

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Г.Н.Кулиш, Л.И.Макаров

§1. Автоматизация конструкторского этапа
проектирования печатных плат

Возрастание сложности устройств вычислительной техники и радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) приводит к такому увеличению трудоемкости процесса ее проектирования, что этот процесс становится невозможным без применения систем автоматизированного проектирования (САПр). При этом наибольший эффект может быть достигнут при комплексной автоматизации всех этапов процесса проектирования: структурного, логического, конструкторского, технического, надежностного и т.д.

На каждом этапе процесса проектирования возникает целый ряд сложных оптимизационных задач. Поэтому появляется необходимость постановки и исследования задач, отражающих специфику каждого этапа, выделения из них основных задач и разработки алгоритмов их решения. На этапе конструкторского проектирования основными задачами являются задачи размещения элементов устройств РЭА на печатной плате и трассировки их соединений. Рассмотрим эти задачи в упрощенной постановке.

Устройство РЭА может быть задано схемой, состоящей из множества элементов устройства и системы соединений (связок) их контактов. Геометрическими моделями элементов схемы и печатной платы обычно служат прямоугольники. Положение элемента на плате может быть задано координатами репера элемента в системе координат платы и ориентацией, т.е. углом поворота элемента относительно той же системы. Ориентация обычно выбирается кратной 90° . При размещении элементов на плате требуется выполнение некоторых условий,

в частности, все элементы должны находиться внутри платы, реперы элементов должны совпадать с узлами заданной на плате решетки размещения, не допускается наложения элементов друг на друга и на запрещенные зоны платы. При трассировке соединений схемы также нужно учитывать определенные требования, например, трассы должны проходить по линиям заданной на плате решетки трассировки.

В качественной постановке задачи размещения и трассировки состоят в следующем. В задаче размещения необходимо на плате найти такое размещение элементов схемы, которое удовлетворяет заданным условиям и позволяет реализовать все соединения схемы. В задаче трассировки необходимо для заданного размещения элементов на плате провести в соответствии с заданными условиями трассы, реализующие все соединения схемы.

Требование 100%-й реализации соединений схемы при формализации этих задач часто сводят к требованию построения трасс минимальной суммарной длины. Поскольку для нахождения точного решения задачи трассировки неизвестны эффективные методы, то в задаче размещения обычно используют не значение длины трассы, а ее эффективно вычисляемую оценку, зависящую от выбранной модели трассы [1].

В приведенной постановке задачи размещения и трассировки не содержат многие практически важные требования и условия, например, требования равномерности размещения элементов на плате, минимальности числа пересечений трасс, минимальности числа межслойных переходов и т.д. Однако и в упрощенной постановке эти задачи при их формализации могут быть отнесены к классу экстремальных комбинаторных задач и сведены к общему случаю задачи дискретного программирования.

Для решения таких задач при проектировании реальных устройств точные методы обычно не находят применения, поскольку

а) точные методы их решения являются неэффективными, т.е. имеют экспоненциальную сложность и не могут быть использованы для решения задач реальной размерности;

б) формальные модели, используемые при постановке задач, не адекватны реальным процессам и объектам проектирования, поэтому достижение точного решения поставленных задач не гарантирует получения наилучшего результата проектирования.

Размерности реальных задач проектирования имеют порядок $10^3 - 10^4$, поэтому для их практического решения необходима разра-

ботка быстродействующих приближенных алгоритмов, учитывающих специфику решаемых задач и обеспечивающих получение допустимого решения в приемлемое на практике время.

Автоматизации конструкторского этапа проектирования посвящена обширная литература и в этой области разработано большое количество как отдельных алгоритмов и программ, так и программно-аппаратных систем проектирования. Однако все известные, практически используемые системы ориентированы в основном на проектирование устройств с одинаковыми элементами, поскольку не имеют в своем составе эффективных модулей размещения разногабаритных элементов.

В отличие от устройств с одинаковыми элементами устройства РЭА с разногабаритными элементами реализуются на печатных платах, не имеющих регулярных позиций элементов, что приводит к невозможности использования алгоритмов размещения и трассировки, учитывающих регулярное расположение элементов.

При автоматизации конструкторского этапа проектирования устройств РЭА с разногабаритными элементами необходимо в структуре и схеме функционирования создаваемой САПр учесть вычислительные трудности основных задач этого этапа. Некоторые требования к САПр, вытекающие из учета вычислительной сложности задач, приведены ниже.

Формализация конструкторских, технологических, схемотехнических требований, условий и целей проектирования устройств РЭА на печатных платах приводит к сложным математическим моделям и оптимизационным задачам в общей постановке. Для решения этих задач в приемлемое время необходимо создание быстродействующих приближенных алгоритмов, каждый из которых, естественно, не может гарантировать получение результата, удовлетворяющего проектировщика. Поэтому САПр печатных плат должна содержать набор различных алгоритмов для решения задач с разными критериями оптимизации, при разных условиях и имеющих управляющие параметры, воздействующие на качество результата, т.е. алгоритмов, адаптируемых к условиям конкретной задачи.

Для управления процессом проектирования с целью воздействия на качество его результата САПр должна представлять оператору-проектировщику средства для изменения схемы функционирования как алгоритмов, так и самой системы и средства оперативного редактирования результатов работы алгоритмов, т.е. САПр должна иметь возможность работать в интерактивном режиме.

Кроме того, САПр должна быть инвариантной к изменению технологии и технических средств проектирования, т.е. допускать замену технологических параметров изготовления печатных плат и функционирование на различных ЭВМ.

Изложенные требования к системам частично реализованы в САПр печатных плат, разработанной в Институте математики СО АН СССР.

