

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра радиоэлектронных средств

***АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНСТРУКТОРСКОГО
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ***

Учебно-методическое пособие
для студентов специальностей I-38 02 03
«Техническое обеспечение безопасности»
и I-39 02 01 «Моделирование и компьютерное
проектирование радиоэлектронных средств»
дневной формы обучения

Минск 2007

УДК 621.396.6 (075.8)

ББК 32.844-02 я 73

А 22

Рецензент
доцент кафедры ЭВС БГУИР,
канд. техн. наук В. П. Луговский

Авторы:
В. Е. Галузо, В. В. Мельничук,
Н. С. Образцов, А. И. Пинаев

Автоматизация конструкторского и технологического проектирования радиоэлектронных средств : учебно-метод. пособие для студ. спец. I-38 02 03 «Техническое обеспечение безопасности» и I-39 02 01 «Моделирование и компьютерное проектирование радиоэлектронных средств» дневн. формы обуч. / В. Е. Галузо [и др.]. – Минск : БГУИР, 2007. – 36 с.

ISBN 978-985-488-154-6

В работе дано подробно изложено содержание дисциплины «Автоматизация конструкторского и технологического проектирования радиоэлектронных средств». Приведены методические указания, конкретизирующие последовательность и глубину проработки подлежащих изучению вопросов.

УДК 621.396.6(075.8)
ББК 32.844-02 я 73

ISBN 978-985-488-154-6

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2007

1. Цель и предмет автоматизированного проектирования радиоэлектронных средств (РЭС). Основные понятия

Современные достижения науки и техники, возрастающая функциональность современных изделий требуют выполнения проектных работ большого объема. Требования к качеству проектов, срокам их выполнения оказываются все более жесткими в условиях конкурентной борьбы за потребителя. Удовлетворить эти требования, количественно увеличивая проектировщиков, невозможно, так как распараллеливание проектных работ не безгранично.

Решить проблему можно, внедряя в практику инженерного проектирования методы и средства автоматизированного проектирования.

Цель автоматизации проектирования – повышение качества, снижение материальных затрат, сокращение сроков проектирования и повышение производительности труда проектировщиков.

Под автоматизацией проектирования понимается такой способ проектирования, при котором весь цикл проектных работ осуществляется рационально распределенным взаимодействием человека и ЭВМ. В настоящее время термин *автоматизация проектирования* характеризует целое научно-техническое направление, базирующееся на современных достижениях физики, математики, вычислительной техники и теории проектирования.

Предметом автоматизации проектирования являются формализация проектных процедур, структурирование и типизация процессов проектирования, постановки, модели, методы и алгоритмы, информационная поддержка решения проектных задач, а также технические средства и способы их объединения в единую проектирующую систему.

В начале 70-х гг. в связи с возникновением нового бурно развивающегося направления науки и техники появился новый термин *автоматизированное проектирование*. Суть его трактуется в ГОСТ 22487-77 как проектирование, осуществляемое взаимодействием человека и ЭВМ. Под проектированием здесь понимается процесс составления описания, необходимого для создания в заданных условиях еще не существующей аппаратуры. Проектирование как процесс, развивающийся во времени, расчленяется на *стадии, этапы, проектные процедуры, решения и операции*.

К *стадиям проектирования* относятся:

– техническое предложение, связанное с обоснованием целесообразности разработки, с поиском принципиальных возможностей построения системы, исследованием новых принципов, структур, технических средств и обоснованием наиболее общих решений;

– эскизный проект, на стадии которого проверяется корректность и реализуемость основных принципов и положений, определяющих функционирование будущей РЭС;

– технический проект, на стадии которого выполняется всесторонняя проработка всех частей проекта, конкретизируются и детализируются технические решения;

– рабочий проект, на стадии которого формируется вся необходимая документация для изготовления спроектированной РЭС на конкретном предприятии.

Использование систем автоматизированного проектирования (САПР) характерно для стадий эскизного, технического и рабочего проектирования. Стадия технического предложения – это творческий процесс, протекающий по трудно формализуемым и недостаточно изученным алгоритмам. Конечно, и на этой стадии применяется вычислительная техника, однако это применение имеет характер решения научных задач.

Этап проектирования – составная часть любой из стадий проектирования, сводящихся к выполнению проектных операций и процедур, относящихся к одному аспекту или иерархическому уровню. Например, при проектировании интегральных схем выделяют этапы:

- проектирования компонентов;
- схемотехнического проектирования;
- функционально-логического проектирования;
- топологического проектирования.

Проектная процедура – формализованная совокупность действий, выполнение которых оканчивается *проектным решением*. Примерами проектных процедур могут служить:

- разработка чертежа изделия;
- расчет характеристик усилителя;
- выбор типовой конструкции функционального узла.

Проектное решение – промежуточное или окончательное описание объекта проектирования, необходимое и достаточное для рассмотрения и определения дальнейшего направления или окончания проектирования.

Проектная операция – действие или формализованная совокупность действий, составляющих часть проектной процедуры, алгоритм которых остается неизменным для ряда проектных процедур. Примерами проектных операций могут служить:

- подготовка исходных данных для электрического расчета;
- оформление чертежа детали в соответствии с единой системой конструкторской документации (ЕСКД);
- оформление отчета.

Различают два вида процесса проектирования – *нисходящее* и *восходящее*.

Нисходящее проектирование («сверху вниз») характеризуется тем, что решение задач более высоких иерархических уровней предшествует решению задач нижних уровней. При этом исходные данные для проектирования представляются в виде технического задания (ТЗ) для высшего иерархического уровня.

Восходящее проектирование («снизу вверх») – проектирование, при котором вначале разрабатываются элементы системы, а затем система из этих элементов. Объекты, проектируемые на каждом уровне восходящего проектирования, должны стать типовыми, предназначенными для различных применений.

У каждого из двух видов проектирования имеются свои особенности.

При нисходящем проектировании система разрабатывается в условиях, когда ее элементы еще не существуют и, следовательно, можно сформулировать требования к их функциональным характеристикам, а затем попытаться удовлетворить их.

При восходящем проектировании, наоборот, функциональные характеристики элементов известны, а требования к ним носят предположительный характер, и их пытаются удовлетворить.

При практическом проектировании сложных систем обычно используются черты как нисходящего, так и восходящего проектирования. Однако в обоих случаях проектирование ведется в условиях недостатка информации.

Схема процесса автоматизированного проектирования РЭС представлена на рис. 1.

Исходным документом для начала проектирования является техническое задание. В нем перечислены все технические требования, предъявляемые к создаваемой аппаратуре. Основные требования:

- значения выходных характеристик и их допустимые разбросы;
- показатели надежности: вероятность безотказной работы, время эксплуатации, срок службы и др.;
- условия эксплуатации: влажность, давление, температура и др.;
- специальные воздействия: вибрация, удары, акустический шум, радиация и др.;
- условия хранения и транспортировки.

