпали.

4. Удалите характеристику  $(V(\text{input1}) + V(\text{input2}))/2$ .

В программе Probe имеется возможность раздельного анализа характеристик (на отдельных графиках или в окнах анализа). Для добавления окна анализа необходимо выполнить команду Plot/Add Plot, после чего в верхней части окна программы появится новое окно анализа (пока еще без характеристики), а слева от него появится надпись SEL (выбрано), показывающая, что в данный момент это окно анализа является активным (рис. 3.24). Далее необходимо указать характеристику, какую необходимо вывести в это окно с помощью команды Trace/Add. Для удаления окна анализа необходимо выделить его, щелкнув по нему мышкой, и выполнить команду Plot/Delete Plot.

### Задание 3

1. В программе Schematics задайте имя Smes проводнику, соединяющему резисторы R2, R3, R0, установите маркеры напряжения на проводники Smes, input1, input2 (маркер на проводнике output у Вас должен быть уже установлен). Задайте частоту второго источника сигнала равной 60 кГц. Выполните моделирование. Все четыре характеристики расположены в одном окне анализа, что неудобно. Поэтому оставьте в нижнем окне анализа только характеристику V(output), а остальные удалите.

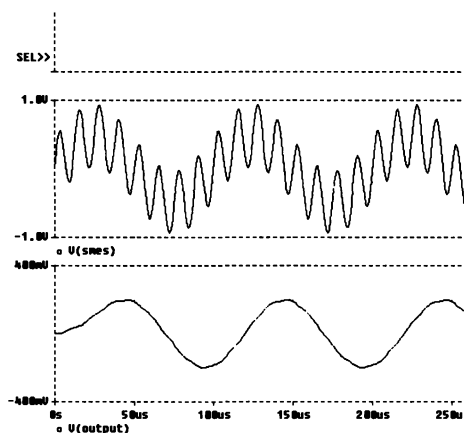


Рис. 3.24. Вид окна программы Probe при вводе нового окна анализа

2. С помощью команды Plot/Add Plot добавьте три новых окна анализа и выведите в каждое окно по одной характеристике (с помощью команды Trace/Add, предварительно выделив нужное окно анализа). В верхнее окно выведите характеристику V(input1) — временное представление сигнала 1 с частотой 10 кГц, во второе окно выведите характеристику V(input2) — временное представление сигнала 2 с частотой 60 кГц, в третье окно выведите характеристику V(Smes) — временное представление суммы двух сигналов на входе фильтра. В нижнем окне у Вас должна остаться характеристика V(output) сигнала на выходе фильтра, повторяющего по форме сигнал 1. На рис. 3.25 показан фрагмент окна программы Probe, который должен получиться у читателя при выполнении указанных выше действий.

3. Нажав на кнопку с надписью FFT (быстрое преобразование Фурье), можно посмотреть спектральные составляющие, присутствующие в различных сигналах. Повторное нажатие этой кнопки приведет к выводу временного представления. Произведите спектральный анализ сигналов, нажав кнопку FFT. Оцените результат. На рис. 3.26 показан фрагмент окна программы Probe с результатами быстрого преобразования Фурье сигналов в контрольных

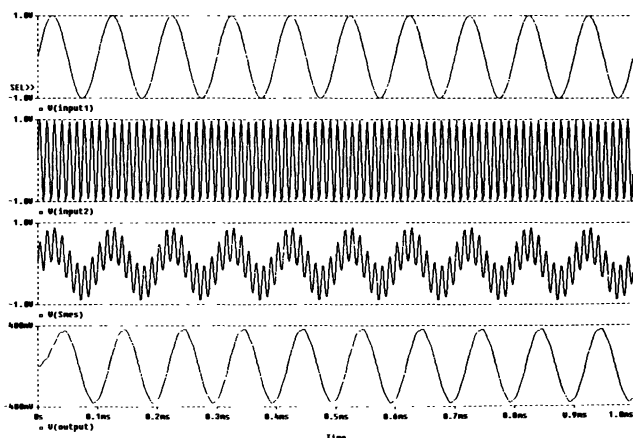


Рис. 3.25. Фрагмент окна программы Probe с отдельно выводимыми временными характеристиками

дает с направлением его последнего перемещения с помощью мыши.

#### Задание 5

1. Переместите курсор C1 вправо, щелкнув левой кнопкой мыши правее от той точки, где он ранее размещался. Нажимая на кнопку перемещения к пику, снимите показания пиков характеристики.

2. Когда курсор дойдет до крайнего правого положения, щелкните левой кнопкой мыши в точке, расположенной левее. Нажимая на кнопку перемещения к пику, наблюдайте перемещение курсора к очередному пику характеристики в обратном направлении.

3. Прodelайте действия 1—2 с курсором C1 с использованием других кнопок перемещения курсора.

4. Выполните действия 1—3 для курсора C2, используя правую кнопку мыши.

Следует отметить, что рассмотренные возможности программы Probe доступны и в других режимах анализа (частотном, по постоянному току и т. д.).

Рисунки характеристик, приводимые в книге, могут отличаться от тех, которые получаются у читателя. Это связано с настройками установочного файла программы `msim_evl.ini`, размещенного в каталоге операционной системы Windows. Например, для задания другой цветовой схемы программы Probe следует изменить значения некоторых параметров, при этом характеристики будут выводиться на белом фоне с черными надписями, что удобно для печати принтскринов (снимков с экрана). Фрагмент установочного файла с изменениями приводится ниже:

```
[PROBE DISPLAY COLORS]
NUMTRACECOLORS=6
BACKGROUND=BRIGHTWHITE
FOREGROUND=BLACK
```

После внесения изменений в установочный файл с помощью текстового редактора «Блокнот» его следует сохранить и перезапустить систему схемотехнического моделирования DesignLab.

# ГЛАВА 4

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СИСТЕМЫ DESIGNLAB ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ АНАЛОГОВЫХ И ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ

В настоящей главе будут рассмотрены схемы резистивного и резонансного усилителей в качестве примеров моделирования активных аналоговых устройств. Этому материалу будет предшествовать рассмотрение источников сигналов, которые могут использоваться при моделировании аналоговых радиоэлектронных устройств. Аналогичным образом, следуя принципу «от простого к сложному», будут рассмотрены источники цифровых сигналов и схемы цифровых устройств — делителя частоты и преобразователя кода. Модели рассматриваемых в настоящей главе схем читатель сможет найти в папке catalog.

### 4.1. Моделирование активных аналоговых устройств

Для моделирования аналогового устройства необходимо выполнить графический ввод компонентов схемы в программе Schematics, используя различные библиотеки компонентов:

- ANALOG.slb — для пассивных элементов ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ );
- BIPOLAR.slb — для биполярных транзисторов;



- EDIODE.slb — для диодов;
- JFET.slb — для полевых транзисторов;
- PORT.slb — для заземления (компонент AGND — для аналоговых устройств).

Следует сказать, что в демо-версии системы DesignLab присутствуют не все перечисленные библиотеки компонентов. Так модель транзистора для схемы усилителя размещена в библиотеке EVAL.slb. Для питания схемы по постоянному току обычно используется компонент VDC (источник постоянного напряжения), расположенный в библиотеке SOURCE.slb. В качестве атрибутов источника VDC задается величина постоянного напряжения DC. После ввода компонентов схемы моделируемого устройства необходимо ввести источник сигнала, расположенный также в библиотеке SOURCE.slb.

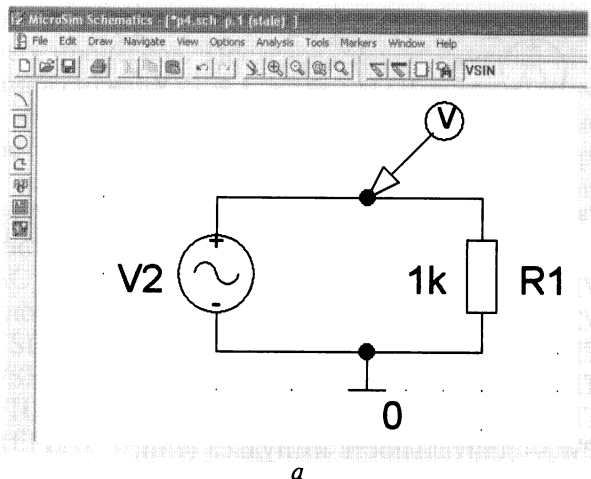
#### 4.1.1. Ввод источников аналоговых сигналов

Задание источника сигналов осуществляется в зависимости от типа активного устройства и от того, какие его характеристики необходимо исследовать. Так, например, для моделирования временных и частотных характеристик устройств в качестве источника сигналов следует выбирать компонент VSIN (источник синусоидального напряжения). Рассмотрим параметры источника сигнала VSIN для схемы, представленной на рис. 4.1, а).

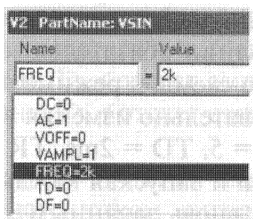
В окне Analysis Setup зададим параметры директивы моделирования схемы в режиме анализа переходных процессов (Transient) таким образом, чтобы на графике было видно 10—15 периодов колебания.

Последовательно изменяя атрибуты источника сигнала VAMPL = 5, FREQ = 5k, TD = 2ms, DF = 30, PHASE = 180 и запуская каждый раз режим моделирования схемы с вновь заданным значением атрибута, можно наблюдать изменение временного представления сигнала источника VSIN.

Для исследования процессов прохождения различных сигналов через аналоговые устройства возможно использование следующих источников сигналов: VPULSE — импульсный источник напряжения



а



б

Рис. 4.1. Схема для исследования параметров (а) и окно с атрибутами компонента V2 (б)

(рис. 4.3, а), VEXP — экспоненциальный источник напряжения (рис. 4.3, б) и VPWL\_FILE — источник напряжения, заданный в файле (рис. 4.3, в), атрибуты которых, обязательные для заполнения, представлены ниже. В скобках указаны ориентировочные значения атрибутов.

