



*Томский межвузовский центр
дистанционного образования*

Д.А. Рождественский

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ И СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ

Часть 2

Учебное пособие

ТОМСК – 2004

Министерство образования и науки Российской Федерации

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

**Кафедра компьютерных систем в управлении
и проектировании (КСУП)**

Д.А. Рождественский

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ И СРЕДСТВ УПРАВЛЕНИЯ

Часть 2

Учебное пособие

2004

Корректор: Осипова Е.А.

Рождественский Д.А.

Автоматизация проектирования систем и средств управления:
Учебное пособие. В 2-х частях. – Томск: Томский межвузовский
центр дистанционного образования, 2004. – Ч.2. – 131 с.

© Рождественский Д.А., 2004
© Томский межвузовский центр
дистанционного образования, 2004

СОДЕРЖАНИЕ

10 ПОДКЛАСС САПР – СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ (САПР ПП)	5
10.1 Введение в САПР ПП	5
10.2 Этапы создания печатной платы	7
10.3 Детализация функций основных этапов технологического проектирования изделия (платы) в САПР ПП	12
10.4 Состав программ САПР ПП.....	19
10.5 САПР ПП и производство печатных плат.....	26
10.6 Установка радиоэлементов	32
10.7 Пайка	33
10.8 Сокращение и определение в САПР ПП	33
10.9 Фирмы-изготовители САПР ПП и САМ-систем для САПР ПП.....	35
11 ПОДКЛАСС САПР – СИСТЕМЫ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ (САПР СМ)	40
11.1 Моделирование на этапах жизненного цикла изделия	43
11.2 Структура и отличительные черты современных САПР СМ.....	47
11.3 Язык описания аппаратуры VHDL.....	52
12 ПОДКЛАСС САПР – СИСТЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ (САПР ММ)	60
12.1 Введение в системы математического моделирования.....	60
12.2 Структура программ математического моделирования.....	60
12.3 Графический интерфейс программ математического моделирования.....	61
12.4 Краткий обзор программ САПР ММ	62
13 ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И КРИТЕРИИ РАЗВИТИЯ САПР	64
13.1 Критерии развития САПР	64
13.2 Направления развития САПР	66
13.3 Критерии выбора САПР	68
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ОБЗОР СИСТЕМ САПР ПП	71
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ОБЗОР СИСТЕМ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ САПР СМ	100
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ОБЗОР СИСТЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ MATLAB	117

10 ПОДКЛАСС САПР – СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ (САПР ПП)

10.1 Введение в САПР ПП

Внедрение в инженерную практику методов автоматизации проектирования позволяет перейти от традиционного макетирования разрабатываемой аппаратуры к ее моделированию с помощью персональных компьютеров (ПК).

И более того, с помощью ПК возможно осуществить полный цикл проектирования печатных плат (так называемый цикл сквозного проектирования). С помощью данных программ, называемых «Системы автоматизированного проектирования печатных плат (САПР ПП)», осуществляют:

- синтез структуры и функциональной схемы устройства – графический ввод схем, создание принципиальной схемы;
- контроль ошибок в схеме, анализ ее характеристик в различных режимах с учетом разброса параметров компонентов и наличия дестабилизирующих факторов;
- синтез топологии – упаковку схемы на печатную плату, ручное и/или автоматическое размещение элементов на плате;
- ручную, интерактивную и/или автоматическую трассировку проводников (межэлементных соединений);
- контроль ошибок на печатной плате, параметрическую оптимизацию и верификацию топологии;
- выпуск конструкторской документации.

В основном, проект в САПР ПП представляется в двух видах: в виде схемы электрической принципиальной и в виде печатной платы.

В соответствии с этим в САПР ПП имеются два графических редактора:

- схемный редактор, обеспечивающий создание принципиальной схемы;
- технологический редактор, предназначенный для редактирования топологии печатной платы.

В начале разработки платы используется схемный редактор, в нем производится схемотехническое моделирование и в результате создается принципиальная схема платы.

Схемный редактор использует схемную (символьную) библиотеку, состоящую из условных обозначений для схемы принципиальной электрической. Данные элементы именуются символами.

Символы несут следующую информацию об элементе:

- его функциональную схему;
- номера контактов в соответствии с данной схемой;
- электрические характеристики элемента (пример: цифровой элемент (DD), аналоговый (DA)) и каждого его контакта (пример: цепь питания (Power), цифровой ввод (DI), цифровой вывод (DO)).

Основной причиной ошибок в печатных платах является недостаточный контроль принципиальной схемы. Поэтому в любом схемном редакторе присутствуют средства для оптимизации и верификации (проверки) созданной схемы. Проверка производится на основе библиотечных данных об элементах и их соединениях на схеме. К сожалению, автоматизации поддается лишь контроль простых синтаксических ошибок (цепи, присоединенные только к одному выводу или вовсе не имеющие узлов, неподключенные выводы, различные электрические ошибки и т.д.).

После завершения схемотехнического моделирования из схемного редактора переходим в технологический редактор, где на базе созданной принципиальной схемы разрабатывается топология печатной платы. В технологическом редакторе осуществляется размещение элементов на ПП и трассировка соединений.

Технологический редактор использует технологическую библиотеку, определяющую «посадочные места» элементов для их установки на печатную плату. Это информация о расположении и размерах контактов элемента, которые соответствуют номерам контактов из схемной библиотеки, общие габаритные размеры элемента (ширина и длина) для их расстановки на плате.

Также в технологическом редакторе проводится верификация топологии платы. Она необходима для контроля соблюдения

технологических норм, проверки на соответствие созданной топологии исходной принципиальной схеме.

10.2 Этапы создания печатной платы

Весь цикл работ, выполняемых САПР ПП при создании печатной платы, можно разделить на 5 этапов:

- 1) этап создания принципиальной схемы;
- 2) этап перехода от схемного к технологическому представлению изделия;
- 3) этап размещения элементов на печатной плате;
- 4) этап создания топологии печатной платы (разводка);
- 5) этап подготовки производства печатной платы.

1. Этап создания принципиальной схемы.

Данный этап относится к фазе функционального (схемотехнического) проектирования и для технического и конструкторского проектирования, необходим для создания документа «схема электрическая принципиальная»: описание состава элементов и задания электрических связей между контактами этих элементов.

Формально создание принципиальной схемы не является обязательным этапом, поскольку существует несколько способов описания принципиальной схемы. Кроме случаев получения такого описания из других САПР на этапе функционального (схемотехнического) проектирования, возможно текстовое описание электрических связей проекта, которое выполняется при помощи специального языка описания принципиальной схемы (более подробное описание одного из этих языков VHDL в пункте данного пособия).

Этап заканчивается созданием списка соединений схемы, так называемый файл netlist.

2. Этап перехода от схемного к технологическому представлению изделия.

Данный этап является одним из наиболее важных. Здесь происходит замена базиса библиотечных элементов. Схемные библиотечные элементы заменяются на технологические библио-

течные элементы. Необходимо отметить, что библиотечные элементы, используемые при создании ПП, содержат как графическое описание, так и упаковочную информацию. Упаковочная информация представляет собой текстовое описание контактов и взаимные ссылки на нумерацию контактов в символах схемной библиотеки и посадочных местах технологической библиотеки. Любая ошибка на данном этапе приведет к большим сложностям в дальнейшем, вплоть до проведения всего проектирования заново.

3. Этап размещения элементов на печатной плате.

Этап размещения выполняется либо в автоматическом, либо в полуавтоматическом режиме. На данном этапе последовательно производятся работы:

- создание заготовки печатной платы. Включает в себя создание контура печатной платы, в котором будет производиться расстановка элементов. Следует помнить, что если вы собираетесь использовать автоматическую трассировку, то контур печатной платы должен представлять собой замкнутую линию. А также задание областей запрета для размещения элементов – необходимо в случае присутствия в заданном контуре платы сторонних деталей (винтов, крепежей и т.д.);
- расстановка элементов – качество размещения оценивается по интегральному критерию оценки, учитывающему общую длину электрических связей на печатной плате. Чем меньше длина связей, тем лучше и качественней будет проведен следующий этап разводки;
- проверка размещения элементов – выполняется автоматическая проверка на соблюдение заданных пользователем минимально-допустимых расстояний между соседними корпусами элементов.

4. Этап создания топологии печатной платы.

Данный этап, именуемый иначе как «разводка платы», – так же как и предыдущий этап, может выполняться посредством автоматической трассировки соединений и/или при помощи интерактивной (полуавтоматической) прокладки трасс.

Для автоматической трассировки необходимо создать файл стратегии. Файл стратегии – это совокупность настроечных па-

раметров автотрассировки, включая тип автотрассировщика и другие необходимые данные для трассировки печатной платы.

Существует два типа автотрассировщиков по типу используемого алгоритма трассировки:

А) Первый тип алгоритма называется «последовательная трассировка» – автотрассировщики данного типа разводят плату, последовательно прорисовывая по одной связи. Пользователь может задать порядок трассировки связей, например, начать со связей минимальной длины или начать с трассировки «земляных» проводников и т.д. Пример автотрассировщика данного типа – это PCAD 4.5.

Б) Второй тип алгоритма называется «трассировка с устранением конфликтов» – автотрассировщики данного типа на первом этапе производят прорисовку абсолютно всех проводников без обращения внимания на возможные конфликты, заключающиеся в пересечении проводников на одном слое и нарушении зазоров. Далее автотрассировщик производит устранение возникших конфликтов – разрывая и прокладывая вновь связи, раздвигая проводники и т.д. Пример автотрассировщика данного типа – это Specstra.

На данное время не доказано какой тип автотрассировщиков лучше, но на практике получено, что если плата не разводится в одном типе автотрассировщиков, то она разведется в другом типе.

В результате выполнения этапа получают исходные данные по конфигурации проводников, которые дальше используются на этапе подготовке производства.

5. Этап подготовки производства.

Данный этап включает в себя три типа работ:

А) Электрический и технологический контроль печатной платы. Выполняется контроль за идентичностью электрических соединений на схеме электрической принципиальной и на печатной плате, а также возможные внесения исправлений в готовый проект как со стороны схемы электрической принципиальной, так и со стороны печатной платы. Производится расчет электрических характеристик схемы с учетом паразитных параметров, присущих конкретной конструкции. В результате внесенные изменения должны быть учтены в проекте.

Б) Формирование управляющих программ для станков с ЧПУ: фото-координатографов и сверлильных станков. Для фото-координатографа генерируется файл «фотошаблон», содержащий рисунки всех используемых слоев печатной платы. Для сверлильного станка формируется файл «сверловки», содержащий координаты и диаметры отверстий на плате.

В) Оформление выходной документации на изделие (платы):

- Электрическая принципиальная схема устройства.
- Техническое задание на разработку платы.
- Чертеж топологии печатной платы.
- Схема расположения элементов на поверхности платы.
- Внешний вид изделия (платы) с двух сторон.
- Маршрутная карта, которая отражает последовательность производства платы, список используемого оборудования и материалов и т.д.

Примечание. Наиболее успешно в САПР ПП разрабатываются печатные платы цифровых устройств, где вмешательство человека в процесс синтеза топологии сравнительно невелико. Разработка аналоговых устройств требует гораздо большего участия человека в процессе проектирования, коррекции и, при необходимости, в частичной переделке результатов автоматизированного проектирования. Основная сложность при разработке аналоговой аппаратуры заключается в автоматизации синтеза топологии и обеспечении взаимодействия программ моделирования схем и синтеза топологии. Кроме того, достаточно сложно формализовать многочисленные дополнительные требования к аналоговым устройствам, например, требование электромагнитной совместимости компонентов и др.

Выделяют два типа проверки платы: параметрическая и временная верификация. Термин «**верификация**» означает установление работоспособности.

Параметрическая верификация – это процедура установления работоспособности устройства с учётом всех его схемотехнических и конструкторских параметров. Она сводится к модели-

рованию на ЭВМ конструкции устройства и исследованию всех режимов его работы.

Особенность процедуры верификации здесь заключается в модели, которая исследуется. Используется КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ, которая включает в себя:

- модель конструкции изделия;
- модель электрической схемы.

Построение полной электродинамической модели конструкции изделия представляет весьма сложную задачу. Поэтому в ряде случаев ограничиваются только моделью схемы, которая используется на этапе автоматизированного схемотехнического проектирования. При этом абстрагируются от физической конструкторской реализации этой схемы, что вносит определенные погрешности в результаты выполнения этапа параметрической верификации.

Следует иметь в виду, что чем выше частотный диапазон сигналов, обрабатываемых проектируемым устройством, тем важнее иметь его адекватную модель конструкции.

Ввиду сложности полной комплексной модели для ряда задач применяют упрощённый подход к параметрической верификации. В частности для цифровых схем применяют временную верификацию как частный случай параметрической верификации.

Временная верификация – является частным случаем параметрической верификации. Она применима к цифровым системам.

Целью временной верификации является установление временных соотношений в системе между событиями срабатывания микросхем. При проектировании цифровых систем составляются временные диаграммы, которые жёстко связаны с осью времени. На этой оси фиксируются «события срабатывания» ИМС. Вся логика работы любого цифрового устройства жёстко и однозначно увязана с временными диаграммами. При этом все интервалы времени также очень точно определены.

Временная верификация, которая оперирует точными моделями линий и микросхем, позволяет оценить с повышенной точностью все временные соотношения в системе.

10.3 Детализация функций основных этапов технологического проектирования изделия (платы) в САПР ПП

1. Этап компоновки.

Задачи компоновки – это задачи разделения устройства на отдельные части (блоки, печатные платы) с учетом заданных критериев:

- Минимум межблочных соединений (соединение между платами) или внешних выводов блоков.
- Выделение типовых блоков для минимизации числа типов используемых модулей.
- Электрическая, магнитная и тепловая совместимость элементов.
- Минимизация числа неиспользуемых элементов в модуле.

Компоновка актуальна в основном для сложных изделий.

В задачах компоновки, кроме конструктивных характеристики модулей, существенны и их функциональные характеристики. Они возникают на этапе перехода от функциональных или логических схем к электрическим принципиальным схемам, учитывающим заданную систему элементов, и сводятся в назначении элементов логической схемы в типовые модули из заданного набора.

Алгоритмы компоновки делятся на два класса:

1) последовательные – на каждом шаге данного алгоритма поочередно добавляется по одному новому элементу, выбираемому из списка по определенному приоритету;

2) параллельно-последовательные – сначала выделяется некоторое исходное множество групп элементов, которое затем распределяется по частям с учетом заданных критериев и ограничений на компоновку. Обычно его используют при решении задач компоновки со специальными требованиями (например, минимизация числа однотипных блоков).

Следует помнить, что сокращение номенклатуры используемых частей позволяет уменьшить затраты на проектирование.

2. Этап размещения элементов на плате.

После распределения конструктивных элементов устройства по печатным платам различного уровня и иерархии, для каждой полученной в результате компоновки единицы (платы) производят размещение включенных в его состав элементов, т.е. выбирают такое их взаимное расположение, при котором наилучшим образом учитываются предъявленные к аппаратуре требования.

В общем виде задача размещения состоит в следующем: необходимо разместить набор фиксированных элементов на заданной площади с учетом критериев размещения:

- Критерий равномерности размещения элементов на плате, с точки зрения обеспечения равномерной плотности сигнальных соединений на различных участках платы.
- Минимум средней длины сигнальных соединений.
- Минимум суммарной длины сигнальных соединений.
- Совместимость элементов с точки зрения допустимых показателей под тепловыделение на различных участках платы.
- Совместимость взаимного расположения элементов с точки зрения минимизации электромагнитных наводок.
- Оптимальное (рациональное) размещение внешних выводов элементов.
- Равномерность размещения элементов по полю конструктивна.

Исходной информацией при решении задач размещения являются:

- данные о конфигурации и размерах коммутационного пространства, определяемые требованиями установки и крепления данной сборочной единицы в аппаратуре;
- количество и геометрические размеры конструктивных элементов, подлежащих размещению;
- ряд ограничений на взаимное расположение отдельных элементов, учитывающих особенности разрабатываемой конструкции.

Задача сводится к отысканию для каждого размещаемого элемента таких позиций, при которых оптимизируется выбранный показатель качества и обеспечиваются наиболее благоприятные условия для последующего электрического монтажа.

Качество размещения оценивается по критериям:

- 1) минимум суммарной взвешенной длины соединений;
- 2) минимум числа соединений, длина которых больше заданных;
- 3) минимум числа пересечений проводников;
- 4) максимальное число соединений между элементами, находящимися в соседних позициях, либо в позициях, указанных разработчиком;
- 5) максимум числа цепей простой конфигурации.

Наибольшее распространение в алгоритмах размещения получил первый критерий. Это объясняется следующими причинами: уменьшение длин соединений улучшает электрические соединения устройства, упрощает трассировку печатных проводников и снижает трудоемкость изготовления.

Перед разбиением поверхности коммутационной платы на позиции выделяют области для размещения выводных контактных зон схемы, а также запрещенные области, в которых не должны размещаться элементы схемы.

Все конструктивные элементы, подлежащие размещению, можно условно разделить на три группы:

- 1) нефиксированные элементы, местоположение которых на плате заранее не известно;
- 2) граничные элементы, к которым относятся элементы, связанные с разъемами, осуществляющие электрическую связь с элементами, расположенными на других коммутационных платах. Т.к. разъемы обычно помещают на внешней стороне коммутационной платы, то эти элементы желательно располагать у границы коммутационного поля;
- 3) фиксированные элементы, местоположение которых заранее известно (указано разработчиком).

3. Этап трассировки платы (создание топологии).

Исходные данные для трассировки определяются при составлении исходного задания на проектирование и дополняются после выполнения операций компоновки и размещения. В итоге входная информация для трассировки представляется двумя

компонентами: списком трассируемых контактов и моделью представления поля печатной платы.

Ограничения при трассировке связаны с возможностью и невозможностью проведения трасс (проводников), наличием на поверхности печатных плат (коммутационных полей) запрещённых для прокладки проводников участков поля, возможностью или невозможностью изготовления двусторонних и многослойных печатных плат и т.п.

Содержание задачи трассировки заключается в получении конфигурации трасс межсоединений, которые в дальнейшем будут реализованы в виде печатного или проводного монтажа.

Решение задачи трассировки соединений предполагает предварительное выполнение следующих основных этапов:

1. Определение списка всех проводников, которые должны быть проложены между парами различных контактов.
2. Распределение проводников по слоям.
3. Определение последовательности трассировки проводников в каждом слое (назначение парных соединений в каналы при канальной трассировке).
4. Собственно трассировка проводников

В качестве целевой функции (критерии качества) в алгоритмах трассировки используют:

1. Минимальную суммарную длину всех проводников (сигнальных соединений), полученных в результате трассировки. При проектировании аппаратуры, работающей на повышенных частотах (повышенного быстродействия), данный критерий следует использовать с осторожностью.
2. Минимальная длина самого длинного проводника. Это так называемый «минимаксный» критерий. При использовании этого критерия на каждом шаге трассировки выбирается самый длинный проводник и минимизируется его длина.
3. Минимальное количество слоев соединений.
4. Минимальное количество межслойных переходов.
5. Минимальное количество отдельных фрагментов соединений в целях связи элементов – проводник должен иметь по

возможности простейшую конфигурацию – в идеале представлять собой отрезок прямой линии.

6. Минимальное количество взаимных пересечений сигнальных соединений.

Все алгоритмы трассировки соединений можно разделить на три основные группы:

1. Волновые и его модификации.
2. Канальные.
3. Эвристические.

1. Волновые алгоритмы трассировки и его модификации.

Среди множества алгоритмов трассировки электрических соединений наиболее распространенным является волновой алгоритм (алгоритм Ли). Данные алгоритмы сканируют все поле трассировки при проведении каждого отдельного проводника, со всей совокупностью конструктивных ограничений.

Эти алгоритмы всегда гарантируют построение трассы, если путь для нее в принципе существует. Они выдают высокое качество решений, но менее быстродействующие.

Данный алгоритм обладает высокой степенью общности, прост в реализации и имеет широкий спектр применимости для трассировки двухслойных, многослойных печатных плат, БИС и т.д. Основан на «просмотре» возможных вариантов решений и выборе из них одного, удовлетворяющего требованиям поставленной задачи.

Решение задачи с использованием волнового алгоритма предполагает два этапа: на первом осуществляется поиск возможных решений – распространение волны, на втором выбирается решение, удовлетворяющее условиям поставленной задачи – построение обратного следа.

2. Канальные методы.

Основной единицей модели поля при канальной трассировке является канал, представляющий множество свободных для трассировки вертикальных и горизонтальных каналов-магистралей, расположенных между рядами запрещенных для трасси-

ровки зон. Соединения между соседними каналами осуществляются через так называемые проходные блоки или через внешнюю область монтажа.

Канальные методы трассировки определяют одно из самостоятельных направлений решения задач топологического синтеза. Эти методы имеют определенные преимущества перед другими (к примеру, они в 75–100 раз быстрее волновых), но им присущи также и недостатки.

Процесс канальной трассировки обычно разделяют на несколько этапов.

А) Создание канала.

На этом шаге элементы уже размещены, и интервалы между ними достаточны для проведения любых проводников питания и заземления, которые должны находиться в этих интервалах, и содержат некоторое пространство для проводников других цепей.

Нам не нужно особенно заботиться о ширине интервалов, поскольку, если нам не удастся найти разводку сетей в выделенном пространстве, мы сделаем очередную попытку с лучшим пониманием того, какой величины должен быть каждый интервал в действительности.

Мы должны разделить все пустое пространство вокруг элементов на каналы, которые определим как условные прямоугольники пустого пространства. Основная цель здесь состоит в том, чтобы выполнить разделение как можно проще; «простота» формально определена тем условием, чтобы общая длина ребер, разделяющих прямоугольники каналов, была минимальна.

Б) Глобальная трассировка.

Следующей задачей является глобальная трассировка цепей, иначе говоря, выбор для каждой цепи дерева каналов, которые она должна занять. Здесь возможно использование алгоритмов нахождения кратчайшего пути. Наши пути будут проходить по точкам середин границ каналов, начинаясь и заканчиваясь на выводах одной и той же цепи.

В) Упорядочивание пересечений между каналами.

На данном этапе происходит выбор точек, в которых проводники пересекают стены между каналами, отдавая приоритет выбору положения проводников внутри каналов.

Г) Трассировка соединений в каналах.

Выбрав позиции для всех точек пересечения стены, мы можем проложить трассы проводников внутри каждого канала отдельно, то, что мы делаем в одном канале, не повлияет на другой. Более того, больше не нужно разделять точки на границах канала на точки выводов элементов и точки пересечений стены. Конечно, поскольку ширина каналов первоначально выбиралась условно, нет гарантии, что можно выполнить требуемую трассировку данного канала даже самым умным и исчерпывающим алгоритмом. В этом нет ничего ужасного, поскольку, когда даже один канал не может быть обработан, последует увеличение каналов и почти весь процесс разводки начинается сначала.

Наиболее известным методом канальной трассировки является метод Стволов и Ветвей. Он имеет одно ограничение, состоящее в том, что каждой группе соединительных проводников соответствует одна горизонтальная трасса (Ствол), и поэтому определив, какую горизонтальную дорожку следует использовать в данном случае, задачу трассировки вертикальных проводников (Ветвей) можно решить автоматически.

3. Эвристические алгоритмы трассировки.

В основе этих алгоритмов, как правило, лежит некий эвристический прием, который должен приводить к удовлетворительному результату.

Наибольшее распространение получили методы, основанные на оценке длины проводников.

Существуют две их разновидности:

1. Соединение проводников в порядке возрастания длины отдельных проводников (в качестве оценки длины принимается кратчайшее расстояние между соединяемыми контактами). Этот метод основан на том соображении, что короткие проводники вносят меньше конфликтных ситуаций.

2. Соединение проводников в порядке убывания длины проводников, так как длинные проводники труднее трассировать.

С точки зрения минимальной суммарной длины соединений оба подхода дают примерно одинаковые результаты.

Другие методы упорядочения связаны с учетом степени влияния проводников друг на друга по площади перекрытия минимальных прямоугольников, с учетом числа контактов, попадающих в минимальный прямоугольник, или с другими критериями.

Эти алгоритмы очень быстродействующие, но не гарантируют 100% трассировку платы.

10.4 Состав программ САПР ПП

Все вышеперечисленные этапы создания печатной платы выполняются в специальных программах, из которых и состоит САПР ПП:

- Схемотехнический редактор.
- Менеджер библиотек.
- Отладчик принципиальных схем.
- Технологический редактор печатных плат.

Схемотехнический редактор

Типовой схемотехнический графический редактор (система создания принципиальных электрических схем) предназначен для проектирования интегральных схем; разработки схем для комплекта печатных плат, содержащих аналоговые и цифровые блоки; создания блок-схем и т.д.

Схемотехнический редактор – мощное и удобное средство:

- графическое, плоское и иерархическое представление проекта схемы в редакторе;
- определяемый пользователем неограниченный список параметров для компонентов, цепей, пинов и названий блоков;
- графика и список цепей в EDIF-формате;
- поддержка форматов и интерфейсы для описания на языках HDL/VHDL/Verilog и программ моделирования;

- мощные инструменты запроса для поиска компоненты, в качестве критерия поиска можно использовать любую комбинацию значений параметров;
- тесная двунаправленная интеграция с технологическим редактором – гарантирует соответствие между схемой и топологией ПП при изменении обозначения или величин параметров компонента, а также при любой перестановке его секции или пина;
- обеспечивает многостраничный структурированный режим ввода схемы, поддержанный интеллектуальным графическим интерфейсом, включающим исчерпывающий набор команд редактирования и установки параметров, определяемых пользователем,
- поддерживает неограниченное число вводимых компонентов, связей, различных атрибутов для задания параметров схемы;
- позволяет использовать русифицированные шрифты True Type, поддерживаемые WINDOWS, а также осуществлять операции переноса частей проекта между различными приложениями WINDOWS, что упрощает оформление технической документации;
- обеспечивает первичную проверку схемы с учетом критериев, определяемых пользователем.

Схемотехнический графический редактор имеет механизм электрического контроля (electric rule check) схемы – проверка правил создания схемы электрической принципиальной, связанных: с проверкой цепей, имеющих менее двух контактов; с проверкой правильности формирования шин (цепь в шину входит, но не выходит); с контролем за правилами соединения в одну компоненту связанности различных типов контактов (например, в одной цепи не могут быть соединены одни выходные или одни входные контакты) и др.