Инвариантность - программные модули САПр реализованы на языке высокого уровня ПЛ/И в ОС (версия 6.1) для ЕС ЭВМ; в процессе проектирования учитывается широкий круг технологических, конструктивных и схемотехнических требований к устройству; допускается изменение как технологических параметров, так и состава элементов, используемых в устройствах РЭА;

интерактивность - в системе допускается проектирование нескольких устройств одновременно, осуществляется контроль входной и выходной информации, обеспечивается оперативная работа с различными вариантами выходной информации модулей системы и их оперативное редактирование;

адаптивность - САПр содержит набор различных прикладных модулей, обеспечивает возможность изменения последовательностей их работы и воздействие на процесс проектирования с помощью управляющих параметров модулей.

Разработанная система автоматизированного проектирования печатных плат предназначена для автоматизации конструкторского этапа проектирования устройств радиоэлектронной аппаратуры на двуслойных печатных платах с односторонним расположением разногабаритных и одинаковых элементов [2,3].

САПр печатных плат, как программный продукт, состоит из следующих основных функциональных компонент: программное обеспечение и информационное обеспечение. Основу программного обеспечения составляет комплекс прикладных модулей, осуществляющих непосредственно проектирование печатной платы: размещение и коррекцию размещения разногабаритных элементов, размещение одинаковых элементов, маршрутную и волновую трассировку соединений. Основными компонентами информационного обеспечения являются: а) средства описания входной, рабочей и выходной информации системы и средства управления ее модулями; б) специализированный банк данных, состоящий из постоянной и переменной баз данных и поддерживающих их систем управления.

В разработке САПр печатных плат, кроме авторов, принимали участие Инлев В.И. (модуль грамматического контроля), Воробьева И.И. (модуль трансляции и сепарации данных), Кашин В.И. (модуль размещения разногабаритных элементов), Беллев Е.И. (модуль коррекции размещения разногабаритных элементов), Бессонов Ю.Е. (модуль размещения одинаковых элементов), Хрущев В.Г. (программы подготовки информации для трассировки соединений), Данков Е.В. (модуль маршрутной трассировки), Леоненко Ю.П. (модуль волновой трассировки), Алсынбаева Л.Г. (постоянный банк данных).

§2. Банк данных САПр печатных плат

Прикладные модули САПр печатных плат работают с прямоугольными моделями платы, ее запрещенных зон и элементов. Прямоугольник P со сторонами, параллельными осям координат (X, Y) , описывается двумя точками: левит - левая нижняя точка с координатами (x_d, y_d) : $x_d = \min x$, $y_d = \min y$ и правит - правая верхняя точка с координатами (x_p, y_p) : $x_p = \max x$, $y_p = \max y$; $x, y \in P$. В прямоугольнике платы начало ее системы координат совмещено с левитом. Если реальная плата не является прямоугольником, то моделью платы служит ее габаритный прямоугольник, в котором области, не принадлежащие плате, объявляются запрещенными зонами. Запрещенные зоны, являющиеся многосвязными непрямоугольными областями, должны быть покрыты прямоугольниками со сторонами, параллельными осям координат платы.

На плате задаются решетки размещения и трассировки с соответствующими шагами. Реперы размещенных элементов должны совпадать с узлами решетки размещения, а трассировка связей проводится по линиям решетки трассировки. Элементы проектируемого устройства могут иметь особые контакты: соединенные или эквивалентные. Два контакта элемента являются соединенными, если они электрически соединены между собой внутри элемента и, следовательно, всегда входят в одну связку. Два контакта, входящие в разные связки, эквивалентны, если при их взаимной замене в соответствующих связках функционирование устройства не нарушается (например, контакты резисторов, неполярных конденсаторов и т.д.).

2.1. Описание проектируемого устройства. Вся исходная информация о проектируемом устройстве должна быть сепарирована и средствами входного языка отображена во входные описания:

- таблицы спецификаций: имя проектируемого устройства; наименование элемента, состоящее из его имени и ключа для поиска соответствующей ему геометрической информации в библиотеке радиоэлементов; позиционные обозначения элементов принципиальной схемы с этими наименованиями; примечание, содержащее схемотехническую и технологическую информацию, не включенную в наименование (может отсутствовать в описании);

- печатной платы: имя проектируемого устройства; граница печатной платы, которая может быть либо прямоугольником, либо окружностью, либо совокупностью ломаных линий и дуг окружностей; габариты платы - длина, ширина и толщина; шаг трассировки и размещения; поля позиций (для размещения одинаковых элементов), задаваемые их денитами и праведами, шагами и количеством мультипликаций по осям координат платы, запрещенные узлы для размещения элементов с их позиционными обозначениями; границы объединенных запрещенных зон, описываемые аналогично границе платы; запрещенные зоны, номер слоя, тип запрета (для размещения или/и трассировки), конструктивный тип запрета; обязательными компонентами являются: имя проектируемого устройства, габариты платы, шаг размещения и трассировка;

- принципиальной схемы: имя проектируемого устройства; перечень номеров связей с их наименованиями, перечень позиционных обозначений элементов и номерами их контактов, включенными в связь; перечень звезд с их наименованиями, совпадающими с позиционными обозначениями соответствующих им элементов, и для каждого элемента перечень его контактов и связей, в которые они входят; перечень связей либо перечень звезд может отсутствовать;

- указаний конструктора: имя проектируемого устройства; перечень позиционных обозначений фиксированных элементов с координатами репера и ориентациями; перечень элементов - "друзей" с их позиционными обозначениями и максимально-допустимыми расстояниями; перечень элементов - "врагов" с их позиционными обозначениями и минимально-допустимыми расстояниями между ними; позиционные обозначения элементов с запрещенными для них ориентациями; перечень наименований элементов с наборами особенных контактов; фиксированные трассы с их номерами и координатами угловых точек; перечень трасс - "врагов" заданных попарно их номерами и минимально-допустимыми расстояниями; особенности трасс: ширина, способ монтажа, приоритетность связей, заданная номерами приоритетов и перечнем свя -

зок для каждого из них; наличие как отдельных составляющих, так и всех указаний конструктора не является обязательным.