Атрибуты источника сигнала VPULSE:

AC — амплитуда напряжения при анализе в частотной области (1);

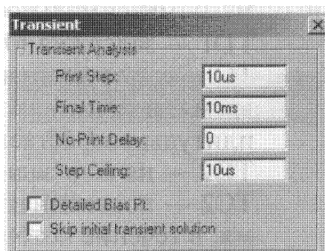


Рис. 4.2. Окно задания параметров директивы моделирования Transient

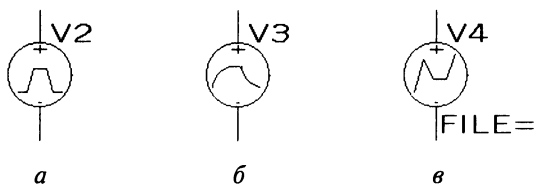


Рис. 4.3. Условные графические обозначения источников сигналов: *а* — VPULSE, *б* — VEXP и *в* — VPWL\_FILE

V1 — минимальное напряжение (0);

V2 — максимальное напряжение (2);

TD — задержка (0);

TR — длительность переднего фронта (0);

TF — длительность заднего фронта (0);

PW — длительность импульса (1m);

PER — период повторения импульсов (4m).

Заменяв в предыдущей схеме источник сигнала VSIN на VPULSE и заполнив обязательные атрибуты, выполните моделирование схемы в режиме анализа переходных процессов. Последовательно изменяя атрибуты источника сигнала  $V1 = 2$ ,  $V2 = 5$ ,  $TD = 2\text{ms}$ ,  $TR = 0,2\text{m}$ ,  $TF = 0,5\text{m}$ ,  $PW = 2\text{m}$ ,  $PER = 5\text{m}$  и запуская каждый раз режим моделирования схемы с вновь заданным значением атрибута, можно наблюдать изменение временного представления сигнала источника VPULSE.

Атрибуты источника сигнала VEXP:

AC — амплитуда напряжения при анализе в частотной области (1);

V1 — минимальное напряжение (0);

V2 — максимальное напряжение (1);

TD1 — задержка (0);

TC1 — постоянная времени переднего фронта — время, в течение которого мгновенное значение амплитуды возрастает до уровня  $0,63 \cdot V2$  (0,2m);

TD2 — начало заднего фронта (2m);

TC2 — постоянная времени заднего фронта — время, в течение которого мгновенное значение амплитуды убывает до уровня  $V2 - 0,63 \cdot V2$  (0,2m).

Заменяв в предыдущей схеме источник сигнала VPULSE на VEXP и заполнив обязательные атрибуты,

выполните моделирование схемы в режиме анализа переходных процессов. Последовательно изменяя атрибуты источника сигнала  $V1 = 1$ ,  $V2 = 3$ ,  $TD1 = 1\text{ms}$ ,  $TC1 = 0,3\text{m}$ ,  $TD2 = 4\text{m}$ ,  $TC2 = 0,3\text{m}$  и запуская каждый раз моделирование схемы с вновь заданным значением атрибута, можно наблюдать изменение временного представления сигнала источника VEXP.

Атрибуты источника сигнала VPWL\_FILE:

AC — амплитуда напряжения при анализе в частотной области (1);

TSF — масштабный множитель по времени (1);

VSF — масштабный множитель по уровню (1);

FILE — имя файла (primer.txt);

REPEAT\_VALUE — количество циклов повторения (3).

Имя файла для источника сигнала VPWL\_FILE должно состоять из латинских букв (расширение txt). Данные в файле необходимо представить в следующем формате:

(<отсчет времени 1>, <отсчет амплитуды 1>)

(<отсчет времени 2>, <отсчет амплитуды 2>)

...

(<отсчет времени N>, <отсчет амплитуды N>)

Файл с таким источником сигнала можно создать в программе «Блокнот» и затем поместить в папку, где расположен файл с моделируемой схемой. Пример файла с источником сигнала представлен на следующем рисунке.

Пример схемы с таким источником сигнала, а также сам файл источника сигнала расположены в каталоге схем. Загрузите схему r4.sch и выполните моделирование во временной области, убедитесь в том, что созданный из файла источник сигнала действительно воспроизводит отсчеты сигнала в заданные моменты времени.

Следует сказать, что в системе DesignLab имеется встроенный редактор входных сигналов Stimulus Editor, позволяющий создавать аналоговые и цифровые сигналы

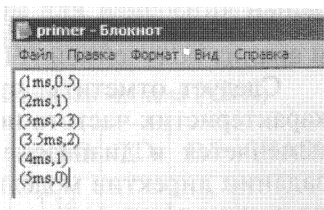


Рис. 4.4. Окно программы «Блокнот» с файлом источника сигнала

непосредственно с помощью курсора мыши. Эти сигналы записываются в файл и включаются в схему с помощью источника сигналов VPWL\_FILE, рассмотренного выше.

После ввода источника сигнала схема аналогового устройства проверяется на отсутствие «плавающих» (неподключенных) узлов, в контрольные точки устанавливаются маркеры и выполняется моделирование.

#### 4.1.2. Пример и порядок выполнения заданий на моделирование резонансного усилителя

Усилители находят широкое применение в радиоэлектронной аппаратуре. Одной из важнейших характеристик усилителей является амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), показывающая значение коэффициента усиления на конкретной частоте [6]. Для резонансных усилителей с нагрузкой в виде колебательного контура АЧХ имеет вид колокола. Рассматриваемый ниже пример резонансного усилителя демонстрирует такой тип АЧХ.

Методика моделирования резонансных усилителей в режиме анализа частотных характеристик заключается в экспериментальном определении номиналов элементов, обеспечивающих требуемую избирательность и коэффициент усиления в заданной полосе частот, т. е. АЧХ соответствующей формы. Для этого после графического ввода элементов схемы, задания источника входного сигнала и директив моделирования выполняют моделирование, затем, в случае необходимости, корректируют номиналы элементов схемы, выполняя повторно моделирование и анализ полученной АЧХ.

Следует отметить, что в режиме анализа частотных характеристик частота источника сигнала автоматически изменяется в диапазоне, указанном пользователем при задании директив моделирования. Поэтому, если на входе схемы пользователь установит маркер, вместе с АЧХ усилителя на графике будет отображаться горизонтальная линия, соответствующая изменяющейся частоте источни-

ка сигнала (независимо от значения, установленного в атрибуте источника сигнала FREQ).

После исследования АЧХ резонансного усилителя к входу схемы подключается источник сигнала с несущей частотой, равной резонансной частоте контура, и схема исследуется в режиме анализа переходных процессов. По временному представлению выходного сигнала проектировщик определяет, не вносит ли усилитель искажений в сигнал. В результате форма выходного сигнала после завершения переходных процессов должна в точности соответствовать форме входного сигнала с учетом коэффициента усиления.

На этом этапе моделирование схемы считается законченным, после чего переходят к разработке печатной платы для физического моделирования (сборки) схемы.

Для получения навыков работы в системе DesignLab выполните моделирование характеристик резонансного усилителя в режимах частотного анализа (AS Sweep) и исследования переходных процессов (Transient) в соответствии со следующими указаниями.

### *Исследование амплитудно-частотной характеристики резонансного усилителя*

1. Выполните графический ввод схемы усилителя в соответствии с примером, приведенным на рис. 4.5 и в таблицах 4.1, 4.2. В качестве источника сигнала используйте компонент VSIN, параметры которого также установите в соответствии с заданием. Для питания схемы по постоянному току используйте компонент VDC. Расположите на входе и выходе схемы маркеры для измерения напряжения, используя команду Markers/Mark Voltage.

**Табл. 4.1.** Значения атрибутов источника сигнала (VSIN)

VSIN	DC	AC	VOFF	VAMPL	FREQ	TD	DF	PHASE
	1	1	0	0,01	3,14 meg	0	0	0

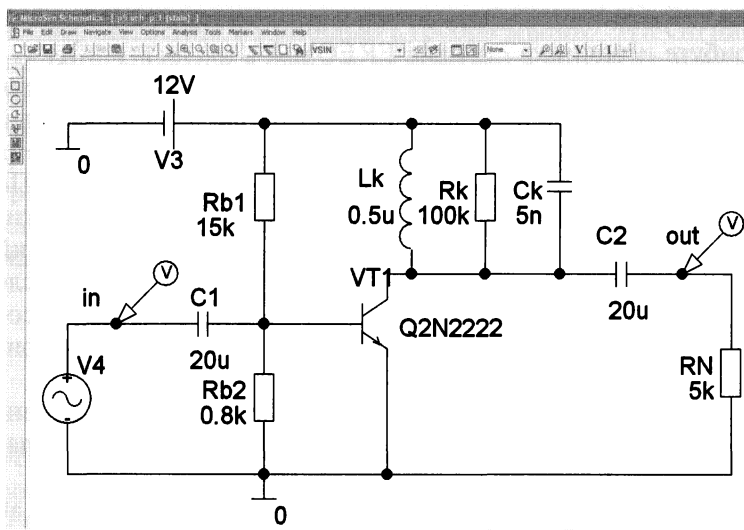


Рис. 4.5. Схема резонансного усилителя

Табл. 4.2. Значения атрибутов источника постоянного напряжения (VDC) и модель транзистора

VT1	модель	VDC	DC
	Q2N2222		+12 V

2. Задайте необходимые параметры директивы анализа частотных характеристик схемы (Analysis Setup/AC Sweep): количество точек графика (Total Pts.), начальное (Start Freq.) и конечное (End Freq.) значения полосы частот. Закрыв окно Analysis Setup, запустите режим моделирования командой Analysis/Simulate или нажатием клавиши F11.

3. По построенному в окне программы Probe графику определите коэффициент усиления и ширину полосы пропускания усилителя, используя команды управления курсором. Для этого необходимо активизировать кнопку Toggle Display of cursor, расположенную на панели инструментов программы Probe.

4. Измените произвольно значения номиналов емкости или индуктивности в контуре, выполните моделирова-



ние и оцените изменение полосы пропускания усилителя. В каталоге схем размещен файл p5.sch для проверки правильности ввода представленной схемы резонансного усилителя и задания параметров директив моделирования.

*Исследование резонансного усилителя в режиме анализа переходных процессов*

1. В графическом редакторе выполните изменение частоты источника сигнала (параметр FREQ), установив ее равной резонансной частоте колебательного контура.