Менеджер библиотек

В современных САПР ПП создание библиотечных элементов производится в отдельной программе, именуемой менеджер библиотек. Краткое назначение – создание упаковочной информации и

графического образа элемента: для схемного редактора – символа, а для технологического редактора – посадочного места.

Библиотечный элемент графического редактора – это графическая информация, созданная графическим редактором в специальном режиме формирования библиотечных элементов, записанная в отдельный файл или помещенная в библиотеку элементов и предназначенная для последующего дублирования (многократной вставки) в проект.

Библиотечный элемент характеризуется точкой привязки и системой атрибутов. Библиотечный элемент содержит описание графической и упаковочной информации. Упаковочная информация элемента представляет собой текстовое описание контактов и взаимные ссылки на нумерацию контактов в символах схемной библиотеки и посадочных местах технологической библиотеки.

Различают простые библиотечные элементы и иерархические модули.

Простой библиотечный элемент представляет элементарную графическую информацию, созданную из графических примитивов: контактов, отрезков прямых, дуг окружности, прямоугольников, текста, атрибутов и т.п. Простые библиотечные элементы, как правило, помещаются в библиотеки элементов. Из простых библиотечных элементов, как из «кирпичиков», строится проект.

Иерархический элемент (модуль) кроме графических примитивов содержит простые библиотечные элементы и электрические цепи. Иерархический элемент, содержащий другие иерархические элементы, называют сложным иерархическим элементом.

В зависимости от типа графического редактора различают схемные и технологические библиотечные элементы. Схемные библиотечные элементы (символы) предназначены для формирования схемы принципиальной электрической. Технологические библиотечные элементы представляют собой графические изображения посадочных мест для размещения радиоэлементов на печатной плате.

Менеджер библиотек осуществляет:

- создание схемного (символьного) образа элемента;
- создание посадочного места для радиоэлемента на печатной плате (причем правила создания посадочных мест для эле-

ментов со штыревыми и планарными контактами отличаются друг от друга);

- создание взаимосвязи между схемными и технологическими библиотечными элементами;
- внесение библиотечных элементов в библиотеки;
- создание контактных площадок.

Существует два варианта нового библиотечного элемента:

1. Можно честно рисовать элемент от начала до конца и описать всю упаковочную информацию (вид корпуса, электрический тип вывода и т.д.).

2. Можно немного изменить графическое представление и упаковочную информацию уже существующего (похожего) библиотечного элемента.

Проектировщик в каждом конкретном случае сам выбирает наиболее оптимальный способ.

Отладчик принципиальных схем

Для устранения ошибок на стадии проектирования электронных схем в САПР ПП необходим отладчик – средство расчета и моделирования созданных в схемотехнических редакторах схем электрических устройств.

Данный класс программ обеспечивает полнофункциональное моделирование поведения сложных электронных устройств (проектирование высокочастотных систем, разработка устройств малой мощности на базе интегральных схем со сложными внутренними моделями).

Программа позволяет моделировать поведение любой комбинации аналоговых и цифровых устройств, имеющих сигналы разных форм и величины. Благодаря взаимоувязанным встроенным алгоритмам аналогового и цифрового моделирования с циклической обратной связью программа автоматически распознаёт и обрабатывает аналого-цифровые и цифро-аналоговые интерфейсы.

Отладчик принципиальных схем – это:

- полуавтоматическое описание компонентов устройств на основе данных производителя и просмотр списка подключенных

библиотек математических моделей, содержащих более 16 тысяч аналоговых и аналого-цифровых устройств;

- полная совместимость со схемотехническим редактором, что позволяет проводить всестороннее функциональное тестирование введенного с его помощью проекта, аналитическое задание и графическое редактирование входных воздействий;
- контроль значений параметров непосредственно на схеме и их вывод в отдельный текстовый файл;
- просмотр графиков результатов моделирования;
- выполнение расчетов режима по постоянному току и чувствительности схемы к разбросу параметров компонентов;
- проверка работоспособности схемы при наихудшей комбинации отклонений от номинала;
- работа совместно с популярными пакетами разработки CPLD и FPGA микросхем, производимых фирмами XILINX, AMD, Altera, Actel, Lattice, QuickLogic, Lucent, Vantis;
- поддержка основных промышленных стандартов описания программируемой логики, путем использования универсальных форм описания типов сигналов и компоновки элементов на языке VHDL;
- интерактивный пошаговый и программный режим отладки с заданными точками останова и учетом реальных временных задержек между узлами схемы.

Технологический редактор печатных плат

Данные программы предназначены для проектирования топологии печатных плат, имеют интерфейс ввода информации из графических редакторов, двусторонние связи с другими программами, предлагают средства просмотра печатной платы, размещения компонентов на плате, различные возможности автоматической трассировки цепей.

Решаемые задачи:

- размещение элементов схемы на печатной плате;
- соблюдение всех технологических требований к высоте выводов элементов и зонам их монтажа, к установочным отверстиям, проводникам на печатной плате и другим ее элементам;

- трассировка электрических связей в соответствии со схемой, устранение их взаимовлияния и обеспечение надежности;
- Технологический редактор – это:
- Совместное или индивидуальное размещение компонентов.
 - Автоматическое размещение компонентов внутри области, определяемой пользователем.
 - Автоматическая и интерактивная перестановка логически эквивалентных отпечатков корпусов, секций и пинов компонента.
 - Выбор альтернативного типа корпуса.
 - Автоматическая и интерактивная проверка правил проектирования.
 - Контроль высоты компонента и ограничений на его размещение.
 - Отчет о размещенных и не размещенных компонентах.
 - Поддержка неограниченного числа слоев.
 - Трассировка с применением современных механизмов проталкивания проводников и огибания препятствий по бесспорной технологии.
 - Автоматическое определение размеров (линейный, значение величины, угловой, радиальный, диаметральный, фаска) с соблюдением промышленных стандартов (ANSI, ISO, BSI, JIS, AFNOR, DIN).
 - Автоматическая проверка технологических допусков.
 - Наличие интерфейса с механическими САПР (AutoCAD, Autodesk Inventor, CATIA, Pro/Engineer, SDRC, Solid Edge).
 - САМ-интерфейс с системами для работы с фотоплоттерами.

Структура слоев технологического редактора

СЛОЙ РЕДАКТОРА – это выделенная часть информации графического редактора, отображаемая одним цветом и характеризующаяся состоянием.

Различают четыре типа состояния слоя редактора:

1. *Выключенный слой* – не отображается на экране дисплея и не подлежит редактированию, хотя при этом графическая ин-

формация, принадлежащая данному слою, сохраняется и станет видимой при включении слоя.

2. *Видимый (или включенный) слой* – отображается на экране дисплея, но графическая информация, принадлежащая слою, не подлежит редактированию.

3. *Доступный слой* – отображается на экране графического редактора, а информация, принадлежащая данному слою, доступна для редактирования (выделения, перемещения, поворота, зеркализации, удаления или видоизменения).

4. *Активный слой* – им может быть только один из доступных слоев графического редактора. В активном слое происходит рисование новых графических примитивов (для команд рисования) либо в первую очередь происходит выделение графических объектов (для команд выделения). Для некоторых команд графического редактора активным может стать только специальный вид слоя (среди доступных слоев). Например, только сигнальный слой графического редактора может быть активным для команд прокладки или редактирования трасс электрических соединений на печатной плате.

Основными группами слоев технологического редактора являются верхние слои (Top) и нижние слои (Bottom). Для каждой группы имеется слой нанесения надписей (Assay), слой шелкографии (Silk), слой маскирования (Mask) и слой нанесения припоя (Paste). Отдельно отстоит слой Board, в котором рисуется контур печатной платы. Слои характеризуются номером, цветом и состоянием.

Слои технологического редактора подразделяются на три группы:

1) **сигнальные слои** графического редактора (Top и Bottom) – это слои печатных проводников. Для этих слоев выполняются дополнительные настройки, касающиеся трассировки проводников. Сигнальные слои графического редактора (слои печатной платы или физические слои) представляют собой токопроводящий слой, отделенный от других слоев диэлектрическим материалом. Токопроводящий слой содержит печатные проводники, экраны и другие графические объекты, формирующие электрические соединения в данном слое. Электрические соединения между сигнальными слоями формируются при помощи переходных

отверстий. Физическому слою печатной платы кроме топологии сигнального слоя принадлежит графическая информация контактных площадок и переходных отверстий, находящаяся на данном уровне печатной платы. Другими словами, к физическому слою печатной платы относится вся графическая информация, помещаемая на фотошаблон для изготовления данного слоя печатной платы.

2) ***слой внутренней проводимости*** – это внутренний слой печатной платы, в котором формируются зоны проводимости, представляющие собой полигональную токопроводящую область. Контактные площадки или переходные отверстия могут <выходить> на эту область (т.е. электрически соединяться в одну цепь) или иметь диэлектрический зазор вокруг металлизации отверстия контактной площадки или переходного отверстия;

3) ***информационные (или несигнальные) слои*** печатной платы используются для нанесения пояснительных надписей и графической информации, которая выводится либо на графопостроитель, либо на фотокоординатограф для последующего нанесения на печатную плату способом шелкографии. Несигнальные слои определяют графическую информацию для утилит графического редактора (например, области запрета, сетки трассировки или размещения, технологического контроля);

4) ***информационные (или несигнальные) слои*** печатной платы используются для нанесения пояснительных надписей и графической информации, которая выводится либо на графопостроитель, либо на фотокоординатограф для последующего нанесения на печатную плату способом шелкографии.

10.5 САПР ПП и производство печатных плат

Печатная плата служит основанием для монтажа микросхем, бескорпусных радиоэлементов, радиодеталей и обеспечивает коммутацию всех элементов в соответствии с принципиальной схемой.

Разновидности печатных плат: печатные платы из стеклотекстолита (однослойные, двухслойные, многослойные); многослойные керамические платы; многослойные платы на основе по-

лиамидной пленки; металлические основания, покрытые специальным диэлектриком.

Однослойные и двухслойные печатные платы состоят из основания, на которое с одной стороны или с двух сторон наносятся печатные проводники. Основания плат должны обладать достаточной механической прочностью, малыми диэлектрическими потерями, высокой нагревостойкостью и хорошей адгезией материалов платы и печатных проводников. При изготовлении печатных плат используется стеклотекстолит, стеклоткань, пропитанная эпоксидной смолой или полиамидом.

Односторонние печатные платы (ОПП)

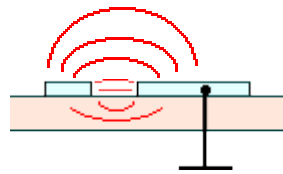


Рис. 5.1 – Односторонняя печатная плата

Недостатки формирования линии связи на односторонних печатных платах:

- Линия не экранирована, достаточно сильно излучает и, кроме того, чувствительна к внешним помехам.
- Практически сложно реализовать постоянство сечения линии по её длине, что соответствовало бы постоянству структуры поля.
- Недостаточно площади платы, чтобы сформировать линии связи для всех проводников.

В односторонних ПП не удастся сформировать качественные линии связи; их также не рекомендуется использовать для сверхбыстродействующих систем.

Двусторонние печатные платы

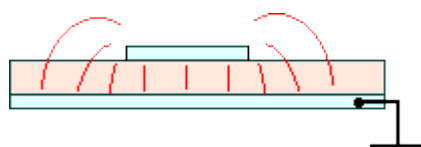


Рис. 5.2 – Двусторонняя печатная плата

Двусторонние печатные платы имеют ряд достоинств относительно односторонних печатных плат:

- Возможно формирование частично экранированной линии. Это позволяет снизить уровень излучения помех и восприимчивость к внешним помехам.
- Электромагнитное поле линии сосредоточено в области между проводником и экраном, т. е. локализовано. Это позволяет с достаточной точностью рассчитывать значения электрических параметров через геометрию сечения линии.

Двусторонние ПП позволяют создать линии связи приемлемого качества, однако их площадь ограничена.

Многослойные печатные платы

Многослойные печатные платы представляют собой единый монтажный узел, состоящий из чередующихся слоев токопроводящего и изоляционного материала.

Многослойные печатные платы изготавливают путем соединения отдельных слоев с нанесенным рисунком соединений (на пастах, содержащих молибден) и их последующим спеканием.

Многослойные печатные платы на основе полиамидной пленки формируются на базе двухсторонних гибких плат, из которых набирается многослойный пакет. Пакет устанавливают на металлическом основании (анодированный алюминий). Проводники на пленке создают методами тонкопленочной технологии.

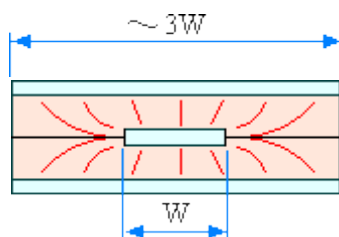


Рис. 5.3 – Трёхслойная печатная плата

Многослойные печатные платы имеют ряд достоинств:

- В многослойных печатных платах формируется практически полностью экранированная линия связи.

- Обеспечивается максимальная локализация электромагнитного поля, а следовательно, и максимальная точность расчетов электрических параметров через геометрию сечения.
- Наличие большого числа слоёв позволяет реализовать практически любую топологию.

МПП является основным изделием, в котором реализуются соединения в виде линии связи для быстродействующей и сверхбыстродействующей аппаратуры.

Многослойные печатные платы (МПП)

Их применение позволяет увеличить плотность монтажа и сократить длину соединительных линий. Любая МПП состоит из нескольких печатных слоев, спрессованных с использованием изоляционных прокладок методом попарного прессования или металлизации сквозных отверстий:

1) ***попарное прессование***. Используется двухсторонний диэлектрик. Надо иметь две заготовки, на каждой из которых разводят монтаж, и металлизированные отверстия, которые соединяют монтаж с фольгой с другой стороны. Затем эти две заготовки спрессовывают печатью внутрь, изолировав прокладкой. Заготовка имеет по обе стороны сплошную фольгу с металлизированными отверстиями, которые соединяют фольгу с печатью на ближайшем слое. После этого выполняют монтаж на наружных слоях и металлизирование отверстий, которые соединяют проводники на наружных слоях. Каждое отверстие на любом слое имеет контактные площадки. Недостаток метода в том, что можно получить только 4-слойную плату. Установка элементов на внешних слоях делается обычным способом;

2) ***метод металлизации сквозных отверстий***. При этом методе заготовки выполняют из двухстороннего фольгированного диэлектрика без отверстий. В местах, где нужно сделать электрические соединения, делают контактные площадки, которые располагают одну над другой. Потом набор заготовок прессуют с прокладками из стеклоткани, а на наружных слоях химическим способом разводят печатный монтаж и делают сквозные металлизированные отверстия, которые соединяют площадки во всех слоях в зоне этих отверстий.

Число слоев может быть любым (до 10 слоев). Это сложный процесс и требует очень точного совпадения слоев. Для этого по краям платы за ее габаритами делают отверстия, в которые вставляют направляющие штыри, а потом их отрезают. На больших европлатах такие отверстия делают и в середине платы. Стоимость МПП примерно в 10 раз больше ОПП.

Недостатки:

- 1) более низкая надежность из-за большого числа внутренних контактов;
- 2) трудоемкость внесения изменений, т.к. практически нужно менять фотошаблоны внутренних слоев;
- 3) низкая ремонтпригодность.

Поэтому применение МПП следует всячески ограничивать и делать там, где разводка обычным способом невозможна. Недостаток метода в том, что можно получить только 4-слойную плату. Установка элементов на внешних слоях делается обычным способом;

3) **метод металлизации сквозных отверстий.** При этом методе заготовки выполняют из двухстороннего фольгированного диэлектрика без отверстий. В местах, где нужно сделать электрические соединения, делают контактные площадки, которые располагают одну над другой. Потом набор заготовок прессуют с прокладками из стеклоткани, а на наружных слоях химическим способом разводят печатный монтаж и делают сквозные металлизированные отверстия, которые соединяют площадки во всех слоях в зоне этих отверстий.

Число слоев может быть любым (до 10 слоев). Это сложный процесс и требует очень точного совпадения слоев. Для этого по краям платы за ее габаритами делают отверстия, в которые вставляют направляющие штыри, а потом их отрезают. На больших европлатах такие отверстия делают и в середине платы. Стоимость МПП примерно в N раз больше ОПП.

Недостатки:

- 1) более низкая надежность из-за большого числа внутренних контактов;
- 2) трудоемкость внесения изменений, т.к. практически нужно менять фотошаблоны внутренних слоев;
- 3) низкая ремонтпригодность.

Поэтому применение МПП следует всячески ограничивать и делать там, где разводка обычным способом невозможна.

Материалы для печатных плат

Для изготовления платы необходим листовой диэлектрик с приклеенной к нему с одной или с двух сторон металлической фольгой. Для ПП применяют:

- 1) изоляционные прокладки из стеклопластика и фольгированный стеклотекстолит толщиной 0,8 – 3 мм марок СФ1 и СФ2;
- 2) фольгированный стеклотекстолит повышенной нагреваемости толщиной 0,5 – 3 мм;
- 3) фольгированный гитенакс толщиной 1,5 – 3 мм, но он не влагостоек, применяется в основном в бытовой аппаратуре. Производится вырубка платы и вскрытие отверстий.

Изготовление монтажа

Процесс изготовления платы состоит в основном из двух операций:

- 1) создание изображения печатных проводников путем копирования с негатива или с позитива на светочувствительный слой или печатание изображения краской через трафарет;
- 2) создание токопроводящего слоя на ее основании.

Существует три метода изготовления платы:

- 1) *химический* – при котором происходит вытравливание незащищенных участков фольги;
- 2) *электрохимический* – способ, при котором методом химического осаждения создается слой металла толщиной 1 – 2 микрона, который затем наращивается гальваническим способом до нужной толщины. Одновременно металлизуют стенки отверстий, которые используют как перемычки для соединения проводников на разных сторонах платы;
- 3) *комбинированный* метод – это сочетание первых двух. Проводники получают травлением, а отверстия – электрохимическим способом.

При выпуске документации любым способом на печатную плату делается таблица цепей для проверки ПП на установках автоматизированного контроля.

10.6 Установка радиоэлементов

Основные правила установки радиоэлементов на печатную плату:

- Элементы со штыревыми выводами нужно устанавливать на плату с одной стороны, для плат с односторонней фольгой – со стороны, где нет фольги. Это дает возможность применить прогрессивный способ пайки «волной припоя».
- Элементы с планарными выводами можно разместить с обеих сторон платы один против другого. А навесные элементы располагаются на плате, используя места для установки корпусных элементов.
- Для всех типов элементов строго ограничено ОТУ и ТУ минимальное расстояние от корпуса, на котором можно производить сгибание вывода, и минимальное расстояние до места приложения паяльника. БИС устанавливают на металлическую несущую раму, выполняющую заодно роль теплоотвода, или на индивидуальные прокладки толщиной 0,5–1,5 мм, или специальные разъемы.
- Тепловыделяющую или мощную ИС устанавливают на теплоотводящие шины.
- Корпусные микросхемы располагают на плате геометрически правильными рядами с шагом 2,5 или 1,25 мм.
- Первый вывод корпуса микросхемы совмещается с первой контактной площадкой, которая имеет ключ.
- При расстановке элементов должна быть предусмотрена возможность конвекции воздуха около элементов, которые выделяют тепло.
- При установке транзисторов, в аппаратуре, работающей при ударах и вибрации, корпус его должен быть приклеен к плате.

10.7 Пайка

Есть 3 метода в зависимости от типа производства:

- 1) пайка «волной припоя» – применяется в основном для односторонних плат;
- 2) второй – сваркой на специальных автоматах – это оди-
ночная сварка или групповая для планарных выводов;
- 3) третий – маломощным паяльником с заземлением.

После контроля платы на работоспособность ее покрывают защитным лаком до пяти слоев с промежуточной сушкой.

10.8 Сокращение и определение в САПР ПП

АТТРИБУТ – параметр, принадлежащий графическому объекту и предназначенный для программ или утилит. Атрибут имеет имя и значение. Имена атрибутов зарезервированы программами, обрабатывающими данную информацию. Например, программа автотрассировки обрабатывает атрибуты, задающие ширину трассы или величину зазора.

БИБЛИОТЕКА ЭЛЕМЕНТОВ – файл, имеющий специальный формат и содержащий библиотечные элементы. В зависимости от типов библиотечных элементов, включенных в библиотеку, различают технологическую и схемную библиотеки элементов. Система имен элементов библиотеки позволяет создавать копии – дополнительные имена для библиотечного элемента. В библиотеке может храниться отдельно графическая и упаковочная информация. Элемент библиотеки объединяет упаковочную информацию и символ или посадочное место.

ПЕРЕХОДНОЕ ОТВЕРСТИЕ – место сверления для металлизации электрического соединения между физическими слоями платы, а также области для электрического подсоединения к печатным проводникам.

ПЛОЩАДКА КОНТАКТНАЯ – место сверления для штыревого контакта и области электрического подсоединения к печатным проводникам для всех физических слоев печатной платы. Или металлизированный участок на плате или на кристалле, служащий для присоединения выводов радиоэлементов.

ПОСАДОЧНОЕ МЕСТО – графическое изображение радиоэлемента, выполненное для обозначения места размещения радиоэлемента на печатной плате, в соответствии с принятой формовкой выводов радиоэлемента и расположением крепежных отверстий.

РЕЖИМ ГРАФИЧЕСКОГО РЕДАКТОРА – основное состояние графического редактора. Различают символьный режим графического редактора (который предназначен для создания библиотечного элемента) и основной режим (в котором происходит объединение библиотечных элементов в схему электрическую принципиальную (для схемного графического редактора) или в топологию печатной платы (для технологического графического редактора)).

СЕТКА ПРОЕКТА – однородная или неоднородная система узлов на рабочем пространстве графического редактора, позволяющая регуляризировать автоматическое размещение элементов проекта посредством их привязки к узлам сетки. Однородная сетка проекта характеризуется шагом сетки (расстоянием между узлами) по осям X и Y . Неоднородная сетка имеет переменный шаг сетки.

ТОЧКА ПРИВЯЗКИ – место на библиотечном элементе (координаты X и Y), которым библиотечный элемент «приклеивается» к курсору графического редактора. Относительно точки привязки выполняется поворот библиотечного элемента.

ШИНА (на печатной плате) – способ регулярного формирования электрических связей, выполненных либо печатным, либо навесным монтажом. Навесная шина (jumper) на печатной плате изображена в виде системы эквипотенциальных контактных площадок, которые затем электрически соединяются друг с другом внешней («навесной») пластиной, имеющей штыри для всех контактных площадок. Печатная шина представляет собой регулярно проложенные области (полигоны, экраны, широкие линии и т.п.), к которым подключаются печатные проводники. Обычно здесь используются электрические свойства экранов.

ШИНА (на принципиальной схеме) – способ группирования электрических связей в образ жгута, в который входят и выходят именованные цепи. Шина на принципиальной схеме изо-

бражается в виде широкой линии, проложенной по схеме и объединяющей входящие и выходящие цепи.

ЭКРАН – полигональная структура (многоугольник), расположенная на одном из физических слоев печатной платы и подключенная к одной электрической цепи принципиальной схемы. При проверке технологических правил проектирования печатной платы экран является разновидностью печатного проводника сложной формы. В экране могут находиться «окна» и «каналы», позволяющие обеспечить отсутствие нежелательных электрических контактов с контактными площадками, переходными отверстиями и печатными проводниками, принадлежащими другим электрическим цепям.

10.9 Фирмы-изготовители САПР ПП и САМ-систем для САПР ПП

В данной таблице представлены ведущие фирмы-изготовители САПР ПП.

№	ФИРМА-ИЗГОТОВИТЕЛЬ	НАЗВАНИЕ ПРОДУКТА	КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ
1	ACCEL Technologies	ACCEL EDA	выполняет полный цикл проектирования печатных плат, ориентирована на особенности аналоговых и смешанных аналого-цифровых устройств. Имеется механизм переноса изменений печатной платы на схему и наоборот
2	Personal CAD Systems CADAM Company	PCAD	редакторы принципиальных схем и многослойных ПП, программы моделирования цифровых устройств, автоматического размещения компонентов на ПП и трассировки соединений, выдачи чертежей на принтер, плоттер, фотопостроитель, выдачи данных на сверлильные станки с ЧПУ, а также вспомогательные сервисные программы
3	Mentor Graphics	Mentor BoardStation	наиболее мощное решение в области проектирования плат. Основу системы составляет среда AutoActive, позволяющая реализовать такие функции, как предтопологический анализ целостности сигналов, интерактивная

№	ФИРМА- ИЗГОТОВИТЕЛЬ	НАЗВАНИЕ ПРОДУКТА	КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ
			и автоматическая трассировка с учётом требований высокочастотных плат и специальных технологических ограничений, накладываемых использованием современной элементной базы (BGA). Единая среда позволяет с помощью модуля ICX моделировать наводки в проводниках непосредственно при прокладке трассы или шины и контролировать превышение ими заданного уровня
4	OrCAD System Corp	OrCAD	имеется графический редактор принципиальных схем и ПП, а также программы моделирования цифровых устройств и трассировки соединений (однако программа автоматического размещения компонентов отсутствует). Привлекательность этому пакету придают удобный графический редактор и возможность перекодирования списка соединений схемы в форматы таких программ, как P-CAD, PSpice и др
5	Wintek Corp	smARTWORK	один из самых простых пакетов, включает в себя графический редактор двусторонней ПП, программу ручной и автоматической трассировки соединений и программу выдачи чертежей на плоттер
6	Saisy Systems Corp	Personal Logican	позволяет проектировать цифровые устройства, включая микропроцессоры, контроллеры и устройства памяти. Большие успехи достигнуты в создании САПР цифровых устройств на базе программируемых логических матриц (ПЛИМ)
7	Altium	Продукты Protel	обеспечивает сквозной цикл проектирования смешанных аналого-цифровых печатных плат с использованием программируемой логики фирм Xilinx и Altera. Включает средства предтопологического и посттопологического анализа целостности сигналов Главное отличие – топологический автотрассировщик, призванный реализовать новый подход к автоматической разводке плат

№	ФИРМА-ИЗГОТОВИТЕЛЬ	НАЗВАНИЕ ПРОДУКТА	КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ
8	Cadence	SPECCTRA	является несомненным лидером среди топологических редакторов. Она успешно размещает компоненты в автоматическом режиме и трассирует платы большой сложности благодаря применению оригинального принципа представления графических данных так называемой ShapeBased-технологии. Использует адаптивные алгоритмы, реализуемые за несколько проходов трассировки
9	Xilinx Foundation Series	Xilinx XACT Development System	фирма Xilinx специализируется на выпуске программируемых логических интегральных схем (ПЛИС или FPGA и FPLD) и комплекса их программного обеспечения. Данное ПО выполняет компиляцию описания ПЛИС (составленного на языке высокого уровня типа VHDL или представленного принципиальной схемой), компоновку и трассировку кристалла. Система Xilinx выпускается в нескольких вариантах, отличающихся набором поддерживаемых серий микросхем (в основном собственного производства)

Важным этапом проектирования печатных плат является подготовка уже разработанного проекта к производству. Под этим подразумевается генерация управляющих файлов для изготовления фотошаблонов, станков для сверления отверстий, оборудования для автоматического тестирования плат и расстановки компонентов. Как правило, все системы проектирования печатных плат имеют встроенные средства генерации таких файлов, тем не менее, имеется ряд задач, которые необходимо выполнять в специально предназначенных для этого продуктах – это САМ-системы для САПР ПП.