Выходная информация комплекса прикладных модулей содержит данные о размещении элементов с указанием их места расположения на плате и ориентации, о протрассированных фрагментах связей с указанием координат точек излома, о межслойных переходах, об управляющих параметрах прикладных модулей, о качестве результатов проектирования (процент размещения элементов, суммарная длина проведенных фрагментов трасс и т.д.). Эти данные сгруппированы в массивы (одномерные и двумерные), структуры и массивы структур.

2.2. Постоянный банк данных. Назначение банка данных – информационное обеспечение системных и прикладных модулей, осуществляющих автоматизированный процесс проектирования устройства. Он состоит из базы данных (БД) и поддерживающей ее системы управления [4]. База данных – совокупность всех данных, циркулирующих в системе, подлежащих накоплению, хранению, поиску, преобразованию и выдаче в установленном порядке, а также используемых для организации общения проектировщика с САПр.

В результате информационного анализа исходных данных, технического задания на разработку САПр совместно с информационными потребностями алгоритмов проектирования определена предметная область. Ее объекты, их атрибуты и взаимосвязи между ними представлены в базе данных в виде отношений. Так как каждому отношению соответствует отдельный физический файл, то отношения определены таким образом, что избыточность данных в наборе экземпляров файлов для каждого прикладного модуля минимальна и отсутствует необоснованное дублирование содержательно эквивалентных столбцов. Следовательно, выбор отношений способствует уменьшению объема хранимой информации, упрощению технологии обработки данных (повышению степени ее автоматизации), обеспечению высокой надежности функционирования системы при многоаспектном использовании одних и тех же данных.

В зависимости от интенсивности использования и обновления хранящихся и обрабатываемых данных БД условно разделена на две части: постоянная и переменная.

К постоянной базе данных отнесена такая информация:

– библиотека описаний геометрии используемых радиоэлементов: резисторов, подстроечных сопротивлений, транзисторов, тиристоров, микросхем, диодов, реле конденсаторов, разъемов. Описание состоит

из ключевой и информативной частей. Ключевая часть содержит данные, необходимые для поиска в библиотеке: тип радиоэлемента, вариант установки, вариант посадки, номинальное напряжение, номинальное сопротивление, номинальная емкость, мощность. В информативной части содержатся данные о геометрии радиоэлемента, используемые прикладными модулями: высота установки радиоэлемента над платой; описание корпуса радиоэлемента, который может быть либо кругом, заданным координатами центра и диаметром, либо прямоугольником; маркировка выводов; выводы, заданные координатами и типом; контакты, которые могут быть либо кругами, либо прямоугольниками с указанием их признака и номера слоя. Все координаты заданы в системе координат элемента, описания однотипных элементов хранятся в одном файле:

- характеристика прикладных наборов, хранимых в переменной базе данных: имя одноименного файла, количество вариантов прикладного набора, длина (в байтах) записи прикладного набора, максимальное количество записей варианта набора, зарезервированное при форматизации БД;

- перечень конструктивных элементов печатной платы: круглая контактная площадка, шина, прямоугольная контактная площадка и т.д.;

- технологические ограничения - минимально допустимые расстояния между разнотипными конструктивными элементами печатной платы;

- геометрические размеры стандартных конструктивных элементов платы (круглой контактной площадки, круглого переходного отверстия, шины, прямоугольной контактной площадки, круглого неметаллизированного отверстия и т.д.): для круглых - внутренний и внешний диаметры, для прямоугольных - габариты, для шины - ширина;

- словарь входного языка - средства описания исходной информации о проектируемом устройстве. Так как входной язык предназначен для описания иерархически упорядоченной информации, то в каждом элементе словаря вместе с обозначением понятия находится и его номер уровня иерархии;

- описания элементов с особыми (соединенными и/или эквивалентными) контактами; они предназначены для уменьшения входного описания проектируемых устройств, имеющих такие элементы;

- перечень имен проектируемых системой устройств.

Эти данные организованы как отдельные файлы, которые могут быть реконструированы лишь при изменении технологии, элементной базы, функциональных возможностей и т.д., т.е. данных, внешних по отношению к проектируемым системой устройствам. Они совместно с входным описанием проектируемого устройства являются основными (первичными) относительно результатных наборов комплекса прикладных модулей.

2.3. Переменный банк данных содержит следующую информацию:

- каталог, предназначенный для нейтрализации следующих аварийных ситуаций: отсутствие в БД искомого набора данных, количество читаемых записей превосходит истинное количество хранящихся, количество записываемых в БД записей превосходит максимальное количество, созданное при форматизации БД. С этой целью для каждого проектируемого устройства значения соответствующих элементов каталога равны истинному количеству записей вариантов прикладных наборов, хранящихся в одноименных файлах;
- описание проектируемого устройства на входном языке, являющееся результатом модуля грамматического контроля;
- входные наборы комплекса прикладных модулей, организован - ные по принципу: компонента описания → набор данных;
- данные о геометрических размерах корпусов, выводов, контактных площадок элементов, используемых в проектируемом устройстве;
- данные о размещении элементов на плате;
- данные о трассировке межсоединений;
- управляющие наборы прикладных модулей.

Форматизация БД состоит в размещении на отдельном пакете дисков всех файлов и наполнении их состоящими из пробелов записями фиксированной длины. Количество записей и их длина для каждого файла определяются из его характеристики.