2. Задайте необходимые параметры директивы моделирования переходных процессов (Analysis Setup/Transient): конечное время анализа (Final Time), временной шаг расчета характеристик (Step Ceiling). Закрыв окно Analysis Setup, запустите режим моделирования командой Analysis/Simulate или нажатием клавиши F11. Важно отметить, что для правильного отображения результатов расчета необходимо так выбирать шаг между отсчетами сигнала, чтобы на период несущего колебания приходилось не менее 20—25 отсчетов. Речь идет о параметре Step Ceiling директивы Transient. Так для схемы из файла p5.sch пара-

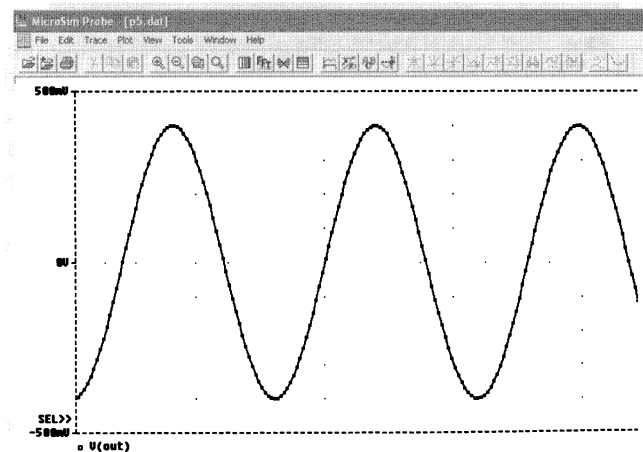


Рис. 4.6. Форма сигнала на выходе резонансного усилителя при правильном значении параметра Step Ceiling



метр Step Ceiling = 0,005 мкс и форма выходного сигнала получается такой, как на рис. 4.6.

Если же параметр Step Ceiling установить равным 0.1 мкс, то отсчетов сигнала явно недостаточно, результаты моделирования не соответствуют действительности — форма сигнала искажается, как будто бы имеет место модуляция амплитуды выходного сигнала, уровень сигнала значительно меньше по сравнению с действительным. На рис. 4.7 показан результат моделирования при неверно установленном параметре Step Ceiling.

3. По графику выходного сигнала в окне программы Probe определите коэффициент усиления (КУ) схемы и сравните его с коэффициентом усиления, рассчитанным в режиме анализа частотных характеристик. При этом значения КУ могут различаться. Это связано с тем, что алгоритмы расчета частотных и временных характеристик различаются. Частотный анализ является менее точным, но более быстродействующим, поэтому коэффициент усиления следует определять по результатам временного анализа.

4. Измените частоту источника сигнала в окне графического редактора так, чтобы сигнал находился в полосе пропускания контура. Выполнив моделирование с изме-

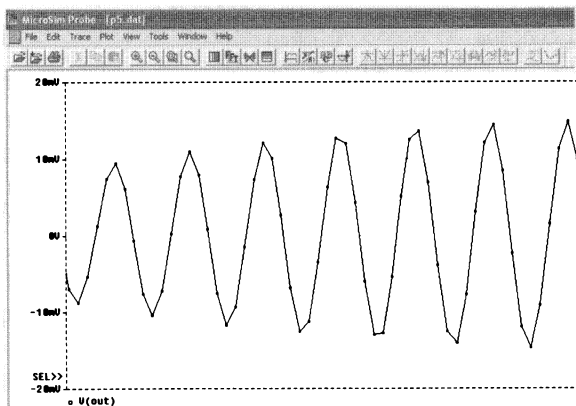


Рис. 4.7. Искаженная форма сигнала на выходе резонансного усилителя при неверном значении параметра Step Ceiling (недостаточно отсчетов на период несущей частоты)



ненными параметрами, убедитесь в уменьшении уровня выходного сигнала по сравнению с предыдущим результатом (когда частота источника сигнала в точности соответствовала резонансной частоте контура).

#### 4.1.3. Пример и порядок выполнения заданий на моделирование искажений импульсных сигналов при их прохождении через резистивный усилитель

Резистивные усилители применяются для усиления сигналов в широком диапазоне частот, поэтому их АЧХ должна быть постоянной в некотором диапазоне. Однако из-за наличия паразитных емкостей в нелинейных элементах АЧХ резистивных усилителей в области высоких частот имеет убывающий характер. Это приводит к искажениям сигналов, несущая частота которых близка к граничной частоте пропускания усилителя, а также широкополосных сигналов (например, импульсных) [6].

В связи с этим задача моделирования резистивных усилителей заключается в определении номиналов компонентов и модели активного компонента, обеспечивающих усиление заданных широкополосных сигналов с минимальными искажениями.

В рассматриваемом ниже примере необходимо определить искажения фронтов импульсного сигнала на выходе резистивного усилителя в режиме анализа переходных процессов. Импульс считается искаженным, если длительность фронтов  $t_{пф} + t_{зф}$  (переднего и заднего) превышает длительность вершины  $t_v$  (плоской части импульса).

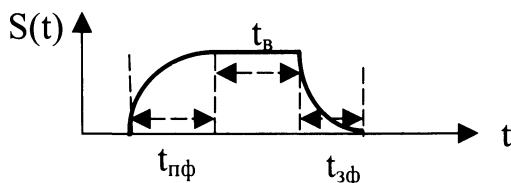


Рис. 4.8. Временное представление искаженного импульса

1. В схеме усилителя вместо резонансного контура включите сопротивление  $R_k = 15 \text{ кОм}$  и замените источник сигнала VSIN на VPULSE, установив параметры источника в соответствии с примером, приведенным на рис. 4.9 и в таблице 4.3.

Табл. 4.3. Параметры источника импульсных сигналов (VPULSE)

VS	DC	AC	V1	V2	TD	TR	TF	PW	PEW
	0	0,01	0	-0,02	0	0	0	1u	3u

2. Задайте параметры директивы моделирования переходных процессов (конечное время анализа Final Time и временной шаг расчета характеристик Step Ceiling) таким образом, чтобы на графике выходного сигнала видно было 10–15 импульсов. Закрыв окно Analysis Setup, запустите режим моделирования командой Analysis/Simulate или нажатием клавиши F11.

3. Измените параметры источника сигнала (длительность импульсов), уменьшив значение в 5–10 раз, и вы-

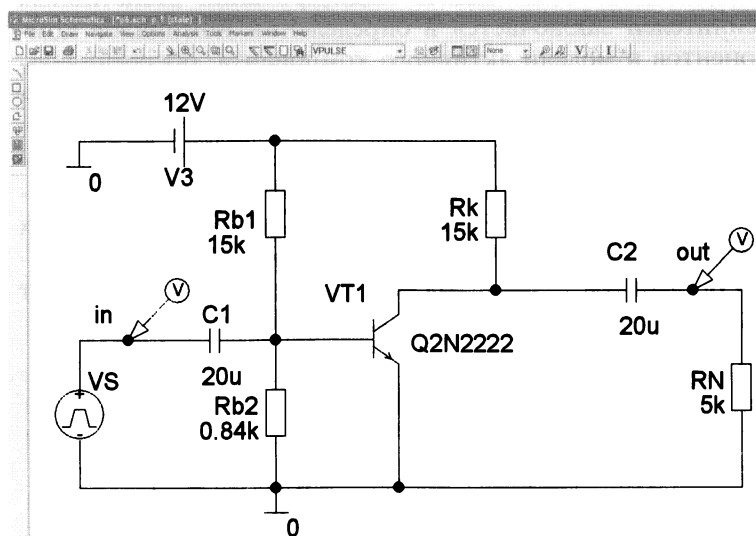


Рис. 4.9. Схема резистивного усилителя



полните моделирование с измененными параметрами. По графику выходного сигнала определите длительность переднего и заднего фронтов импульсов. Из графика видно, что при длительности импульсов 0,1 мкс передний и задний фронты импульсов становятся затяжными — это результат влияния паразитных емкостей транзистора. Поэтому если искажения сигналов при их прохождении через усилитель являются значительными, то следует выбирать модель более высокочастотного транзистора.

#### 4.1.4. Статистический анализ по методу Монте-Карло

Завершающим этапом моделирования радиоэлектронных устройств является, как правило, анализ влияния разброса параметров элементов на уже рассчитанные характеристики схемы. Для этого в системе DesignLab предназначена директива моделирования Monte Carlo/ Worst Case — статистический анализ по методу Монте-Карло и «Наихудший случай». Для метода Монте-Карло случайные значения параметров компонентов рассчитываются по формуле [2]:

$$x = x_{ном}(1 + \xi \cdot \Delta),$$

где  $x_{ном}$  — номинальное значение параметра, введенное проектировщиком;  $\Delta$  — разброс параметра, установленный проектировщиком для каждого компонента в атрибуте Tolerance;  $\xi$  — центрированная случайная величина в диапазоне  $(-1, +1)$ , формируемая генератором случайных чисел.

Для активизации статистического анализа по методу Монте-Карло необходимо задать параметры директивы Monte Carlo/ Worst Case и в атрибутах компонентов схемы установить значение параметра Tolerance (разброс) в процентном отношении. Задание параметров директивы статистического анализа по методу Монте-Карло осуществляется в диалоговом окне, вызываемом по команде Analysis/Setup и нажатием на кнопку Monte Carlo/Worst

Case (рис. 4.10). Ниже приводится назначение основных параметров директивы статистического анализа по методу Монте-Карло:

- Monte Carlo/Worst Case — выбор алгоритма статистической обработки (метод Монте-Карло или метод наихудшего случая);
- MC Runs — число статистических испытаний (прогонов);
- Analysis Type (AC, DC, Transient) — выбор вида анализа (частотный анализ, анализ по постоянному току, временной анализ);
- Output Var — выходная переменная, значения которой будут рассчитываться и выводиться на графики;
- Function — выбор вида статистической функции, а также дополнительных условий, позволяющих осуществлять селекцию статистических результатов;
- MC Options/Output — задание числа или номера выводимой реализации (прогона).