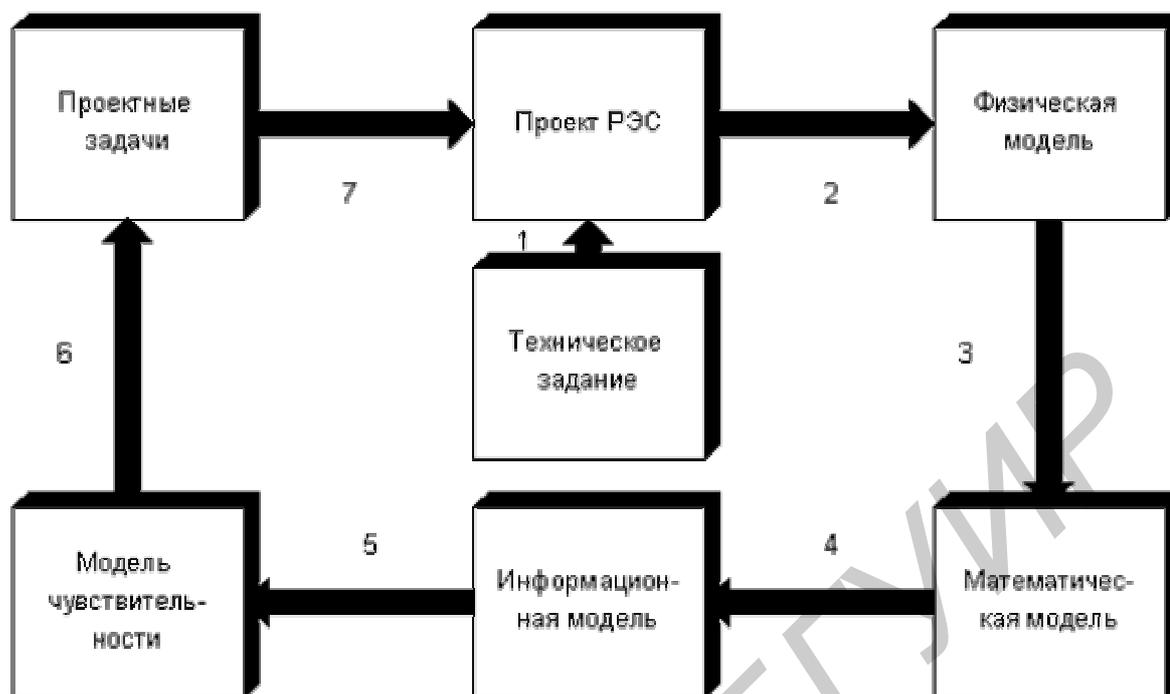


Рис. 1. Схема процесса автоматизированного проектирования РЭС

На основе технического задания создается проект (см. рис. 1, стрелка 1) – эвристический набросок схемы и конструкции. На этом этапе разрабатываются эскизы структурной и функциональной схем устройства, производятся предварительная компоновка и размещение.

Далее разработанный проект исследуется и многократно уточняется (см. рис. 1, стрелки 2–7), при этом происходит постепенный переход от эскизного проекта к техническому.

На основе эскизов схем и конструкций производится *формализация проекта* (см. рис. 1, стрелка 2), результатом которой являются физические модели схемы и конструкции, составленные в терминах соответствующего научного направления, например, электрические – в терминах электротехники, механические – в терминах механики, тепловые – в терминах теории теплообмена. Формализация проекта производится с позиции системного подхода и заключается в учете тех или иных факторов, влияющих на функционирование аппаратуры при построении физических моделей.

На основе физических моделей создают математические модели (см. рис. 1, стрелка 3), полученные с использованием математических методов и законов соответствующих наук. Они являются основой для расчета выходных характеристик, проектируемой аппаратуры, а также параметров и факторов, по которым оценивается фактическое состояние схемы или конструкции.

В результате расчета с использованием математических моделей (см. рис. 1, стрелка 4) получается информационная модель устройства, которая включает: расчетные значения выходных характеристик; требования технического задания; информацию из технических условий на элементы схемы и конструкции; расчетные значения электрических, тепловых и

механических режимов работы элементов; показатели, определяющие надежность и качество изделия, а также множество внутренних параметров схемы и конструкции, которые могут быть управляемыми. Под множеством управляемых параметров понимается перечень внутренних параметров аппаратуры, которые можно изменять в процессе проектирования для улучшения выходных характеристик аппаратуры и режимов работы ее элементов.

Путем сопоставления требований ТЗ с расчетными характеристиками, режимов работы элементов с допустимыми режимами, приведенными в технических условиях (см. рис. 1, стрелка 5) выявляются те характеристики и режимы работы элементов, которые необходимо изменить, и на этой основе строится модель чувствительности.

В результате расчета модели чувствительности (см. рис. 1, стрелка 6) определяются функции чувствительности, показывающие степень влияния управляемых параметров на выходные характеристики и позволяющие окончательно сформулировать проектные задачи, которые необходимо решить для доработки проекта. Существует три группы проектных задач:

1. *Задачи синтеза, расчета и оптимизации* структуры и параметров схемы и конструкции.
2. *Задачи исследования разбросов параметров* вокруг номинальных значений.
3. *Задачи обеспечения показателей надежности и качества.*

Решение сформулированных проектных задач (см. рис. 1, стрелка 7) позволяет внести соответствующие изменения в схему и конструкцию проектируемой аппаратуры и уточнить проект.

Таким образом, из приведенного описания схемы автоматизированного проектирования следует:

1. Процесс проектирования носит итерационный характер, т.к. решения в этом процессе принимаются в условиях отсутствия полной информации, поэтому возникают ситуации, когда были приняты не реализуемые по тем или иным причинам решения. Их исправление происходит путем повторного выполнения проектных процедур.
2. Процесс проектирования реализуется путем моделирования различных физических процессов, протекающих в аппаратуре при ее функционировании.

2. Классификация проектных задач

Рассмотрим классификацию проектных задач, решаемых в процессе проектирования РЭС (рис. 2).



Рис. 2. Классификация проектных задач

Задачи синтеза технических объектов направлены на создание новых вариантов проектных решений. Создаваемые в процессе синтеза проектные решения должны быть оформлены на языке оформления проектной документации, например, в виде чертежей, схем и пояснительного текста. В этом языке действуют правила, установленные единой системой конструкторской документации.

Различают задачи *структурного и параметрического синтеза*. В первом случае синтезируется структура проектируемого объекта, а во втором – его параметры.

Задачи анализа технических объектов направлены на изучение их свойств. В процессе анализа не создаются новые объекты, а лишь исследуются заданные. Решение задачи анализа позволяет получить информацию о выходных характеристиках объекта, режимах работы его элементов, тепловых и механических режимах конструкции и т.д. Необходимо отметить, что часто задачи синтеза решаются путем многократного решения задач анализа.

Решение задачи оптимизации направлено на поиск не любого, а наилучшего в некотором смысле проектного решения. Если в процессе оптимизации ищется наилучшая структура, то такую задачу называют *структурной оптимизацией*, а если при заданной структуре отыскиваются параметры объекта, удовлетворяющие заданному критерию, то такую задачу называют *параметрической оптимизацией*.

Параметры элементов любого технического объекта не могут иметь точно заданные значения. Это является следствием неизбежных погрешностей технологического оборудования, влияния внешних факторов, разбросов параметров материалов и т.д. Поэтому параметры элементов являются случайными величинами. А это значит, что при серийном производстве каждый экземпляр проектируемой аппаратуры будет иметь случайные значения выходных характеристик. Другими словами, выходные характеристики партии объектов будут находиться в некотором диапазоне, который не выходит за рамки регламентируемого в техническом задании. В противном случае, те объекты значения выходных характеристик, которые выходят за пределы диапазона, регламентируемого техническим заданием, считаются неработоспособными. Учесть влияние разбросов параметров

элементов на выходные характеристики и уменьшить это влияние позволяет решение задачи исследования разбросов.

Задача обеспечения надежности направлена на достижение заданных в техническом задании показателей надежности. Первая особенность этой задачи заключается в том, что ее решение осуществляется на всех этапах проектирования и при выполнении большинства проектных операций. Вторая особенность заключается в том, что решение этой задачи интегрирует в себе результаты решения практически всех задач анализа характеристик объекта и исследования их разбросов.

3. Моделирование в процессе автоматизированного проектирования РЭС

Как было показано ранее, процесс проектирования реализуется путем моделирования различных физических процессов, протекающих в аппаратуре при ее функционировании.