Доступные по цене и достаточно мощные САМ-системы для САПР ПП, работающие на рынке.

№	ФИРМА- ИЗГОТОВИТЕЛЬ	НАЗВАНИЕ ПРОДУКТА	КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ
1	PCB Frontline	Genesis 2000	ориентирована на мощные аппаратные платформы, работающие под управлением операционной системы UNIX, что определяет её относительно высокую стоимость. Основная особенность пакета Genesis 2000 – высокий уровень автоматизации обработки топологий. Здесь имеются специальные средства верификации и корректировки, которые позволяют увеличить технологичность платы и учесть особенности производства на данном предприятии. Широкий набор интерфейсов импорта/экспорта позволяет обмениваться данными с большинством известных систем проектирования печатных плат
2	Downstream Technologies	CAM350	наиболее популярная в России. Ранее облегченная версия этого продукта поставлялась с пакетом ACCEL EDA, поэтому имела схожую с ней идеологию и позволяла загружать проект платы не в виде набора Gerber файлов, а файл PCB с сохранением информации об электрических связях. Вышедшая в марте 2003 новая версия 8.0 получила полностью обновлённый пользовательский интерфейс, усовершенствованные средства контроля правил DRC и DFM, улучшенные средства генерации списков соединений с учётом сквозных, слепых и глухих переходных отверстий. Отличительной особенностью является то, что в качестве основного стандарта обмена данными сейчас принят формат ODB++, содержащий полную информацию о проекте и поддерживаемый большинством систем управления ресурсами предприятия.
3	Pentalogix	CAMMaster	предоставляют специалистам все необходимые средства подготовки печатных плат к производству, от-

№	ФИРМА- ИЗГОТОВИТЕЛЬ	НАЗВАНИЕ ПРОДУКТА	КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ
			личительной особенностью которых является поддержка языка макроскриптов Visual Basic for Application
4	Wise	GerbTool	эта программа поставляется в составе этого пакета проектирования OrCAD как штатный САМ-модуль. Здесь имеется полный набор инструментов первичной подготовки проектов плат к производству: обработка топологий, генерация файлов сверления и фрезерования, средства верификации и улучшения технологичности
5	Altium	CAMtastic	поставляется бесплатно в качестве штатного САМ-средства совместно с пакетами P-CAD 2002 и Protel DXP. Последняя версия CAMtastic DXP, в дополнение к обработке формата Gerber, позволяет автоматизировать большинство процедур с помощью специального языка Client Basic

В приложении №1 приводится более детальное описание наиболее ярких представителей САПР III.

11 ПОДКЛАСС САПР – СИСТЕМЫ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ (САПР СМ)

Сложность современных объектов, содержащих сотни тысяч, а порой и миллионы компонентов, делает их проектирование традиционными (ручными) методами с обязательным изготовлением макета практически невозможным.

Именно по этой причине резко возрос интерес разработчиков электронной аппаратуры подклассу системам автоматизированного проектирования – системы моделирования.

Системы моделирования (СМ) позволяют проверять не только правильность работы проектируемого устройства, но и выяснять его основные характеристики, начиная с самых первых шагов, когда прорабатываются только архитектурные решения будущего проекта.

Моделирование – общий метод, основанный на изучении определённого объекта посредством устройств и образцов, моделирующих его поведение, с последующим переносом полученных знаний с модели на оригинал.

При разработке любого электронного устройства необходима проверка соответствия его характеристик заданным или ожидаемым с учетом всего многообразия как входных сигналов, так и других внешних воздействий или факторов соответствующим реальным условиям его изготовления (производства) и последующей эксплуатации.

Во многих случаях, для доведения всех параметров и характеристик такого устройства до желаемого уровня, предварительно изготавливают макетный образец, проводят его исследование, испытание в различных условиях и по результатам вносят соответствующие изменения или уточнения в схему или конструкцию.

Это требует определенных материальных и временных затрат и, в виду их ограниченности, не всегда гарантирует оптимальность или достаточность принимаемых технических решений.

В то же время современный уровень развития вычислительной техники позволяет для проведения целого ряда исследований заменить реальный макет (схему) соответствующей математиче-

ской моделью и получать необходимые результаты быстрее, качественнее, с минимальными затратами и в короткие сроки.

В современных условиях это с успехом можно реализовать с помощью систем моделирования на персональном компьютере, которые решают следующие задачи:

- реализация математических моделей внешних воздействий;
- реализация математических моделей электронных устройств;
- реализация алгоритмов преобразований входных сигналов;
- реализация алгоритмов обработки результатов моделирования.

При этом моделирование на ПК сводится к проведению экспериментов с машинной программой, имитирующей работу определенного электронного устройства при заданных в общем случае случайных воздействиях, и к статистической обработке результатов этих экспериментов.

Следует, однако, всегда иметь в виду, что модель, описывающая формализованный процесс функционирования электронного устройства, как правило, в состоянии охватить только основные его закономерности, оставляя в стороне второстепенные факторы, следовательно, она не может считаться полностью идентичной реальному устройству.

Чем выше степень идентичности, тем сложнее модель, тем больше времени необходимо затратить на ее разработку и последующую отладку программ, поэтому всегда нужно стремиться найти разумный компромисс между точностью результатов моделирования и сложностью модели. Обычно это достигается при использовании принципа от простого к сложному, т.е. при последовательном усложнении модели с учетом получаемых результатов.

Преимуществами компьютерного моделирования являются:

- возможность исследования процессов большой сложности с учетом большого количества факторов;
- простота организации экспериментов, относительно небольшое время и стоимость экспериментов;

- возможность контроля всех факторов и результатов экспериментов;
- повторяемость результатов.

Оценка требуемых параметров с помощью моделирования обычно достаточно проста, но необходимость проверки соответствия модели реальной системе требует так называемой калибровки моделей, которая, по существу, сводится к согласованию результатов моделирования с натурным экспериментом.

При этом общая задача отработки модели состоит:

- в установлении подобия исходных данных, поступающих на вход модели и реальных устройств;
- в установлении подобия основных параметров модели и реальных устройств;
- в выборе объема и условий проведения эксперимента на модели и реальном объекте;
- в согласовании результатов моделирования и натурного эксперимента.

При согласовании в случае необходимости проводят корректировку (доработку) модели.

Типовая взаимосвязь отдельных операций в процессе моделирования отражена на блок-схеме рис. 1.

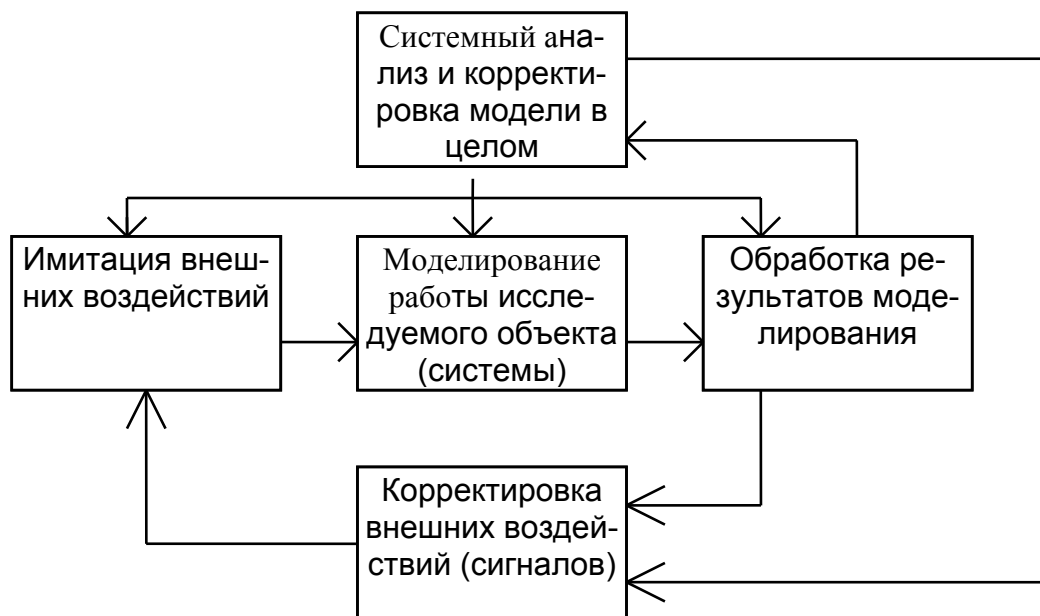


Рис.1 – Блок-схема организации типового процесса моделирования

Современные СМ электронной аппаратуры позволяют:

- проверить правильность работы проектируемого устройства;
- выяснить его временные задержки и проконтролировать выполнение требуемых временных соотношений в схеме;
- провести моделирование с учетом допустимых нагрузок на выходные контакты;
- проконтролировать допустимую мощность рассеивания на каждом компоненте;
- промоделировать работу идеальной схемы и той же схемы с учетом паразитных параметров и влияния близко расположенных компонентов.

Можно различить две разновидности моделирования: параметрическое и структурное.

- *Параметрическое моделирование* (Parametric modeling) позволяет рассматривать систему на уровне её системного свойства в форме совокупности дискретных значений основных параметров системы при функциональном анализе множеств её исполнения и компонентов. При разработке параметрической модели принимаются во внимание взаимосвязи параметров системы и среды, системы и образующих её компонентов.

- *Структурное моделирование* – используется при необходимости отображения состава и структурной композиции системы в форме совокупности взаимосвязанных элементов и отношений.

11.1 Моделирование на этапах жизненного цикла изделия

Инструменты моделирования присутствуют на всех этапах проектирования аппаратных и программных средств.

Моделирование выполняется для прогнозирования будущего, а особенности продукта систематически варьируются с целью улучшения характеристик продукта на раннем этапе разработки, при этом решения о технологическом и материальном оснащении принимаются заранее.

Моделирование помогает проектировщикам понять, какие компромиссы и решения в области проекта они должны сделать для оптимизации своей продукции.

Моделирование сокращает и заменяет дорогостоящий длительный процесс создания физических прототипов и их тестирования.

Моделирование может воздействовать на каждый из пунктов, обозначенных выше, приводя Вас к увеличению продаж и сокращению затрат на разработку продукта.

Моделирование может использоваться для сокращения времени на каждом этапе процесса проектирования.

Приведем функции систем моделирования на этапах жизненного цикла изделия:

1. Моделирование на этапе НИР.

Как уже говорилось выше, на этапе НИР идет разработка концепции, принимаются основные решения о будущем изделии исходя из рыночных потребностей, требований функциональности продукта и нужд бизнеса.

Моделирование на этом этапе позволяет разработчикам концепции проверить ее, чтобы убедиться, что продукт можно изготовить в соответствии с заданными требованиями и потребительскими свойствами.

Моделирование облегчает первоначальную оценку различных концепций проекта, предоставляя возможность удовлетворения всех требований к функциональности в установленных рамках времени и затрат средств на выполнение работ по данному проекту.

2. Моделирование на этапе ОКР и технического проекта.

На этом этапе проект в целом уже определен, включая его отдельные узлы и компоненты с заданными потребительскими свойствами. Определены геометрия, материалы и стадии производственного процесса.

Моделирование на этом этапе позволяет удостовериться, что данный проект реален, его можно будет выполнить и поставить на рельсы серийного производства.

Весь проект может быть смоделирован, от системы в целом до каждого отдельного компонента. Осуществляется детальное исследование влияния на проект отдельных факторов, и производится оптимизация параметров проекта.

На этом этапе моделирование выполняется инженерами-разработчиками и инженерами-технологами, планирующими производство.

3. Моделирование на этапе Испытаний.

Это один из важных этапов в жизни проекта, т.к. он определяет дальнейшую судьбу изделия. Этап испытаний начинается тогда, когда доступен образец. Большинство компаний создают несколько натурных прототипов и подвергают их тщательному тестированию. Если экспериментальные образцы не проходят испытания, проект изменяется и образец проходит новые испытания до тех пор, пока не будет получен положительный результат. Такой цикл создания, испытания и устранения дефектов требует значительных временных, производственных и финансовых затрат.

Моделирование может использоваться на этой стадии для уменьшения числа прототипов и физических циклов восстановления и повторного испытания, путем моделирования тестируемого образца на компьютере. Если тестируемый образец не проходит модельных испытаний, повторное изменение проекта очень дорого. Используя компьютерное моделирование на данном этапе, удастся сократить затраты на разработку прототипов более чем на 50%, а это значительная экономия времени и средств. Кроме этого, моделирование может быть использовано для сокращения времени и объема испытаний натурального образца.

Например, при помощи моделирования можно «пробежаться» по образцу, сообщив «данные», которые бы измерялись при физическом испытании. Это позволяет инженерам, производящим испытание, заранее и более качественно определять критерии измерений и нагрузки/динамического нагружения, экономя время и исключая «работу вслепую», как часто бывает при лабораторных исследованиях.

4. Моделирование на этапе Производства.

Всем понятно, что на этом этапе продукция изготавливается. В данном случае моделирование используется для оптимизации процессов производства с целью минимизации отходов и этапов обработки. Моделирование улучшает процедуру изготовления продукта и снижает затраты на гарантийный ремонт, выявляя и исключая те параметры проекта, которые могут вызвать дефекты во время процесса производства.

5. Моделирование на этапе Эксплуатации.

Моделирование может использоваться не только для разработки и производства Вашей продукции. Оно также может применяться для маркетинга и продаж Вашей продукции. Моделирование можно использовать в коммерческих предложениях, чтобы показать, как Ваш продукт будет выглядеть в конкретных условиях и какими интересными свойствами он может быть интересен покупателю. Результаты моделирования могут использоваться в рекламе для придания Вашему продукту образа «высокотехнологичного». Ваши продажи увеличатся благодаря тому, что моделирование улучшает дизайн, а также саму продукцию, т.е. ее потребительские свойства.

В дальнейшем, после реализации, Ваша продукция будет нуждаться в поддержке, техническом обслуживании, капитальном и текущем ремонте. Моделирование может использоваться на этом этапе для проведения ремонта и для модификаций изделия, обеспечивая корректировку проблемы, при этом одновременно сохраняя функциональность первоначального дизайна и набор полезных свойств. Задачи этого этапа очень четко просматриваются в аэрокосмической промышленности, где моделирование применяется для продления ресурса жизненного цикла изделий.

6. Моделирование на этапе Утилизации.

Этот этап особенно актуальный в настоящее время. Ничто не вечно в этом мире. Когда срок полезного использования изделия закончен, оно утилизируется или перерабатывается.

Моделирование здесь применяется для выбора таких производственных процессов и упаковочных материалов, при которых

возможна экономичная переработка изделия, включая различные типы материалов, которые были использованы для его изготовления.

В качестве примера можно привести российскую орбитальную станцию «Мир», в которой процесс утилизации был смоделирован и заложен в неё, еще при изготовлении станции.

Во многих отраслях промышленности число «контактирующих частей» во время производства на порядок превышает число фактических частей в продукте.

Применение моделирования позволяет спланировать их повторное использование или эффективную утилизацию еще на этапе эскизного проектирования самого изделия, значительно задолго до начала его эксплуатации.

11.2 Структура и отличительные черты современных САПР СМ

Современные профессиональные СМ имеют следующие отличительные черты:

- графический пользовательский интерфейс, позволяющий «рисовать» на экране монитора проектируемую схему и временные диаграммы на ее входах;
- интерактивную рабочую среду проектирования – управляющую оболочку, то есть специальную программу, из которой можно запускать все или большинство других программ пакета, не обращаясь к услугам штатной операционной системы;
- современные СМ поддерживают иерархическое проектирование как сверху – вниз, так и снизу – вверх;
- многоуровневое моделирование и метод локальной детализации проекта, неразрывно связанные с иерархическим проектированием;
- многоразрядные контакты и шины, позволяющие на верхних уровнях иерархии весьма лаконично описывать проект и тут же выяснять его работоспособность;
- наличие в современных САПР и АСМ постпроцессоров моделирования позволяет не только просматривать в удобной для пользователя форме результаты моделирования, но и обрабаты-

вать эти результаты, отыскивая нужные события или состояния в схеме, измерять временные интервалы, контролировать соблюдение временных соотношений в схеме;

- современные СМ поддерживают библиотечный метод проектирования, то есть содержат огромное число графических и функциональных описаний компонентов; причем эти библиотеки открыты для добавления в них новых описаний, которые может сделать сам пользователь;

- в современных СМ реализуется событийный механизм продвижения модельного времени, основанный на принципе dz ; это означает, что модельное время продвигается, опираясь на ближайшее событие, а не на очередной такт;

- моделирование выполняется с учетом реальных временных задержек, связанных с распространением сигналов внутри компонентов; при этом могут учитываться не только средние задержки, но и максимальные их значения, а также наихудший случай при их разбросе;

- автоматическую генерацию модели всей схемы по ее структурному описанию;

- многозначный алфавит представления сигналов в схеме, включающий (кроме лог. 0 и лог. 1) значения X, Z, R и F, то есть неизвестное значение, высокоомный выход, переключение сигнала вверх (Rise – фронт) и вниз (Fall – спад);

- интегрируемость с другими пакетами аналогичного назначения, которая обеспечивается соответствующими программами – конверторами, позволяющими импортировать и экспортировать данные из одной системы в другую; высшей формой такого взаимодействия является «горячая связь» – Cross Probing.

Методы и алгоритмы, используемые в системах моделирования:

1. Многоуровневое моделирование и метод локальной детализации объекта.

При многоуровневом моделировании различные части объекта (фрагменты) представлены на различных уровнях иерархии. Например, проектируемая в настоящий момент времени часть объекта раскрыта до уровня простых интегральных микросхем и

имитируется структурной моделью, а остальные фрагменты (программа на микропроцессоре, связь с компьютером), представленные на соседнем более высоком, имитируются только поведенческими моделями.

Закончив проектирование данного фрагмента, разработчик представит его поведенческой моделью, то есть спрячет детали структурного описания в «черный ящик», и раскроет более подробно другой фрагмент объекта, который еще предстоит проектировать.

Эта процедура повторяется столько раз, сколько фрагментов необходимо спроектировать на данном уровне иерархии. Описанный метод проектирования называется *методом локальной детализации объекта*, потому что в каждый момент времени подробно представлен только один фрагмент – тот, который находится «в работе». Остальные фрагменты свернуты в «черные ящики» и не перегружают модель ненужными для решения текущей задачи деталями.

2. Библиотечный метод проектирования.

Суть метода заключается в том, что в процессе проектирования объект детализируется до некоторых элементарных фрагментов, называемых структурными примитивами. Каждый примитив имеет свою поведенческую модель.

В качестве примитивов обычно выступают конструктивно законченные радиоэлектронные компоненты, например интегральные микросхемы или функциональные ячейки топологии кристалла кремния.

Примитивы и их модели объединяются в библиотеки, которые доступны любому проектировщику.

Разрабатываемый объект представляет собой некоторую комбинацию стандартных примитивов. Генерация конкретного варианта структуры выполняется на заданном наборе библиотечных примитивов методом проб и ошибок.

Полученное решение требует проверки на работоспособность и соответствие требованиям технического задания.

С этой целью строится структурная модель объекта как комбинация поведенческих моделей структурных примитивов, составляющих объект.

Привлекательная сторона библиотечного метода проектирования состоит в том, что структурные примитивы могут принадлежать различным иерархическим уровням. Благодаря этому, значительно повышается эффективность моделирования. Понятно, что поведенческие модели должны весьма точно отображать временные параметры примитива.

Типовой состав профессиональной системы моделирования

Типовой состав профессиональной системы моделирования включает в себя:

- Графический или текстовый язык описания объекта (ЯОО), с помощью которого пользователь вводит в систему моделируемую схему. Для событийного моделирования исходное описание объекта обычно представляется в табличной форме. Проектирование схемы выполняется с использованием базовых структурных примитивов, графические и функциональные описания которых содержатся в соответствующих библиотеках.

- *Транслятор ЯОО* преобразует исходное описание проекта в формат, пригодный для моделирования.

- Моделирование выполняется специальной программой, называемой *управляющей программой моделирования*, или коротко – *модулятором*. На модулятор обычно возлагаются следующие функции:

- начальная инициализация моделируемой схемы;
- задание временных диаграмм на входах схемы (часто эту функцию выполняет другая программа, называемая редактором входных сигналов);
- продвижение модельного времени по принципу Dt или dz , а при моделировании смешанных (аналого-цифровых) схем используются одновременно оба принципа;
- автоматическая или пошаговая реализация запланированных пользователем модельных экспериментов;
- поддержание диалога с пользователем (запросы, диагностические сообщения, ошибки);
- накопление и фиксация результатов моделирования и представление их в желаемой форме (обычно в виде временных диаграмм или таблиц).

- Для вывода, наблюдения и обработки результатов моделирования используется другая программа, называемая постпроцессором моделирования. Часто они объединяются под общим названием: инструментальные средства моделирования. Сюда могут входить и некоторые другие программы, например, менеджер иерархии, менеджер проекта, программа электрического контроля схемы, библиотечарь, отладчики поведенческих моделей, программы автоматической генерации макромоделей, программные логические анализаторы и т.п.

Современные промышленные СМ имеют также средства для проектирования поведенческих моделей, включающие *языки логического моделирования* (ЯЛМ) и соответствующие *компиляторы ЯЛМ*.

Информация о проекте хранится в базах данных СМ, которые разделяются на справочные и рабочие. Управляющая оболочка СМ осуществляет вызовы нужных программ и делает работу с системой удобной для пользователя.

Современная система моделирования объединяет в себе средства:

- интерактивного ввода структурной схемы проектируемого или исследуемого объекта;
- автоматического построения (генерации) его модели;
- интерактивного ввода временных диаграмм входных сигналов, в том числе и непосредственно в графической форме;
- автоматического проведения имитационных экспериментов с построенной моделью;
- автоматизированной или интерактивной обработки результатов моделирования.

Одной из самых слабых сторон моделирования является невозможность имитировать работу объекта в реальном масштабе времени, то есть поддерживать темп, с которым протекают процессы в моделируемом объекте.

Низкая эффективность моделирования во многом объясняется невозможностью адекватно моделировать параллельно протекающие процессы на однопроцессорных вычислительных системах. Такие процессы приходится моделировать квазипараллельно, обрабатывая одно за другим одновременные события при

остановленном (замороженном) модельном времени. Оно остается фиксированным до тех пор, пока не будут обработаны все одновременные (кратные) события, привязанные к текущему моменту времени.

После этого модельное время опять оживает и начинает двигаться дальше шагами равной длины (принцип Dt – *потактовое моделирование*) или прыгая неравномерными скачками от текущего события до ближайшего будущего (принцип dz – *событийное моделирование*).

Для повышения эффективности моделирования используются следующие методы:

- высокоуровневое моделирование;
- многопроцессорные ВС;
- событийный механизм продвижения модельного времени;
- многоуровневое моделирование;
- метод локальной детализации проекта;
- сетевое моделирование;
- компилятивный метод моделирования (вместо интерпретирующего);
- аппаратные акселераторы (ускорители) моделирования.

11.3 Язык описания аппаратуры VHDL

Введение в VHDL

В системах схемотехнического моделирования большую роль играют средства описания аппаратуры для последующего ее моделирования.

Расшифровка аббревиатуры: **VHDL** (Vhsic Hardware Description Language) – язык описания аппаратуры на базе сверхскоростных интегральных схем.

VHDL – это язык описания аппаратуры, который поддерживается в настоящее время многими системами моделирования, такими, как GMVHDL, Active VHDL, Accolade Peak VHDL, OrCAD и др.

Появление языка VHDL в определенной степени позволяет автоматизировать задачи проектирования от описания алгоритма функционирования систем до реализации кристаллов микросхем.

При этом понятие синтез следует определить как формализованный процесс построения схемы из некоторого заданного набора компонентов.

История создания языка VHDL

VHDL – это не первый язык описания аппаратуры (ЯОА), они известны давно.

Одним из первых ЯОА был LOTIS – формальный язык, описывающий логические переменные и дискретные схемы. Он разработан Шлэппи (IBM) в 1964 г.

Затем в течение семидесятых годов в Европе и США было разработано много ЯОА, их насчитывалось более 200 – отечественных и зарубежных. Самыми известными являются МОДИС, МОДИС-B78, Автокод, МПЛ, OCC-2, ФОРОС, EPICURE, CDL, DDL, ISPS, CONLAN, HILO, CASCADE, REGLAN и др.

Однако все они страдали одним недостатком – моделируя функцию объекта, они не имели развитых средств для описания и контроля временных соотношений в цифровой аппаратуре (ЦА).

Особенно остро это ощущалось при разработке сверхскоростных интегральных схем (VHSIC – Very High Speed Integrated Circuits). Схема правильно работает на умеренных частотах. Но на высоких частотах синхронизации появляются сбои, и работоспособность ЦУ нарушается. Моделированием на существующих до сих пор языках обнаружить эти предельные для аппаратуры частоты не удавалось.

Разработка языка VHDL была осуществлена институтом инженеров по электротехнике и радиоэлектронике (IEEE) под финансированием военного ведомства США.

В 1987 года этот язык был принят в качестве стандарта ANSI/IEEE Std 1076-1987.

Стандарты необходимы как для того, чтобы улучшить эффективность разработки программных средств поставщиков САПР, так и для осуществления реальной возможности внедрения сообществом потребителей процессов оптимального проектирования электронных устройств.

Это особенно важно, так как большинство пользователей имеют смесь коммерческих программных продуктов, которые

должны быть совместно интегрированы и образовывать взаимосвязанную цепочку.