Отличительной особенностью результатных наборов прикладных модулей размещения и трассировки является их вариантность. Она призвана обеспечить формирование, хранение, выдачу согласно запросу проектировщика нескольких вариантов результатных наборов, чтобы посредством их анализа выбрать лучший согласно определенным критериям. С целью воздействия на качество результатов проектирования САПр предоставляет проектировщику возможность воздействовать посредством набора управляющих параметров на схему функционирования прикладных модулей. Система управления БД устанавливает соответствие между номером варианта набора управляющих параметров

и номерами вариантов результатных прикладных наборов; ее средствами можно узнать всю "родословную" каждого результатного набора данных, т.е. как первичные, так и производные относительно него имена файлов и номера вариантов, а также изъять из БД варианты результатных наборов, производных по отношению к указанному.

В целях уменьшения объема информации при вводе управляющих параметров учреждены шаблоны управляющих наборов; их наличие в БД позволяет вводить лишь параметры, значения которых отличны от шаблонных. Результатным наборам присваивается номер варианта, либо вычисленный, либо указанный проектировщиком, который может совпадать с уже имеющимся в БД. В последнем случае происходит замена прежнего новым.

Средства системы управления БД обеспечивают выдачу на АЦПУ результатных наборов в удобном для восприятия виде эскизов размещения и трассировки, редактирование результатных наборов размещения и трассировки.

§3. Комплекс прикладных модулей САПр

3.1. Размещение разногабаритных элементов. В модуле размещения разногабаритных элементов реализован итеративно-последовательный алгоритм размещения [5]. Алгоритм состоит из двух этапов - этапа построения геометрических моделей элементов и этапа размещения этих моделей с последовательным уточнением их положения в системе областей, покрывающих плату.

На этапе построения моделей находятся прямоугольники, являющиеся моделями платы, запрещенных зон и элементов. Размеры моделей позволяют автоматически удовлетворять определенным требованиям к размещению элементов при плотном без налеганий размещении их моделей.

Эти требования состоят в учете технологических ограничений на расстояния между компонентами элементов, необходимости расположения репера элемента в узле решетки размещения и условий трассировки около элемента. При этом предполагается, что дополнительная площадь, предназначенная для проведения трасс около элемента, пропорциональна площади зон, запрещенных для трассировки под элементом, а коэффициент пропорциональности находится из заданной плотности заполнения платы элементами.

Для размещения моделей элементов на плате использован итеративно-последовательный алгоритм. На каждом шаге очередной итера-

ции в выбранной области платы производится приближенное размещение нефиксированных элементов этой области и фиксация (окончательное размещение) элементов, сравнимых по размерам с ячейками разбиения области.

При переходе к следующей итерации каждая область разбивается на ячейки; новые (меньшие по размерам) области формируются из этих ячеек таким образом, что соседние области перекрываются, и задается порядок неповторного выбора этих областей.

Для выбора очередного размещаемого элемента используется критерий его связности с уже размещенными элементами и его геометрические размеры, а в качестве места его установки выбирается свободная часть области, наименее удаленная от связанных с ним элементов.

Покрытие платы областями, в которых производится приближенное размещение и фиксация элементов, приводит к повышению быстродействия алгоритма, а перекрытие соседних областей обеспечивает возможность значительного изменения положения нефиксированных элементов при их приближенном размещении, т.е. возможность их перехода из одной области в другую, и тем самым ведет к улучшению качества размещения - уменьшению оценки суммарной длины соединений.

Входной информацией модуля служат: перечень элементов проектируемого устройства и описание их геометрии, описание геометрии платы и запрещенных для размещения элементов зон, шаг решетки размещения, система соединений устройства и указания конструктора: положение на плате заранее фиксированных элементов, перечень пар элементов с заданными ограничениями на расстояние между ними, перечень элементов с запрещенными ориентациями, перечень элементов с особенностями контактов (соединенными или эквивалентными).

Управляющими параметрами модуля являются коэффициенты: разбиения областей на ячейки, перекрытия соседних областей и плотности заполнения платы элементами. Увеличение коэффициентов разбиения и перекрытия областей ведет к повышению качества размещения (увеличению процента окончательно размещенных элементов и уменьшению оценки суммарной длины соединений) и вместе с тем к увеличению времени работы модуля. Увеличение коэффициента плотности заполнения платы элементами снижает вероятность 100%-го размещения, увеличивает время работы модуля и оценку длины соединений, но при

получении 100%-го размещения создает большую равномерность размещения элементов на плате, т.е. улучшает условия для трассировки соединений.

Выходной информацией модуля служат: перечень ориентаций и координат реперов элементов, размещенных на плате, процент размещенных элементов и оценка длины их соединений.

Время T_p работы модуля можно оценить [8] из выражения $T_p \sim \sim fnN$, где n - число элементов устройства, N - число узлов решетки размещения платы, f - выпуклая функция, зависящая от управляющих параметров модуля и имеющая значения, меньшие единицы в области определения, задаваемой реальными значениями параметров.

Модуль размещения разногабаритных элементов содержит около 1700 операторов ПД/И, рабочая программа занимает в оверлейной структуре около 110К оперативной памяти ЭВМ ЕС-1050.

3.2. Коррекция размещения разногабаритных элементов. Модуль размещения разногабаритных элементов не гарантирует получение 100%-го размещения элементов. В общем случае результатом его работы может быть не полное размещение, при котором отдельные элементы накладываются друг на друга или выступают за границу платы. В этом случае необходима коррекция предварительного размещения с целью получения более полного размещения элементов без существенного увеличения оценки суммарной длины соединений.

В модуле коррекции размещения разногабаритных элементов реализован быстродействующий последовательный алгоритм переразмещения всех элементов схемы [6], ориентированный на получение размещения, незначительно отличающегося от предварительного, но имеющего меньшее количество неразмещенных элементов, т.е. более высокую плотность размещения.

Повышение плотности получаемого размещения осуществляется с помощью процедуры уплотнения. В процессе плотного размещения множество элементов, размещенных к данному шагу процесса, образует область (обычно односвязную), граница которой представляет собой "контур размещения" - непрерывную серию чередующихся горизонтальных и вертикальных отрезков. Очередной размещаемый элемент ставится вплотную к контуру размещения в один из его углов (позицию) и соответствующие стороны элемента включаются в контур размещения. Выбор размещаемого элемента и его позиции осуществляется исходя из критерия наибольшей плотности размещения элементов на плате.