Под *моделью радиоэлектронной аппаратуры* понимается представленное в той или иной форме математическое описание, которое адекватно отражает сущность и характерные свойства рассматриваемого физического процесса, протекающего в схеме и конструкции аппаратуры.

Построение моделей аппаратуры предполагает формализацию схемы и конструкции с точки зрения рассматриваемого процесса, а она, в свою очередь, предполагает принятие определенных допущений. Поэтому модели неполно отражают детали рассматриваемого процесса. Степень соответствия модели реальным процессам определяет точность получаемых при моделировании результатов и зависит от полноты учета существенных сторон моделируемых процессов.

Практика инженерного проектирования РЭС показывает, что наиболее существенное влияние на выходные характеристики, их разбросы и надежность аппаратуры оказывают взаимосвязанные между собой электрические, тепловые и механические процессы.

Сформулируем принципы, исходя из которых строятся модели этих процессов.

Модель электрических процессов:

– отражает электрические процессы, протекающие в схеме аппаратуры, что должно обеспечить получение с заданной точностью функциональных и режимных электрических характеристик;

– включает в себя эквивалентные схемы радиоэлементов (резисторов, конденсаторов, катушек индуктивности, диодов, транзисторов, микросхем и пр.);

– учитывает паразитные проводимости, емкости, индуктивности, взаимные индуктивности и другие параметры, отражающие влияние конструкции на протекающие электрические процессы.

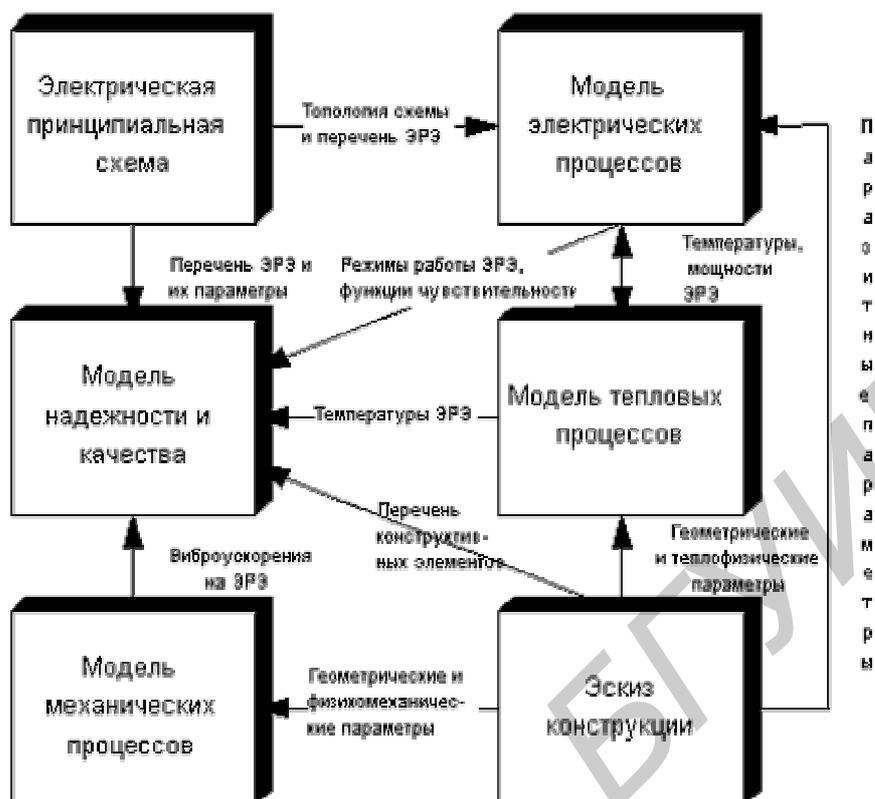


Рис. 3. Схема взаимодействия моделей

Модель тепловых процессов:

- отражает тепловые процессы в конструкции, связанные с теплообменом под влиянием окружающей среды, тепловыделениями в радиоэлементах, действием систем охлаждения и термостатирования, что должно обеспечить получение с заданной точностью тепловых характеристик;

- учитывает кондуктивные, конвективные и лучистые составляющие теплообмена в аппаратуре;

- учитывает распределенность массы элементов конструкции и анизотропность тепловых свойств электрорадиоэлементов.

Модель механических процессов:

- отражает механические процессы в конструкции, связанные с появлением механических деформаций и напряжений при механических воздействиях, что должно обеспечить получение с заданной точностью статических, частотных и временных механических характеристик;

- учитывает распределенность массы несущих конструкций и анизотропность механических свойств электрорадиоэлементов (ЭРЭ);

- учитывает эффект внутреннего трения в материалах конструкции при деформациях;

- учитывает жесткость крепления ЭРЭ к печатным платам, шасси и другим несущим конструкциям, а также крепления элементов конструкции друг с другом.

Модель надежности и качества:

- отражает с заданной точностью характеристики надежности и качества аппаратуры, связанные с технологическими факторами, тепловыми и механическими воздействиями, процессами старения;
- учитывает электрические, механические и тепловые режимы ЭРЭ;
- учитывает электрические, механические и тепловые режимы элементов конструкции;
- учитывает разбросы параметров ЭРЭ и элементов конструкции.

С учетом изложенного на рис. 3. представлена схема взаимодействия моделей в процессе автоматизированного проектирования. Блоками здесь выделены исходная информация для построения моделей физических процессов в виде электрической схемы и эскиза конструкции и сами модели. Стрелками показано взаимодействие между моделями. Надписи на стрелках отображают информацию, которая получается в результате расчета по одной модели и требуется для построения другой.

Например, модель электрических процессов строится на основе топологии схемы, перечня элементов, паразитных параметров, вносимых конструкцией, температур электрорадиоэлементов, а в результате моделирования электрических процессов помимо функциональных характеристик схемы получают мощности тепловыделений ЭРЭ, необходимые для построения модели тепловых процессов, режимы работы ЭРЭ и функции чувствительности, необходимые для построения модели надежности и качества.

4. Схема алгоритма методики моделирования РЭС

Важную роль при проведении моделирования физических процессов, протекающих в аппаратуре, играет его правильный порядок. Он определяется, с одной стороны, логикой проектирования аппаратуры, а с другой – взаимосвязью моделей физических процессов между собой.

Порядок проведения тех или иных работ в процессе автоматизированного проектирования регламентируется соответствующими методиками. На рис. 4 представлена схема алгоритма методики моделирования РЭС.

В рассматриваемой методике взаимосвязь моделей физических процессов отражается в дублировании некоторых работ, например, моделировании электрических процессов и исследовании разбросов. При проведении данных работ в первый раз нам не известны температуры радиоэлементов, поэтому учесть их нет возможности, и они задаются равными 25 °С. Возникает вопрос: имеет ли смысл на этой стадии проводить эти работы? Практика проектирования показывает, что имеет, поскольку результаты этих работ, во-первых, позволяют правильно сравнить полученные результаты моделирования с требованиями ТЗ, а во-вторых, грамотно сформулировать требования к конструкции. Второй раз моделирование электрических процессов и исследование разбросов проводится после разработки конструкции и моделирования ее тепловых процессов, поэтому температуры радиоэлементов становятся известными и появляется возможность их учесть.

Итогом выполнения работ является исследование надежности аппаратуры, которое интегрирует результаты всех работ и позволяет дать оценку качества разработанной схемы и конструкции.

5. Основные этапы автоматизированного проектирования РЭС

Сложившаяся практика автоматизированного проектирования показывает, что оно наиболее эффективно, если предусматриваются следующие этапы:

1. *Концептуальное проектирование* – основополагающий и определяющий этап проектирования. Все современные фирмы-разработчики систем проектирования перемещают проектные ресурсы на ранние этапы проектирования. Практикой доказано, что при этом достигается почти двойная экономия средств за счет того, что отсутствует необходимость в повторных операциях последующих этапов проектирования. На этом этапе возможна доработка ТЗ с целью обеспечения заданного уровня качества изделия, а иногда просто для обеспечения реализуемости проекта как такового.