Важно, что использование стандартного языка позволяет компании защищать ее проектные данные путем сохранения их в непатентованном стандарте, в то же время не адаптируя их под определенного пользователя. Но также важно и то, что это защищает вклады компании в обучение и дает возможность инженерам, знакомым с VHDL, использовать многочисленные программные продукты.

С утверждением стандарта на VHDL любая разработка и документирование аппаратуры и алгоритмов функционирования системы должны сопровождаться описанием на языке VHDL, т. е. VHDL-описание является неотъемлемой частью документации и для разработчика, и для заказчика.

Министерство обороны США обязало своих поставщиков ИМС представлять в составе документации на новые изделия VHDL-модели и тестирующие их VHDL-векторы.

В США создана VHDL Users Group, в Европе – VHDL FORUM – группы, которые занимаются внедрением этого языка. В бывшем СССР также существовала подобная ассоциация.

Функциональные характеристики VHDL

Основные функциональные характеристики и возможности VHDL:

- Язык VHDL имеет развитую общеалгоритмическую базу, заимствованную от языка программирования PASCAL.
- Он содержит тщательно проработанные конструкции для поведенческого (функционального) и структурного представлений, а также средства для документирования проектов.
- Это многоуровневый язык, поддерживающий иерархическое проектирование – высокоуровневые описания могут комбинироваться с низкоуровневыми принципиальными схемами.
- Он является языком аппаратного описания. Данный язык дает возможность описывать проект на верхнем уровне абстракции.
- Язык имеет средства для описания протекающих во времени процессов, для задания временных задержек на элементах.

- С его помощью можно описать временные диаграммы на входах моделируемой схемы и взаимодействия между отдельными устройствами через системную шину.

- Проектирование цифровой аппаратуры на архитектурном уровне и одновременное отображение результатов на компьютере.

- Внесение в проект серьезных изменений в малой степени повлияет на его стоимость и сроки подготовки производства.

- Язык VHDL позволяет сначала создать абстрактное описание функций, а затем (по мере проработки проекта) осуществлять их детализацию, вплоть до того момента, когда для них станут ясны структурные решения.

Системы моделирования, поддерживающие язык VHDL, включают в себя:

- компилятор языка VHDL;
- отладчик исходного кода;
- интерактивную подсистему цифрового моделирования.
- Дополнительно, некоторые включают схемный редактор или программу-драйвер интеграции с другими САПР, имеющими такой редактор. Например, для создания принципиальной схемы используется пакет OrCAD, а специальная программа-драйвер конвертирует графическое описание в VHDL-код.

Средства и структура VHDL

В отличие от других языков описания и моделирования аппаратуры, язык VHDL не навязывает разработчику конкретный метод проектирования. Он волен выбрать любой способ проектирования с использованием как поведенческих, так и структурных представлений компонентов, можно применить как восходящее, так и нисходящее проектирование или комбинировать их.

А) Средства для моделирования во времени.

Важнейшими в алгоритмах моделирования систем являются:

- имитация реального времени;
- имитация параллельных процессов в однопроцессорной моделирующей ЭВМ.

Для организации моделирования во времени в VHDL применяется принцип *событийного моделирования* как наиболее эффективный по быстродействию.

Основные его характеристики:

- время в моделях представляется дискретным и может задаваться в диапазоне натуральных единиц времени от наносекунды до часа;
- приращение времени на каждом шаге моделирования;
- величина переменная, равная интервалу времени между двумя последующими событиями (событием в моделях называется любое изменение одного из сигналов в схеме).

Б) Разнообразие форм описания объекта проекта.

К замечательным свойствам VHDL, позволяющим использовать его для решения задач синтеза по методологии нисходящего проектирования, относится возможность описания объекта проекта с различной степенью детализации:

- на поведенческом уровне с помощью двух форм: потоковой, имитирующей поведение объекта проекта как последовательность прохождения потока данных и сигналов управления; процессной, имитирующей поведение объекта проекта как совокупность независимых, но синхронизируемых во времени процессов, определяющих алгоритм функционирования;
- на структурном уровне имитирует объект проекта как совокупность компонентов структуры и связей между ними, при этом для описания компонентов может быть выбрана любая из перечисленных форм.

В) Описание объекта проекта в VHDL.

Полное описание VHDL-модели объекта проекта состоит из трех частей:

- 1) описание интерфейса объекта проекта (ENTITY), включающее PORT (списки входных и выходных сигналов) и GENERIC (список задержек переключения и других констант);
- 2) архитектура объекта проекта (ARCHITECTURE), включающая объявление переменных и дополнительных (внутренних) сигналов объекта проекта и операторную часть, описывающую объект проекта на структурном или поведенческом уровне.

3) описание конфигурации, задающей подключение библиотеки моделей типов элементов и выборку их в качестве компонентов структуры объекта проекта.

Г) Системы VHDL-синтеза.

В среде VHDL-синтеза все модели и средства должны работать совместно. Следовательно, среда проектирования, основанная на VHDL, должна включать:

- поведенческое VHDL-описание проектируемой ДС;
- метод и средства декомпозиции поведенческого описания ДС (определяется методом синтеза и набором типовых элементов аппаратуры);
- набор поведенческих и/или структурных VHDL-описаний компонентов, соответствующих типовым элементам аппаратуры;
- правила выбора формы VHDL-описания компонента для его аппаратной реализации.

Для успешного решения задач высокоуровневого синтеза с последующим переходом на более низкие уровни с использованием VHDL-описаний (VHDL-синтеза) должны выполняться следующие допущения:

- генерируются схемы, функционирование которых адекватно VHDL-описаниям;
- многообразие наборов VHDL-описаний в библиотеке компонентов для каждой аппаратной реализации соответствующей функции обеспечивает выбор оптимального варианта по заданному критерию синтеза схемы;
- поведенческое VHDL-описание ДС, служащее входом для VHDL-синтеза, обычно не зависит от технологии изготовления системы, но для эффективных аппаратных решений следует учитывать технологическую информацию как можно раньше.

В настоящее время наиболее успешным оказывается применение поведенческих VHDL-моделей для синтеза устройств, последовательность обработки данных в которых может быть строго структурирована и представлена в виде схемы алгоритма или соответствующего потока сигналов.

Д) Обзор САПР и систем моделирования, использующих язык VHDL и системы VHDL-синтеза:

В настоящее время существует большое число пакетов и систем проектирования, использующих VHDL.

Одни из них относятся к промышленным системам: COMPASS, CADENCE, TANNER, SMASH, Mentor Graphics, Cadence, Workview Office.

Другие используются в сфере образования (университетские системы): ALLIANCE, AMICAL, VANTAGE, SYNOPSYS.

Характерным для данных систем является применение методологии нисходящего проектирования, интерактивные средства моделирования с многооконным редактором, большой набор утилит, ориентированных на поддержку коллективной работы.

Ряд систем (например, SYNOPSYS или система ХАСТ для разработки программируемых логических матриц фирмы Xilinx) позволяют разработчику выбирать, кроме VHDL, другие средства описания аппаратуры, например Verilog, синтаксической основой которого является язык Си.

Очевидно, что ни один язык описания цифровой аппаратуры, в том числе и VHDL, не может полностью удовлетворить разработчика в части адекватного семантического отображения поведенческими моделями дискретных систем. Поэтому создаются системы, которые на базе подмножеств средств языка VHDL дополняют и расширяют функциональные и семантические возможности VHDL-конструкций в конкретных областях проектирования.

Система Silicon 1076 (САПР специализированных БИС, разрабатываемых по принципу параллельного проектирования) включает среду интерактивного архитектурного синтеза, для которого исходным является подмножество средств поведенческих VHDL-описаний. Система поддерживает многоцелевой синтезатор уровня регистровых передач, специализированные средства синтеза запоминающих и арифметических устройств.

В качестве заключения можно отметить, что для решения задач синтеза с применением языка VHDL в рамках САПР необходимо:

- создание библиотеки моделей поведенческого типа для проектируемых объектов в целом. Например, для процессора —

это последовательность микроопераций для выполнения команд процессора;

- создание библиотеки моделей компонентов, конструктивных блоков разрабатываемого класса объектов. Например, для синтеза процессора: АЛУ, наборы регистров, счетчики, мультиплексоры и т.д.;

- разработка процедуры синтеза с указанием связей между поведенческими и структурными моделями. Например, для процессора процедура синтеза должна включать и критерии выбора длины слова, способов организации алгоритмов выполнения отдельной команды, например, умножения.

12 ПОДКЛАСС САПР – СИСТЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ (САПР ММ)

12.1 Введение в системы математического моделирования

Рост сложности решаемых задач по объективным причинам ведёт к сложности алгоритмов и их реализаций на алгоритмических языках Си, Паскаль, Фортран и др. Ещё больше времени уходит на отладку кода. Эти причины привели к созданию Систем автоматизированного проектирования (САПР), в которые заложены некие алгоритмы.

Такие системы появились достаточно давно и были узкоспециализированными. Среди математических САПР наибольшую популярность приобрели MathCAD (MathSoft Inc.), Mathematica (Wolfram Research, Inc.), MATLAB (MathWorks Inc.), Maple V (Waterloo Maple Inc.). Можно выделить также класс специализированных решений для моделирования динамических процессов (DyMoLa, Dynast, Multisim, VisSim, MBTY, MVS, Simulink).

При использовании той или иной программы, пользователю нужно определить последовательность математических функций, которые должны быть вычислены математическими ядрами.

12.2 Структура программ математического моделирования

Типовая структура программы математического моделирования включает в себя:

- Графический интерфейс, ориентированный на человека и отвечающий за представление математической модели в виде, понятном широкому кругу специалистов. Это могут быть блок-схемы, схемы физические принципиальные, гибридные карты состояний и пр.
- Систему управления базой данных, отвечающую за хранение объектов составленной пользователем модели, и требуемые трансформации структуры ее хранилища.

- Математическое ядро – модуль, выполняющий основную вычислительную нагрузку. Он обеспечивает исполнение потоков математических функций согласно заданной программе, руководствуясь готовностью аргументов и приоритетностью математических операций.
- Серверы визуализации обеспечивают интерфейс между функционирующим математическим ядром и пользователем: осциллографирующие, показывающие и индицирующие приборы.

**Модульная структура
моделирующих
программ**

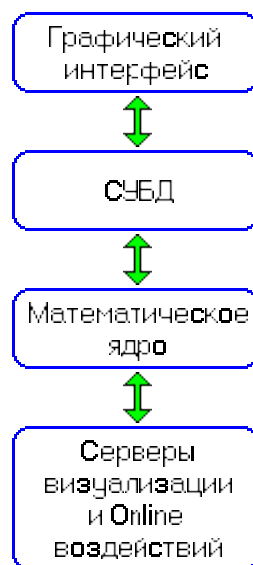


Рис. 1 – Типовая структура программы
математического моделирования

12.3 Графический интерфейс программ математического моделирования

Графический интерфейс – это самое «слабое место» программ математического моделирования динамических систем.

Попробуем разобраться с тем, что может понимать русскоязычный специалист под скромным английским термином диаграмма (diagram), если с помощью неё требуется представить описание модели системы на том или ином уровне в графической форме:

1. Блок-схемы или около десятка именованных направленных графов.

2. Схемы физические принципиальные электрических, магнитных, тепловых, гидравлических, акустических, механических, ротационных и др. цепей преобразования энергий.

3. Гибридные карты состояния или импульсные потоковые графы, графы переходных состояний.

4. Графы алгоритмов программ.

5. Структурные схемы, функциональные схемы, мнемосхемы.

6. И многое другое.

С задачей качественного отображения всего перечисленного, в любых масштабах, на любых устройствах ввода вывода, могут справиться лишь редакторы векторной графики.

12.4 Краткий обзор программ САПР ММ

MATHCAD – предлагает большой набор высококлассных инструментов для решения и анализа широкого спектра технических проблем. Улучшенные математические способности программы и возможности визуализации позволяют осуществлять самые сложные расчеты и лучше понять суть рассматриваемой проблемы. Патентованная технология IntelliMath™ автоматизирует рутинные операции, увеличивая тем самым производительность. Mathcad также позволяет соединять в одном документе текст, формулы и графику, что облегчает создание подписей к расчетам и их иллюстрацию. Более того, «живой» интерфейс Mathcad автоматически обновляет результаты, позволяя обойтись минимальными перерасчетами. Еще одно удобство этой программы – легкость ввода и просмотра уравнений, в ходе которых используется стандартная математическая система записи (вместо программирования в командной строке). Кроме этого, Mathcad позволяет создавать точные технические документы, соответствующие внутренним и внешним деловым стандартам, таким, как 509000; такие документы можно легко переслать, интегрировать, использовать снова и т.д.

MATLAB – универсальная система для автоматизации математических и научных расчетов, моделирования систем управ-

ления. Это техническая вычислительная среда, объединяющая числовые вычисления, построение графиков и их визуализацию, язык программирования высокого уровня. Задачи построения алгоритмов, анализа графиков, моделирования легко решаются при помощи MATLAB. Гибкий, диалоговый MATLAB – язык позволяет выражать технические идеи просто и однозначно. Обширные и мощные числовые вычислительные методы позволяют проверять и исследовать альтернативные идеи легко и быстро.

MATHEMATICA – объединяет возможности аналитических и численных вычислений, визуализации и документирования в единой среде. Mathematica помогает эффективно работать с момента появления идеи до получения окончательного результата.

Maple V корпорации Maple Waterloo – предназначена для выполнения сложных аналитических и численных расчетов широкого класса математических задач. Она имеет более двух с половиной тысяч встроенных функций, обладает развитым языком программирования, позволяющим пользователю самому расширять возможности Maple V при решении специальных задач, прекрасными графическими средствами и средствами профессионального оформления выполненной работы.

В приложении №3 приведен обзор наиболее яркого представителя данных систем математического моделирования – пакета программ MATLAB.

13 ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И КРИТЕРИИ РАЗВИТИЯ САПР

13.1 Критерии развития САПР

Развитие САПР осуществляется за счёт постоянного совершенствования таких характеристик, как: программное обеспечение, быстродействие, качество выводимых материалов, отношение цены к производительности и др.

Совокупность критериев развития САПР можно разбить на четыре основные группы:

- 1) функциональные критерии;
- 2) технологические критерии;
- 3) экономические критерии;
- 4) антропологические критерии.

Рассмотрим их более подробно.

1. Функциональные критерии развития САПР.

Функциональные критерии характеризуют систему на стадии ее эксплуатации.

К числу основных функциональных критериев развития принято относить:

- *Критерий оценки производительности* – производительность САПР зависит от объема знаний и необходимых данных, заложенных в систему. Под знаниями понимаются правила принятия проектных решений и методики расчета числовых параметров. Под данными понимаются данные нормативно-справочной информации и архивные данные разработанных ранее проектов.

- *Критерий оценки скорости обработки информации* – это объем выполненной проектной работы за единицу времени. В данном случае объем выполненной работы измеряется в листах формата А4 (бумажные носители) или в количестве байт информации при построении информационной модели проектируемого технического объекта или процесса.

- *Информационный критерий эффективности САПР.* Этот критерий является аналогом энергетического коэффициента по-

лезного действия и представляет собой усредненное отношение объема выходной информации к суммарному объему входной и выходной информации. Очевидно, что система тем совершеннее, чем меньше, при прочих равных условиях, в нее нужно вводить данных, чтобы получить необходимый проект. Предельным минимумом являются данные технического задания на проектирование изделия или технологического процесса.

- *Критерий совмещения функциональных операций* – определяет возможное количество одновременно выполняемых на одной рабочей станции функциональных операций.

- *Критерий автоматизации*. Данный критерий определяет степень автоматизации труда. Для достижения высокого коэффициента автоматизации необходим охват в САПР максимально-возможного количества проектных операций с первоочередным включением наиболее трудоемких.

- *Критерий непрерывности процесса проектирования*.

Сквозной процесс конструкторско-технологического проектирования прерывается по многочисленным организационно-техническим причинам. Это связано как с переходом от неавтоматизированных проектных процедур и операций к автоматизированным и наоборот, так и с продолжением проектного процесса в других подразделениях и даже предприятиях. В результате общий цикл разработки конструкторско-технологической документации на изделие существенно превышает чистую трудоемкость проектирования на всех этапах.

Критерий непрерывности процесса проектирования представляет собой усредненное отношение чистой трудоемкости проектирования к длительности разработки проекта от начала до конца.

Технологические критерии развития САПР.

Технологические критерии связаны с развитием и адаптацией систем применительно к конкретным производственным условиям.

- *Критерий трудоемкости разработки САПР*. Критерий равен отношению суммарной трудоемкости разработки и подготовки к эксплуатации системы к главному показателю ее эффек-

тивности, в качестве которого выступает натуральный или информационный показатель производительности. Критерий представляет собой удельную трудоемкость создания САПР на единицу получаемой эффективности и является положительно определенной и монотонно убывающей во времени величиной.

- *Критерий технологических возможностей.* Критерий отражает простоту разработки САПР и подготовки ее к эксплуатации на конкретном предприятии.

Экономические критерий развития САПР.

Экономический критерий развития равен стоимости положительного эффекта автоматизации проектирования к величине произведенных затрат. В качестве экономического критерия принято использовать величину годового экономического эффекта от использования САПР.

Критерий эргономичности.

Эргономичность – это свойство системы человек-машина изменять свою эффективность в зависимости от степени использования возможностей человека-оператора.

Поскольку САПР является человеко-машинной системой, важность этого критерия возрастает. Критерий эргономичности САПР равен отношению реализуемой эффективности системы человек-машина к максимально возможной эффективности этой системы.

Критерий эргономичности можно представить как коэффициент полезного действия человека в системе человек-машина.

13.2 Направления развития САПР

Исходя из выделенных критериев и опираясь на обзор современных пакетов программ САПР, часть из них приведена в настоящем учебном пособии, можно сформулировать несколько основных направлений дальнейшего развития систем автоматизированного проектирования:

- переход от автоматизации проектирования отдельных работ или этапов к интегрированным системам, обеспечивающим

целостную автоматизацию работ на протяжении всего жизненного цикла проектируемого объекта/предприятия;

- переход от технико-экономического обоснования и эскизного проектирования до автоматизации управления уже спроектированного и построенного предприятия;

- переход от автоматизации отдельных рабочих мест к автоматизации в масштабах всего проекта и предприятия и к распределённому проектированию и моделированию, то есть к согласованной одновременной разработке проекта соисполнителями различных фирм, которые могут находиться в разных частях земного шара;

- использование объектной технологии и возможностей Internet в САПР.

Приведем некоторые прогнозы развития САПР:

- В области прикладного программного обеспечения дальнейшее развитие будет связано с использованием технологии <Plug. Play>. Это означает, что прикладные программы будут представлять собой как бы набор элементарных кирпичиков-приложений, которые благодаря строгому соблюдению всех стандартов и программных интерфейсов будут легко состыковываться и взаимодействовать друг с другом и из которых конечный пользователь сможет собирать целостные системы с необходимым ему набором функций.

- В области хранения и управления данными произойдёт переход от реляционных СУБД к объектным или объектно-реляционным СУБД и доступу к информации с использованием сетей Internet/Intranet и Web-технологии.

- Развитие объектной технологии позволяет создавать не просто трёхмерную геометрическую модель проекта, но и модель, элементы которой обладают определённым «интеллектом» и моделируют поведение соответствующих объектов реального мира.

- Переход к единой комплексной системе проектирования — САПР, способных выполнять работы на всех этапах жизненного цикла объектов. Это переход от создания инструментов проектирования для индивидуальных компьютеров к созданию систем

информационного управления и принятия решений на протяжении всего жизненного цикла предприятия.

- В САПР будет оставаться актуальным требование к совместимости с уже существующими системами, так как никто не хочет утратить то, что уже наработано, и никто не хочет начинать с чистого листа или «изобретать велосипед».

При разработке новых систем необходимо учитывать следующие замечания:

- вновь разрабатываемая система должна обладать, в сравнении с существующими аналогами, существенно новыми потребительскими свойствами, привлекательность которых побуждала бы пользователей внедрять ее для замены уже освоенных;
- новая система должна обладать более низкими затратами на эксплуатацию, а также на сопровождение и развитие, которые окупали бы расходы на ее приобретение и внедрение.

13.3 Критерии выбора САПР

При выборе методов и средств конструирования, помимо приведенных выше критериев и направлений развития САПР, необходимо также учитывать:

- новизну и сложность конструктивного исполнения разрабатываемого изделия и его свойств;
- наличие исходных научно-технических решений по разрабатываемому объекту, его компонентам, материалам и их свойствам;
- влияние выбираемых методов конструирования на качество выполняемых работ, в первую очередь – на производительность труда конструктора, полноту и точность получаемых результатов.

Для правильного выбора САПР необходимо ориентироваться на следующие критерии:

- САПР должна автоматизировать работу. Инструменты САПР должны экономить ваше время, обеспечивать продуктивность и не противоречить традиционному проектированию.
- САПР должна быть надежной. Не следует забывать, что данные, хранящиеся в электронной форме, недоступны для прямого чтения (для доступа к ним как минимум нужны компьютер и

специальная программа). Потому, покупая систему с нестандартным форматом хранения информации, вы совершаете ошибку.

- Простота доступа пользователя к САПР. Реализуется одинаковыми средствами описания проектируемого объекта, ориентированными на конкретного пользователя, и универсальным математическим обеспечением, транслирующим это описание в соответствующую программную модель. Также необходимо уделить внимание возможности непосредственного обращения пользователя к программно-информационным средствам САПР, т.е. возможности оперативного ввода данных и отображения результатов проектирования.

- САПР должна быть доступной. Если после покупки САПР вы не сможете пройти необходимого обучения или не на высоте окажется техническая поддержка, нормальная работа любой САПР (даже самой легкой и умной) маловероятна.

- САПР должна быть открытой. Если систему нельзя настроить или доработать под ваши потребности, выбор такой системы – ошибка.

- САПР должна иметь память. Не стоит покупать САПР, которая меняет форматы данных и не поддерживает свои старые форматы либо меняет одно математическое ядро на другое, это признак ненадежности системы.

- САПР должна быть долговечной. Помните, что, покупая САПР, вы выбираете ее всерьез и надолго. Нормальный ход работ и стабильное качество способна гарантировать лишь долговечная система (независимо от количества выпускаемых версий и обновлений).

- САПР должна быть универсальной. Бойтесь САПР, которая «сама в себе», даже если она и устраивает вас по функционалу. Подумайте о смежниках и масштабируемости системы. Если смежникам будет тяжело обрабатывать вашу информацию, если со временем вы не сможете увеличить мощь системы или расширить круг решаемых задач, то такую систему можно считать «однодневкой»: будущего у нее нет.

- САПР должна быть стабильной. Система не должна постоянно менять основные принципы работы. Работа в САПР это обычай и своды правил, и поэтому только постоянство стиля

САПР позволит вам вовремя и качественно выполнить обязательства по проекту.

- САПР должна окупать себя. Если предлагаемую САПР мучительно трудно осваивать, если ее невозможно применить без дополнительных затрат, и она не приносит ожидаемого результата, покупать такую САПР нет смысла.

- Необходимо уделить внимание и «открытости» САПР. Если придется разрабатывать что-то специальное под уникальную и неповторимую задачу, главное, чтобы фирмы и компании – разработчики ПО смогли самостоятельно написать заказанные вами приложения. Кстати, в этой области у AutoCAD нет конкурентов: официальная поддержка Microsoft Visual C++, Autodesk AutoLISP, Microsoft VBA (Basic), возможна поддержка Delphi, Borland C и других

- САПР должна быть масштабируемой, то есть иметь возможность роста. Хорошая САПР удовлетворит любой «кошелек». Она позволит вам начать с «малого решения» и со временем расширить систему до желаемого уровня.

- САПР должна быть наиболее универсальной – универсальность определяется степенью универсальности программ по отношению к проектным задачам. Это позволяет решать с помощью одних и тех же программных средств широкий круг проектных задач.

- САПР должна иметь возможности адаптации к условиям проектирования. Адаптируемость, в отличие от универсальности, предполагает главным образом возможность включения в систему новых программных средств для работы с непредусмотренными изменениями среды проектирования.

- Особое внимание необходимо уделить средствам связи САПР с производством. При автоматизированном производстве обязательной для САПР является поставка управляющих программ для станочного парка с ЧПУ и автоматов контроля. Для традиционных ручных способов производства САПР должна поставлять текстовую и графическую конструкторскую документацию и описания технологических процессов.

- Документация о САПР (учебники, руководства) должна быть легкодоступной.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ОБЗОР СИСТЕМ САПР ПП

P-CAD

Система **P-CAD** предназначена для проектирования многослойных печатных плат (ПП) вычислительных и радиоэлектронных устройств.

P-CAD является интегрированным набором специализированных программных пакетов, работающих в диалоговом режиме. Средства системы позволяют проектировать принципиальные электрические схемы, печатные платы (в том числе и многослойные), а также получать всю необходимую конструкторскую документацию.

P-CAD выполняет полный цикл проектирования печатных плат, включающий в себя графический ввод схем, упаковку схемы на печатную плату, ручное размещение компонентов, ручную, интерактивную и/или автоматическую трассировку проводников, контроль ошибок в схеме и печатной плате и выпуск документации.

Структурная схема системы P-CAD

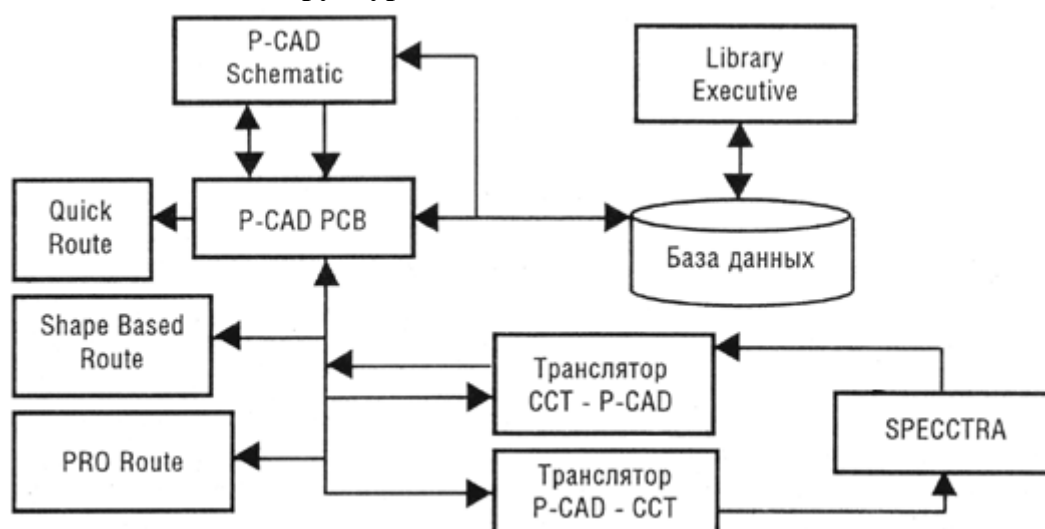


Рис. 1.1 – Структура системы проектирования P-CAD

В систему входят следующие пакеты:

- Пакет для проектирования принципиальных электрических схем и создания образов радиоэлектронных компонентов (P-CAD Schematic).