Незначительное отклонение получаемого размещения от предва- рительного реализуется путем разбиения платы на ячейки и применения процедуры уплотнения, т.е. постановки элементов в позицию контура размещения, для элементов каждой ячейки отдельно в выбранном порядке их обхода. Обход множества ячеек должен быть непрерывным, бесповторным и полным. Таким обходом может служить, например, "волновой", при котором вначале выбираются ячейки, содержащие участки начального контура размещения, затем ячейки, соседние с ними, и т.д.

Быстродействие алгоритма обеспечивается как разбиением платы на ячейки, так и небольшим количеством позиций контура размещения.

Входной информацией модуля служат: перечень элементов проектируемого устройства, описание геометрии их моделей, описание геометрии моделей платы и запрещенных зон, система соединений устройства, указания конструктора (положение на плате заранее фиксированных элементов, перечень элементов с запрещенными ориентациями) и вариант выходной информации модуля размещения разногабаритных элементов.

Управляющими параметрами модуля являются количество ячеек разбиения платы, начальный контур размещения и направление уплотнения. Уменьшение количества ячеек разбиения платы, т.е. увеличение размера ячейки и количества элементов в ней, приводит к увеличению времени работы модуля, возрастанию оценки длины соединений и к уменьшению количества неразмещенных элементов, вследствие увеличения плотности их расположения при более широком выборе элементов в ячейке. Начальный контур размещения задается из конструктивных соображений. Обычно в качестве такого контура задают либо одну из сторон платы, либо стороны фиксированного заранее элемента типа "разъем". Направление уплотнения задается как тангенс угла наклона прямой линии по отношению к одной из сторон платы и определяет выбор позиции при установке элемента и тем самым форму контура размещения, что дает возможность воздействовать на окончательную конфигурацию размещения элементов на плате.

Выходной информацией модуля служат перечень координат реперов и ориентаций элементов на плате, оценка длины соединений и процент размещенных элементов.

Время T_k работы модуля коррекции размещения и увеличение ΔL суммарной длины соединений в зависимости от числа k ячеек разбиения платы можно оценить из выражений [8]: $T_k \sim nk_0^{3/2}$; $\Delta L \sim nk_0^{1/2}$;

$n_0 = n/k$, где n – число элементов устройства, k – среднее число контактов элемента.

Модуль коррекции размещения содержит около 2700 операторов ПД/1, рабочая программа с массивами в оверлейной структуре занимает около 125К оперативной памяти ЭЕМ ЕС-1050.

3.3. Размещение одинаковых элементов. Модуль размещения одинаковых элементов предназначен для экирования цифровой аппаратуры. При этом моделью платы является поле позиций, представляющее собой решетку, в узлы которой помещаются точечные модели элементов. Шаг решетки задается таким образом, чтобы он удовлетворял технологическим требованиям к расстоянию между элементами и обеспечивал возможность трассировки соединений. Система соединений проектируемого устройства задается в виде двудольного графа соединений с множеством вершин $V_E \cup V_S$, где вершины из множества V_E соответствуют элементам, а вершины из V_S – связкам схемы, при этом вершина $v_i \in V_E$, $i = \overline{1, n}$, соединена ребром с вершиной $v_j \in V_S$, $j = \overline{1, m}$, если хотя бы один контакт i -го элемента схемы входит в j -ю связку.

Модуль реализует алгоритм [7] нахождения отображения множества вершин V_E графа соединений в поле позиций, при котором минимизируется верхняя оценка суммарной длины кратчайших прямоугольных деревьев Штейнера, соответствующих соединениям схемы.

Алгоритм состоит в следующем. Для графа соединений строятся два разбиения \hat{V}_1 и \hat{V}_2 множества его вершин такие, что ребра графа соединяют в каждом разбиении только соседние подмножества. Далее строится произведение разбиений \hat{V}_1 и \hat{V}_2 , в котором каждое подмножество является непустым пересечением двух подмножеств, взятых из разных разбиений.

Структура полученного произведения позволяет разбить поле позиций платы на прямоугольные области и поставить в соответствие элементам схемы позиции из этих областей таким образом, что элементам каждой связки будут соответствовать позиции, лежащие не более чем в четырех соседних областях.

Выбор разбиений \hat{V}_1 и \hat{V}_2 производится исходя из критерия верхней оценки суммарной длины деревьев Штейнера. Разбиение \hat{V}_1 строится относительно заданного фиксированного элемента схемы (обычно разъема). Подмножества вершин из V_E этого разбиения сопоставляются столбцам поля позиций, а подмножества вершин из V_S – соответствующим промежуткам между столбцами. Далее последователь-

но для столбцов, в которых число вершин превышает число позиций, производится перестановка вершин в соседние столбцы по критерию наименьшего увеличения суммарной длины соединений. Разбиение \hat{V}_2 находится среди множества относительных разбиений графа так, чтобы размещение элементов, соответствующее произведению разбиений \hat{V}_1 и \hat{V}_2 , имело наименьшую оценку суммарной длины деревьев Штейнера. Далее с помощью алгоритма попарных перестановок вершин внутри столбцов и между ними находится окончательное размещение элементов в поле позиций.

Входной информацией модуля служат перечень элементов проектируемого устройства, описание поля позиций платы и его запрещенных узлов, система соединений устройства и указания конструктора: положение разъема на плате и перечень запрещенных ориентаций элементов.

В модуле предусмотрено изменение критерия связности элементов схемы с помощью управляющего параметра, что приводит к изменению оценки длины соединений и в результате к изменению размещения элементов.

Входной информацией модуля является перечень координат реперов и ориентаций элементов и оценка длины соединений.