Установка значений атрибута Tolerance осуществляется путем их ввода в диалоговом окне, вызываемом двойным щелчком мыши по компоненту. При этом если значение

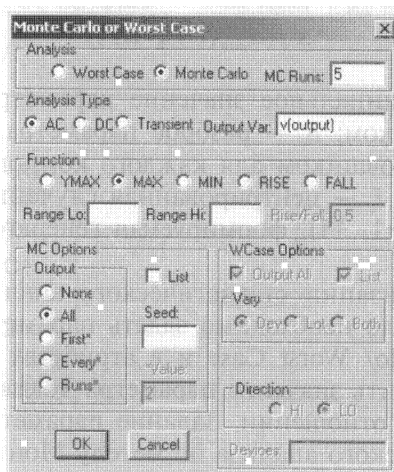


Рис. 4.10. Окно задания параметров статистического анализа по методу Монте-Карло

атрибута Tolerance не установлено ни у одного компонента, то статистический анализ выполнен не будет. На рис. 4.11 показано окно с атрибутами конденсатора C1 с параметром Tolerance = 20%.

После задания параметров режима Монте-Карло и установки соответствующих значений атрибутов компонентов схемы следует выполнить моделирование. Не забудьте включить соответствующую директиву моделирования. Так, например, для расчета влияния параметров конденсатора C1 на АЧХ фильтра необходимо помимо директивы Monte Carlo/ Worst Case включить директиву AC Sweep и задать необходимые параметры. При моделировании в окне программы PSpice показывается информация о ходе вычислений — номер прогона (статистического испытания) и т. д. По окончании моделирования в окно программы Probe будут выведены несколько графиков, количество которых соответствует числу заданных испытаний.

На рис. 4.13 показан фрагмент окна программы Probe с результатами моделирования фильтра нижних частот в режиме частотного анализа (число испытаний равно 5, поэтому выведено 5 характеристик).

Анализируя полученные характеристики, проектировщик принимает решение, является ли разброс выходных

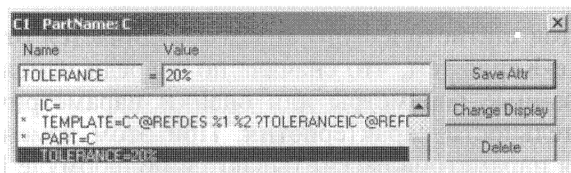


Рис. 4.11. Диалоговое окно для задания атрибутов компонента

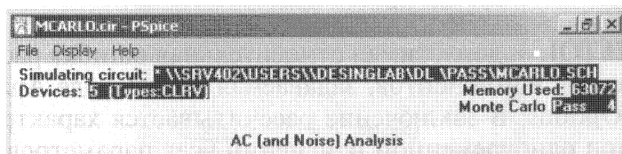


Рис. 4.12. Окно сообщения программы PSpice при статистическом анализе по методу Монте-Карло

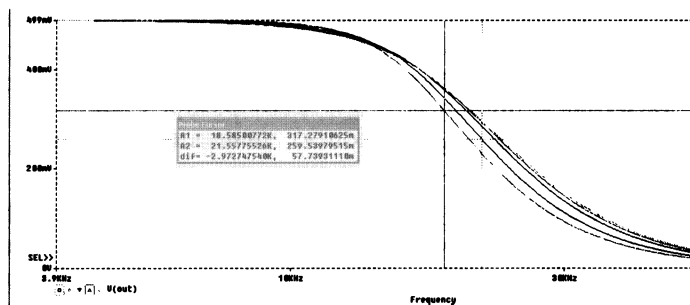


Рис. 4.13. Результаты статистического анализа АЧХ фильтра нижних частот по методу Монте-Карло

параметров (характеристик) допустимым или нет. В случае неудовлетворительного результата необходимо выбрать компоненты с меньшим разбросом параметров или пересчитать номиналы компонентов.

Поупражняйтесь в анализе созданных ранее Вами схем по методу Монте-Карло. Вы также можете воспользоваться файлом p7.sch из каталога схем, в котором анализируется влияние разброса параметров конденсатора C1 на АЧХ фильтра нижних частот.

#### 4.1.5. Статистический анализ методом расчета наихудшего случая

Этот метод статистического анализа отличается от метода Монте-Карло тем, что сначала по очереди изменяются все указанные параметры для оценки параметрической чувствительности характеристик. При этом измененные значения параметров рассчитываются по формуле [2]:

$$x = x_{\text{ном}}(1 + \text{RELTOL}),$$

где RELTOL — допустимая относительная ошибка расчета параметров компонентов, задаваемая по команде Analysis Setup/Options. В заключение рассчитывается характеристика при одновременном изменении всех параметров (так называемый наихудший случай). Значения параметров в этом случае определяются выражением

$$x = x_{\text{ном}}(1 \pm \Delta).$$

Для активизации статистического анализа по этому методу необходимо задать параметры директивы Monte Carlo/ Worst Case и в атрибутах компонентов схемы установить значение параметра Tolerance. Задание параметров директивы статистического анализа по методу «Наихудший случай» осуществляется в диалоговом окне, вызываемом по команде Analysis/Setup и нажатием на кнопку Monte Carlo/Worst Case (рис. 4.14). Ниже приводится назначение основных параметров директивы статистического анализа по методу «Наихудший случай»:

- Monte Carlo/Worst Case — выбор алгоритма статистической обработки (метод Монте-Карло или метод наихудшего случая);
- Analysis Type (AC, DC, Transient) — выбор вида анализа (частотный анализ, анализ по постоянному току, временной анализ);
- Output Var — выходная переменная, значения которой будут рассчитываться и выводиться на графики;

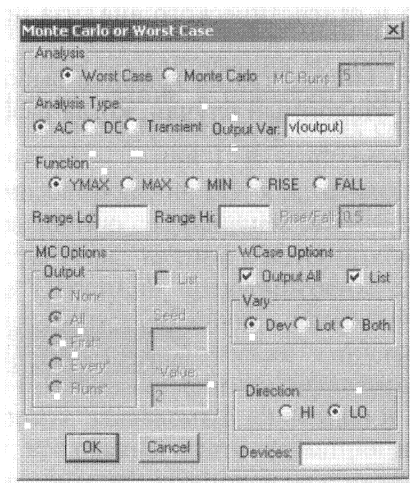


Рис. 4.14. Окно задания параметров статистического анализа по методу «Наихудший случай»



- Function — выбор вида статистической функции, а также дополнительных условий, позволяющих осуществлять селекцию статистических результатов;
- Output All — передача в выходной файл характеристик, рассчитанных при всех комбинациях параметров;
- Vary — выбор типа генератора независимых либо зависимых случайных значений;
- Direction — выбор направления (возрастание или убывание) изменения параметров компонентов относительно номинальных значений;
- Devices — выбор типа компонентов (R, L, C и др.), параметры которых должны изменяться при расчете чувствительности.

После задания параметров директивы и установки соответствующих значений атрибутов компонентов схемы следует выполнить моделирование, по окончании которого в окно программы Probe будут выведены графики характеристик, рассчитанные для оценки параметрической чувствительности и наихудшего случая. На рис. 4.15 показан фрагмент окна программы Probe с результатами моделирования фильтра нижних частот в режиме частотного анализа и статистического анализа по методу «Наихудший случай».

Из рисунка видно, что на графике выводятся две характеристики: эталонный случай, когда разброс парамет-

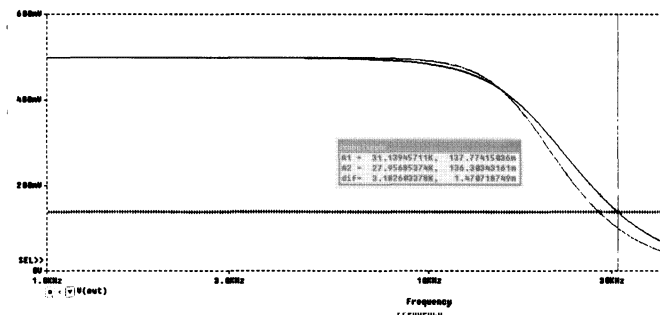


Рис. 4.15. Результаты статистического анализа АЧХ фильтра нижних частот по методу «Наихудший случай»

ра равен 0, и наихудший случай, когда разброс номинала емкости  $C1$  равен 40%.

Читатель может воспользоваться файлом `p8.sch` из каталога схем, в котором анализируется влияние разброса параметров конденсатора  $C1$  на АЧХ фильтра нижних частот по методу наихудшего случая.

## 4.2. Пример и порядок выполнения заданий на моделирование цифровых устройств


Перечень цифровых устройств (ЦУ), используемых в аппаратуре различного назначения, весьма широк. Авторы ставят целью настоящей книги познакомить читателя с общими принципами моделирования ЦУ с использованием системы схемотехнического моделирования DesignLab. Для этого читателю предлагается выполнить моделирование всего лишь двух ЦУ — делителя частоты и преобразователя кода, при этом вопросы синтеза этих устройств сознательно опускаются.

Методика моделирования ЦУ более простая по сравнению с аналоговыми устройствами. После ввода схемы и задания источника сигнала, необходимо установить параметры директивы моделирования во временной области, выполнить моделирование и проверить правильность работы схемы. При этом уровни цифровых сигналов принимают два значения — 0 или 1. В этой связи время, затрачиваемое на моделирование ЦУ, как правило, значительно меньше по сравнению со временем моделирования аналоговых устройств. Итак, начнем с источников сигналов.

В системе DesignLab предусмотрены следующие источники цифровых сигналов: компоненты Digclock (синхросигнал или периодическая импульсная последовательность), FileStim (источник цифрового сигнала произвольной формы, задаваемый из файла) и DigStim (цифровой сигнал, созданный с помощью программы Stimulus Editor). Рассмотрим эти компоненты с целью изучения их свойств.

### 4.2.1. Ввод источников цифровых сигналов

Для изучения источника сигнала Digclock соберите схему, представленную на рис. 4.16. Для этого нажмите кнопку выбора компонентов и в раскрывшемся окне Part Browser Basic нажмите кнопку Libraries (библиотеки), в поле Library выберите библиотеку SOURCE.slb (источники), а в поле Part выберите нужный компонент Digclock (синхросигнал), после чего нажмите кнопки ОК, затем Place & Close (ввести компонент и закрыть диалоговое окно).