- Программы извлечения списка электрических связей из графического образа принципиальной электрической схемы. В результате создается таблица соединений.

- Программа объединения взаимосвязанных таблиц соединений, находящихся в различных базах, в единую базу данных всей принципиальной электрической схемы (**P-CAD Library Executive**).

- Программа преобразования текстового файла библиотеки использующихся в схеме компонентов в двоичную библиотеку описания компонентов.

- Программа упаковки вентилях на кристаллах микросхем и подсоединение конструктива, если это необходимо. Этот пакет реализует задачу компоновки конструктивного модуля, то есть распределение электрической принципиальной схемы по корпусам интегральных микросхем.

- Программа автоматического или ручного размещения компонентов по полю конструктива. Основным критерием размещения является минимум средней длины сигнальных соединений. Обеспечивает решение задачи трассировки сигнальных соединений. Доказано, что наиболее эффективным критерием является критерий равномерного размещения элементов с точки зрения длины сигнальных соединений по полю конструктива, то есть не должно быть очень коротких и очень длинных связей. При использовании критерия минимизации длины сигнальных соединений получаются области с очень высокой плотностью соединений и осуществить разводку соединений в этих областях очень трудно, поэтому используется критерий равномерного размещения (**P-CAD PCB**).

- Программа коррекции принципиальной электрической схемы с учетом возможных изменений в результате работы программы размещения.

- Программа автоматической трассировки печатных плат с настройкой стратегии процесса трассировки. Программа реализована на основе волнового алгоритма (алгоритма Ли), если возможность ее проведения в принципе существует. Идея алгоритма состоит в том, что начальной точкой распределения волны является контакт источника. Первый фронт волны распространяется

на одну единицу дискреты коммутационного поля. Источником второго фронта является каждая предыдущая дискрета и так далее, пока не дойдет до точки приемника (волна может распространяться только вертикально или горизонтально). Когда числовая волна построена, то начинается процесс построения трассы, которая строится в обратном направлении. При этом каждая последующая дискрета коммутационного поля должна иметь вес на единицу меньше предыдущей, чтобы обеспечить минимальную длину сигнальных соединений. Если существует возможность выбора из проводников одинаковой длины, то выбирается проводник с меньшим числом изгибов, то есть с меньшим количеством межслойных переходов, так как количество межслойных переходов определяет надежность модуля (**P-CAD Autorouters**).

- Интеллектуальный графический редактор печатных плат.
- Верификатор топологии печатной платы на соответствие конструктивным технологическим требованиям.

Кроме этих программ, в систему могут включаться пакеты функционально-логического моделирования принципиальных электрических схем. В системе также предусмотрена возможность получения файлов для вывода чертежей на плоттеры или на постпроцессоры для станков с числовым программным управлением.

P-CAD Schematic и **P-CAD PCB** – соответственно графические редакторы принципиальных электрических схем и ПП. Редакторы имеют системы всплывающих меню в стиле **Windows**, а наиболее часто применяемым командам назначены пиктограммы. В поставляемых вместе с системой библиотеках *зарубежных цифровых* ИМС.

Редактор **P-CAD PCB** может запускаться автономно и позволяет разместить модуль на выбранном монтажно-коммутационном поле и проводить ручную, полуавтоматическую и автоматическую трассировку проводников. Если **P-CAD PCB** вызывается из редактора **P-CAD Schematic**, то *автоматически* составляется список соединений схемы и на поле ПП переносятся изображения корпусов компонентов с указанием линий электрических соединений между их выводами. Эта операция называется **упаковкой** схемы на печатную плату. Затем вычерчивается

контур ПП, на нем размещаются компоненты и, наконец, производится трассировка проводников.

Применение шрифтов **True Type** позволяет использовать на схеме и ПП надписи на русском языке.

Автотрассировщики вызываются из управляющей оболочке **P-CAD PCB**, где и производится настройка стратегии трассировки. Информацию об особенностях трассировки отдельных цепей можно с помощью стандартных атрибутов ввести на этапах создания принципиальной схемы или ПП. Первый трассировщик **QuickRoute** относится к трассировщикам лабиринтного типа и предназначен для трассировки простейших ПП. Второй автоматический трассировщик **PRO Route** трассирует ПП с числом сигнальных слоев до 32. Трассировщик **Shape-Based Autorouter** – бессеточная программа автотрассировки ПП. Программа предназначена для автоматической разводки многослойных печатных плат с высокой плотностью размещения элементов. Эффективна при поверхностном монтаже корпусов элементов, выполненных в различных системах координат. Имеется возможность размещения проводников под различными углами на разных слоях платы, оптимизации их длины и числа переходных отверстий.

Document Toolbox – дополнительная опция **P-CAD PCB** и **P-CAD Schematic** для размещения на чертежах схем или ПП различных диаграмм и таблиц, составления различных списков и отчетов, которые динамически обновляются, таблиц сверловки, данных о структуре платы, технологической и учетной информации, размещения на чертежах схем списков соединений, выводов подключения питания и другой текстовой информации. Программа предназначена для расширения возможностей выпуска технической документации *без использования чертежных программ типа AutoCAD*. **Document Toolbox** позволяет автоматизировать создание конструкторской документации, необходимой для производства проектируемых ПП.

SPECCTRA – программа ручного, полуавтоматического и автоматического размещения компонентов и трассировки проводников. Трассирует ПП большой сложности с числом слоев до 256. В программе используется так называемая бессеточная **Shape-Based** – технология трассировки. За счет этого повышается эффективность трассировки ПП с высокой плотностью разме-

щения компонентов, а также обеспечивается трассировка одной и той же цепи трассами различной ширины. Программа **SPECCTRA** имеет модуль **AutoPlace**, предназначенный для автоматического размещения компонентов на ПП. Вызов программы производится автономно из среды **Windows** или из программы **P-CAD PCB**.

P-CAD Library Executive – менеджер библиотек. *Интегрированные библиотеки P-CAD* содержат как *графическую* информацию о символах и типовых корпусах компонентов, так и *текстовую* информацию (число секций в корпусе компонента, номера и имена выводов, коды логической эквивалентности выводов и т.д.). Программа имеет встроенные модули: **Symbol Editor** . для создания и редактирования символов компонентов и **Pattern Editor** . для создания и редактирования посадочного места и корпуса компонента. Упаковка вентиля компонента, ведение и контроль библиотек осуществляются модулем **Library Executive**. Модуль имеет средства просмотра библиотечных файлов, поиска компонентов, символов и корпусов компонентов по всем возможным атрибутам.

Вспомогательные утилиты, образующие интерфейс **DBX (Data Base Exchange)**, в частности, производят перенумерацию компонентов, создают отчеты в требуемом формате, автоматически создают компоненты, выводы которых расположены на окружности или образуют массив, рассчитывают паразитные параметры ПП и т.п.

Основные характеристики системы проектирования **P-CAD** приведены ниже.

Общие характеристики:

- 32-разрядная база данных;
- разрешающая способность **P-CAD PCB** и других программ равна **0,001 мм**;
- до 100 открытых одновременно библиотек;
- число компонентов в одной библиотеке – не ограничено;
- до 64 000 электрических цепей в одном проекте;
- до 10 000 выводов в одном компоненте;
- до 5000 секций (вентилей) в одном компоненте;
- до 2000 символов в атрибуте компонента;

- до 2000 символов в текстовой строке;
- до 20 символов в имени вывода, имени цепи, позиционном обозначении вывода (пробелы, знаки табуляции, точки и скобки не допускаются);
- до 16 символов в имени типа компонента (пробелы и знаки табуляции не допускаются);
- до 30 символов в позиционном обозначении компонента (двоеточие, пробелы, знаки табуляции, точка и точка с запятой не допускаются);
- до 8 символов в имени файла (в том числе и при работе в среде Windows);
- многошаговый «откат» вперед и назад. По умолчанию количество запоминаемых шагов установлено равным 10, но эту величину можно при необходимости изменить, редактируя файл конфигурации ***.ini**.
- минимальный шаг сетки 0,1 mil в английской системе и 0,001 мм в метрической системе (**1 mil = 0,001 дюйма = 0,0254 мм, 1 мм = 40 mil**). Систему единиц можно изменять в любой фазе проекта.

Графический редактор принципиальных схем P-CAD Schematic:

- до 99 листов схем в одном проекте, максимальный размер листа 60 x 60 дюймов;
- поддержка стандартных форматов листов от А до Е, А0-А4 и др. форматов;
- дискретность угла поворота компонента 90°;
- работает утилита **ERC** для просмотра и сортировки ошибок в принципиальных схемах;
- перекрестные связи между **P-CAD Schematic** и **P-CAD PCB** позволяют для выбранной на схеме цепи высветить на ПП соответствующий ей проводник и наоборот;
- возможна передача данных в программу моделирования **Dr. Spice A/D**.

Графический редактор печатных плат P-CAD PCB:

- до 99 слоев в ПП, из них 11 слоев предварительно определены;
- максимальный размер ПП 60 x 60 дюймов;
- автоматическая коррекция принципиальных схем по изменениям в печатной плате и наоборот (коррекция «назад» и «вперед»);
- до 64 000 типов контактных площадок в проекте;
- ширина проводника на ПП до 10 мм;
- до 64 000 стилей стеков контактных площадок в проекте;
- контактные площадки различных форм: эллипс, овал, прямоугольник, скругленный прямоугольник, сквозное переходное отверстие, перекрестье для сверления (target), непосредственное соединение, тепловой барьер с 2 или 4 перемычками;
- контроль соблюдения зазоров и полноты разводки ПП;
- минимальный дискрет угла поворота текста и графических объектов . 0,1 град;
- поддержка управляющих файлов фотоплоттеров **Gerber** и сверлильных станков с ЧПУ типа **Excellon**.

Интерфейс пользователя

Графические редакторы **P-CAD** имеют похожие интерфейсы и системы меню команд, общие сведения о которых излагаются ниже.

На рис. 1.2 представлен экран графического редактора **P-CAD Schematic**.

Горизонтальная панель инструментов содержит пиктограммы *системных команд*, а вертикальная панель – *команды размещения* объектов на рабочем поле экрана.

В поле *рабочего окна* располагают символы принципиальных схем и собственно схемы, составленные из символов, электрических соединений, шин и т.п.

Вторая строка снизу на экране – строка *сообщений*.

Самая нижняя строка – *строка состояний*. Значения полей строки состояния перечисляются ниже.

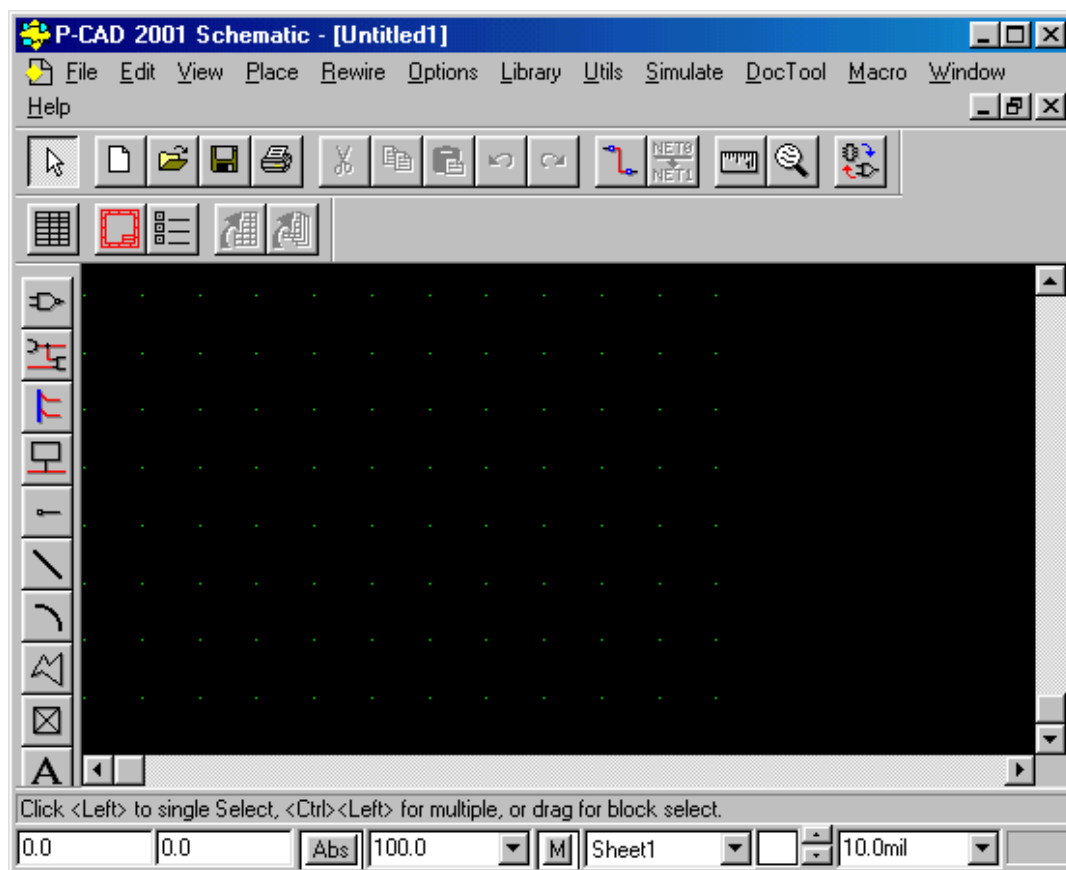


Рис. 1.2 – Рабочий экран P-CAD Schematic

Координаты X и Y. Числа в полях указывают текущие координаты курсора. Перемещение курсора в заданную пользователем точку производится следующим образом. Если активизирован режим выбора объекта (команда Edit/Select), то нажатие клавиши J передает управление полю X. На клавиатуре можно набрать значение координаты X, затем нажать клавишу **Tab**, набрать значение координаты Y и нажать клавишу **Enter**. В результате указанных действий курсор переместится в заданную точку. Если выбрана одна из команд размещения Place, то можно указанными выше операциями разместить объект в заданную точку.

Значения координат вводят в милах (**mil**), миллиметрах (**mm**) или в дюймах (**inch**). Выбор системы единиц измерения производится при выполнении команды **Options/Configure/Units**. Если координаты точки заданы в mil, то точность . один десятичный знак, а если в мм – три десятичных знака после запятой.

Кнопки переключения типа сетки ABS и Bel. Абсолютная сетка **ABS** имеет начало координат в нижнем левом углу рабочей

области экрана. Относительная сетка **Rel** имеет начало координат в точке, указанной пользователем. Сетка **Rel** включается в том случае, если в окне команды **Options/Grids** активен режим **Prompt for Origin**. Значение **шага сетки** устанавливается при нажатии на кнопку *выбора* (стрелка), находящуюся справа от поля шага сетки. А набор шагов сеток устанавливается в поле **Grid Spacing** после выполнения команды **Options/Grids**.

При активизации кнопки *записи макрокоманд* **M** (или клавиши **M**) начинается запись во временный файл всех выполняемых команд. Повторное нажатие кнопки **M** (или клавиши **M**) прекращает запись файла с именем **_default.mac**. Этот файл доступен только в течение *текущего сеанса*.

Поля *текущего имени схемы* и кнопка выбора *имени листа* отражают установки, проведенные по команде **Options/Sheets** в закладке **Sheets**. Все листы схемы одного проекта содержатся в одном файле с расширением **.sch**. Добавление листов в проект осуществляется командой **Options/Sheets/ Sheets/Add**.

Поля *ширина линии* и *выбор ширины линии* дублируют команду **Options/CurrentLine**. Для добавления в список новой толщины линии необходимо щелкнуть по кнопке **Line Width** и ввести новое значение толщины линии. *Тип линии* устанавливается командой **Options/ Current Line** в области **Style** диалогового окна.

В строке *сообщений* (справа от кнопки выбора ширины линий) отображается следующая *текущая* информация:

- тип, позиционное обозначение или общее количество выбранных объектов;
- значения приращений по осям **X** и **Y** при перемещении выбранных объектов;
- имя выбранной цепи;
- расстояние между выбранными точками и их проекции на оси **X** и **Y** при выполнении команды **Edit/Measure**.

Команды обзора

Команды обзора рабочего окна сгруппированы в меню **View** и изменяют вид, масштаб изображения объекта и его положение в пределах рабочего окна.

Команда **View/Redraw** перечерчивает экран с целью удаления «следов», оставшихся после редактирования изображения.

Команда **View/Extent** масштабирует изображение так, что на экран выводятся все введенные на данный момент фрагменты проекта.

Команда **View/Last** выводит предыдущее изображение экрана.

Команда **View/All** выводит на экран все содержимое активного окна вместе с рамкой.

Команда **View/Center** (или нажатие на клавишу C) центрирует изображение относительно текущего положения курсора. Эта же клавиша используется для панорамирования изображения при установке курсора на край экрана. Если курсор расположить на границе экрана, то смещение изображения (панорамирование) выполняется при нажатии одной из клавиш со стрелками (<., >.).

Команды **View/Zoom In** или **View/Zoom Out** увеличивают или уменьшают изображение относительно координаты, указанной курсором, на величину параметра **Zoom Factor**, указанного в меню **Options/ Configure**. Изменение масштаба изображения удобнее производить при установке курсора в точку, относительно которой будет произведено изменение, и последующем нажатии на клавиши *серый +* или *серый -*. Команда **View/Jump Location** перемещает курсор в точку с координатами, которые указываются в окнах диалогового окна, появляющегося после выполнения указанной команды.

Размещение объектов

Размещение объектов в рабочем окне производится с помощью команд меню **Place**. Эти команды дублируются соответствующими пиктограммами на панели инструментов **Placement Toolbar**.

Команда **View/Snap to Grid** перемещает курсор только по узлам координатной сетки экрана. Это позволяет точно позиционировать точки привязки объектов.

При *размещении* (или рисовании) объекта вначале щелчком мыши выбирается соответствующая пиктограмма, а затем курсором указывается местоположение объекта (или начальная точка рисования объекта). Перед размещением некоторых объектов

возможна операция ввода дополнительной информации (появляется соответствующее диалоговое окно). Точка *привязки* объекта устанавливается в узле сетки рабочего окна. Объекты в процессе размещения можно *перемещать*. Для этого, после указания начальной точки размещения (не отпуская кнопку мыши), необходимо протащить контур объекта в нужную позицию экрана и отпустить кнопку мыши.

Нажатие клавиши в процессе размещения позволяет некоторые объекты развернуть против часовой стрелки на угол, кратный 90°.

Нажатие клавиши F в процессе размещения позволяет некоторые объекты *отобразить зеркально относительно оси Y*. Например, для редактора **P-CAD PCB** эта операция эквивалентна переносу компонента на противоположную сторону платы.

Выбор и редактирование объектов

Режим выбор объектов активизируется при нажатии клавиши S или щелчком мыши по пиктограмме Select. Объект выбирается щелчком мыши, при этом имя выбранного объекта и его данные выводятся в строку информации. Если один объект закрывает другой, то выбор невидимого объекта осуществляется повторным щелчком мыши или повторным нажатием на клавишу <Пробел> (при этом курсор должен находиться на выделенном объекте). Для добавления выбранных объектов к уже выделенным перед щелчком мыши нажимается и удерживается клавиша Ctrl. Щелчком мыши в свободной части рабочего окна выбор объектов отменяется.

Двойной щелчок левой клавишей по объекту позволяет редактировать все его *атрибуты*. Щелчок правой клавишей мыши вызывает *контекстно-зависимое меню* команд.

При *перемещении* объекта его можно сдвигать на один или несколько шагов сетки (не отпуская кнопку мыши, нажимать соответствующую клавишу со стрелкой). Для изменения положения *точки привязки* после выбора объекта в меню команд редактирования компонента выбирают команду Selection Point и щелчком мыши устанавливают новое положение точки привязки.

После выбора объекты можно вращать (R), отображать зеркально (F), выравнивать (Align) по горизонтали и вертикали, ко-

пировать в буфер обмена (Copy) или в файл (Copy to File), вставлять из буфера или передвигать в нужное место рабочего поля.

В P-CAD можно выбрать отдельный элемент сложного компонента, пример вывод символа, схемное имя или номер контакта компонента. Для этого перед щелчком мыши необходимо нажать и удерживать клавишу Shift. После выделения объекта и последующего щелчка правой кнопкой мыши по объекту вызывается контекстное меню, пример которого показан на рис. 1.3.



Рис. 1.3 – Контекстное меню команд редактирования компонента

Полный перечень команд контекстного меню таков:

- **Properties...** – просмотр и редактирование характеристик выбранного объекта;
- **Copy** – копирование объекта в буфер обмена;
- **Copy Matrix...** – множественное копирование объекта;
- **Cut** – удаление выбранного объекта с сохранением его копии в буфере обмена;
- **Delete** – удаление выбранного объекта;
- **Edit Nets...** – редактирование атрибутов цепи;
- **Select Contiguous** – выбор соприкасающихся элементов цепи;
- **Select Net** – выбор всей цепи (включая фрагменты цепи, связанные с общей шиной);
- **Net Info...** – вывод информации о цепи;
- **Highlight** – окрашивание выбранного объекта;

- **Unhighlight** – отмена предыдущей команды;
- **Highlight Attached Nets** – окрашивание цепей, подсоединенных к выбранным объектам;
- **Unhighlight Attached Nets** – отмена предыдущей команды;
- **Align** – выравнивание компонентов на рабочем поле;
- **Selection Point** – изменение положения точки привязки выбранного объекта или группы объектов.

Дополнительные возможности по выбору и редактированию параметров выбранных объектов предоставляют команда **Options/Block Selection** для редактора **P-CAD Schematic** и команда **Options/Selection Mask** для редактора **P-CAD PCB**, которые настраивают фильтры и режимы выбора параметров. Диалоговые окна указанных команд для соответствующих редакторов представлены на рис. 1.4 и рис. 1.5.

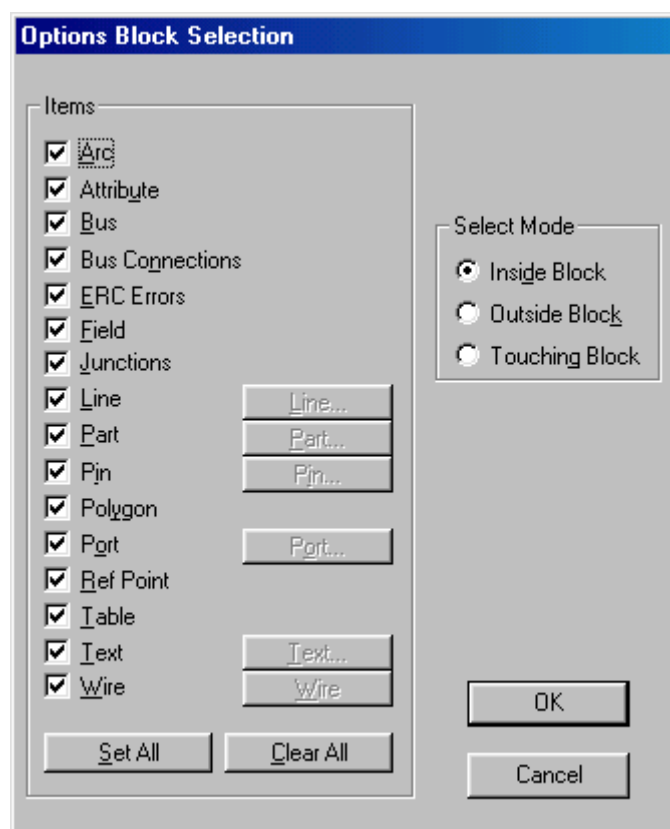


Рис. 1.4 – Настройка параметров блока выбора редактора **P-CAD Schematic**

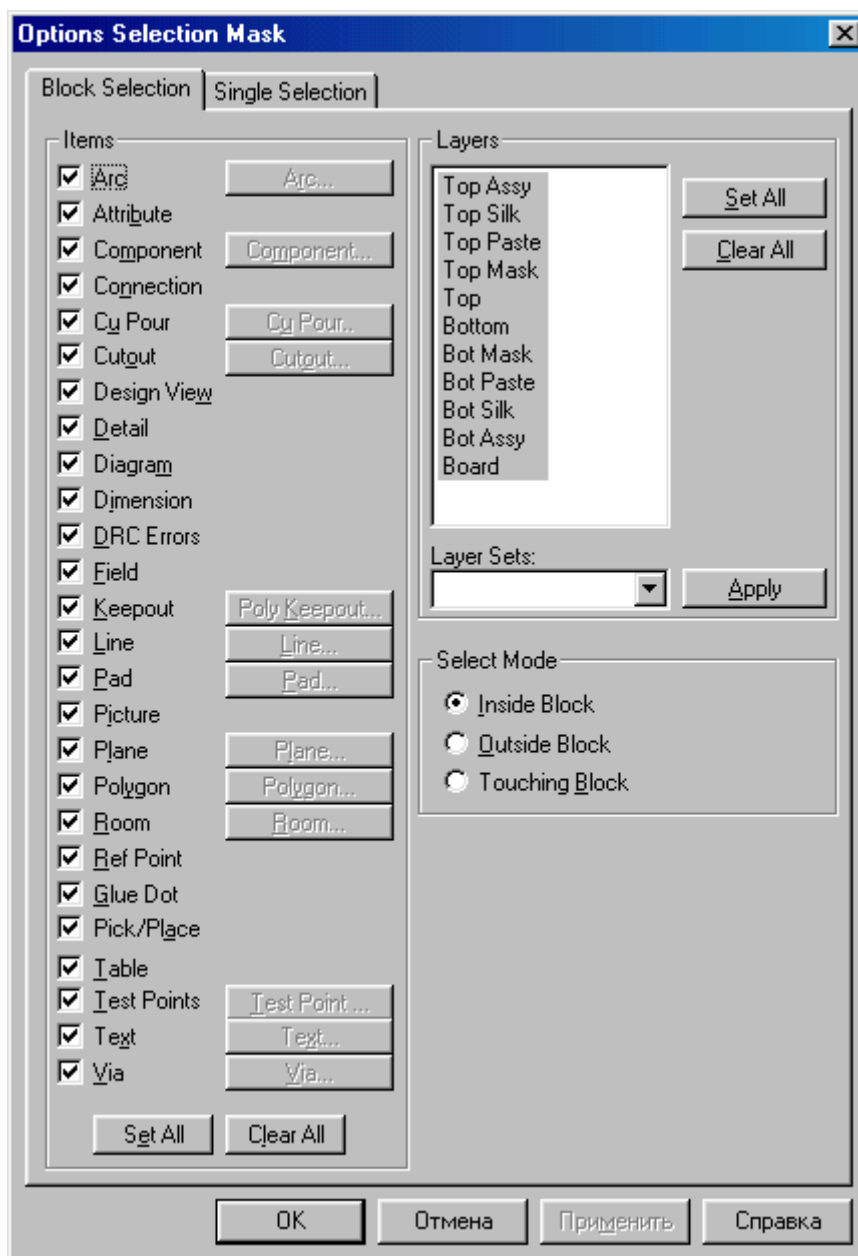


Рис. 1.5 – Настройка параметров блока выбора редактора P-CAD PCB

В секции **Items** (Элемент) диалогового окна указывают элементы, которые должны быть выбраны после выполнения операции блочного выбора. Некоторые элементы левого столбца имеют кнопки для задания дополнительных параметров.