2. *Функционально-логическое и схемотехническое проектирование:*

- а) проектирование функциональных схем;
- б) проектирование программ испытаний и тестов;
- в) проектирование и оптимизация принципиальных электрических схем.

3. *Конструктивно-технологическое проектирование:*

- а) конструкторское проектирование:
 - формирование множества рациональных вариантов (конструктивные решения на основе методов принятия решений);
 - анализ альтернативных программных модулей реализации последующих проектных процедур и выбор из них наиболее приемлемых – адаптация САПР к объекту проектирования;

– выбор базового варианта конструктивного решения (выбор метрических и топологических параметров объекта) с последующим решением следующих задач:

- компоновка конструктивных модулей;
- размещение конструктивных элементов;
- трассировка электрических соединений;
- оценка качества разработанной конструкции, предполагающая выполнение конструкторских расчетов электрических, тепловых, механических и других ее характеристик;

б) технологическая подготовка производства (создание маршрутных карт производственного процесса, управляющих технологическим оборудованием программ);

в) подготовка необходимой технической документации.

6. Особенности компоновки конструктивных модулей

Компоновкой электрической схемы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) на конструктивно законченные части называется процесс распределения элементов низшего конструктивного уровня в высший в соответствии с выбранным критерием. Основным для компоновки является критерий электромагнитно-тепловой совместимости элементов низшего уровня. Данный критерий определяет область допустимых разбиений схемы, при этом могут быть сформулированы и другие, частные критерии. Такими критериями могут быть минимум типов конструктивно законченных частей, плотность компоновки, минимум соединений между устройствами, число образующихся блоков, электрическая, магнитная и тепловая совместимость элементов и др. Очевидно, что внешние соединения между частями схем являются одним из важнейших факторов, определяющих надежность РЭА. Поэтому наиболее распространенным критерием является критерий минимума числа внешних связей. Выполнение этого критерия обеспечивает минимизацию взаимных наводок, упрощение конструкции, повышение надежности и т.д.

Формально задачу компоновки можно сформулировать следующим образом: объединить модули низшего ($i - 1$)-го уровня в модули более высокого i -го уровня по заданному критерию при наличии заданных ограничений.

Для построения формальной математической модели компоновочных задач удобно использовать теорию графов. При этом электрическую схему интерпретируют ненаправленным мультиграфом, в котором каждому конструктивному элементу (модулю) ставят в соответствие вершину мультиграфа, а электрическим связям схемы – его ребра. Тогда задача компоновки формулируется следующим образом: задан мультиграф $G(X, U)$, требуется «разрезать» его на отдельные куски $G1(X1, U1), G2(X2, U2), \dots$,

$G_k (X_k, U_k)$ так, чтобы число ребер, соединяющих эти куски, было минимальным, т.е. минимизировать $\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k U_{ij}, i \neq j$ при

$$\forall G_i(X_i, U_i), G_j(X_j, U_j) \subset G(X, U) \left[G_i(X_i, U_i) \neq G_j(X_j, U_j) \Rightarrow (X_i \cap X_j = \emptyset \& U_i \cap U_j = U_{ij}) \right]$$

$$\bigcup_{i=1}^k G_i(X_i, U_i) = G(X, U),$$

$$i, j = 1, 2, \dots, k,$$

где U_{ij} – множество ребер, соединяющих куски $G_i(X_i, U_i)$ и $G_j(X_j, U_j)$.

Среди методов компоновки выделяют два класса.

К первому классу относят такие методы, которые осуществляют разбиение коммутационной схемы на части (блоки) с учетом таких ограничений, как число элементов блоков, число внешних выводов блоков, суммарная площадь, занимаемая элементами и соединениями.

Такие задачи возникают при разбиении коммутационной схемы на блоки, к которым не предъявлены требования схемной унификации. Это задачи распределения плат по панелям, интегральных микросхем – по печатным платам, коммутационных схем — по кристаллам больших интегральных схем (БИС) или сверхбольших интегральных схем (СБИС). Таким образом, к первому классу задач компоновки относят такие, в которых критерии оптимизации и ограничения могут быть сведены к определенным конструктивным параметрам, характеризующим расположение отдельных элементов и соответствующих межсоединений. Эти задачи называют *задачами разбиения* конструктивных модулей или блоков.

Второй класс образуют такие методы, в которых кроме конструктивных характеристик модулей существенны и их функциональные характеристики. Они возникают на этапе перехода от функциональных или логических схем электронно-вычислительной аппаратуры (ЭВА) к электрическим принципиальным схемам, учитывающим заданную систему элементов, и сводятся в назначении элементов логической схемы в типовые модули из заданного набора. Данный класс задач основан на методах *покрытия* функциональных, логических и принципиальных электрических схем элементами с заданной серией и на методах компоновки типовых блоков.

Основными критериями при покрытии схем являются:

- число модулей, необходимых для покрытия исходной схемы;
- число межмодульных соединений;
- число типов используемых модулей;
- число используемых элементов в модулях (минимизация числа неиспользуемых элементов в модуле).

Если речь идет о заказной БИС, то анализируется необходимое число элементов на кристалле. Если речь идет о полузаказной БИС (матричная БИС), то речь идет о минимизации избыточности кристаллов.

В качестве ограничений выступают конструктивные и функциональные характеристики типовых модулей:

- максимально допустимое число элементов $(i-1)$ -го уровня модулей i -го уровня;

- максимально допустимое число выводов модуля $(i-1)$ -го уровня;

- ограничения на совместную работу модулей $(i-1)$ -го уровня.

Для указанных классов задачи компоновки выделяют соответственно алгоритмы компоновки конструктивных и типовых блоков.

Классификация алгоритмов компоновки представлена на рис. 5.