Время T_0 работы модуля пропорционально n^3 , n - число элементов устройства. Модуль содержит около 1000 операторов ПЦ/И и занимает около 250К оперативной памяти ЭВМ ЕС-1050.

3.4. Маршрутная трассировка. Алгоритмы размещения разногабаритных элементов приводят к такому расположению элементов на плате, которое в отличие от размещения в поле позиций не имеет специфических особенностей типа регулярного расположения каналов для трассировки. Поэтому алгоритмы трассировки соединений должны быть реализованы для общего случая нерегулярного расположения элементов на плате, вследствие чего повышение их быстродействия за счет учета специфики размещения элементов затруднительно. Кроме того, учет конструкторских и схемотехнических требований к трассировке соединений также увеличивает время работы модулей трассировки. Для снижения времени проектирования на этапе трассировки соединений разработано два модуля трассировки - модуль маршрутной трассировки для быстрого построения множества коротких соединений в каждом слое платы отдельно и модуль волновой трассировки для проведения оставшихся соединений в обоих слоях платы одновременно [9].

В модуле для каждой связки схемы строится исходя из заданного размещения элементов кратчайшее связывающее дерево, ребра которого соединяют модели контактов этой связки. Модели контактов строятся с учетом технологических ограничений на расстояния между конструктивными элементами платы. Далее ребра всех деревьев распределяются по двум слоям в зависимости от угла наклона ребер в системе координат платы и упорядочиваются в каждом слое по приоритету связок и убыванию длин ребер.

Алгоритм маршрутной трассировки строит соединения в каждом слое платы отдельно по линиям решетки трассировки. Для очередного ребра данного слоя алгоритм строит простейший путь, соединяющий контакты ребра. При этом могут быть заданы варианты построения пути - кратчайший путь с минимумом поворотов без огибания препятствий, кратчайший или не кратчайший путь при огибании препятствий. Сложность путей может быть ограничена как заданием вариантов их построения, так и заданием наибольшего числа поворотов строящегося пути. Из множества построенных путей в каждом слое выбирается с учетом их особенностей (ширины, приоритета и т.д.) наибольшее количество путей, которые относятся к разным связкам и не пересекаются. В выбранных путях устраняются петли, возникшие в результате пересечения путей одной связки.

Входной информацией служат описание геометрии платы и запрещенных для трассировки зон, шаг решетки трассировки, система соединений элементов, заданный вариант размещения элементов на плате и указания конструктора: фиксированные трассы, пары трасс с ограничением на расстояния между ними, ширина и приоритет трасс.

Управляющими параметрами являются перечень вариантов построения пути и наибольшее допустимое число поворотов пути. Увеличение этих параметров ведет как к увеличению времени работы модуля, так и к повышению процента трассировки, т.е. количества успешно проведенных путей.

Выходной информацией являются описание построенных трасс в виде перечня координат поворотов и конечных точек путей, описание соединенных фрагментов не полностью протрассированных связок, суммарная длина построенных путей и процент трассировки.

Модуль состоит примерно из 8000 операторов ПЛ/І и занимает в оверлейной структуре около 250К оперативной памяти ЭВМ ЕС-1050.

3.5. Волновая трассировка. Модуль волновой трассировки проводит пути, соединяющие фрагменты не полностью протрассированных связей, в дискретном рабочем поле, задаваемом решеткой трассировки платы, в обоих слоях одновременно. Для очередной по приоритету связи, имеющей несколько несоединенных между собой фрагментов, выбираются фрагмент-исток и фрагменты-цели, в которые включаются группы эквивалентных или соединенных контактов. При необходимости, в соответствии с особенностями данной трассы, вокруг запрещенных зон и фрагментов других трасс в дискретном рабочем поле производится запрещение полос нужной ширины. Для заданного значения относительного веса перехода из слоя в слой с помощью волнового алгоритма находится путь от фрагмент-истока до ближайшего фрагмента-цели, соединенные этим путем фрагменты объединяются в один и эта процедура применяется до объединения всех фрагментов связи. Затем производится соединение фрагментов следующей по порядку связи и т.д.

Входной информацией модуля служит информация, совпадающая с входной информацией модуля маршрутной трассировки, и его выходная информация.

Управляющими параметрами модуля являются интервал номеров связей и вес перехода из слоя в слой. При недостатке времени счета на ЭЕМ или для нейтрализации сбоя в модуле предусмотрен вывод контрольных точек на ленту через заданный интервал номеров связей, просмотренных алгоритмом. С увеличением веса перехода возрастает время работы модуля, уменьшается количество переходных отверстий и растет длина путей, построенных в одном слое. Влияние веса перехода на процент трассировки неоднозначно, так как условия трассировки улучшаются с увеличением свободной площади платы, а увеличение веса перехода приводит, с одной стороны, к уменьшению свободной площади из-за удлинения трасс, а с другой стороны, к ее увеличению из-за снижения числа переходных отверстий.

Выходной информацией являются описание построенных трасс, описание соединенных фрагментов не полностью протрассированных связей, описание реализованной системы соединений устройства, которая может отличаться от исходной из-за наличия особенностей контактов элементов; суммарная длина построенных трасс и процент трассировки.

Модуль содержит около 6000 операторов ПЛ/I и требует в оверлейной структуре около 330К оперативной памяти ЕС-1050.

§4. Функционирование и характеристики САПр

Эксплуатация САПр предшествует созданию на проинициализированном пакете дисков рабочего состояния БД: размещение и наполнение системных файлов, файлов, содержащих описания радиоэлементов (резисторов, тиристоров, реле, транзисторов, конденсаторов, подстроечных сопротивлений, разъемов), файла описаний элементов с особенными контактами, форматизация переменной БД.