Для ввода логического элемента в поле Library выберите библиотеку 7400.slb (аналоги цифровых компонентов серии 155), а в демо-версии следует воспользоваться библиотекой EVAL.slb, в поле Part выберите нужный компонент 7404 (инвертор). Соедините компоненты проводниками, активизировав режим рисования проводников кнопкой .

После создания схемы просмотрите атрибуты источника сигнала, заданные по умолчанию. Для источника сигнала Digclock атрибуты имеют следующие обозначения:

DELAY — задержка синхросигнала;

ONTIME — длительность синхропосылки;

OFFTIME — длительность паузы (генерация синхросигнала начинается с паузы);

STARTVAL — начальное значение или уровень паузы (обычно 0);

OPPVAL — уровень синхропосылки (обычно 1).

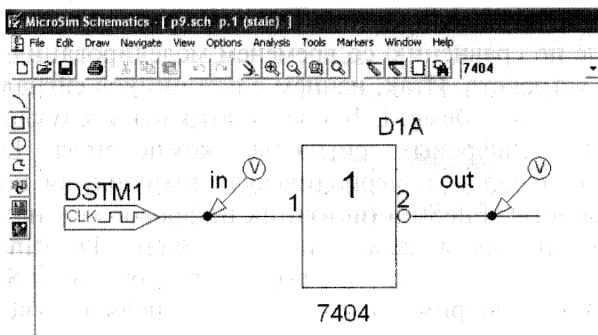


Рис. 4.16. Схема для исследования источника цифрового сигнала

### Задание 1

1. Выполните ввод маркеров с помощью команды Markers/ Mark Voltage (Level) в точки, как показано на рис. 4.16. После этого сохраните файл с созданной схемой.

2. В окне Analysis Setup задайте параметры директивы моделирования схемы в режиме анализа переходных процессов (Transient) таким образом, чтобы на графике было видно 10—15 импульсов (Print Step = 0,1us, Final Time = 10us). Запустите режим моделирования, в открывшемся окне программы Probe наблюдайте временную диаграмму входного сигнала и сигнала на выходе инвертора.

3. Последовательно изменяя атрибуты источника сигнала DELAY = 0,8us, ONTIME = 2us, OFFTIME = 1us, STARTVAL = 1, OPPVAL = 0 и запуская каждый раз моделирование схемы с вновь заданным атрибутом, наблюдайте изменение временного представления сигнала источника Digclock.

Удалите в схеме источник сигнала Digclock, выделив его левой кнопкой мыши и нажав клавишу Delete. Введите источник сигнала FileStim (источник цифрового сигнала из файла). Для этого нажмите кнопку выбора компонентов и в открывшемся окне Part Browser Basic нажмите кнопку Libraries (библиотеки), в поле Library выберите библиотеку SOURCE.slb (источники), а в поле Part — нужный компонент FileStim, после чего нажмите кнопки ОК, затем Place & Close (ввести компонент и закрыть диалоговое окно). Заполните обязательные атрибуты в соответствии с приведенным примером.

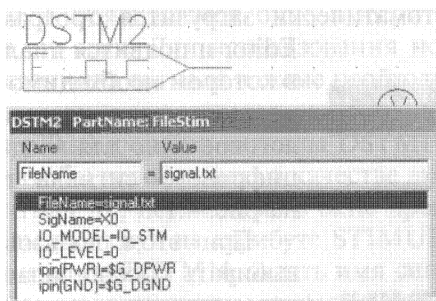


Рис. 4.17. Изображение и окно для задания значений атрибутов источника сигнала FileStim

Ниже приводится пояснение обязательных для заполнения атрибутов источника сигнала FileStim:

FileName — имя файла с источником сигнала;

SigName — имя сигнала в файле (может быть несколько сигналов с разными именами в одном файле).

Файл с источником сигнала создайте с помощью программы «Блокнот» в соответствии с образцом (рис. 4.18). При этом вначале указывается имя сигнала, а затем после пропущенной строки должны следовать отдельные строки «отсчет времени — логический уровень сигнала (0 или 1)». Файл с источником сигнала поместите в папку, где сохранен файл с моделируемой схемой, и после этого выполните моделирование. Наблюдайте результаты моделирования схемы с источником сигнала FileStim.

В системе схемотехнического моделирования DesignLab предусмотрен также ввод источника сигнала с помощью встроенной программы создания сигналов Stimulus Editor. Для ее использования необходимо ввести в схему источник сигнала, расположенный в библиотеке SOURCESTM.slb (в демо-версии эта библиотека недоступна, но источник DigStim имеется в библиотеке SOURCE.slb). С этой целью нажмите кнопку выбора компонентов, в поле Library выберите библиотеку SOURCE.slb (источники), а в поле Part — компонент DigStim (цифровой сигнал, созданный с помощью программы Stimulus Editor), после чего нажмите кнопку ОК, затем Place & Close (ввести компонент и закрыть диалоговое окно).

Дважды нажмите левой кнопкой мыши на источнике сигнала. Автоматически загрузится программа Stimulus Editor и появится диалоговое окно, в котором необходимо задать параметры создаваемого сигнала. Диалоговое окно для ввода параметров цифрового сигнала представлено на рис. 4.19.

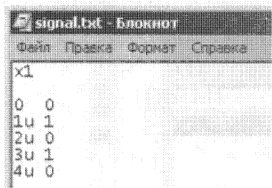


Рис. 4.18. Пример для задания источника сигнала из файла

При этом пользователь может выбирать способ задания параметров источника сигнала. В первом случае задаются частота следования

импульсов и скважность (Frequency and duty cycle), во втором — период следования и длительность импульсов (Period and on time). На рис. 4.19 показан пример задания параметров источника сигнала, соответствующий первому способу. В поле Name указано имя сигнала, которое по умолчанию определяется как имя компонента (источника сигнала на схеме, в нашем случае — DSTM14). В поле Initial Value (начальное значение) задается начальный логический уровень сигнала.

Задайте параметры, как показано на рис. 4.19, нажмите OK.

Окно закроется и на графике в программе Stimulus Editor будет показан сигнал, имя которого DSTM14. В том случае, если в папке с файлом схемы уже есть файл с источником сигнала, созданного в программе Stimulus Editor, на график будут также выведены имеющиеся в этом файле сигналы (имя сигнала и его временное представление).

Файл с источником сигнала именуется также как и файл схемы, получает расширение \*.stl и сохраняется в папке с моделируемой схемой. При этом на схеме атрибут STIMULUS источника сигнала DigStim получает имя сигнала (по умолчанию имя источника сигнала, в нашем случае — DSTM14).

Для создания нового сигнала выполните команду Stimulus/New, в появившемся окне выберите вид сигнала и задайте его имя. Для использования нового сигнала в качестве источника сигнала в схеме необходимо в атрибут STIMULUS ввести имя соответствующего сигнала. Например, в файле p10.stl имеются сигналы DSTM14, Sig1, X0.

Для того чтобы использовать в качестве входного сигнала в схеме сигнал X0, необходимо в окне программы Schematics, дважды щелкнув на атрибуте STIMULUS источника сигнала с именем DSTM14, задать имя сигнала X0.

Выполните моделирование схемы с источником сигнала, созданным в программе Stimulus Editor. Наблюдайте

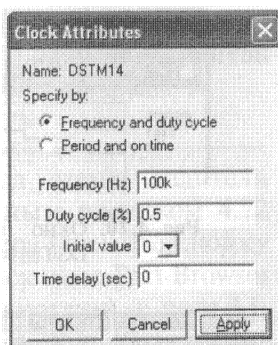


Рис. 4.19. Окно ввода параметров источника сигнала в программе Stimulus Editor

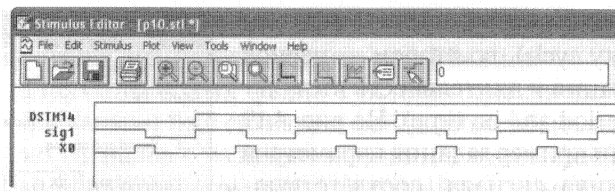


Рис. 4.20. Окно программы Stimulus Editor с сигналами DSTM14, Sig1, X0

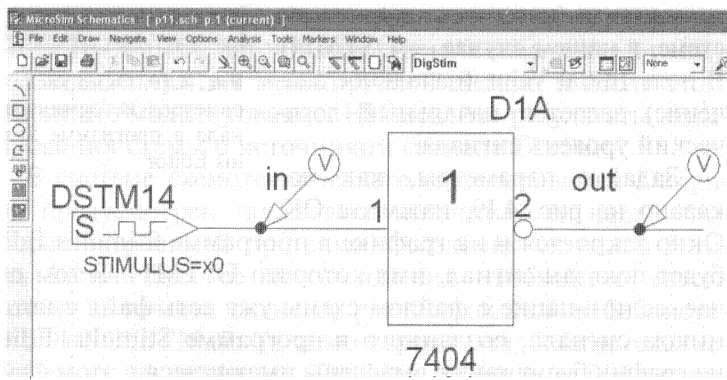


Рис. 4.21. Пример задания входного сигнала с помощью источника DigStim

результаты моделирования в окне программы Probe. Следует сказать о том, что программа Stimulus Editor очень «капризна» к именам каталогов, в которых сохраняются файлы источников сигналов. Поэтому после их создания не следует переименовывать файлы и каталоги. В противном случае придется заново вводить в схему источник сигнала и задавать его параметры.

#### 4.2.2. Моделирование делителя частоты

Делитель частоты на триггерах широко используется в цифровых синтезаторах частот для получения сетки частот от высокостабильного источника (например, кварцевого генератора). Последовательным включением триггеров осуществляется увеличение длительности выходного им-

пульса, что равносильно уменьшению частоты [11]. В нижеследующем примере рассматривается один из вариантов делителя частоты, выполненный на JK-триггерах.