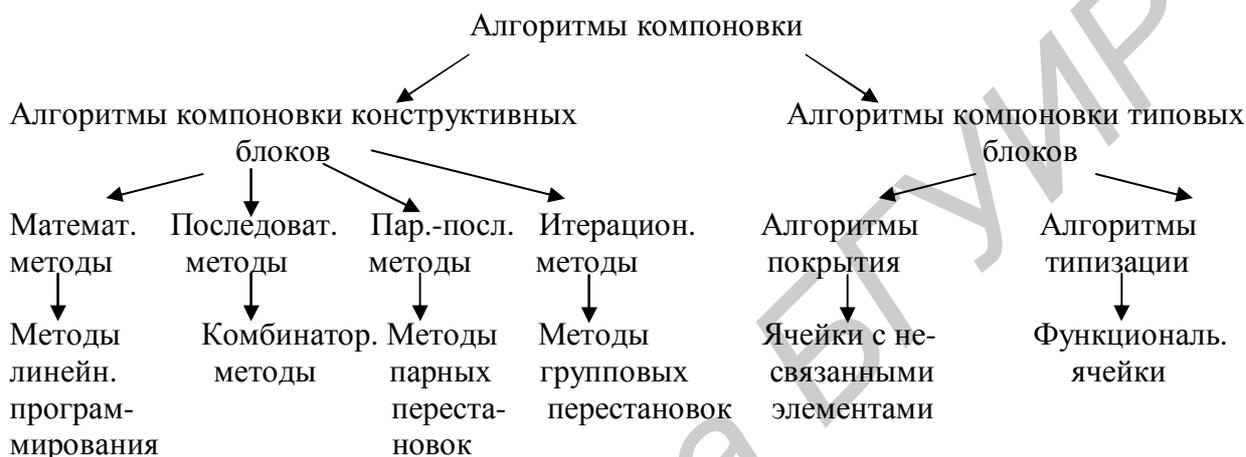


Рис. 5. Классификация алгоритмов компоновки

Критериями для классификации алгоритмов компоновки являются формирование частей или структура вычислительной процедуры. С этой точки зрения их делят на последовательные, параллельно-последовательные и итерационные. В последнее время наибольшее распространение получили приближенные алгоритмы компоновки (последовательные, итерационные, смешанные). При использовании последовательных алгоритмов сначала по определенному правилу выбирают вершину графа, затем осуществляют последовательный выбор вершин (из числа нераспределенных) и присоединение их к формируемому куску графа. После образования первого куска переходят ко второму и т.д. до получения желаемого разрезания исходного графа. В итерационных алгоритмах начальное разрезание графа на куски выполняют произвольным образом; оптимизация компоновки достигается парными или групповыми перестановками вершин графа из различных кусков. Процесс перераспределения вершин заканчивают при получении локального экстремума целевой функции, удовлетворяющего требованиям разработчика. В смешанных алгоритмах компоновки для получения начального варианта «разрезания» используется алгоритм последовательного формирования кусков; дальнейшая оптимизация решения осуществляется перераспределением вершин между отдельными кусками графа.

В последовательных алгоритмах вводится последовательный процесс компоновки частей, на каждом шаге которого в очередную часть добавляется

один из элементов, выбираемый по определенному приоритету. При этом «разрезание» исходного графа $G(X, U)$ на куски $G_1(X_1, U_1), G_2(X_2, U_2), \dots, G_k(X_k, U_k)$ сводится к следующему.

В графе $G(X, U)$ находят вершину $x_i \in X$ с минимальной локальной степенью $r(x_i) = \min r(x_j)$.

Если таких вершин несколько, то предпочтение отдают вершине с максимальным числом кратных ребер. Из множества вершин, смежных с вершинами формируемого куска графа $G_1(X_1, U_1)$, выбирают ту, которая обеспечивает минимальное приращение связей куска с еще не распределенными вершинами. Данную вершину $x_i \in X$ включают в $G_1(X_1, U_1)$, если не происходит нарушения ограничения по числу внешних связей куска, т.е.

$$\left[x_j \in GX_1 \ \& \ d(x_j) = r(x_j) - 2 \sum_{r \in E} a_{je} = \min_{x_r \in GX} d(x_g) \ \& \ \sum_{g \in jUE} d(x_g) \leq m \Rightarrow x_j \in X_1 \right],$$

где a_{je} – элемент матрицы смежности исходно графа $G(X, U)$;

$d(x_g)$ – относительный вес вершины x_g , равный приращению числа внешних ребер куска $G_1(X_1, U_1)$ при включении вершины x_g во множество X_1 ;

E – множество индексов вершин, включенных в формируемый кусок графа на предыдущих шагах алгоритма;

m – максимально допустимое число внешних связей отдельно взятого куска со всеми оставшимися.

Указанный процесс продолжается до тех пор, пока множество X_1 не будет содержать n элементов, либо присоединение очередной нераспределенной вершины x_j к куску $G_1(X_1, U_1)$ не приведет к нарушению ограничения по числу внешних соединений куска, равному $\sum_{k_R \in X_1} d(x_g)$.

Следует отметить, что величина $\sum_{k_R \in X_1} d(x_g)$ не является монотонной функцией $|X_1|$, поэтому для того, чтобы убедиться в невозможности дальнейшего формирования куска вследствие нарушения последнего ограничения, необходимо проверить его невыполнимость на последующих шагах увеличения множества X_1 вплоть до n . В качестве окончательного варианта выбирают кусок $G_{10}(X_{10}, U_{10})$, содержащий максимально возможное число вершин графа $G(X, U)$, для которого выполняются ограничения на число внешних связей и входящих в него вершин ($n_{\min} - n_{\max}$).

После преобразования куска $G_{10}(X_{10}, U_{10})$ процесс повторяют для формирования второго, третьего и т.д. кусков исходного графа с той лишь разницей, что рассмотрению подлежат вершины, не вошедшие в предыдущие куски.

Рассмотренный алгоритм прост, легко реализуется на ЭВМ и позволяет получить решение задачи компоновки. Также среди достоинств данной группы алгоритмов следует отметить высокое быстродействие их при решении задач компоновки.

Основным недостатком последовательного алгоритма является неспособность находить глобальный минимум количества внешних связей (не анализируются возможные ситуации).

В параллельно-последовательных алгоритмах сначала выделяется некоторое исходное множество групп элементов, которое затем распределяется по частям с учетом заданных критериев и ограничений на компоновку. Обычно эти алгоритмы, обладающие достаточно сложной структурой, используют при решении задач компоновки со специальными требованиями (например минимизация числа однотипных блоков). Как правило, алгоритмы этих двух типов применяются для создания базового (или начального) варианта компоновки. Итерационные алгоритмы служат для улучшения некоторого начального варианта компоновки в соответствии с принятым критерием. При использовании итерационных алгоритмов сначала граф схемы разбивают на определенное число частей произвольным образом (например с помощью последовательных алгоритмов), затем по некоторым правилам производится перестановка вершин из одной части графа в другую с целью минимизации числа внешних ребер.

Сущность итерационных алгоритмов заключается в выборе некоторого начального «разрезания» исходного графа на куски (вручную или с помощью последовательного метода компоновки) и последующем его улучшении с помощью итерационного парного или группового обмена вершин из различных кусков. При этом для каждой итерации осуществляется перестановка вершин, которая обеспечивает максимальное уменьшение числа связей между кусками графа или максимальное улучшение другого выбранного показателя качества с учетом используемых ограничений (например на максимальное число внешних ребер любого отдельно взятого куска).

Найдем выражение для подсчета приращения числа ребер, соединяющих куски $G_A(X_A, U_A)$ и $G_B(X_B, U_B)$, при парном обмене вершин $x_g \in X_A$ и $x_h \in X_B$.

Очевидно, что парная перестановка вершин x_g и x_h приведет к изменению числа только тех связывающих куски $G_A(X_A, U_A)$ и $G_B(X_B, U_B)$ ребер, которые инцидентны этим вершинам. Общее число соединительных ребер между $G_A(X_A, U_A)$ и $G_B(X_B, U_B)$, инцидентных x_g и x_h , до перестановки вершин определяют по матрице смежности следующим образом:

$$r_{gh} = \sum_{i \in I} a_{gi} + \sum_{j \in J} a_{hj} - a_{gh},$$

где i и j – множества индексов вершин, принадлежащих X_B и X_A .

В этом выражении первые два слагаемых определяют число ребер, соединяющих вершины x_g с $G_B(X_B, U_B)$ и x_h с $G_A(X_A, U_A)$, а наличие третьего члена обусловлено тем, что связь двух слагаемых учитывалась дважды.

После перестановки вершин x_g и x_h получим:

$$r_{gh} = \sum_{i \in I} a_{hi} + \sum_{j \in J} a_{gj} + a_{gh}.$$

Третий член выражения указывает на сохранение связи (x_g, x_h) после перестановки вершин. Следовательно, в результате перестановки x_g и x_h приращение числа ребер, соединяющих $G_A(X_A, U_A)$ и $G_B(X_B, U_B)$, равно

$$\Delta r_{gh} = r_{gh} - r_{hg} = \left(\sum_{i \in I} a_{gi} - \sum_{j \in J} a_{gj} \right) + \left(\sum_{j \in J} a_{hj} - \sum_{i \in I} a_{hi} \right) - 2a_{gh}.$$

Перестановка вершин целесообразна, если $\Delta r_{gh} > 0$, причем эффективность её тем выше, чем больше Δr_{gh} .