В секции **Select Mode** можно задать способ выбора: **Inside Block** – выбор элементов, находящихся внутри блока, **Outside Block** . выбор всех элементов, находящихся вне блока, **Touching Block** . выбор всех элементов, находящихся внутри блока и ка-

сающихся его контура. Выбор объектов, удовлетворяющих заданным условиям, производится заданием на рисунке прямоугольного контура с помощью мыши. Все выбранные объекты подсвечиваются, и в дальнейшем их можно копировать, перемещать и редактировать.

При копировании графические данные из буфера обмена можно передавать в другие программы, работающие под управлением **Windows: MS Word, Paintbrush** и др. Эти же данные не *передаются* из графического редактора **P-CAD PCB** в редактор **P-CAD SCHEMATIC** и наоборот. Для ускорения копирования в пределах одного листа необходимо выбрать нужный объект, нажать клавишу **Ctrl**, и, не отпуская левую кнопку мыши, переместить копию объекта на новое место.

Изменение размеров объекта производится после его выделения, удерживанием курсора на одной из узловых точек объекта и последующим перемещением курсора в нужном направлении. Изменяются, таким образом, размеры линий, проводников, шин питания и полигоны при захвате концов или изломов объектов.

При изучении системы **P-CAD** для проектирования ПП будем придерживаться следующей последовательности изложения материала:

- создание символов компонентов (программа **SYMBOL EDITOR**, исполняемый файл **SYMED.EXE**);
- создание посадочных мест компонентов (программа **PATTERN EDITOR**, исполняемый файл **PATED.EXE**);
- правила ведения библиотек (программа **LIBRARY EXECUTIVE**, исполняемый файл **CMR.EXE**);
- создание принципиальных электрических схем, их верификация, создание отчетов и вывод результатов на печать (графический редактор **P-CAD SCHEMATIC**);
- размещение компонентов на монтажно-коммутационном поле, ручная трассировка электрических цепей, верификация ПП, оформление чертежей, генерация отчетов и вывод на печать (графический редактор **P-CAD PCB**);
- использование программ автоматической трассировки **QUICKROUTE, PROROUTE** и **SHAPE-BASED ROUTING**.

Структура библиотек P-CAD

Библиотеки в системе **P-CAD** называются *интегрированными* по той причине, что библиотека (***.lib**), помимо информации о рисунке символа компонента на электрической схеме и посадочном месте компонента на печатной плате, содержит также и текстовую информацию о внутренней структуре и функциях отдельных составляющих компонента. Заметим, что символ компонента и его посадочное место можно записывать не только в библиотеку, но и в отдельные файлы с расширениями ***.sym** и ***.pat** соответственно.

Каждый компонент состоит из одной или нескольких (**одинаковых или различных**) логических секций (вентилей), которые *упаковываются* в один корпус. Компоненты с разными именами могут иметь одну и ту же графику корпуса или символа. Корпусы и символы в этом случае должны находиться в одной и той же библиотеке.

При создании компонентов введены следующие обозначения:

- **Pad Numbers** – номер вывода (контактной площадки) компонента;
- **Pin Designator** – позиционное обозначение вывода компонента на схеме (может отличаться от **Pad Numbers**);
- **Symbol Pin Numbers** – номер вывода в секции (вентиле) компонента;
- **Pin Names** – имя вывода в секции (вентиле) компонента.

Отметим, что в систему **P-CAD** включены несколько десятков интегрированных библиотек-компонентов (увы, не отвечающих требованиям российских ГОСТов), компоненты которых в принципе можно отредактировать до параметров, нужных для текущего проекта. В частности, библиотека **PCBMAIN.LIB** содержит информацию о *корпусах дискретных компонентов и интегральных схем со штыревыми* выводами, **PCBSMT.LIB** – *корпуса дискретных компонентов и интегральных схем с пленарными* выводами, **PCBCON.LIB** – *разъемы*.

Для создания библиотечных элементов при проектировании электронных систем необходимо реализовать следующие шаги:

- создание схемного (символьного) образа компонента и запись его в библиотеку;
- создание стеков контактных площадок – установочных мест компонентов;
- создание посадочных мест элементов со штыревыми и планарными выводами для дальнейшего размещения их на монтажно-коммутационном поле;
- запись посадочных мест компонентов и стеков контактных площадок в библиотеки;
- создание взаимосвязи между символами элементов и их посадочными местами.

Алгоритм проектирования модуля в системе P-CAD

Исходными данными для проектирования являются:

1. Техническое задание на разработку модуля.
2. Библиотека электронных компонентов.
3. Параметры символьных отображений компонентов, находящихся в соответствии с конструктивно-технологическими образами этих компонентов.
4. Принципиальная электрическая схема модуля и перечень используемых элементов.

Первый этап. Начальная настройка системы.

1. Заготовка файла, содержащего имена всех используемых компонентов.
 2. Все символьные отображения компонентов.
 3. Все конструктивно-технологические отображения компонентов.
 4. Задается ограничитель формата принципиальной электрической схемы.
 5. Описывается используемый конструктив, то есть задаются размеры используемой печатной платы.
 6. Задается стратегия трассировки сигнальных соединений.
- Все эти данные заносятся в предварительно созданный справочник проектируемого модуля.

Второй этап. Коррекция библиотек системы.

Перед началом проектирования необходимо убедиться, что все компоненты, используемые в данном модуле, описаны в эталонной библиотеке. Описание состоит из двух частей:

1. Символьное описание компонентов.
2. Конструкторско-технологическое описание компонентов.

Создание символьного описания компонентов:

- А) Обозначение контактов.
- Б) Введение текстовых обозначений.
- В) Установка рабочих параметров.
- Г) Построение графического построения элементов.
- Д) Задание ключевой точки (либо левый нижний, либо правый верхний контакт).
- Е) Введение информации об установке вентилей в корпусе.
- Ж) Сохранение заданного описания.

Построение конструкторско-технологического образа компонентов:

- А) Введение конструкторско-технологических обозначений.
- Б) Введение текстовых обозначений.
- В) Установка рабочих параметров.
- Г) Построение графического построения элементов.
- Д) Задание ключевой точки (либо левый нижний, либо правый верхний контакт).
- Е) Введение информации об установке вентилей в корпусе.
- Ж) Сохранение заданного описания.

Третий этап. Построение принципиальной электрической схемы.

1. Установка рабочих параметров.
2. Вызов файла формата чертежа.
3. Размещение элементов схемы на поле чертежа.
4. Построение графического изображения электрических связей.
5. Введение конструкторских обозначений элементов.
6. Сохранение созданной схемы.

Четвертый этап. Выделение списка цепей электрической принципиальной схемы.

В результате работы данной программы создается файл электрических соединений и цепей.

Пятый этап. Создание библиотеки описания элементов.

С помощью текстового редактора строится (корректируется) символьный файл, содержащий перечень используемых компонентов и соответствующих им файлов символьных и конструкторско-технологических образов.

Шестой этап. Подготовка конструктива.

Используется декартова система координат с единицей дискретизации 1 DBU=0,001 дюйма (Data Base Unit), допустимый размер конструктива ± 30 тыс. DBU. В современных версиях этой системы может использоваться система Си.

Седьмой этап. Формирование данных проекта.

Выполняется программа, использующая в качестве входных данных список фактических связей, которые производят упаковку вентиля по корпусам и подсоединяют конструктив платы.

Восьмой этап. Создание базы данных проекта.

В базу данных входят:

1. Конструктив с не установленными компонентами.
2. Командный файл для коррекции принципиальной электрической схемы.
3. Файл ошибок.
4. Набор файлов для программы выпуска справочной статистической документации.

Все эти данные формируются автоматически в результате выполнения всех предыдущих пунктов.

Девятый этап. Размещение компонентов по полю конструктива.

Задача размещения сводится к расстановке корпусов элементов на поле платы с учетом критерия минимизации длины

электрических связей. Этот критерий является косвенным критерием сложности задачи трассировки, однако наиболее оптимальным на сегодняшний день является критерий равномерного размещения элементов с точки зрения средней длины сигнальных соединений. Автоматическое размещение элементов состоит из:

А) Настройка программы на конкретный проект.

Б) Загрузка проекта.

В) Расстановка закрепленных элементов. *Закрепленными* называются элементы, которые могут устанавливаться в общем случае вне сетки размещения компонентов, то есть в любом месте платы, и местоположение которых в дальнейшем изменять нельзя.

Г) Указание сетки размещения элементов.

Д) Указание элементов, подлежащих автоматической расстановке.

Е) Создание барьеров для размещения, с помощью которых выделяются области на плате, размещения в которых недопустимы, в том числе имеются в виду области, отделяющие схему от краев платы и расстояния от разъемов.

Ж) Описание характеристик расположения регулярных элементов и элементов обвязки (элементы, которые располагаются по периметру модуля).

З) Указание свободных зон вокруг размещаемых элементов.

И) Осуществление начальной расстановки элементов по узлам сетки размещения.

К) При необходимости проводятся улучшения качества размещения элементов на основе итерационного алгоритма попарных перестановок как самих корпусов элементов, так и взаимозаменяемых вентилях в одноименных элементах.

Л) Ручная коррекция полученного размещения.

М) Сохранение результата размещения.

Десятый этап. Прокладка шин питания и формирование зон запрета.

Производится формирование зон запрета на коммутационном поле платы, в котором трассировка не разрешена. Причем зоны запрета могут формироваться для каждого слоя трассировки или платы и иметь индивидуальную конфигурацию. А могут

формироваться на все слои одновременно, в этом случае они имеют одну и ту же конфигурацию. Для разводки шин земли и питания используют, как правило, дополнительный слой. Ширина этих проводников 3 – 5 мм, то есть значительно шире, чем ширина сигнальных проводников.

Одиннадцатый этап. Трассировка соединений.

Трассировка соединений самый трудоемкий этап во всем цикле разработки печатной платы.

1. Настройка технологических параметров трассировки.
2. Настройка параметров алгоритма. В основе трассировки Р-САД лежит волновой алгоритм (алгоритм Ли):
 - А) Выбор весовых коэффициентов алгоритма.
 - Б) Выбор типа алгоритма трассировки.
 - В) Задание числа итераций.
 - Г) Приведение в соответствие типов используемых канатов трассировки и графических образов контактных площадок.
 - Д) Выбор ширины трассируемых проводников.

Двенадцатый этап. Формирование информации о печатной плате.

К выходной информации относятся:

1. Принципиальная электрическая схема модуля.
2. Перечень используемых элементов (спецификация).
3. Техническое задание на проектирование, в котором должно быть указано:
 - конструктив или описание конструктива, в котором велась разработка;
 - форма лицевой панели с установленными элементами, разъемами и соответствующими надписями;
 - форма обратной или задней панели;
 - индивидуальные особенности реализации проекта;
 - рисунок разводки соединений или топология печатной платы.

Автотрассировщик SPECCTRA

Из широкого класса программ-трассировщиков, хотелось выделить программу SPECCTRA, перечислим ее основные возможности:

- базируется на самой современной технологии бессеточного (Shape-Based) проектирования;
- предназначена для автоматического и интерактивного размещения компонентов и трассировки проводников с соблюдением технологических ограничений к компонентам, ПО и проводникам;
- применяется для повышения эффективности трассировки ПП с высокой плотностью расположения компонентов/переходных отверстий (ПО);
- позволяет снимать напряженность в местах с плотным расположением проводников;
- обеспечивает тонкую настройку стратегии трассировки – для каждого объекта, расположенного на определенном слое ПП, или в определенной области, или принадлежащего некоторому классу, можно задать ряд индивидуальных правил.

Рассмотрим подробнее технологию бессеточного (Shape-Based) проектирования. Согласно ей все объекты ПП моделируются в виде совокупности геометрических фигур (прямоугольник, круг, дуга, трасса, полигон), которым приписаны определенные электрические и физические характеристики и правила проектирования. В отличие от привязанных к сеткам технологиям (Grid-Based), при бессеточной технологии каждый объект моделируется не набором узлов сетки, а геометрически точно, за счет чего достигается более плотный монтаж с меньшим числом слоев. Характерная особенность бессеточной технологии – меньшие затраты памяти.

SPECCTRA использует адаптивные алгоритмы, реализуемые за несколько проходов трассировки. На первом проходе выполняется соединение абсолютно всех проводников без обращения внимания на возможные конфликты, заключающиеся в пересечении проводников на одном слое и нарушении зазоров. На каждом последующем проходе автотрассировщик пытается уменьшить количество конфликтов, разрывая и прокладывая

вновь связи (метод Rip-up-and-retry) и проталкивая проводники, раздвигая соседние (метод Push-and-shove). Информация о конфликтах на текущем проходе трассировки используется для «обучения» – изменения весовых коэффициентов (штрафов) так, чтобы путем изменения стратегии уменьшить количество конфликтов на следующем проходе.

Трассировка проводников проводится в три этапа:

- 1) предварительная трассировка;
- 2) автотрассировка;
- 3) дополнительная обработка результатов автотрассировки.

Помимо обычного контроля соблюдения технологических зазоров типа проводник-проводник, проводник-переходное отверстие и т.п., в системе SPECCTRA выполняется контроль максимальной длины параллельных проводников, расположенных на одном или двух смежных слоях, что позволяет уменьшить уровень перекрестных искажений и уровень шума проектируемого устройства. Контролируется также максимальное запаздывание сигнала в отдельных цепях.

Вызов программы SPECCTRA производится автономно из среды Windows или из редактора PCB. Практически все современные системы имеют интерфейс в SPECCTRA. В последнем случае в меню Route/Autorouters выбирается тип автотрассировщика и указывается имя файла стратегии трассировки. В результате начнется выполнение трассировки текущей платы в автоматическом режиме, по окончании которого управление будет передано обратно в редактор PCB.

Программа SPECCTRA имеет режимы интерактивной трассировки проводников и размещения компонентов. SPECCTRA выполняет размещение компонентов и трассировку платы, на которой предварительно размещены компоненты, с помощью одного из графических редакторов печатных плат PCBoards, P-CAD, TangoPRO, PADS, Protel, OrCAD. Плата с предварительно размещенными компонентами транслируется в формат пакета SPECCTRA. Разведенная в программе SPECCTRA печатная плата транслируется обратно. Процедура трансляции встроена в P-CAD PCB, графический редактор PCBoards системы DesignLab, к остальным программам трансляторы поставляются отдельно.

Система SPECCTRA имеет два основных режима.

1 режим – размещение компонентов.

Выполняется автоматическое размещение компонентов на одной или двух сторонах ПП.

В своем составе она содержит утилиту интерактивного размещения компонентов. Выполняются размещение, сдвиг, поворот, выравнивание и перестановка компонентов, перенос их на противоположную сторону ПП. При перемещении компонента он может сдвигать мешающий ему один или несколько других. Можно выбрать компонент с наибольшим числом связей и предложить наилучшее место его размещения. Изображается гистограмма плотностей связей. При размещении компонентов контролируется соблюдение допустимых зазоров между ними.

2 режим – трассировка проводников.

Данный режим обеспечивает:

- разрыв мешающих проводников (Rip-up) и их повторную разводку с применением раздвигания и проталкивания проводников (Push and Shove);
- трассировку с применением и без применения сеток размещения ПО и прокладки проводников;
- улучшение технологичности изготовления ПП;
- сглаживание прямоугольных изгибов проводников по диагонали;
- трассировку на основании набора иерархических правил.
- текущий контроль соблюдения допустимых зазоров между проводниками и другими объектами;
- выполнение команд интерактивного редактирования трасс проводников, специфических для высокочастотных устройств, в частности, для трассировки цепей с учетом ограничений на время распространения сигналов; вывод на экран подробной информации о длине проводников с контролем ограничения на их минимальную и максимальную длину.

Система проектирования печатных плат Cadence.

Решение компании Cadence для сквозного проектирования печатных плат электронно-вычислительных устройств ориентировано, прежде всего, на сверхплотные и многослойные печатные

платы быстродействующих устройств. В системе комбинируются инструменты, позволяющие вести проектирование, начиная с построения общей концепции и заканчивая полностью подготовленными к производству печатными платами. В состав пакета входят программы:

1. Project Manager – менеджер проектов;
2. PCB (печатная плата) Library – управление библиотеками компонентов, разработка символов принципиальных схем (Pad Developer), топологических посадочных мест (Allegro Library), их верификация и группировка (Library Explorer);
3. Allegro PCB (Printed Circuit Board)– редактор печатных плат с возможностями размещения компонентов, трассировкой проводников и технологической подготовкой к производству;
4. Specstra – система размещения компонентов и трассировки проводников. Эти процессы могут происходить одновременно;
5. Concert HDL – редактор принципиальных схем, обеспечивающий быстрый ввод проектов, групповую разработку и использование ранее созданных проектов, в том числе и других САПР;
6. Capture CIS – редактор принципиальных схем, заимствованный из пакета OrCAD и имеющий интегрированную систему управления удаленными и локальными базами данных компонентов – Component Information System.

К стандартной конфигурации прилагается набор опций, предназначенный для реализации ряда специфических действий к печатным платам:

1. Allegro Perfomance Options – расширение редактора печатных плат для разработки быстродействующих устройств, повторного использования старых проектов, подготовки процедуры автоматизированного тестирования и использования языка Skill;
2. Specstra Perfomance Options – расширенный набор правил проектирования для управления стратегией размещения и трассировки для программы Specstra;
3. Pspice A/D – программа смешанного аналого-цифрового моделирования, заимствованная из пакета OrCAD;
4. Variant Design – многовариантное проектирование на основе базового проекта, поставляется для конфигурации, включающей Concept HDL и Allegro;

5. Checkplus – расширение для редактора принципиальных схем Concept HDL, предназначенных для настройки и проверки правил проектирования;

6. Spectra Quest Signal Explorer – анализ целостности сигналов, исследование паразитных эффектов печатных плат.

Пакет программ PCB Design Studio поддерживает технологию обмена информацией ODB++, разработанную фирмой Valor Computerized System, специализирующейся на решениях для технологической подготовки производства. Эта технология поддерживает перспективный и интеллектуальный формат описаний печатных плат, который позволяет обеспечить высокое качество и точность изготовления конечных изделий.

WSCAD – САПР для электротехники и электроники

WSCAD – профессиональная САПР для проектирования в электротехнике и автоматике.

WSCAD – пакет подпрограмм, соединяющих в себе высокий профессионализм, удобство в обращении и, что, конечно, немаловажно, относительно невысокую по сравнению с другими себестоимость разработки. Простота использования WSCAD обеспечивается ее эффективным сервисом, предоставляющим начинающим пользователям максимум подсказок и пояснений во время работы, не ограничивая при этом быстроту разработки и качество проектов. Все это позволяет в короткие сроки создавать документацию для объемных производств и установок, избегая при этом многих ошибок, неизбежных при ручном чертежном проектировании.

Некоторые интересные и важные характеристики программы:

- три ступени сложности (Базис-, Авто- и Мега-версии), ориентированные на различные уровни требований к проектированию;
- работа в стандартных Windows-окнах с комментариями к каждой команде, обеспечивающими простоту обращения и освоения системы проектирования;
- широкий объем и доступность вызываемых пунктов меню, возможность составлять и конфигурировать рабочие панели программы самим пользователем;

- 32-битовое программное обеспечение, позволяющее эффективно использовать вычислительные мощности Вашего компьютера;
- возможность работы в локальных сетях, предоставляющая совместное использование проектных файлов, баз данных и графических библиотек;
- поддержка всех Windows 95/98-совместимых графических адаптеров, принтеров и графопостроителей.

Все увеличивающаяся сложность автоматизированных систем управления предъявляет повышенные требования к надежности, наглядности и достоверности проектной документации, а с ними и к ПО САПР.

Характеристики и функции основных подмодулей WSCAD:

- *Программа просмотра File View.* Поставляемая бесплатно, дополнительно к Wscad-МЕГА-версии программа просмотра File Viewer позволяет распечатать и продемонстрировать клиентам готовые файлы проектов системы без возможности вносить в них какие-либо изменения. File Viewer разрешается передавать без оплаты для дальнейшего использования своим клиентам.

- *Демо-версия программы.* Демонстрационная версия WSCAD работает без лимита по времени и представляет собой полную функциональную копию большой МЕГА-версии программы, ограниченную лишь возможностью печати (до 8 – 10 элементов на одном листе). Она сопровождается 23 примерами чертежей из различных областей техники, созданных ее пользователями и партнерами (находятся после инсталляции в каталоге ExampleFiles). Открыв при помощи программы WSCAD первый файл этих документов (Examp1s.000), Вы сможете прочитать обращение фирмы WSCAD к будущим покупателям и краткое указание по просмотру этих документов.

- *Проектирование шкафов РУ.* Графическое распределение деталей в распределительном шкафу осуществляется при помощи активируемого менеджера шкафа РУ. Помимо элементов схем там можно размещать монтажные и сборные шины, монтажные платы, кабельные каналы и другие вспомогательные компоненты. Все наносимые (автоматически или вручную) части шкафа РУ представляются в соответствии с их габаритами и масштабом, за-

даваемым в установках менеджера. Опционально в плане шкафа РУ возможно указание номеров артикулов, обозначений и кодов установок и позиций размещаемых элементов. Для облегчения позиционирования последних при помощи менеджера шкафа РУ можно указать вспомогательные линии, невидимые при выводе на печать. Также здесь можно рассчитать суммарные габариты несущих конструкций шкафа и суммарную, занимаемую деталями площадь.

- *Менеджер кабелей проектов.* При включенном автоматическом управлении кабелями каждая наносимая жила/линия кабеля контролируется менеджером кабелей. С его помощью Вы можете произвести присваивание конкретной марки и цветового кода кабелю в вызываемой автоматически WSCAD-базе данных артикулов, а также распределять отдельные жилы кабеля на несколько листов проекта. В управляемой менеджером базе данных кабелей проекта можно также произвести переприсваивание цветового кода и номера артикула имеющихся кабелей или, зачитав в нее данные чертежей, произвести обработку проектов, созданных без управления кабелями.

- *Система навигации и просмотра.* Встроенная система браузеров помогает в больших, сложных проектах быстро находить элементы, редактировать их параметры и оперативно переносить к ним вносимые изменения.

- *Браузер контакторов.* Вместе с полуавтоматическим режимом управления контакторами браузер последних представляет собой гибкий инструмент при вводе новых и изменении параметров у существующих в проекте контакторов и реле. С его помощью Вы можете присваивать контакторам и реле новые артикулы, менять тип или изготовителя, редактировать параметры этих элементов, например функциональные тексты или номиналы мощности, автоматически перенося изменения в параметры деталей при нажатии ОК.

- *Браузер клемм.* С его помощью Вы получаете список клемм с их параметрами для одной из выбираемых планок. Помимо них в браузере указываются номера и наименования присоединений и обозначения подключенных к клеммам деталей, а также путь их токовых цепей в проекте. В браузере Вы можете

вручную редактировать наименования и номера выводов клемм, а также менять их функциональный текст и присвоенный им из WSCAD-базы данных артикул. Перенос изменений в чертежи проекта осуществляется автоматически при нажатии ОК.

- *Импорт Bitmap-файлов.* Импорт графических файлов до 30 КБ формата BMP позволяет заносить в чертежи проекта фирменные знаки и символы.

- *Управление проектами.* В МЕГА-версии программы расширенное управление проектами позволяет при помощи комбинированных долевого проекта (КДП) разрабатывать электротехническую и монтажную документацию для больших производств, разделяя ее по кодам установок и/или позиций. Каждая часть КДП может содержать до 999 листов форматов А4-А0, позволяя тем самым создавать практически не ограниченные по объему документы.

- *Браузер материальных средств.* Браузер материальных средств или просто материалов наглядно представляет информацию обо всех элементах и конструкциях проекта, позволяя заодно переуказать для них номера артикулов, функциональные тексты и находить искомые элементы. Внесенные изменения при нажатии ОК сразу переносятся к соответствующим деталям, ускоряя корректировку их параметров.

- *Иностранный перевод.* Содержащиеся в проектах тексты могут быть полуавтоматически представлены дополнительно на 2 иностранных языках. Загрузив при помощи одной команды тексты из проекта во встроенный WSCAD-словарь формата Access-97, вы можете передать его как базу данных для перевода. Дополнение текстов основного языка в проекте переведенными словами словаря осуществляется также автоматически.

- *Импорт/экспорт данных, привязка к САПР печатных плат.* В Wscad существует также возможность создания списков электрических соединений проекта в форматах популярных САПР для дальнейшей разработки печатных плат. Помимо этого возможен цветной импорт/экспорт чертежей в формате DXF (например, для привязки к AutoCAD) и HPGL (формат данных плоттеров).

ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ОБЗОР СИСТЕМ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ САПР СМ

ELECTRONICS WORKBENCH

Система схемотехнического моделирования Electronics Workbench предназначена для моделирования и анализа электрических схем, рис.1. Правильно говорить: система моделирования и анализа электрических схем Electronics Workbench, но для краткости здесь и далее мы будем называть её программой.