## Задание 2

1. Выполните графический ввод схемы делителя частоты в соответствии с приведенным рисунком 4.22 и таблицей 4.4. Для выбора JK-триггера нажмите кнопку выбора компонентов и в раскрывшемся окне Part Browser Basic нажмите кнопку Libraries (библиотеки), в поле Library выберите библиотеку EVAL.slb, в поле Part — компонент 7472, после чего нажмите кнопки ОК, затем Place & Close (ввести компонент и закрыть диалоговое окно).

Подайте на инверсные входы предустановки в единичное состояние (S) и сброса в нулевое состояние (R) уровень логической единицы для устранения неопределенности. Для этого нажмите кнопку выбора компонентов и в раскрывшемся окне Part Browser Basic нажмите кнопку Libraries (библиотеки), в поле Library выберите библиотеку PORT.slb, а в поле Part — компонент HI (уровень логической единицы), после чего нажмите кнопки ОК, затем Place & Close.

В качестве источника сигнала используйте компонент DigClock, параметры которого также установите в соответствии с любым вариантом из таблицы. Соедините все входы триггера, включив режим рисования проводников, с источником сигнала.

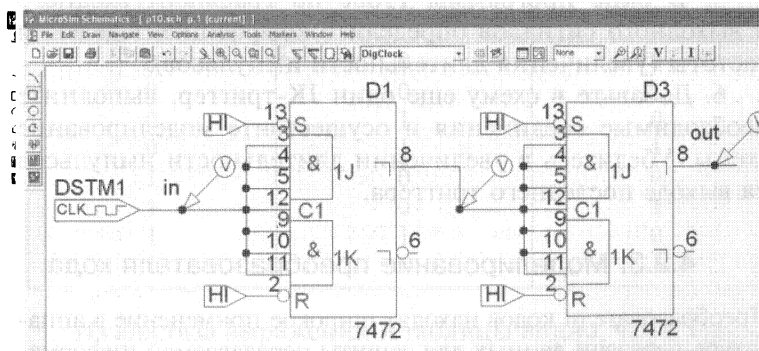


Рис. 4.22. Схема делителя частоты на JK-триггерах



Табл. 4.4. Варианты заданий для моделирования делителя частоты

Вариант	К-т деления частоты	Атрибуты источника сигнала DigClock		
		DELAY	ONTIME	OFFTIME
1	2	1u	0,5u	0,5u
2	4	0,2u	1u	1u
3	3	0,8u	1,5u	1,5u
4	4	0,3u	0,9u	0,9u
5	2	0,5u	2u	2u

2. Расположите на входе и выходе схемы (прямой выход) маркеры для измерения сигналов, используя команду Markers/Mark Voltage.

3. Сохраните схему. Задайте необходимые параметры директивы моделирования переходных процессов (Analysis Setup/Transient): конечное время анализа (Final Time = 10u), временной шаг расчета характеристик (Step Ceiling = 50n) и интервал между точками отсчета при выводе результатов моделирования (Print Step = 50n).

4. В окне Analysis Setup нажмите кнопку Digital Setup и в раскрывшемся окне в поле Flip-flop Initialization (установка начального состояния триггеров) активизируйте опцию All 0 (все в нулевое состояние). Закрыв окно Analysis Setup, запустите режим моделирования командой Analysis/Simulate или нажатием клавиши F11.

5. В окне программы Probe по графикам входного и выходного сигналов определите коэффициент деления частоты (увеличения длительности импульсов).

6. Добавьте в схему еще один JK-триггер, выполните необходимые соединения и осуществите моделирование схемы. Убедитесь в увеличении длительности импульсов на выходе последнего триггера.

### 4.2.3. Моделирование преобразователя кода

Преобразователи кодов находят широкое применение в аппаратуре передачи данных для защиты передаваемой информации от ошибок, а также для аппаратного шифрования каких-

либо сведений. Преобразователем кода называется цифровой узел с  $m$  входами и  $n$  выходами, преобразующий один параллельный код в другой [11]. Моделирование преобразователя кода имеет своей целью выполнить проверку синтезированной схемы на предмет соответствия таблицы истинности преобразованного кода с сигналами на выходах моделируемой схемы. Вопросы синтеза цифровых схем подробно рассматриваются в курсе «Цифровых и импульсных устройств». Ниже описываются особенности моделирования уже синтезированного преобразователя кода 8—4—2—1 в дополнительный код.

### Задание 3

1. Создав новый файл, выполните графический ввод схемы преобразователя кода, осуществляющего преобразование входного сигнала по следующим выражениям для переменных  $Y_2$ ,  $Y_1$ ,  $Y_0$ :

$$Y_2 = \overline{\overline{X_2} \cdot \overline{X_0} \cdot \overline{X_2} \cdot X_0 \cdot \overline{X_1}},$$

$$Y_1 = \overline{\overline{X_1} \cdot \overline{X_0} \cdot \overline{X_1} \cdot X_0},$$

$$Y_0 = X_0.$$

Входной код задан следующей таблицей (код 8—4—2—1).

Табл. 4.5. Код 8-4-2-1

X2	X1	X0
0	0	0
0	0	1
0	1	0
0	1	1
1	0	0
1	0	1
1	1	0
1	1	1

Из анализа выражений и таблицы видно, что в качестве входных используются три сигнала  $X_0$ ,  $X_1$  и  $X_2$ . Поэто-

му в схеме необходимо будет использовать три источника сигнала с различной частотой следования импульсов.

Для создания таких сигналов введите в схему три компонента DigClock (библиотека SOURCE.slb). Задайте для первого источника сигнала  $X0$  параметры ONTIME (длительность импульса) = 0,5 мкс и OFFTIME (длительность паузы) = 0,5 мкс. Аналогичным образом введите в схему и задайте параметры источников сигналов  $X1$  (ONTIME = 1 мкс и OFFTIME = 1 мкс) и  $X2$  (ONTIME = 2 мкс и OFFTIME = 2 мкс). На рис. 4.23 показаны временные диаграммы сигналов  $X0$ ,  $X1$ ,  $X2$ .

2. Для реализации логического выражения, в соответствии с которым осуществляется преобразование кода, необходимо ввести логические элементы и соответствующим образом выполнить соединения. Из анализа выражения  $Y2$  видно, что для схемной реализации такой логической операции необходимо использовать следующие элементы:

- двухходовый элемент И-НЕ для операций  $X2 \cdot \overline{X0}$ ,  $\overline{X0} \cdot X2$  (компонент 7400);
- трехходовый элемент И-НЕ для результирующей операции (компонент 7410).

Введем последовательно такие компоненты и выполним соответствующие соединения. Для реализации логической операции  $X2 \cdot \overline{X0}$  необходимо ввести два компонента 7400. Для этого нажмите кнопку выбора компонентов и в раскрывшемся окне Part Browser Basic кнопку Libraries (библиотеки), в поле Library выберите библиотеку EVAL.slb, а в поле Part — компонент 7400, после чего нажмите кнопки ОК, затем Place & Close (ввести компонент и закрыть диалоговое окно).

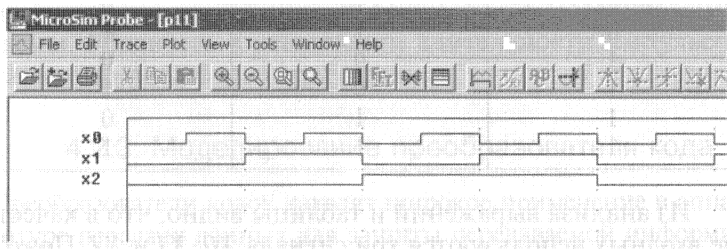


Рис. 4.23. Временные диаграммы сигналов  $X0$ ,  $X1$ ,  $X2$

Соединим выход источника сигнала  $X0$  с входами компонента D4A (в результате на выходе получим значение  $\overline{X0}$ ), выход которого и сигнал  $X2$  необходимо завести на входы компонента D1A. У читателя позиционные обозначения логических элементов могут отличаться от приводимых авторами, что связано с последовательностью ввода и размещением на схеме самих элементов.

Затем выполним ввод еще двух компонентов и необходимые соединения для реализации операции  $\overline{X0} \cdot \overline{X2}$ : соединим выход источника сигнала  $X2$  с входами компонента D5A, выход которого и сигнал  $\overline{X0}$  необходимо завести на входы компонента D3A. Для реализации последней операции (объединение по трем входам с отрицанием) введем компонент 7410 (получит имя D6A). Соединим входы компонента D2A с сигналом  $X1$  (получим  $\overline{X1}$ ), выходы D1A, D2A, D3A с входами D6A. Получим фрагмент схемы, реализующий выходную переменную  $Y2$  в соответствии с заданным выражением  $Y2 = \overline{X2} \cdot \overline{X0} \cdot \overline{X2} \cdot \overline{X0} \cdot \overline{X1}$ .

Аналогичным образом введите компоненты и выполните необходимые соединения для реализации выходных переменных  $Y1$ ,  $Y0$ .

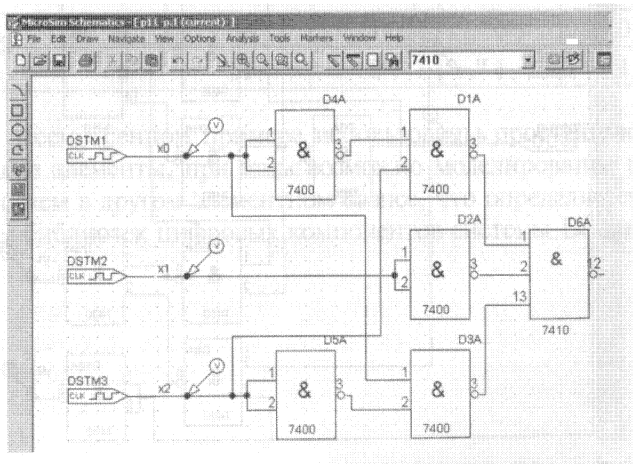


Рис. 4.24. Схема, обеспечивающая реализацию логического выражения  $Y2 = \overline{X2} \cdot \overline{X0} \cdot \overline{X2} \cdot \overline{X0} \cdot \overline{X1}$

3. Для удобства анализа результатов моделирования обозначьте выходы источников сигналов как  $X_2$ ,  $X_1$ ,  $X_0$ , а выходы компонентов, реализующих схемные функции, как  $Y_2$ ,  $Y_1$ ,  $Y_0$ . Для этого дважды нажмите на соответствующем проводнике, исходящем от компонента, и в появившемся диалоговом окне введите соответствующее обозначение.