Если исходный граф $G(X, U)$ задан матрицей смежности $A = \|a_{ij}\|_{N \times N}$, то «разрезание» $G(X, U)$ на k кусков эквивалентно разбиению матрицы A на $k \times k$ подматриц (рис. 6):

$$A = \begin{array}{|c|c|c|c|} \hline & \begin{array}{|c|c|c|} \hline A_{11} & & A_{1j} & & A_{1k} \\ \hline & & & & \\ \hline A_{r1} & & A_{rj} & & A_{rk} \\ \hline & & & & \\ \hline A_{k1} & & A_{kj} & & A_{kk} \\ \hline \end{array} & & & \\ \hline \end{array}$$

Рис. 6. Разбиение матрицы A на $k \times k$ подматриц

Операция парного обмена вершин x_g и x_h сводится к перестановке соответствующих строк и столбцов матрицы A . Так как сумма элементов любой подматрицы A_{rj} определяет число ребер, связывающих $G_r(X_r, U_r)$ и $G_j(X_j, U_j)$, то процесс оптимального «разрезания» графа $G(X, U)$ на куски заключается в нахождении на каждой итерации таких парных перестановок строк и столбцов матрицы A , при которых максимизируется сумма элементов в диагональных подматрицах A_{jj} ($j = 1, 2, \dots, k$), что равносильно минимизации числа соединительных ребер.

В итерационных алгоритмах предусмотрена возможность поиска оптимального варианта для различных начальных разбиений. Это связано с тем, что при использовании итерационных алгоритмов оптимальность решения в значительной мере зависит от того, насколько удачно было произведено начальное разбиение графа $G(X, U)$.

Итерационные алгоритмы компоновки обеспечивают высокое качество решения задачи, однако, требуют больших затрат машинного времени, чем последовательные алгоритмы. Для сокращения числа итераций обмена вершин между кусками в смешанных алгоритмах для получения начального «разрезания» графа применяют последовательные методы формирования его

кусков. С этой целью в некоторых итерационных алгоритмах используют процесс групповой перестановки взаимно непересекающихся пар вершин.

В алгоритмах разбиения, основанных на математических методах, в основном используется *метод ветвей и границ* и решается задача о назначении. Алгоритмы разбиения с применением метода ветвей и границ состоят из следующих этапов.

Сначала определяется нижняя оценка разбиения графа на заданное число частей. Затем производится построение дерева решений и осуществляется поиск оптимального результата. Задачу разбиения графа схемы на части можно свести к задаче о назначении. При этом ищется вариант назначения кандидатов (вершин графа) во все части, дающий минимальные суммарные затраты. При этом каждая вершина графа может быть назначена только в одну часть и в каждой части должны содержаться различные вершины.

Алгоритмы компоновки типовых блоков сводятся к так называемым задачам *покрытия и типизации*.

Под *покрытием* понимается представление функциональной схемы устройства типовыми конструктивными элементами и связями между ними с выполнением заданных конструктивных ограничений. При покрытии выделяют задачи с несвязанными элементами и функциональными ячейками. В первом случае решают задачи определения необходимого числа ячеек для покрытия схемы с минимальной суммарной стоимостью и минимизацией числа связей между ячейками. Во втором случае решают задачу покрытия схемы заданным классом функциональных ячеек с минимизацией числа ячеек и суммарного числа связей между ячейками.

Типизация – разбиение схемы на части по критерию оптимальности (минимум номенклатуры частей разбиения) или по критерию максимума однотипности используемых ячеек.

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

7. Особенности размещения конструктивных элементов

Под *размещением* конструктивных элементов понимают поиск их оптимального взаимного положения в пределах заданного объема монтажного пространства.

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;
- схема соединений;
- 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. Особое значение эта задача приобретает при проектировании аппаратуры на печатных платах.

Основная сложность в постановке задач размещения заключается в выборе целевой функции. Связано это с тем, что одной из главных целей размещения является создание наилучших условий для дальнейшей трассировки соединений, что невозможно проверить без проведения самой трассировки. Любые другие способы оценки качества размещения (минимум числа пересечений ребер графа, интерпретирующего электрическую схему соединений, разбиение графа на минимальное число плоских суграфов и т.д.), хотя и позволяют создать благоприятные для трассировки условия, но не гарантируют получение оптимального результата, поскольку печатные проводники представляют собой криволинейные отрезки конечной ширины, конфигурация которых определяется в процессе их построения и зависит от порядка проведения соединений. Следовательно, если для оценки качества размещения элементов выбрать критерий, непосредственно связанный с получением оптимального рисунка металлизации печатной платы, то конечный результат может быть найден только при совместном решении задач размещения, выбора очередности проведения соединений и трассировки, что практически невозможно вследствие огромных затрат машинного времени.

Поэтому все применяемые в настоящее время алгоритмы размещения используют промежуточные критерии, которые лишь качественно способствуют решению основной задачи: получению оптимальной трассировки соединений. К таким критериям относятся:

- минимум суммарной взвешенной длины соединений;
- минимум числа соединений, длина которых больше заданной;
- минимум числа пересечений проводников;
- максимальное число соединений между элементами, находящимися в соседних позициях либо в позициях, указанных разработчиком;
- максимум числа цепей простой конфигурации.

Наибольшее распространение в алгоритмах размещения получил первый критерий, что объясняется следующими причинами: уменьшение длин соединений улучшает электрические характеристики устройства, упрощает трассировку печатных плат; кроме того, он сравнительно прост в реализации.

Возможно применение обобщенных критериев:

- критерий равномерности размещения элементов на плате с точки зрения обеспечения равномерной плотности сигнальных соединений на различных участках платы;
- минимум средней длины сигнальных соединений;
- совместимость элементов с точки зрения допустимых показателей тепловыделения 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 конструктива.

В зависимости от конструкции коммутационной платы и способов выполнения соединений расстояние между позициями установки элементов подсчитывается по одной из следующих формул:

$$d_{ij}^1 = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2},$$

$$d_{ij}^1 = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|.$$

В общем виде задача размещения конструктивных элементов на коммутационной плате формулируется следующим образом.

Задано множество конструктивных элементов $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ и множество связей между этими элементами $V = \{v_1, v_2, \dots, v_p\}$, а также множество установочных мест (позиций) на коммутационной плате $T = \{t_1, t_2, \dots, t_k\}$. Найти такое отображение множества R на множестве T , которое обеспечивает экстремум целевой функции

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} d_{ij},$$

где c_{ij} – коэффициент взвешенной связности,

d_{ij} – расстояние между i и j посадочным местом.

Классификация алгоритмов размещения представлена на рис. 7.

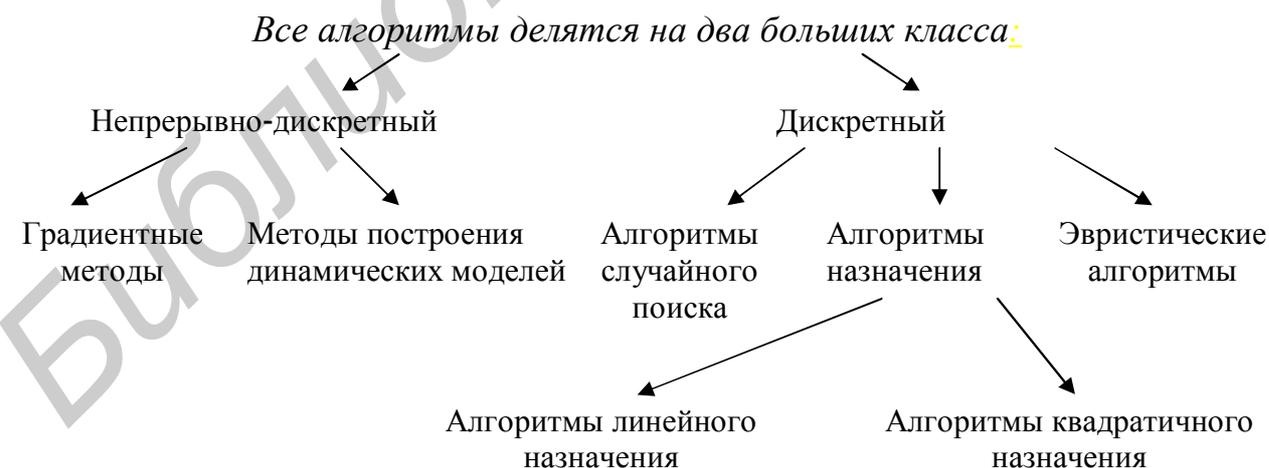


Рис. 7. Классификация алгоритмов размещения

При использовании *непрерывно-дискретных* методов задача решается в два этапа. На первом этапе определяются координаты местоположения центров элементов, при которых целевая функция принимает экстремальное значение (эта координата носит непрерывный характер, т.е. центры

элементов в общем случае могут оказаться в любых местах платы). На втором этапе полученная координата округляется до фиксированного целочисленного значения координатной сетки. Координата становится дискретной.