Автоматизированное проектирование [I0, I1] начинается сепарацией информации о нем на 4 компоненты: таблицы спецификаций, печатной платы, принципиальной схемы и указания конструктора. В случае, если в таблице спецификаций имеются наименования элементов, которых нет в библиотеке, то необходимо либо скорректировать схему устройства, либо реконструировать библиотеку посредством записи в нее описаний отсутствующих элементов.

Исходная информация целиком или покомпонентно должна быть описана на входном языке и отперфорирована. Результатом является входное описание проектируемого устройства на перфокартах, машинную обработку которого начинает модуль грамматического контроля. Основные функции этого модуля в САПр следующие:

- лексический контроль, выявляющий недопустимые слова во входном описании;
- синтаксический анализ, распознающий типы предложений и структуру входного описания;
- синтаксический контроль, выявляющий синтаксические ошибки в предложениях входного описания;
- диагностика и индикация ошибок на АЦПУ с указанием номера записи (перфокарты);
- минимизация объемов компонент входного описания, не содержащих грамматических ошибок, которая состоит в переформировании их к виду, не содержащему избыточных пробелов;
- запись грамматически правильных компонент в виде наборов в одноименные файлы БД.

В случае, если системы управления БД проинформировала о том, что заполнен перечень проектируемых устройств, необходимо средствами модуля реконструкции БД изъять проектируемое устройство, присутствие которого по мнению проектировщика не является необходимым, и повторить ввод входного описания.

На следующем этапе обработку входного описания осуществляет модуль трансляции, основные функции которого таковы:

- семантический контроль, выявляющий несоответствия в описаниях связей и звезд;

- перевод предложений входного описания на внутренний язык, основными типами предложений которого являются структуры, организованные в массивы;

- запись результатов трансляции в одноименные файлы БД.

Используя созданные транслятором наборы, система управления БД формирует и записывает в одноименные файлы БД такие наборы:

- основные данные о геометрии: высота установки, месторасположение корпуса в локальной системе координат элемента, адрес описания контактов и крепежа в другом наборе;

- основные данные о выводах, компонентах и крепеже: номер вывода и его тип, месторасположение его точек вывода, тип контакта крепежа и ее месторасположение в локальной системе координат элемента.

На этом кончается подготовка входной информации для комплекса прикладных модулей, осуществляющих автоматизированное проектирование.

Исправление обнаруженных модулями трансляции и визуальным контролем ошибок входного описания производится повторной перфорацией ошибочных перфокарт и вводом в САПр соответствующей компоненты описания, которое снова подвергается контролю.

Только при условии наличия в БД грамматически и семантически правильного описания происходит переход к автоматизированному проектированию. На первом этапе осуществляется размещение элементов на плате. Если проектируемое устройство состоит из разногабаритных элементов, то размещение их производит модуль размещения разногабаритных элементов. Управление им осуществляется посредством ввода значений тех управляющих параметров, которые отличны от шаблонных. Многократный пуск модуля с различными значениями управляющих параметров осуществляется в целях получения 100%-го размещения, удовлетворяющего требованиям минимальности суммарной длины соединений и равномерной плотности расположения элементов на плате. Если это оказалось невозможным, то необходимо:

- либо скорректировать входное описание в сторону смягчения требований, предъявляемых к размещению;

- либо посредством модуля коррекции размещения произвести коррекцию выбранных вариантов разногабаритных элементов; в качестве критерия выбора можно использовать "максимальный процент"

размещенных элементов; посредством управляющих параметров модуля необходимо получить вариант с 100%-м размещением; если это невозможно, то следует либо произвести те же действия, что для модуля размещения разногабаритных элементов;

- либо посредством модуля редактирования размещения отредактировать выбранный вариант размещения постановкой неразмещенных элементов на указанные оператором позиции.

Если проектируемое устройство состоит из геометрически одинаковых элементов, то их размещение производится модулем размещения одинаковых элементов. Если посредством управляющих параметров модуля невозможно получить 100%-е размещение, то необходимо:

- либо скорректировать входное описание в сторону смягчения требований, предъявляемых к размещению;

- либо посредством модуля редактирования отредактировать выбранный вариант размещения постановкой неразмещенных элементов на указанные позиции.

Исходя из анализа полученных вариантов результатов размещения, пользователь выбирает оптимальные по его мнению (100%-е размещение, минимальная суммарная длина соединений, равномерное заполнение платы и т.д.) варианты и переходит к следующему этапу автоматизированного проектирования - трассировке соединений на плате. Для этой цели в САПр имеются модули маршрутной трассировки и волновой трассировки. Специфика информационного обеспечения и программной реализации модулей такова, что начинать трассировку могут оба модуля и модуль волновой трассировки может продолжит трассировку после модуля маршрутной. Исходя из анализа результатов трассировки, проектировщик может принять такие альтернативные решения:

- повторный запуск этого же модуля трассировки с другими значениями управляющих параметров;

- продолжение модулем волновой трассировки, начатой модулем маршрутной;

- возврат к редактированию размещения;

- размещение элементов с другими значениями управляющих параметров;

- коррекция размещения с целью получения более подходящего для последующей трассировки варианта;

- редактирование входного описания в сторону смягчения требований, предъявляемых к трассировке.

Технологическая информация постоянной БД и результаты работы комплекса прикладных модулей, хранящиеся в переменной БД, содержат все необходимые данные как для получения документации, так и для подготовки информации, управляющей технологическим оборудованием.

Поскольку все данные о проектируемом устройстве хранятся в банке данных, то модификация устройства, проводимая по результатам опытных испытаний изготовленных образцов, может быть произведена средствами САПр путем изменения его входного описания или редактирования описания размещения элементов.