Программа Electronics Workbench позволяет моделировать аналоговые, цифровые и цифро-аналоговые схемы большой степени сложности. Имеющиеся в программе библиотеки включают в себя большой набор широко распространенных электронных компонентов. Есть возможность подключения и создания новых библиотек компонентов.

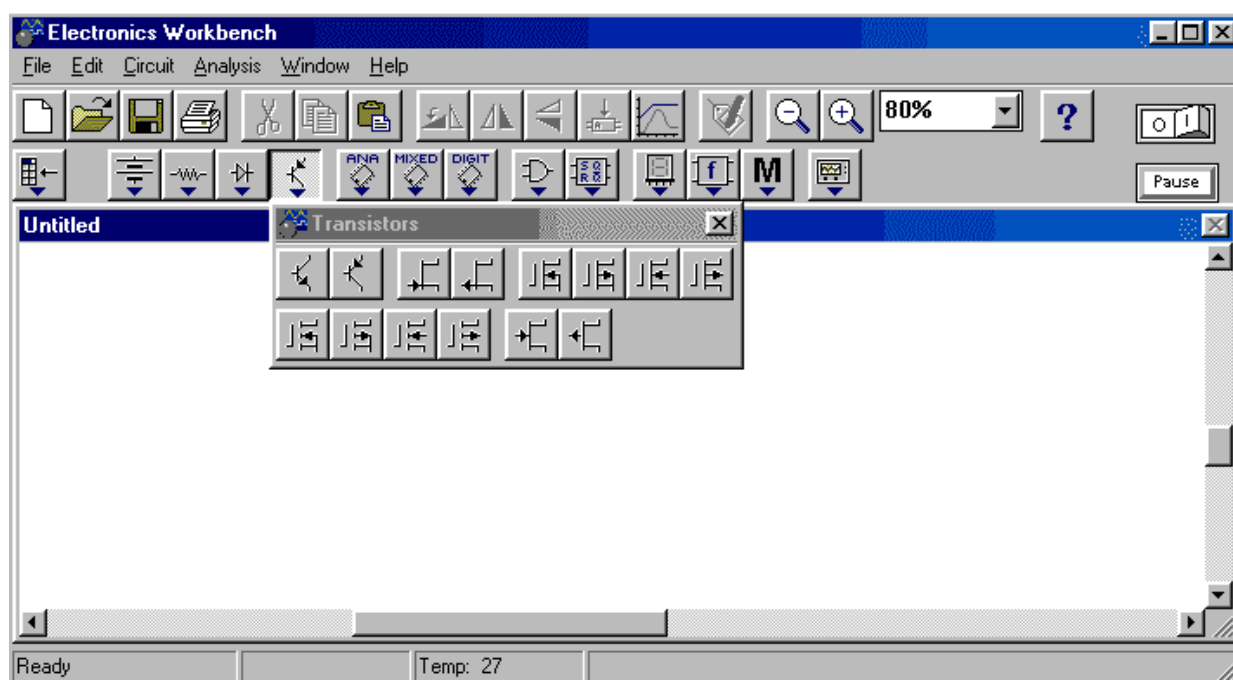


Рис. 1

Параметры компонентов можно изменять в широком диапазоне значений. Простые компоненты описываются набором параметров, значения которых можно изменять непосредственно с клавиатуры, активные элементы – моделью, представляющей со-

бой совокупность параметров и описывающей конкретный элемент или его идеальное представление.

Модель выбирается из списка библиотек компонентов, параметры модели также могут быть изменены пользователем. Широкий набор приборов позволяет производить измерения различных величин, задавать входные воздействия, строить графики. Все приборы изображаются в виде, максимально приближенном к реальному, поэтому работать с ними просто и удобно.

Результаты моделирования можно вывести на принтер или импортировать в текстовый или графический редактор для их дальнейшей обработки. Программа Electronics Workbench совместима с программой P-SPICE, то есть предоставляет возможность экспорта и импорта схем и результатов измерений в различные её версии.

Основные достоинства программы

- *Экономия времени* – работа в реальной лаборатории требует больших временных затрат на подготовку эксперимента. Электронная лаборатория позволяет сделать изучение электрических схем более доступным.

- *Достоверность измерений* – в реальной элементной базе не существует двух совершенно одинаковых элементов, все элементы имеют большой разброс значений, что приводит к погрешностям в ходе проведения эксперимента. В Electronics Workbench все элементы описываются строго установленными параметрами, поэтому каждый раз в ходе эксперимента будет повторяться результат, определяемый только параметрами элементов и алгоритмом расчета.

- *Удобство проведения измерений* – ошибки в реальной лаборатории порой очень дорого обходятся экспериментатору – работая в электронной лаборатории Electronics Workbench, экспериментатор застрахован от случайного поражения током, а приборы не выйдут из строя из-за неправильно собранной схемы.

- *Широкий спектр приборов*. Благодаря программе Workbench в распоряжении пользователя имеется такой широкий набор приборов, который вряд ли будет доступен в реальной жизни. Таким образом, у Вас всегда имеется уникальная возможность для пла-

нирования и проведения широкого спектра исследований электронных схем при минимальных затратах времени.

- *Графические возможности.* Сложные схемы занимают достаточно много места, изображение при этом стараются сделать более плотным, что часто приводит к ошибкам в подключении проводников к элементам цепи. Electronics Workbench позволяет разместить схему таким образом, чтобы были чётко видны все соединения элементов и одновременно вся схема целиком. Возможность изменения цвета проводников позволяет сделать схему более удобной для восприятия. Можно отображать различными цветами и графики, что очень удобно при одновременном исследовании нескольких зависимостей.

- *Стандартный интерфейс Windows.* Программа Electronics Workbench использует стандартный интерфейс Windows, что значительно облегчает её использование. Интуитивность и простота интерфейса делают программу доступной любому, кто знаком с основами использования Windows.

- *Совместимость с программой P-SPICE.* Программа Electronics Workbench базируется на стандартных элементах программы SPICE. Это позволяет экспортировать различные модели элементов и проводить обработку результатов, используя дополнительные возможности различных версий программы P-SPICE.

Компоненты и проведение экспериментов

В библиотеки компонентов программы входят пассивные элементы, транзисторы, управляемые источники, управляемые ключи, гибридные элементы, индикаторы, логические элементы, триггерные устройства, цифровые и аналоговые элементы, специальные комбинационные и последовательные схемы.

Активные элементы могут быть представлены моделями как идеальных, так и реальных элементов. Возможно также создание своих моделей элементов и добавление их в библиотеки элементов. В программе используется большой набор приборов для проведения измерений: амперметр, вольтметр, осциллограф, мультиметр, Боде-плоттер (графопостроитель частотных характеристик схем), функциональный генератор, генератор слов, логический анализатор и логический преобразователь.

Анализ схем Electronics Workbench может проводить анализ схем на постоянном и переменном токах. При анализе на постоянном токе определяется рабочая точка схемы в установившемся режиме работы. Результаты этого анализа не отражаются на приборах, они используются для дальнейшего анализа схемы. Анализ на переменном токе использует результаты анализа на постоянном токе для получения линеаризованных моделей нелинейных компонентов.

Анализ схем в режиме АС может проводиться как во временной, так и в частотной областях. Программа также позволяет производить анализ цифро-аналоговых и цифровых схем. В Electronics Workbench можно исследовать переходные процессы при воздействии на схемы входных сигналов различной формы.

Возможности Electronics Workbench:

- выбор элементов и приборов из библиотек;
- перемещение элементов и схем в любое место рабочего поля;
- поворот элементов и групп элементов на углы, кратные 90 градусам;
- копирование, вставка или удаление элементов, групп элементов, фрагментов схем и целых схем;
- изменение цвета проводников;
- выделение цветом контуров схем для более удобного восприятия;
- одновременное подключение нескольких измерительных приборов и наблюдение их показаний на экране монитора;
- присваивание элементу условного обозначения;
- изменение параметров элементов в широком диапазоне.

Все операции производятся при помощи мыши и клавиатуры. Управление только с клавиатуры невозможно.

Механизмы настройки приборов:

- изменять шкалы приборов в зависимости от диапазона измерений;
- задавать режим работы прибора;

- задавать вид входных воздействий на схему (постоянные и гармонические токи и напряжения, треугольные и прямоугольные импульсы).

Графические возможности программы позволяют:

- одновременно наблюдать несколько кривых на графике;
- отображать кривые на графиках различными цветами;
- измерять координаты точек на графике;
- импортировать данные в графический редактор, что позволяет произвести необходимые преобразования рисунка и вывод его на принтер.

Electronics Workbench позволяет использовать результаты, полученные в программах P-SPICE, PCB, а также передавать результаты из Electronics Workbench в эти программы. Можно вставить схему или её фрагмент в текстовый редактор и напечатать в нем пояснения или замечания по работе схемы.

HYPERSIGNAL BLOCK DIAGRAM

Назначение и область применения.

Программа HyperSignal Block Diagram / RIDE (Real-time Integrated Development – возможность подключения аппаратуры для обработки сигналов в реальном времени) предназначена для моделирования аналоговых и цифровых устройств, заданных функциональными схемами.

Hyperception, Inc. была образована в 1984 г., с целью разработки усовершенствованного прикладного программного обеспечения, которое объединило бы мощность и эффективность IBM PC с программными методологиями.

Пакет предназначен для функционального моделирования электронных схем и применяется в технических лабораториях фирм-производителей электронных компонентов и устройств.

Технические характеристики системы.

Пакет функционального моделирования схем HyperSignal Block Diagram включает в себя:

- графическую оболочку;
- генератор текста исходной программы;

- различные библиотеки и другие компоненты.

Пакет базируется на открытой программной архитектуре.

Существует возможность добавления собственных функций, использующих стандартный C/C++ компилятор – подобно Microsoft Visual C/C++.

HyperSignal Signal Block Diagram 4.1 – полная визуальная среда конструирования, которая учитывает исчерпывающую динамическую системотехнику и моделирование (PC разработка).

HyperSignal Block Diagram – наиболее исчерпывающая прикладная среда, доступная для разработки и тестирования проектов.

С этим мощным и дешевым продуктом для визуального конструирования, моделирования, и разработки в реальном масштабе времени клиенты получают преимущество перед другими средствами визуального конструирования для различных областей технологии.

Ее функциональные возможности сопоставимы с программой System View в области моделирования и уступают известному пакету LabView фирмы National Instruments при создании виртуальных инструментов.

Ее отличительные особенности – малые требования к аппаратным ресурсам ПК (процессор 80386 и выше, ОЗУ 4 Мб, доступное пространство на жестком диске 25 Мб), простота интерфейса и большое количество библиотек из области обработки сигналов с возможностями пополнения и подключения программ на Си, в частности, имеются средства синтеза цифровых фильтров.

По Internet можно получить оценочную версию HyperSignal Block Diagram 4.0, поставляемую с библиотекой, содержащей 40 функций. Имеется электронный учебник в формате Acrobat Reader фирмы Adobe. Профессиональная версия содержит библиотеку из 300 функций для моделирования и примерно 500 функций для работы в реальном времени. Дополнительно поставляется транслятор Hyperception Application Interface для генерации выполняемых модулей (аналог Application Builder из пакета LabView). Оценочная версия позволяет работать примерно 30

мин, но позволяет сохранить внесенные в схемы изменения, после чего ее можно запустить вновь.

Универсальная программа проектирования электронных устройств APLAC

В процессе проектирования электронных устройств приходится использовать целый набор программ.

На этапе разработки структурной схемы применяются такие известные программы, как SysCalc, System View, SIMULINK, LabView.

При создании принципиальных схем – PSpice (в составе пакета DesignLab), Micro-Cap, Electronics Workbench, а при проектировании устройств СВЧ – специализированные программы Super Compact, Touchstone, Libra и др.

Все эти программы довольно дорогостоящи, поэтому большой интерес, особенно в технических университетах, вызывают универсальные программы, к которым относится APLAC.

Программа APLAC была разработана в 1988 г. профессором Хельсинского университета Мартти Валтоненом, а затем доработана сотрудниками лаборатории теории цепей этого университета совместно со специалистами Nokia Research Center и Nokia Mobile Phones.

Она предназначена для проектирования и моделирования электрических схем и систем во временной и частотной областях. В состав этих схем и систем могут входить как цифровые, так и аналоговые компоненты, в том числе устройства диапазона СВЧ.

Выполняются 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.

Этот набор довольно стандартен, но только APLAC позволяет выполнять такие расчеты, не прибегая к помощи других программ. Помимо этого в APLAC имеется ряд интересных особенностей, о которых речь пойдет ниже. Еще одна важная особенность APLAC – 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 входит подпрограмма расчета трехмерных электромагнитных полей микрополосковых конструкций и других устройств диапазона СВЧ. Последнее, на что следует обратить внимание, это возможность ввода результатов измерений и вывода управляющих сигналов с помощью интерфейсных плат стандарта IEEE-488 (GPIB, HP-IB), как в системе LabView.

SERENADE

Назначение и области применения.

Система проектирования SERENADE 8.0 представляет собой специализированный пакет программ, ориентированный на разработку высокочастотных систем.

Под высокочастотными системами имеются в виду системы, работающие в области радиочастот и микроволн. SERENADE 8.0 позволяет синтезировать электрические схемы, моделировать электромагнитные процессы, а также разрабатывать конструктивное исполнение проектируемых устройств.

Инструментальные средства рассматриваемой программной системы объединены в универсальную оболочку, позволяющую разработчику свободно перемещаться от одного этапа проектирования к другому, что делает процесс проектирования весьма удобным. Помимо этого, любая программа моделирования из состава пакета может использоваться автономно. В общем, SERENADE представляет собой гибкую интегрированную САПР.

Состав пакета SERENADE:

- ANSOFT HFSS (High Frequency Structure Simulator) – программа моделирования ВЧ-систем.

- **ENSEMBLE** (Planar Electromagnetic Field Simulator) – программа моделирования электромагнитных полей планарных структур.
- **HARMONICA** (Linear & Nonlinear Circuit Simulator) – программа моделирования линейных и нелинейных схем.
- **SYMPHONY** (Wireless & Wired System Simulator) – программа моделирования беспроводных и проводных систем.
- **ANSOFTLINKS** (Geometry and Design Translation) – средства совместимости с другими пакетами.

Краткие характеристики каждого модуля:

A) ANSOFT HFSS.

Данная программа позволяет проводить трехмерное моделирование электромагнитных полей. Она существенно облегчает труд разработчика в проектировании ВЧ-устройств, таких как антенны, волноводы, микроволновые приборы и прочее. В результате моделирования подобных устройств инженер получает в свое распоряжение достаточный набор волновых характеристик проектируемого узла, которые в дальнейшем могут использоваться для программ моделирования линейных и нелинейных схем (**HARMONICA**). Помимо численных характеристик ВЧ-устройств, эта программа выдает наглядную картину происходящих электромагнитных процессов. Например, при проектировании волновода пользователь может посмотреть на процесс распространения электромагнитных волн в любом сечении.

Б) ENSEMBLE.

А эта программа предназначена для моделирования электромагнитных полей при разработке беспроводных и радиочастотных схем, а также планарных (плоских) антенн. При моделировании подобных устройств применяется метод моментов (Method of Moments), который рекомендуется использовать при проектировании многослойных структур, типа печатных плат (**PCB** – Printed Circuit Board), микроволновых интегральных схем (**MMIC** – Monolithic Microwave Integrated Circuit) и плоских антенн.

В распоряжение проектировщика предоставляются достаточно мощные инструментальные средства моделирования вышеупомянутых ВЧ-устройств. Все это сочетается с удобным

пользовательским интерфейсом и развитыми связями с другими компонентами SERENADE. Моделируемые схемы могут быть нарисованы как во встроенном редакторе, так и импортированы из формата DXF (Autodesk's AutoCAD 2D geometry file format).

В) HARMONICA.

С помощью этой программы можно смоделировать работу линейных и нелинейных высокочастотных и беспроводных схем. В распоряжении разработчика имеется полный набор инструментальных средств, позволяющий проводить оптимизацию схем, настройку, статистический анализ и прочее. Все это в сочетании с удобным интерфейсом значительно повышает эффективность деятельности разработчика.

Вдобавок ко всему имеется довольно обширная библиотека стандартных компонентов, включающая более 100 тысяч наименований пассивных и активных элементов. Пользователь получает в свое распоряжение модели резисторов, конденсаторов, диодов, катушек индуктивности и транзисторов, выпускаемых наиболее известными мировыми производителями.

Утилиты, прилагаемые к данной программе, дают разработчику дополнительные возможности для синтеза фильтров, а также для организации распределенных проектов с использованием компьютерных сетей.

Не оставлен без внимания и процесс автоматизации размещения компонентов электрических схем. Генерируемый программой вариант размещения компонентов имеет обратную связь с созданной ранее электрической схемой. Изменив размещение можно посмотреть, что произойдет со схемой (в отношении ее характеристик). По окончании компоновки пользователь получает в свое распоряжение средства трансляции своего проекта в какой-либо формат промышленного стандарта. Следует сказать, что набор доступных форматов весьма богат.

Г) SYMPHONY.

Эта программа дает разработчику возможность моделирования аналоговых и цифровых высокочастотных электрических схем (в том числе беспроводных). Здесь существует три режима: моделирование аналоговых, цифровых и смешанных схем. Пользователь достаточно быстро может построить принципиальную схему, выбирая нужные функциональные блоки из библиотек.

Среди таких блоков можно найти каналные кодеры, аналоговые и цифровые фильтры, усилители, генераторы и многое другое. Для того чтобы начать моделирование подобной схемы, нужно лишь задать несколько параметров для каждого из используемых блоков.

Проводя анализ линейных и нелинейных схем, пользователь может воспользоваться специальным инструментарием, который позволяет получить такие характеристики системы, как коэффициент усиления и картину шумов как во временной, так и в частотной области.

Помимо библиотечных блоков, пользователь может включать в схему и свои функциональные блоки, описанные на уровне компонентов. Для создания таких блоков можно использовать те или иные средства среды проектирования SERENADE.

Д) ANSOFTLINKS.

Это средства для совместимости с программными продуктами других фирм:

- Cadence@Allegro.
- Cadence APD.
- Xynetix Encore™.
- Mentor Board Station®.
- AutoCAD.

MMICAD

Назначение и области применения

Диапазон СВЧ все шире используется в системах связи и управления. Совсем скоро тактовая частота компьютеров также перейдет в СВЧ-диапазон. Системы автоматизированного проектирования СВЧ-устройств ранее использовались исключительно в разработках специального назначения; теперь же они все чаще требуются в гражданских конструкторских бюро. Все большая и большая работа по проектированию и созданию конструкторской документации ложится на компьютеры, совмещенные с измерительными стендами, автоматами по изготовлению фотошаблонов и плоттерами. Каждые два-три года появляются все более совершенные программные продукты, предназначенные для проектирования устройств СВЧ. Система MMICAD (Monolithic and

Microwave Integrated Circuit Analysis and Design – универсальная программа анализа и оптимизации активных и пассивных устройств СВЧ) канадской фирмы Optotek (<http://www.optotek.com/>) появилась на рынке в начале 1996 года. Она отличается большой универсальностью, совместимостью с существующими программами, точностью, удобством работы и новыми возможностями проектирования многослойных устройств СВЧ.

MMICAD предназначена для проектирования всех типов электронных устройств, работающих от низких до СВЧ-частот, вплоть до оптического диапазона. Это одна из первых программ, предназначенных для проектирования однослойных и многослойных интегральных схем. Библиотека MMICAD содержит более 250 элементов интегральных СВЧ-схем, включая элементы оптоволоконных линий, прошедших тщательное тестирование. Хотя MMICAD в основном предназначена для проектирования линейных СВЧ-схем, ее можно использовать в качестве программы моделирования и нелинейных цепей, таких, как малошумящие СВЧ-усилители с большим динамическим диапазоном, смесители и приемопередающий тракт в целом. Это достигается путем расчета линеаризованных моделей полевых транзисторов и других активных элементов в формате SPICE с помощью утилит CamFet и Lasimo.

Microwave Office

Назначение и область применения

Пакет Microwave Office производства компании Applied Wave Research ознаменовал собой появление нового поколения программного обеспечения для проектирования СВЧ-систем. Пакет Microwave Office позволяет выполнять анализ СВЧ-цепей со слабыми нелинейностями методом рядов Вольтерра с привлечением модуля электромагнитного моделирования многослойных 3D-структур и планарных антенн EMSight.

Инструменты СВЧ-проектирования позволяют разработчику смоделировать эффекты, связанные с изменением частоты, оптимизировать проект, с целью подавить эти эффекты или использовать их себе на пользу. Эти инструменты представляют собой практическую альтернативу изготовлению схем-прототипов, зна-

чительно ускоряют регулировку, а также помогают понять суть возникающих проблем.

Техническая характеристика системы

Общая характеристика пакета Microwave Office:

- графический интерфейс, выполненный в стиле Microsoft Office 97;
- многооконность, настройка расположения служебных окон;
- поддержка OLE 2.0;
- для решения задач моделирования в продуктах используется собственная библиотека High Math Object Library;
- подключение пользовательских объектов в виде динамических библиотек DLL.

Продукт Microwave Office объединяет в себе:

- программу моделирования линейных или приближенно линейных схем **VoltaireLS**;
- пакет электромагнитного моделирования EMSight 2.0;
- пакет линейного и нелинейного анализа СВЧ – схем VoltaireXL.

Ниже приводятся краткие характеристики данных пакетов.

Пакет VoltaireLS

Пакет VoltaireLS представляет собой программу моделирования линейных или приближенно линейных схем. Она интегрирована в систему Microwave Office и активируется каждый раз, когда на отображение назначаются результаты анализа, которые можно получить без использования нелинейных моделей.

Наиболее распространенной линейной задачей является расчет частотных характеристик пассивных устройств или мало-сигнальный анализ активных устройств с использованием линеаризованных библиотечных моделей активных элементов.

Такой анализ, как правило, проводится очень быстро. Например, расчет частотных характеристик фильтра на пяти связанных микрополосковых линиях занимает менее секунды.

При добавлении какой-либо новой зависимости к отображаемым результатам, в общем случае, не требуется повторного

перезапуска системы на расчет – она сразу появится на графике. Однако перезапуск понадобится, если эта зависимость выходит за рамки ранее выбранного метода анализа.

Разработанный исключительно для высоко- и сверхвысоко-частотных приложений, пакет работает значительно быстрее всех существующих продуктов. Высокая скорость моделирования достигается вследствие объектно-ориентированного подхода, а также благодаря тому, что система уравнений схемы формируется непосредственно из схематического преобразования, без промежуточного преобразования в файл списка соединений, в отличие от программ, которые имеют программное ядро анализа, построенное по стандарту системы SPICE (например пакеты ADS и Serenada).

Пакет VoltaireXL

Пакет VoltaireXL представляет собой программу нелинейного анализа схем. Он так же глубоко интегрирован в систему Microwave Office, как и линейный VoltaireLS, и активируется всякий раз, когда на отображение назначаются результаты нелинейного анализа или когда в приближенно линейной задаче какой-либо параметр схемы требует нелинейного расчета.

Пакет EMSight 2.0

Несмотря на то что в библиотеках пакета содержится более 450 линейных и нелинейных моделей элементов, всегда может оказаться, что правильная модель используемого устройства отсутствует или эффект близкого расположения элементов подрывает точность уже имеющейся модели. В этом случае пользователи могут обратиться к третьему компоненту пакета Microwave Office – модулю полного электродинамического анализа EMSight.

Здесь для анализа поведения электромагнитных структур используется метод моментов Галеркина, который, по мнению разработчиков пакета, представляет собой наиболее точный и устойчивый алгоритм электромагнитного анализа.

Структура, построенная из набора проводящих и резистивных полигонов, а также межслойных соединений произвольной геометрической формы, анализируется внутри ограниченной многослойной области прямоугольной формы.

Количество анализируемых слоев, межслойных соединений и внешних портов теоретически неограниченно.

Для анализа СВЧ-структур в широком диапазоне частот в системе применен передовой метод быстрого частотного свопирования (FFS), который позволяет на порядок сократить время моделирования по сравнению с обычным методом последовательного перебора частотных точек.

Алгоритм метода FFS позволяет экстраполировать частотную характеристику структуры в широком диапазоне частот всего по одной частотной точке в силу аналитической природы линейных электромагнитных задач.

Алгоритм FFS вычисляет передаточную функцию схемы и ее производные по частоте, причем порядок дифференцирования определяется пользователем (не более 12). Все это затем используется для вычисления доминирующих полюсов и нулей передаточной функции вблизи частот анализа. Для относительно простых структур, размеры которых меньше длины волны, доминирующие полюса и нули передаточной функции обеспечивают точную экстраполяцию частотной характеристики в широкой полосе частот.

Мощные графические возможности модуля электродинамического анализа позволяют пользователю наблюдать цветное трехмерное анимационное изображение токов высокой частоты, на котором отображается не только амплитуда, но и направление этих токов, что позволяет получить новое представление о поведении СВЧ-структур.

CADElectro (НПП «ИНТЕРМЕХ» и НПП «ТЕХНИКОН»)

Пакет прикладных программ CADElectro предназначен для автоматизации проектных работ при создании электрических систем управления на базе контактной аппаратуры и программируемых контроллеров. Система CADElectro обеспечивает автоматизацию проектирования принципиальных электрических схем и монтажной документации.

Обширная база данных, содержащая необходимую информацию о более чем 70 типах аппаратов, открыта для расширения и адаптации к применимости пользователя. Возможно использо-

вание базы данных в качестве справочного материала конструктора. База данных CADElectro организована на основе системы управления базами данных IMBASE.

Выходными рабочими документами являются:

- схема электрическая принципиальная (Э3);
- перечень элементов (ПЭ3);
- схемы соединений (Э4, Э6);
- схемы расположений (Э7);
- сборочный чертеж (СБ);
- спецификация сборочной единицы;
- ведомость покупных изделий;
- ведомость содержания драгметаллов.

На стадии проектирования принципиальной электрической схемы максимально автоматизированы все формальные процедуры:

- определение и маркировка потенциальных узлов;
- простановка монтажных зажимов аппаратов;
- прямая и обратная адресация аппаратов;
- автоматический выбор пускозащитной аппаратуры в силовой цепи двигателей.

Значительно облегчает проектирование возможность создания макроопределений – типовых участков схем, вызываемых из базы данных или формируемых в процессе проектирования.

Конструктору предоставляется возможность проектирования системы управления, разбивая проект на отдельные функциональные узлы, что позволяет сократить время проектирования, создать систему заимствования.