При использовании *градиентных методов* задача сводится к минимизации суммарной взвешенной длины соединений, которая является целевой функцией.

Эффективность данных методов существенно повышается, если их применять совместно с методом случайного поиска.

В основу *методов построения динамических моделей* положен динамический метод В. С. Линского. Процесс размещения элементов на плате представляется как движение к состоянию равновесия системы материальных точек (элементов), на каждую из которых действуют силы притяжения и отталкивания, интерпретирующие связи между размещаемыми элементами. Если силы притяжения, действующие между любыми двумя материальными точками r_i и r_j , пропорциональны числу электрических связей между данными конструктивными элементами, то состояние равновесия такой системы соответствует минимуму суммарной длины всех соединений. Введение сил отталкивания материальных точек друг от друга и от границ платы исключает возможность слияния двух любых точек и способствует их равномерному распределению по поверхности монтажного поля. Чтобы устранить возникновение в системе незатухающих колебаний, вводят силы сопротивления среды, пропорциональные скорости движения материальных точек.

Таким образом, задача оптимального размещения элементов сводится к нахождению такого местоположения точек, при котором равнодействующие всех сил обращаются в нуль.

К достоинствам данного метода относятся возможность получения глобального экстремума целевой функции, а также сведение поиска к вычислительным процедурам, для которых имеются разработанные численные методы.

Недостатками являются трудоемкость метода и сложность его реализации (подбора коэффициентов для силовых связей), необходимость фиксирования местоположения некоторого числа конструктивных элементов на плате для предотвращения большой неравномерности их размещения на отдельных участках платы.

Эти методы наиболее эффективны для размещения разногабаритных элементов.

Дискретные методы решают задачу размещения элементов в фиксированное количество посадочных мест, расположенных в узлах координатной сетки.

Алгоритмы случайного поиска a_n решают задачу размещения на основе задания начального случайного размещения элементов и последовательного или итерационного размещения элементов, связанных с уже установленными элементами.

Алгоритмы назначения сводятся к назначению определенных элементов в определенные позиции координатной сетки с учетом достижения экстремума целевой функции. Задача может решаться как система уравнений.

Эвристические методы сводятся к алгоритмической реализации того или иного эвристического приема (эвристики). К этой группе относятся *итерационные и последовательные алгоритмы*.

Итерационные алгоритмы имеют структуру, аналогичную итерационным алгоритмам компоновки, рассмотренным ранее. В них для улучшения исходного размещения элементов на плате вводят итерационный процесс перестановки местами пар элементов. В случае минимизации суммарной взвешенной длины соединений формула для расчета изменения значения целевой функции при перестановке местами элементов r_i и r_j , закрепленных в позициях t_f и t_g , имеет вид

$$\Delta F_{ij}(f, g) = \sum_{p=1}^k (c_{ip} - c_{jp})(d_{fh(p)} - d_{gh(p)}),$$

где p и $h(p)$ – порядковый номер и позиция закрепления неподвижного элемента r_p .

Если $\Delta F_{ij}(f, g) > 0$, то осуществляют перестановку r_i и r_j , приводящую к уменьшению целевой функции на $\Delta F_{ij}(f, g)$, после чего производят поиск и перестановку следующей пары элементов и т.д. Процесс заканчивается получением такого варианта размещения, для которого дальнейшее улучшение за счет парных перестановок элементов невозможно.

Использование описанного направленного перебора сокращает число анализируемых вариантов размещения (по сравнению с полным перебором), но приводит к потере гарантии нахождения глобального экстремума целевой функции.

Алгоритмы данной группы характеризуются достаточно высоким быстродействием. Алгоритмы с групповыми перестановками элементов на практике используются редко ввиду их сложности, которая часто не оправдывает достигаемую степень улучшения результата.

Последовательные алгоритмы основаны на допущении, что для получения оптимального размещения необходимо в соседних позициях располагать элементы, максимально связанные друг с другом. Сущность этих алгоритмов состоит в последовательном закреплении заданного набора конструктивных элементов на коммутационной плате относительно ранее установленных. В качестве первоначально закрепленных на плате элементов обычно выбирают разъемы, которые искусственно «раздвигают» до краев платы. При этом все контакты разъемов равномерно распределяются по секциям (столбцам и строкам координатной сетки). На каждом i -м шаге ($i = 1, 2, \dots, n$) для установки на коммутационную плату выбирают элемент $r_i^{(i)}$ из числа еще не размещенных, имеющий максимальную степень связности с ранее закрепленными элементами R_{i-1} . В большинстве используемых в настоящее

время алгоритмов оценки степени связности производят по одной из следующих формул:

$$\Phi_i^{(1)} = \sum_{j \in J_{i-1}} c_{ij};$$

$$\Phi_i^{(1)} = 2 \sum_{j \in J_{i-1}} c_{ij} - \sum_{j=1}^n c_{ij},$$

где c_{ij} – коэффициент взвешенной связности элементов i и j ;

J_{l-1} – множество индексов элементов, закрепленных на предыдущих $l-1$ шагах;

n – общее число размещенных элементов.

Если установочные размеры всех размещаемых на плате элементов одинаковы, то выбранный на очередном шаге элемент $r_i^{(l)}$ закрепляют в той позиции $t_j^{(l)}$ из числа незанятых, для которой значение целевой функции $F_j^{(l)}$ с учетом ранее размещенных элементов R_{l-1} минимально. В частности, если критерием оптимальности является минимум суммарной взвешенной длины соединений, то

$$F_j^{(l)} = \min_{t_j \in T \setminus T_{l-1}} \sum_{j \in J_{l-1}} c_{ij} d_{fj},$$

где d_{fj} – расстояние между f -й позицией установки элемента $r_i^{(l)}$ и позицией размещенного ранее элемента r_j ;

T_{l-1} – множество позиций, занятых элементами после $(l-1)$ -го шага алгоритма.

Процесс размещения алгоритма заканчивается после выполнения n шагов алгоритма.

Алгоритмы, использующие последовательный процесс закрепления элементов в позициях, являются в настоящее время самыми быстродействующими. Однако по качеству получаемого решения последовательные алгоритмы уступают итерационным. Поэтому их используют обычно для получения начального размещения элементов на плате.

8. Особенности трассировки электрических соединений РЭС

Трассировка соединений является, как правило, заключительным этапом конструкторского проектирования РЭС и состоит в определении конфигурации электрических соединений, соответствующих схеме электрической принципиальной и удовлетворяющих используемым при трассировке конструктивно-технологическим ограничениям и принятым критериям оптимальности.