Изменения управляющих параметров комплекса прикладных модулей (коэффициентов разбиения и перекрытия областей платы, плотности ее заполнения элементами; количества ячеек разбиения платы и направления управления; изменения критерия связности элементов; наибольшего числа поворотов пути, веса переходных отверстий и т.д.) обеспечивает вариативность выходной информации модулей, что дает возможность выбора на каждом этапе проектирования лучшего варианта из всех результатов работы модулей. Тем самым управляющие параметры модулей совместно с входной схемотехнической, конструкторской и технологической информацией позволяют при проектировании учитывать конкретные особенности проектируемого устройства.

Разработанная САПр печатных плат в сравнении с известными имеет следующие особенности.

1. Модули САПр разработаны с учетом широкого спектра технологических, схемотехнических и конструкторских требований к устройствам РЭА на двухслойных печатных платах.

2. Комплекс прикладных модулей САПр разработан на основе приближенных быстродействующих алгоритмов с управляющими параметрами, которые позволяют оперативно воздействовать на процесс проектирования с целью повышения качества его результата, в частности позволяет получить 100%-е размещение разногабаритных элементов достаточно высокой плотности.

3. Система управления базой данных САПр обеспечивает оперативную работу проектировщика с разными вариантами выходной информации прикладных модулей, обусловленными изменением их управляющих параметров.

САПр печатных плат имеет следующие характеристики:

- количество элементов схемы до 200;
- .. размеры печатной платы до 200х300 шагов решетки трассировки;

- емкость библиотеки радиоэлементов до 5000;
- количество связей до 1200;
- количество контактов до 2500;
- количество угловых точек трасс до 15000;
- количество межслойных переходных отверстий до 500;
- количество одновременно проектируемых устройств - 3;
- количество вариантов результатов работы модулей размещения и трассировки до 9;
- язык программирования ПЛ/I;
- ЭВМ ЕС 1050 с оперативной памятью не менее 512К;
- общий объем программ около 40000 операторов.

Разработанная САПр печатных плат является, с одной стороны, экспериментальной, созданной для разработки и исследования управляемых модулей и информационно-программного обеспечения САПр, связанного с вариативностью их результатов. С другой стороны, данная система открыта для включения новых функциональных модулей, в том числе модулей оперативной коррекции результатов проектирования, документирования и управления технологическим оборудованием, и может служить базовой для создания САПр, ориентированных на конкретные технологические и технические средства реализации проектного решения.

Результаты экспериментального проектирования тестовых устройств РЭА позволяют оценить трудоемкость процесса проектирования в САПр печатных плат. Для устройств РЭА, содержащих в среднем 75 элементов, 75 связей с количеством контактов около 300 на плате размерами 125x180 мм, время подготовки правильной входной информации составляло в среднем 12 час, время работы модулей:

- контроля и трансляции - 20 мин,
- размещения разногабаритных элементов (100%) - 25 мин,
- коррекции размещения - 3 мин,
- маршрутной трассировки (около 50% трассировки) - 15 мин,
- волновой трассировки (около 95% трассировки) - 130 мин.

Время проектирования в САПр среднего устройства данного класса составляет около 16 час, при этом достигается автоматизированное размещение всех элементов устройства и трассировка 95% его соединений.

Л и т е р а т у р а

1. МАКАРОВ Л.И. Размещение и трассировка в плоской прямоугольной решетке. -В кн.: Автоматизация проектирования в микроэлектронике. Теория. Методы. Алгоритмы (Вычислительные системы, вып. 64). Новосибирск, 1975, с. 63-72.
2. КУЛИШ Г.Н., МАКАРОВ Л.И. Система автоматизированного проектирования печатных плат с разногабаритными элементами. -В кн.: Тезисы докладов XXIV научно-технической конференции. Новосибирск, 1981, с. 35.
3. КУЛИШ Г.Н., МАКАРОВ Л.И. Система автоматизированного проектирования печатных плат. -В кн.: Автоматизация поискового конструирования и подготовки инженерных кадров. Тезисы докладов III Всесоюзной конференции. Иваново, 1983, с. 52-53.
4. АЛСЫНБАЕВА Л.Г., КУЛИШ Г.Н. Банк данных САПр печатных плат. -В кн.: Вычислительная техника и дискретная математика. Тезисы докладов региональной научно-технической конференции. Новосибирск, 1983, с. 74.
5. КАШИН В.И., МАКАРОВ Л.И. Итеративно-последовательный алгоритм размещения моделей разногабаритных элементов. -В кн.: Алгоритмические основы обработки структурной информации (Вычислительные системы, вып. 85). Новосибирск, 1981, с. 64-77.
6. БЕЛЯЕВ Е.И., МАКАРОВ Л.И. Алгоритм коррекции размещения разногабаритных элементов. -Там же, с. 78-86.
7. БЕССОНОВ Ю.Е., СКОРОБОГАТОВ В.А. Использование структурных особенностей схем при оптимизации размещений. -Там же, с.21-34.
8. БЕЛЯЕВ Е.И., МАКАРОВ Л.И. Быстродействие алгоритмов размещения и коррекции размещения разногабаритных элементов. -В кн.: Вычислительная техника и дискретная математика. Тезисы докладов региональной научно-технической конференции. Новосибирск, 1983, с. 6-7.
9. ДАНКОВ Е.В., ЛЕОНЕНКО Ю.П., МАКАРОВ Л.И., ХРУЩЕВ В.Г. Трассировка в САПр печатных плат с разногабаритными элементами. -В кн.: Тезисы докладов XXIV научно-технической конференции, Новосибирск, 1981, с. 37-38.
10. КУЛИШ Г.Н. Управление процессом проектирования в САПр печатных плат. -В кн.: Тезисы докладов научно-технической конференции, Новосибирск, 1983, с. 73.
11. КУЛИШ Г.Н., МАКАРОВ Л.И. Функционирование САПр печатных плат. -В кн.: Автоматизация конструкторского проектирования РЭА и ЭВА. Тезисы докладов 10 научно-технической конференции, Пенза, 1983, с. 15-17.

Поступила в ред.-изд.отд.
5 апреля 1984 года