Проводится автоматический контроль возможных ошибок конструктора как во время проектирования, так и по его завершению. Виды контроля:

- переполнение контактного набора аппарата;
- отсутствие катушек для контактов или контактов у катушек;
- обрыв или короткое замыкание в цепи тока и др.

Проектирование электромонтажной и текстовой документации осуществляется в основном по данным, введенным или полученным при проектировании принципиальной электрической схемы.

В основу проектирования перечня документов положен генератор текстовых документов AVS.

Схема электрическая соединений выполняется в табличной форме по отдельным конструктивным элементам и сборочным единицам.

Система ведения архивов конструкторской документации SEARCH, особенно при использовании сетевого варианта системы, позволяет организовать взаимосвязь проектов.

В настоящее время ведутся работы по связи CADElectro с программным обеспечением программируемых контроллеров SIEMENS, OMRON, HITACHI, что позволит решить задачу однократного ввода исходных данных при проектировании управляющей программы программируемых контроллеров и проводной части схемы.

CADElectro работает в среде AutoCAD.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3. ОБЗОР СИСТЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ MATLAB

Введение в MATLAB

MATLAB сегодня – это современная математическая среда для профессиональной работы в широком диапазоне научных, инженерных, финансово-экономических и иных приложений. Простота и удобство использования мощных вычислительных средств этого программного пакета дают возможность пользователю сосредоточиться на своих задачах без затрат времени и сил на традиционное «подробное» программирование.

MATLAB это интерактивная система, языком которой являются простые команды, вызывающие готовые вычислительные алгоритмы. Вместе с тем, язык MATLAB максимально приближен к обычной форме записи математических выражений, что существенно облегчает его освоение и последующую работу. MATLAB имеет мощные средства для процедурного, объектно-ориентированного программирования, отладки программ и разработки пользовательского интерфейса. Встроенная библиотека объединяет более 500 математических функций с эффективными средствами двух- и трехмерной визуализации. В дополнение к этому, пользователям предоставлена возможность свободно дополнять эту библиотеку своими функциями: специализированными программами, написанными на языке MATLAB либо C или Fortran посредством AP интерфейса (Application Program Interface). Коды MATLAB тщательно оптимизированы, что обуславливает его высокие вычислительные характеристики, особенно при работе с массивами данных.

В настоящее время MATLAB de facto стал стандартом, на который ориентируются в своей работе как пользователи, так и разработчики программного обеспечения. Этот программный пакет используется, можно сказать, повсеместно, включая многие десятки и сотни промышленных компаний, государственных учреждений, банков, университетов, колледжей и частных лиц всего мира.

Отличительной особенностью MATLAB является постоянно расширяемое компанией семейство программ, называемых приложениями или модулями (Toolboxes). Эти программы являются

специализированными библиотеками М-файлов и предназначены для работы в отдельных предметных областях. К примеру, без комментариев легко понять назначение таких приложений, как: «Сплайны» (Spline Toolbox), «Оптимизация» (Optimization Toolbox), «Финансы» (Financial Toolbox) или «Дифференциальные уравнения в частных производных» (Partial Differential Equation Toolbox). Имеются и многие другие, возможно, с не столь очевидными названиями, но каждое из которых связано с законченным решением конкретного круга проблем.

Важную группу (семейство) образуют приложения, нацеленные на моделирование и подробный анализ динамических систем: дискретных, непрерывных и гибридных. Их значимость определяется не только предметом исследования (системы управления, связи, обработка сигналов и изображений, моделирование по входным и выходным данным, etc.), но и глубиной предлагаемой проработки проекта, использованием передовых методов анализа и представлением результатов расчета. Эти приложения дополняют друг друга, некоторые между собой связаны очень тесно. Но, по-видимому, в качестве базовых можно выделить следующие: SIMULINK, SIMULINK Real-Time Workshop, «Системы управления» (Control System Toolbox), «Идентификация систем» (System Identification Toolbox), «Обработка сигналов» (Signal Processing Toolbox), «Устойчивость систем» (Robust Control Toolbox).

Назначение и область применения

MATLAB – это высокопроизводительный язык для технических расчётов. Он включает в себя вычисления, визуализацию и программирование в удобной среде, где задачи и решения выражаются в форме, близкой к математической.

Типичное использование MATLAB – это:

- Математические вычисления.
- Создание алгоритмов.
- Моделирование.
- Анализ данных, исследование и визуализация.
- Научная и инженерная графика.

- Разработка приложений, включая создание графического приложения.

MATLAB – это интерактивная система, в которой основным элементом данных является массив. Это позволяет решать различные задачи, связанные с техническими вычислениями, особенно в которых используются матрицы и вектора, в несколько раз быстрее, чем при написании программ с использованием скалярных языков программирования, таких, как Си или Фортран.

Слово MATLAB означает матричная лаборатория (matrix laboratory). MATLAB был специально написан для обеспечения лёгкого доступа к LINPACK и EISPACK, которые представляют собой современные программные средства для матричных вычислений.

MATLAB развивался в течение нескольких лет, ориентируясь на различных пользователей. В университетской среде он представлял собой стандартный инструмент для работы в различных отраслях математики, машиностроения и науки в целом.

В промышленности MATLAB – это инструмент для высокопродуктивных исследований, разработок и анализа данных.

В MATLAB важная роль отводится специализированным группам программ, называемых *toolboxes*. Они очень важны для большинства пользователей MATLAB, так как позволяют изучить и применить специализированные методы. *Toolboxes* – это всесторонняя коллекция функций MATLAB, которые позволяют решать частные классы задач. *Toolboxes* применяется для обработки сигналов, систем контроля, нейронных сетей, нечеткой логики, вэйвлетов, моделирования и т.д.

Технические характеристики системы

Основные части системы MATLAB:

1. Язык MATLAB. Это язык матриц и массивов высокого уровня с управлением потоками, функциями, структурами данных, вводом-выводом и особенностями объектно-ориентированного программирования. Это позволяет как программировать в «не большем масштабе» для быстрого создания черновых программ, так и в «большем», для создания больших и сложных приложений.

2. Среда MATLAB. Это набор инструментов и приспособлений, с которыми работает пользователь или программист MATLAB. Она включает в себя средства для управления переменными в рабочем пространстве MATLAB, вводом и выводом данных, а также для создания, контроля и отладки М-файлов и приложений MATLAB.

3. Управляемая графика. Это графическая система MATLAB, которая включает в себя команды высокого уровня для визуализации двух- и трёхмерных данных, обработки изображений, анимации и иллюстрированной графики. Она также включает в себя команды низкого уровня, позволяющие полностью редактировать внешний вид графики, так же как при создании Графического Пользовательского Интерфейса (GUI) для MATLAB-приложений.

4. Библиотека математических функций. Это обширная коллекция вычислительных алгоритмов от элементарных функций, таких, как сумма, синус, косинус, комплексная арифметика, до более сложных, таких, как обращение матриц, нахождение собственных значений, функции Бесселя, быстрое преобразование Фурье.

5. Программный интерфейс. Это библиотека, которая позволяет писать программы на Си и Фортране, которые взаимодействуют с MATLAB. Она включает в себя средства для вызова MATLAB (динамическая связь), вызывая MATLAB как вычислительный инструмент и для чтения-записи Мат-файлов.

6. Simulink. Сопутствующая MATLAB программа – это интерактивная система для моделирования нелинейных динамических систем. Она представляет собой среду, управляемую мышью, которая позволяет моделировать процесс путём перетаскивания блоков диаграмм на экране и их манипуляцией. Simulink работает с линейными, нелинейными, непрерывными, дискретными, многомерными системами.

7. Blocksets – это дополнение к simulink, которое обеспечивает библиотеки блоков для специализированных приложений, таких, как связь, обработка сигналов, энергетические системы.

8. Real-Time Workshop. Эта программа позволяет генерировать С код из блоков диаграмм.

Структура системы, функциональные возможности и технологический процесс применения

Структурная схема системы

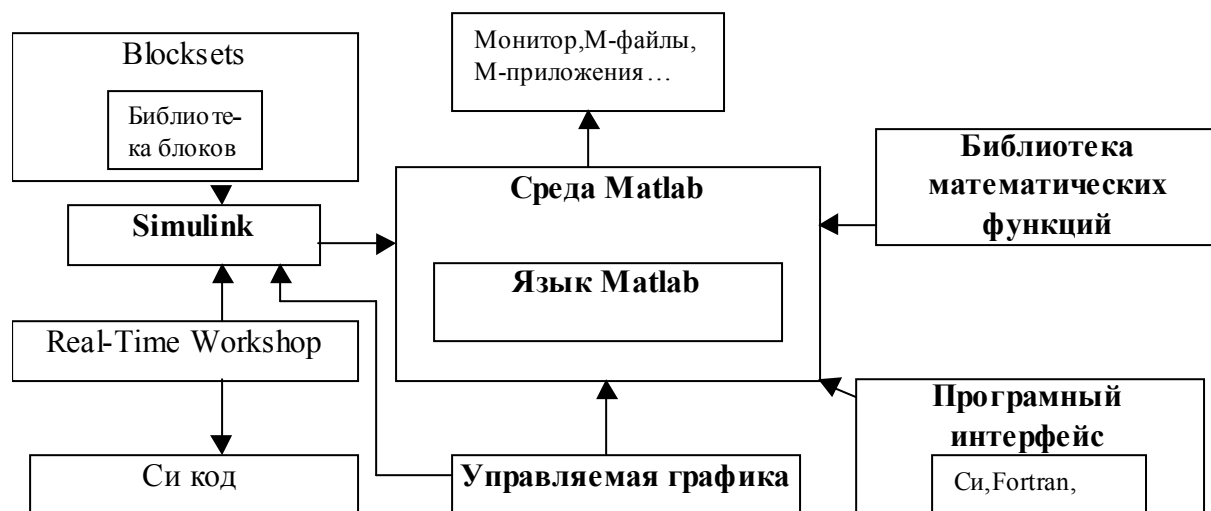


Рис. 1 – Структурная схема системы Matlab

Основные характеристики системы Matlab:

- предоставляет широкие возможности использования математических выражений, в отличие от многих других программ, эти выражения в MATLAB включают матрицы;
- имеет широкие возможности для графического изображения векторов и матриц, а также для создания комментариев и печати графики;
- включает в себя как совокупность переменных, созданных за время работы в MATLAB, так и набор файлов, содержащих программы и данные, которые продолжают существовать между сеансами работы;
- предоставляет комплекс функций низкого уровня, которые позволяют создавать и обрабатывать линии, поверхности и другие графические объекты. Эта система называется управляемая графика;
- предоставляет несколько способов для создания двигающейся, анимационной графики. Использование свойства

EraseMode предназначено для длинной последовательности простых графиков, где изменение от кадра к кадру минимально;

- развитая система справки и документации. Есть несколько способов получить текущую документацию по MATLAB:

- Команда help.
- Окно справки.
- MATLAB help desk.
- Текущие справочные страницы.
- Связь с MathWorks, Inc.

SIMULINK – приложение MATLAB, предназначенное для моделирования САУ

Представляет собой набор средств (М-файлов) для моделирования как линейных, так и нелинейных дискретных, аналоговых и гибридных динамических систем. Используется в качестве дополнительной опции MATLAB. SIMULINK предоставляет пользователю графический интерфейс для построения блочных или структурных схем. Большая библиотека блоков позволяет быстро создавать точные динамические модели, например, системы управления разрабатываемого технического объекта.

В SIMULINK включены современные алгоритмы интегрирования и широкий набор функций анализа модели. Вот некоторые из них: интерактивное моделирование процессов с «живым» отображением, моделирование методом Монте-Карло, балансировка (определение точек устойчивого равновесия), линеаризация. Открытая архитектура SIMULINK позволяет расширять средства моделирования, что подразумевает: создание пользовательских блоков и библиотек блоков с вашими собственными иконками, создание пользовательских интерфейсов с MATLAB, Fortran или С-программами пользователя, связь с уже существующими отлаженными Fortran или С-программами, генерацию С-кода из моделей пользователей, используя приложение SIMULINK Real-Time Workshop.

В сочетании с программным комплексом DADS SIMULINK предоставляет пользователю уникальные возможности для анализа динамического поведения механизмов (систем) с учетом пассивного и (или) активного управления.

Работа в среде SIMULINK начинается с простого нажатия специальной кнопки верхней панели MATLAB и далее сводится к набору или конструированию интересующей исследователя схемы из блоков графической библиотеки SIMULINK. Последующие действия заключаются в использовании команд, реализующих в численном или графическом виде алгоритмы обработки или анализа заданной схемы.

Simulink – это интерактивная среда для моделирования и анализа широкого класса динамических систем. Она предоставляет пользователю графический интерфейс для конструирования моделей из стандартных блоков при помощи технологии «drag-and-drop». Обширная библиотека блоков позволяет моделировать системы очень быстро, без написания единой строчки кода[2].

Основные средства SIMULINK для моделирования и анализа:

1. Обширная библиотека блоков для создания линейных и нелинейных, дискретных и непрерывных, гибридных, SISO и MIMO моделей.
2. Иерархическая структура моделей с неограниченной вложенностью.
3. Скалярные и векторные связи.
4. Средство для создания пользовательских блоков и библиотек.
5. Интерактивное моделирование с «живым» отображением на экране.
6. Семь методов интегрирования с фиксированным и переменным шагом.
7. Линеаризация.
8. Моделирование Монте-Карло.
9. Определение точек равновесия.
10. Различные способы вывода на экран и библиотека входных сигналов.

Интерактивное создание моделей

В SIMULINK входит большая библиотека блоков, позволяющая легко создавать модели. Вы просто переносите компоненты из библиотеки в новую модель и соединяете их с помощью мыши. Группируя блоки в подсистемы, можно создавать иерархические модели. Число блоков и связей в модели не ограничено.

Живое моделирование

Блоки диаграммы Simulink обеспечивают интерактивную среду для нелинейного моделирования. Можно выполнять моделирование с помощью меню или командной строки. Результаты моделирования отображаются в процессе работы. С помощью Simulink можно изменять параметры модели даже в тот момент, когда выполняется моделирование.

Настройка на пользователя

Simulink обладает открытой архитектурой и позволяет обогащать среду моделирования:

1. Создавать собственные блоки и библиотеки блоков с доступом из программ на MATLAB, FORTRAN или C.
2. Связывать блоки с разработанными ранее программами на FORTRAN и C, содержащими уже проверенные модели.

Интеграция с MATLAB и дополнительными пакетами программ

Поскольку Simulink обеспечивает и осуществляет непосредственный доступ к математическим, графическим и программным средствам MATLAB, можно анализировать данные и оптимизировать параметры моделей прямо из SIMULINK. Возможности дополнительных пакетов также могут быть использованы в ходе моделирования.

Специализированные библиотеки блоков

Библиотека блоков SIMULINK может быть дополнена специализированными библиотеками. Например, библиотека DSP Blockset используется для разработки алгоритмов цифровой обработки сигналов, библиотека Fixed-Point Blockset расширяет возможности Simulink для моделирования систем управления и цифровой фильтрации.

Генерация кода

С помощью Real-Time Workshop можно генерировать C-код моделей Simulink.

Communications Toolbox

Данный пакет представляет собой полный набор возможностей для разработки, анализа и тестирования моделей цифровых и аналоговых систем и устройств связи и передачи информации. Пакет содержит более 100 функций MATLAB и примерно 150 блоков Simulink для разработки и моделирования таких систем, как устройство радиосвязи, модемы и устройство хранения информации. Пакет является прекрасным средством для научных разработок, а также для обучения студентов по специальностям, связанным с информационными технологиями.

Основные свойства Communications Toolbox:

1. Кодирование и оцифровка.
2. Контроль ошибок при кодировании.
3. Модуляция и демодуляция.
4. Фильтрация при передаче и приеме.
5. Синхронизация, в том числе аналоговые и цифровые системы фазовой автоподстройки частоты.
6. Коллективный доступ.
7. Вычисление полей Галуа.
8. Генераторы сигналов.
9. Функции анализа и построения графиков.

Control System Toolbox

Данный пакет представляет собой коллекцию алгоритмов MATLAB для моделирования, анализа и проектирования систем автоматического управления. Функции пакета включают наиболее традиционные методы передаточных функций и современные методы пространства состояний. С помощью этого пакета можно моделировать и анализировать как непрерывные, так и дискретные системы. Частотный и временной отклик, диаграммы расположения нулей/полюсов могут быть быстро вычислены и отображены на экране.

Основные свойства Control System Toolbox:

Моделирование:

1. Непрерывные и дискретные системы.
2. Форматы моделей: передаточные функции, пространство состояний, нули-полюса.
3. Пространство линейных моделей систем.

4. Преобразование моделей в различные форматы.

Анализ:

1. Полный набор средств для ММО-систем.
2. Временные характеристики: передаточная и переходная функции, реакция на произвольное воздействие.
3. Частотные характеристики: диаграммы Боде, Николса и др.

Проектирование:

1. Разработка обратных связей.
2. Проектирование LQR/LQE-регуляторов.
3. Характеристики моделей: управляемость, наблюдаемость, понижение порядка моделей.
4. Поддержка систем с запаздыванием.

Excel Link

Данный пакет объединяет вычислительные и графические возможности MATLAB с возможностями электронной таблицы EXCEL, самой распространенной электронной таблицы для WINDOWS.

Основные свойства Excel Link:

1. «Живая» связь MATLAB-EXCEL.
2. Двусторонний обмен данными между MATLAB-EXCEL.
3. Просмотр, редактирование и обмен данных MATLAB в EXCEL.
4. Анализ данных EXCEL в MATLAB.
5. Выполнение функций MATLAB прямо из EXCEL.
6. Подготовка EXCEL-приложений.

Identification Toolbox

Данный пакет представляет специализированные средства для идентификации линейных динамических систем по их временному или частотному отклику. Частотные методы направлены на идентификацию непрерывных систем, что является мощным дополнением к более традиционной дискретной методике. Методы пакета могут быть применены к таким задачам, как моделирование электрических, механических и акустических систем.

Основные свойства Identification Toolbox:

1. Периодические возмущения, пик-фактор, оптимальный спектр, псевдослучайные и дискретные двоичные последовательности.
2. Расчет доверительных интервалов амплитуды/фазы и нулей/полюсов.
3. Идентификация непрерывных и дискретных систем с неизвестным запаздыванием.
4. Диагностика модели, включая моделирование и вычисление невязок.
5. Преобразование моделей в формат System Identification и обратно.

Financial Toolbox

Данный пакет является основой для решения в MATLAB множества финансовых задач, от простых вычислений до полномасштабных распределённых приложений. Он может быть использован для расчёта процентных ставок и прибыли, анализа производных доходов и депозитов, оптимизации портфеля инвестиций.

Основные свойства Financial Toolbox:

1. Обработка данных.
2. Дисперсионный анализ эффективности портфеля инвестиций.
3. Анализ временных рядов.
4. Расчёт доходности ценных бумаг и оценка курсов.
5. Статистический анализ.
6. Анализ чувствительности рынка.
7. Калькуляция ежегодного дохода и расчёт денежного потока.
8. Методы начисления износа и амортизационных отчислений.

Fuzzy Logic Toolbox

Данный пакет обладает простым и хорошо обдуманым интерфейсом, позволяющим легко проектировать и диагностировать нечёткие модели. Обеспечивается поддержка современных методов нечёткой кластеризации и адаптивные нечёткие нейрон-

ные сети. Графические средства пакета позволяют интерактивно отслеживать особенности поведения системы.

Основные свойства Fuzzy Logic Toolbox:

1. Определение переменных, нечётких правил и функций принадлежности.
2. Интерактивный просмотр нечёткого логического вывода.
3. Современные методы: адаптивный нечёткий вывод с использованием нейронных сетей, нечёткая кластеризация.
4. Интерактивное динамическое моделирование в SIMULINK.
5. Генерация переносимого С-кода с помощью Real-Time Workshop.

Higher-Order Spectral Analysis Toolbox

Данный пакет содержит специальные алгоритмы для анализа сигналов с использованием моментов высшего порядка. Он представляет широкие возможности для анализа негауссовых сигналов, так как содержит алгоритмы, пожалуй, самых передовых методов для анализа и обработки сигналов.

Основные свойства Higher-Order Spectral Analysis Toolbox:

1. Оценка спектров высокого порядка.
2. Традиционный или параметрический подход.
3. Восстановление амплитуды и фазы.
4. Адаптивное линейное прогнозирование.
5. Восстановление гармоник.
6. Оценка Запаздывания.
7. Блочная обработка сигналов.

Image Processing Toolbox

Данный пакет предоставляет учёным и инженерам широкий спектр средств для цифровой обработки и анализа изображений. Будучи тесно связанным со средой разработки приложений MATLAB, этот пакет освобождает от длительных операций кодирования и отладки алгоритмов, позволяя сосредоточить усилия на решении основной научной или практической задачи.

Основные свойства Image Processing Toolbox:

1. Восстановление и выделение деталей изображений.
2. Работа с выделенным участком изображения.
3. Анализ изображения.

4. Линейная фильтрация.
5. Преобразование изображений.
6. Геометрические преобразования.
7. Увеличение контрастности важных деталей.
8. Бинарные преобразования.
9. Обработка изображений и статистика.
10. Цветовые преобразования.
11. Изменение палитры.
12. Преобразование типов изображений.

LMI Control Toolbox

Данный пакет обеспечивает интегрированную среду для постановки и решения задач линейного программирования. Предназначенный первоначально для проектирования систем управления, пакет позволяет решать любые задачи линейного программирования практически в любой сфере деятельности, где такие задачи возникают.

Основные свойства LMI Control Toolbox:

1. Решение задач линейного программирования: задачи совместности ограничений, минимизация линейных целей при наличии линейных ограничений, минимизация собственных значений.
2. Исследование задач линейного программирования.
3. Графический редактор задач линейного программирования.
4. Задание ограничений в символьном виде.
5. Многокритериальное проектирование регуляторов.
6. Проверка устойчивости: квадратичная устойчивость линейных систем, устойчивость по Ляпунову, проверка критериев Попова для нелинейных систем.

Mapping Toolbox

Данный пакет предоставляет графический и командный интерфейс для анализа географических данных, отображения карт и доступа к внешним источникам данных по географии. Кроме того, пакет пригоден для работы с множеством широко известных атласов. Все эти средства, в комбинации с MATLAB, предостав-

ляют пользователям все условия для работы с научными географическими данными.

Основные свойства Mapping Toolbox:

1. Визуализация, обработка и анализ графических и научных данных.
2. Более 60 проекций карт (прямые и инверсные).
3. Проектирование и отображение векторных, матричных и составных карт.
4. Графический интерфейс для построения и обработки карт и данных.
5. Глобальные и региональные Атласы данных и сопряжение с правительственными данными высокого разрешения.
6. Функции геостатистики и навигации.
7. Трехмерное представление карт со встроенными средствами подсветки и затенения.
8. Конверты для популярных форматов географических данных: DCW, TIGER, ETOPOS.

Model Predictive Control Toolbox

Данный пакет – полный набор средств для реализации стратегии предикативного управления. Эта стратегия была разработана для практических задач управления сложными многоканальными процессами при наличии ограничений на переменные состояния и управления. Методы предикативного управления используются в химической промышленности и для управления другими непрерывными процессами.

Основные свойства Model Predictive Control Toolbox:

1. Моделирование, идентификация и диагностика.
2. Поддержка MISO, MIMO, переходных характеристик, моделей пространства состояний.
3. Системный анализ.
4. Конвертирование моделей в различные формы представления (пространство состояний, передаточные функции).
5. Учебники и демонстрационные примеры.

μ -Analysis and Synthesis Toolbox

Данный пакет содержит функции для проектирования устойчивых систем управления. Пакет использует оптимизацию в

равномерной норме и сингулярный параметр μ . В версию 3 включён графический интерфейс для упрощения операций с блоками при проектировании оптимальных регуляторов.

Основные свойства μ -Analysis and Synthesis Toolbox:

1. Проектирование оптимальных в равномерной и интегральной норме регуляторов.
2. Оценка действительного и комплексного сингулярного параметра μ .
3. D-K интеграции для приближенного μ -символа.
4. Графический интерфейс для анализа отклика замкнутого контура.
5. Средства понижения порядка моделей.
6. Непосредственное связывание отдельных блоков больших систем.

Symbolic Math Toolboxes

Данный пакет позволяет пользоваться символьной математикой и вычислениями с плавающей точкой в MATLAB. Пакет включает вычислительное ядро пакета Maple V Release 4, разработанного фирмой Waterloo Maple Software. Пакет Extended Symbolic Math представляет пользователю дополнительную возможность программирования на Maple и обеспечивает доступ к специализированным библиотекам Maple. Пакеты Symbolic Math и Extended Symbolic Math позволяют пользователю легко комбинировать численные и символьные вычисления воедино без потери точности и скорости вычислений.

Основные свойства:

1. Вычисления.
2. Преобразования.
3. Линейная алгебра.

MATLAB Compiler

С его помощью можно автоматически генерировать оптимизированный C и C++ код для M-файлов. Транслируя код MATLAB на C и C++ , компилятор существенно ускоряет работу приложения.

Основные свойства:

1. Автоматическое конвертирование М-файлов в высококачественный С, С++ код.
2. Существенное повышение скорости выполнения программ.
3. Возможность встраивать код MATLAB в другие приложения, с использованием библиотек MATLAB С и С++Math.
4. Генерация хорошо аннотированного и переносимого С и С++ кода.
5. Возможность скрытия кода для обеспечения защиты запатентованных алгоритмов.

MATLAB C Math Library

Эта библиотека представляет пользователю набор объектных модулей MATLAB для выполнения наиболее употребительных математических алгоритмов для численных расчётов и процедур для анализа данных. Пользователь может применять эту библиотеку совместно с MATLAB Compiler для создания процедур MATLAB, работающих в каких-либо внешних приложениях, а также может использовать алгоритмы библиотеки MATLAB C Math в программных продуктах, работающих в других средах [2].

Основные свойства:

1. Матричная арифметика.
2. Сравнение матриц.
3. Решение линейных уравнений.
4. LU и QR разложения матриц, сингулярные числа и собственные значения.
5. Нахождение обратной матрицы, детерминанта и возведение матрицы в степень.
6. Элементарная математика.
7. Бета-, Гамма- функции, функция ошибки и эллиптические функции.
8. Статистика и анализ данных.
9. Нахождение корней многочленов.
10. Фильтры, свёртки, быстрые преобразования Фурье.
11. Интерполяция.
12. Операции над строками.
13. Ввод/вывод в файл.