4. Расположите на обозначенных проводниках  $X_2$ ,  $X_1$ ,  $X_0$  и  $Y_2$ ,  $Y_1$ ,  $Y_0$  маркеры для измерения сигналов, используя команду Markers/Mark Voltage и расставляя маркеры в указанной последовательности.

5. Сохраните схему.

6. Задайте необходимые параметры директивы моделирования переходных процессов (Analysis Setup/Transient): конечное время анализа (Final Time = 20u), временной шаг расчета характеристик (Step Ceiling = 50n) и интервал между точками отсчета при выводе результатов моделирования (Print Step = 50n). Закрыв окно Analysis Setup,

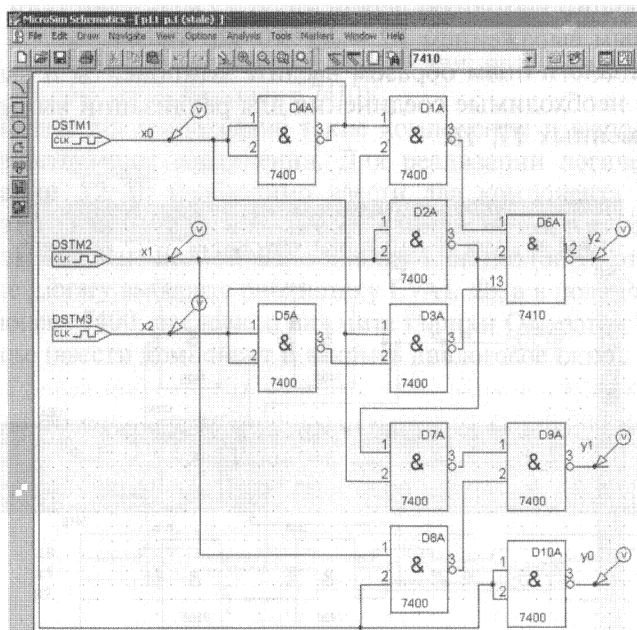



Рис. 4.25. Схема преобразователя кода 8—4—2—1 в дополнительный код

запустите режим моделирования командой Analysis/Simulate или нажатием клавиши F11.

7. В окне программы Probe по графикам входного и преобразованного кодов проверьте соответствие полученных результатов и таблицы истинности (таблица 4.6). Для этого включите режим привязки курсора к построенному графику (кнопка ) , щелкните левой кнопкой мыши на графике и в дискретные моменты времени, соответствующие изменению входных переменных  $X_2$ ,  $X_1$ ,  $X_0$ , определите значения выходных переменных  $Y_2$ ,  $Y_1$ ,  $Y_0$ .

Для проверки работоспособности схемы преобразователя кода приводится таблица истинности первичного и преобразованного кодов.

Табл. 4.6. Таблица соответствия кода 8-4-2-1 и дополнительного кода

Код 8—4—2—1			Дополнительный код		
x2	x1	x0	y2	y1	y0
0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	1	1
0	1	0	1	1	0
0	1	1	1	0	1
1	0	0	1	0	0
1	0	1	0	1	1

В рассмотренном примере использованы простейшие логические элементы, при этом возможно моделирование цифровых схем в другом элементном базисе, что определяется составом библиотек цифровых компонентов системы DesignLab.

# ПРИЛОЖЕНИЕ

## РАЗРАБОТКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ ДЕЛИТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Заключительным этапом проектирования радиоэлектронного устройства является разработка печатной платы на основе данных, полученных в процессе моделирования схемы. Для этого в систему DesignLab включена программа редактирования печатных плат PCBoards, которая позволяет проектировать многослойные печатные платы с двусторонним размещением компонентов. Ниже рассматриваются основные возможности программы редактирования печатных плат PCBoards и пример разработки печатной платы делителя частоты.

### Общие сведения о программе редактирования печатных плат PCBoards

Программа PCBoards функционально подразделяется на редактор печатных плат Layout Editor и редактор типовых корпусов компонентов Footprint Editor. В режиме Layout Editor выполняются все основные операции по разработке печатной платы, включая вызов редактора Footprint Editor, который, в свою очередь, создает графическое изображение типовых корпусов компонентов и информацию об упаковке (координаты расположения выводов, тип компонента и т. д.). Информация об упаковке каждого конкретного компонента содержится в библиотеке Package Library и передается в программу Layout Editor автоматически, которая переносит на экран графические изображения компонентов с указанием логических соединений между выводами. Этот процесс и называется упаковкой схемы на печатную

плату. Затем вычерчивается контур печатной платы произвольной формы и выполняются операции размещения компонентов и трассировки печатных проводников.

Информация о печатной плате заносится в программу PCBoards на 19 слоев, дополнительно к которым пользователь может определить еще 48 слоев [8]. Созданный дополнительный слой может занимать различное промежуточное положение в многослойной печатной плате. Сигнальные слои должны располагаться между верхним [Top] и нижним [Bottom] слоями. Перечень слоев печатных плат, используемых в программе PCBoards, приведен в таблице П.1.

Табл. П.1.

Имя слоя	Содержание
[User defined]	Любые графические объекты или информация об электрических соединениях для трассировки цепей сигналов
[Boundary Top]	Габариты корпусов компонентов на верхней стороне платы
[SMTAssyDrwTop]	Графика выводов планарных компонентов на верхней стороне платы
[SilkTop]	Графика корпусов компонентов на верхней стороне платы
[SolderMaskTop]	Графика маски пайки на верхней стороне платы
[PasteMaskTop]	Графика вставки пайки на верхней стороне платы
[Top]	Верхняя сторона платы
[Bottom]	Нижняя сторона платы
[PasteMaskBottom]	Графика маски пайки на нижней стороне платы
[SolderMaskBottom]	Графика вставки пайки на нижней стороне платы
[SilkBottom]	Графика корпусов компонентов на нижней стороне платы
[AssyDrwBottom]	Графика корпусов планарных компонентов на нижней стороне платы



[SMTAssyDrwBottom]	Графика выводов планарных компонентов на нижней стороне платы
[BoundaryBottom]	Габариты корпусов компонентов на нижней стороне платы
[BoardsOutline]	Физический контур печатной платы
[BoardsSigKeepin]	Область, где разрешено размещать проводники, компоненты, переходные отверстия и полигоны
[DrillSymbol]	Графика отверстий
[Ratsnest]	Логические соединения выводов компонентов
[DRC]	Информация о выявленных технологических нарушениях

Просмотр и редактирование характеристик слоев, ввод новых слоев выполняются по команде *Configure/Layers*. Часть слоев объединяются в пары, чтобы при переносе объектов с одной стороны платы на другую одновременно на соответствующие слои переносилась сопутствующая информация.

Программа PCBoards вызывается автономно или из управляющей оболочки Schematics по команде *Tools/Run PCBoards*. После запуска PCBoards активизируется окно редактора. В верхней части окна располагается строка меню, ниже — строка инструментов.

Конфигурация программы PCBoards устанавливается по команде *Tools/Options*. В меню этой команды задаются следующие параметры:

- Units of Measure — система единиц;
- Snap-to-pin Threshold — радиус области захвата при подсоединении трассы проводника к выводу компонента;
- Rotation Increment — угол поворота объекта против часовой стрелки при выполнении команды *Edit/Rotate*;
- Rubber banding — включение/выключение режима перемещения компонентов вместе с подсоединенными к ним проводниками;
- On-Line DRC — автоматическая проверка соблюдения допустимых между объектами зазоров;

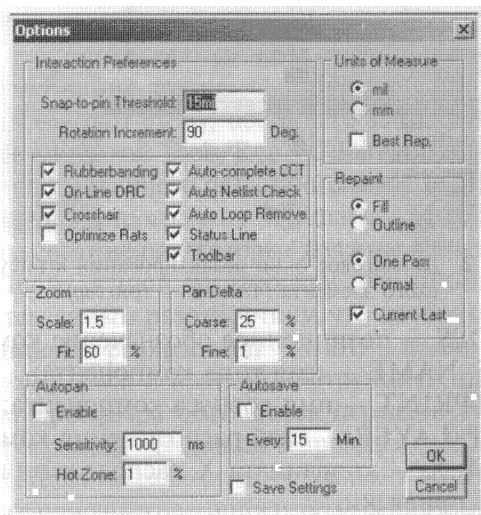


Рис. П.1. Окно задания параметров программы PCBoards

- Crosshair — изображение курсора в виде перекрестья на весь экран;
- Optimize Rats — автоматическое изменение расположения логических связей наилучшим образом при перемещении компонентов;
- Auto-complete CCT — автоматическое возвращение из программы автотрассировки SPECCTRA в PCBoards после завершения трассировки.

Следует отметить, что в составе системы DesignLab имеется программа автотрассировки соединений компонентов SPECCTRA, но проектировщик может и вручную выполнить прорисовку соединений в программе PCBoards.

На рис. П.1 представлено диалоговое окно для задания параметров программы PCBoards.

Набор параметров компонентов, проводников, полигонов и других объектов оформляется в виде их атрибутов. Атрибуты выбранного объекта просматриваются и редактируются по команде Edit/Attribute. Типовые значения атрибутов устанавливаются для всех однотипных объектов платы и затем могут индивидуально редактироваться. На рис. П.2 приведен пример диалогового окна редактирования атрибутов логического элемента, имеющих следующий смысл:

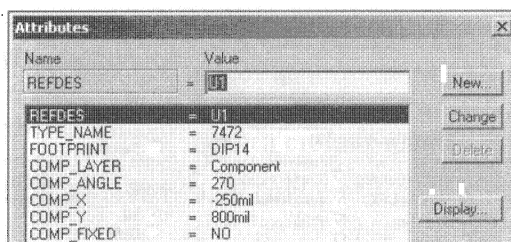


Рис. П.2. Диалоговое окно редактирования атрибутов логического элемента 7472 (JK — триггер)

REFDES — позиционное обозначение компонента;  
 TYPE\_NAME — имя типа компонента;  
 FOOTPRINT — имя корпуса компонента;  
 COMP\_LAYER — слой расположения компонента;  
 COMP\_X — координата X расположения на плате точки привязки;  
 COMP\_Y — координата Y расположения на плате точки привязки;  
 COMP\_FIXED — признак фиксации компонента на плате.

Существует несколько способов начать разработку печатной платы. Простейший состоит в создании списка соединений схемы и использовании конфигурации PCBoards по умолчанию. Список соединений создается автоматически в программе Schematics, после чего схему упаковывают и переносят в программу PCBoards. Далее вручную выполняют трассировку платы, наносят физические границы печатной платы и границы области разводки на слое сигналов, после чего приступают к созданию технической документации. Для более сложных плат необходимо вводить дополнительные слои и настраивать конфигурацию программы в соответствии с особенностями платы.

### Пример разработки печатной платы делителя частоты

Воспользуемся схемой делителя частоты на JK-триггерах, представленной на рис. 4.22. Для создания списка соединений, который будет передан в программу PCBoards, не-



обходимо удалить источники сигналов и питающих напряжений, так как они являются искусственно введенными на этапе моделирования схемы. С помощью команды Tools/Package упаковывают схему, после чего запускают программу PCBoards командой Tools/Run PCBoards. На рис. П.3 показан фрагмент активного окна программы PCBoards после загрузки схемы из программы Schematics. Тонкими линиями показаны соединения, которые должны быть выполнены на плате. После ручной трассировки эти линии исчезают, показывая тем самым разработчику, что необходимое физическое соединение реализовано. Читатель может воспользоваться схемой p12.sch и краткой инструкцией, приведенной там же, для просмотра результатов передачи упакованной схемы из программы Schematics в программу PCBoards.

Далее необходимо разместить основные и вспомогательные компоненты с помощью операции перемещения (выделяя и буксируя с помощью мыши) и выполнить трассировку соединений

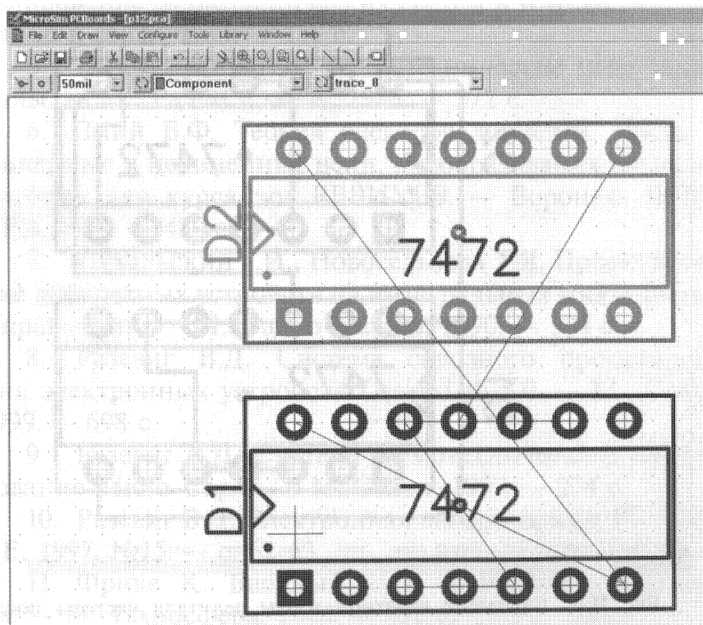


Рис. П.3. Фрагмент активного окна программы PCBoards после загрузки схемы из программы Schematics

с помощью команды Draw/Trace. В том случае, если трассы (физические соединения) пересекаются на слое, они помечаются крестом, сообщая проектировщику об ошибке. На рис. П.4 показан фрагмент печатной платы делителя частоты без вспомогательных компонентов после ручной трассировки.

Кроме того, проектировщик рисует на печатной плате соединения для ввода и вывода информационных и управляющих сигналов, питающего напряжения, вспомогательных элементов и т. д.

После выполнения этих операций осуществляется вывод печатных плат на принтер, плоттер или станки с ЦПУ. При этом проектировщик задает необходимые опции, такие как формат листа, уровень детализации выводимой информации, толщину линий и размер шрифта и т. д.

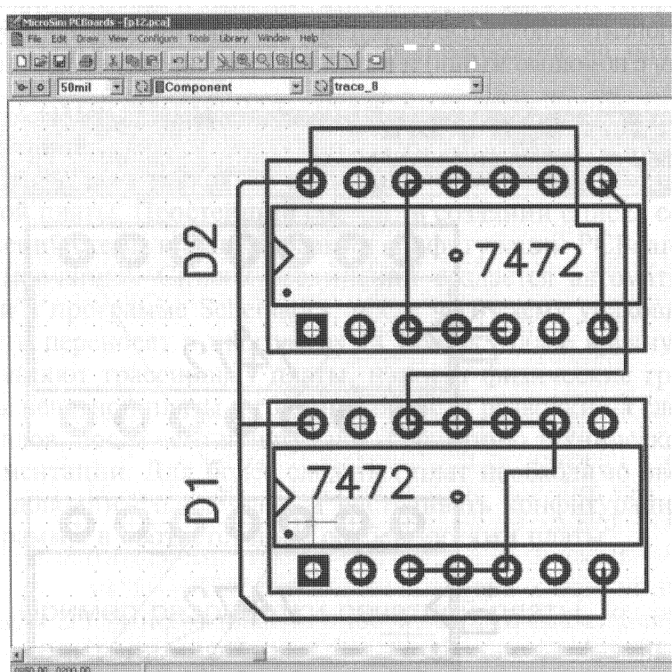


Рис. П.4. Фрагмент печатной платы делителя частоты после ручной трассировки

## ЛИТЕРАТУРА

1. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств. Под редакцией О.В. Алексеева. Учебное пособие для студентов вузов. — М.: Высшая школа, 2000. — 479 с.
2. Абрамов П.Б., Афанасьевский Л.Б., Горин А.Н., Фадин А.Г. Основы компьютерного проектирования и моделирования РЭС. Лабораторный практикум. Под редакцией проф. А.Г.Фадина. — Воронеж: ВИРЭ, 2002. — 268 с.
3. Антипенский Р.В. Моделирование преднамеренных помех сигналам с аналоговой модуляцией и широкополосным сигналам// Телекоммуникации, 2006. № 11, с. 45-48.
4. Борисов Ю.П., Цветнов В.В. Математическое моделирование радиотехнических систем и устройств. — М.: Радио и связь, 1985. — 176 с.
5. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. — М.: Радио и связь, 1986. — 372 с.
6. Змий Б.Ф. Теория электрорадиоцепей. Часть II. Линейные и нелинейные цепи, преобразования сигналов. Учебник для курсантов ВВВИУРЭ. — Воронеж: ВВВИУРЭ, 1990. — 420 с.
7. Пухальский Г.И., Новосельцева Т.Я. Проектирование дискретных устройств на интегральных микросхемах. Справочник. — М.: Радио и связь, 1990. — 304 с.
8. Разевиг В.Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0. — М.: Солон, 1999. — 698 с.
9. Разевиг В.Д. Система схемотехнического моделирования Micro-Cap V. — М.:Солон, 1997. — 274 с.
10. Разевиг В.Д. Электронная лаборатория// PC Week/RE, 1997, №15. — с. 62-63.
11. Фрике К. Вводный курс цифровой электроники. — М: Техносфера, 2003. — 432 с.
12. Richard C. Saffe. Random Signals for Engineers using MATLAB and Mathcad. — Springer — Verlag, 2000. — 376 p.

Заявки на книги присылайте по адресу:  
125319 Москва, а/я 594  
Издательство «Техносфера»  
**e-mail: knigi@technosfera.ru**  
**sales@technosfera.ru**  
факс: (495) 956 33 46

В заявке обязательно указывайте  
свой почтовый адрес!

Подробная информация о книгах на сайте  
**<http://www.technosfera.ru>**

**Антипенский Роман Валериевич**  
**Фадин Аркадий Георгиевич**

**Схемотехническое проектирование  
и моделирование радиоэлектронных устройств**

Компьютерная верстка – С.С. Бегунов  
Корректор – Е.М. Конова  
Дизайн книжных серий – С.Ю. Биричев  
Дизайн – И.А. Куколева  
Выпускающий редактор – М.В. Капранова  
Ответственный за выпуск – О.А. Казанцева

---

Формат 84 x 108/32. Печать офсетная.  
Гарнитура Ньютон  
Печ.л. 4. Тираж 2000 экз. Зак. № 1335  
Бумага офсет №1, плотность 65 г/м<sup>2</sup>.

---

Издательство «Техносфера»  
Москва, Лубянский пр-д, 27/1

---

Диапозитивы изготовлены ООО «Европолиграфик»

Отпечатано в ППП «Типография «Наука»  
Академиздатцентра «Наука» РАН  
121099 Москва, Шубинский пер., 6

# мир электроники

Р. АНТИПЕНСКИЙ, А. ФАДИН

## Схемотехническое проектирование и моделирование радиоэлектронных устройств

АНТИПЕНСКИЙ РОМАН ВАЛЕРИЕВИЧ –  
К.Т.Н., ДОЦЕНТ – ЗАМ.НАЧ. КАФЕДРЫ  
"РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ" ВОРОНЕЖСКОГО  
ВВАИУ (ВОЕННОГО ИНСТИТУТА),  
АВТОР 52 НАУЧНЫХ ТРУДОВ.  
ФАДИН АРКАДИЙ ГЕОРГИЕВИЧ –  
К.Т.Н., ПРОФЕССОР КАФЕДРЫ  
"АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ" ВОРОНЕЖСКОГО ВВАИУ  
(ВОЕННОГО ИНСТИТУТА), АВТОР  
И СОАВТОР 15 УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИХ  
И 70 НАУЧНЫХ ТРУДОВ

ОСНОВНОЙ  
ПРОЦЕСС  
ИМ  
В П

интернет-магазин

**OZON.ru**



13207024



ТЕХНОСФЕРА

ISBN 978-5-94836-133-7



9 785948 361307 >