Задача трассировки – одна из наиболее трудоемких в общей проблеме автоматизации проектирования РЭА. Это связано с несколькими факторами, в частности, с многообразием способов конструктивно-технологической

реализации соединений, для каждого из которых при алгоритмическом решении задачи применяются специфические критерии оптимизации и ограничения. С математической точки зрения трассировка – наисложнейшая задача выбора из огромного числа вариантов оптимального решения.

Задача трассировки имеет метрический и топологический аспекты. Метрический аспект предполагает учет конструктивных размеров элементов, соединений и монтажного поля. Топологический аспект связан с выбором допустимого пространственного расположения отдельных монтажных соединений, числа слоев коммутационной схемы и т.п.

Алгоритмические методы трассировки проводных и печатных соединений существенно различаются. В современных РЭС *трассировку проводных соединений* производят двумя способами:

- 1) по прямым, соединяющим отдельные выводы модулей (монтаж внавал);
- 2) с помощью жгутов.

Первый способ отличается простотой выполнения и высокой помехоустойчивостью, так как позволяет до минимума сократить общую длину проводников и протяженность участков их параллельного прохождения, вследствие чего уровень паразитных наводок и время задержки сигнала в электрических соединениях относительно невелики. Однако при его использовании высока вероятность появления в процессе монтажа ошибок (неправильное подсоединение отдельных выводов, пропуск некоторых соединений и т.п.), в то время как контроль правильности трассировки сложен. Кроме того, при высокой плотности монтажа этот способ обладает малой ремонтпригодностью.

Второй способ предполагает объединение отдельных проводников в жгуты, которые укладываются в специальные каналы, предусмотренные в монтажном поле. Этот способ более технологичен, так как позволяет разделить операции вязки и распайки жгутов, а также упростить процесс контроля и устранения ошибок, допущенных при монтаже. Однако он практически неприемлем для создания высокочастотной и чувствительной к электрическим помехам аппаратуры, несмотря на возможность использования в нем экранированных и других специальных кабелей. С точки зрения задач, непосредственно решаемых конструктором, применение первого способа трассировки проводников предполагает лишь нахождение пар непосредственно соединяемых контактов, в то время как для второго способа необходимо еще произвести раскладку всех проводников по жгутам (каналам), т.е. определить их оптимальную конфигурацию на монтажном поле. С учетом указанных особенностей выполнения проводного монтажа задача трассировки в общем виде может быть сформулирована следующим образом.

В некоторой системе координат XYZ , связанной с коммутационным пространством модуля, задано местоположение множества выводов $M = \{m_1, m_2, \dots, m_p\}$. В соответствии с электрической схемой соединений разобьем множество M на непересекающиеся подмножества $M^{(1)}, M^{(2)}, \dots, M^{(k)}$,

каждое из которых включает в себя выводы, подлежащие электрическому объединению. Для каждого подмножества $M^{(i)} = \{m^{(i)}_1, m^{(i)}_2, \dots, m^{(i)}_n\}$, $i = 1, 2, \dots, k$ требуется определить последовательность соединения выводов и последовательность проводников, обеспечивающих при заданных ограничениях минимальную суммарную длину соединений.

Очевидно, что среди различных вариантов соединения вершин (выводов) подмножества $M^{(i)}$ целесообразно рассматривать лишь древообразные структуры. Практически задача сводится к отысканию дерева с минимальной суммарной длиной ребер (построению кратчайшей связывающей сети).

Эта задача, тривиальная для случая соединения небольшого количества вершин, оказывается сложной при большой мощности подмножества $M^{(i)}$, так как по мере увеличения числа вершин n , входящих в $M^{(i)}$, число связывающих деревьев t_n возрастает по формуле $t_n = n^{n-2}$.

При жгутовом монтаже после нахождения пар непосредственно соединяемых контактов решают задачу формирования жгутов, связанную с нахождением такого распределения проводников по каналам, которое обеспечивает минимум суммарной длины соединений при максимально возможном числе трасс простой конфигурации. Ограничением является пропускная способность каналов.

Выполняя трассировку электрических соединений, следует иметь в виду, что при одновременной трассировке мощных и слабосигнальных (чувствительных к наводкам) цепей необходимо соблюдать очередность проведения соединений. Обычно в первую очередь прокладывают слабосигнальные цепи с целью минимизации их длины. Затем определяют конфигурацию мощных цепей, которые должны находиться на возможно большем удалении от слабосигнальных. При этом происходит удлинение трасс мощных цепей. После этого производят трассировку всех остальных цепей. Таким образом, учет требований помехоустойчивости приводит к изменению порядка трассировки отдельных соединений, а также к уменьшению длин слаботочных цепей до минимально возможных величин, которые, в свою очередь, не должны превышать критической длины соединений, определяемой уровнем допустимых паразитных наводок. При этом практически трассировка проводных соединений сводится к решению задачи построения кратчайшей связывающей сети на заданном множестве контактов. Эту задачу наиболее эффективно решает *алгоритм Прима*.

Проектирование *печатного монтажа* является одной из самых сложных задач автоматизации проектирования РЭА. Для ее решения предложено большое число различных алгоритмов, однако ни один из них не может практически реализовать тактику и стратегию человека-конструктора. Основным недостатком всех используемых в САПР программ является заложенный в них принцип последовательного и фрагментального просмотра коммутационного пространства. Локализация задачи в пределах одного фрагмента не обеспечивает оптимизации монтажа в целом, так как качество последующей разводки существенным образом зависит от ранее проведенных трасс. Сложность

алгоритмов трассировки, обусловленная необходимостью учета большого числа различных требований, связанных со спецификой изготовления печатных плат и особенностями разрабатываемой конструкции, не позволяет привести подробные описания применяемых в настоящее время алгоритмов, поэтому ограничимся рассмотрением основных принципов их построения. Задача проектирования печатного монтажа может быть сформулирована следующим образом.

На коммутационной поверхности задано со своими координатами (x, y) множество конструктивных элементов $R = \{r_1, r_2, \dots, r_T\}$. Выводы этих элементов образуют некоторое множество из L связных подмножеств: $a = \{C_1, C_2, \dots, C_L\}$, причем каждое l -е подмножество C_l объединяет N_l выводов конструктивных элементов из множества R в соответствии с принципиальной электрической схемой. Кроме того, заданы расположение групп контактных площадок разъемов и монтажных отверстий, а также ряд требований, предъявляемых к топологии платы: минимальная ширина проводников и зазора между ними, размеры контактных площадок, число слоев металлизации и способы перехода с одного слоя на другой и т.п. Требуется с учетом заданных конструкторско-технологических ограничений соединить выводы конструктивных элементов внутри каждого подмножества C_l так, чтобы полученные соединения отвечали выбранному показателю качества. На практике при оптимизации топологии печатного монтажа часто используют следующие критерии качества:

- минимум суммарной длины всех соединений;
- минимум числа пересечений проводников;
- равномерность распределения проводников на печатной плате;
- минимальная протяженность параллельных участков соседних проводников;
- минимум числа слоев металлизации и числа переходов из слоя в слой (применяется при проектировании многослойных печатных плат).

Так как все перечисленные критерии являются противоречивыми, то при выборе обобщенного показателя качества указывают важность или очередность учета отдельных критериев оптимизации. В общем виде задачу трассировки печатных соединений можно свести к построению бесперекрестного минимального леса и отысканию кратчайшего пути между его вершинами (трассировка соединений). Обе эти задачи можно рассматривать как независимые, алгоритмически разрешимые. Построение бесперекрестного минимального леса сводится к поиску таких связывающих деревьев G_l для каждого из подмножеств C_l , которые минимизируют целевую

функцию $F = \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{N_l-1} (d_{ij}^{(n)})_l$, где $(d_{ij}^{(n)})_l$ – длина n -й связи в выбранной метрике между точками i и j (контактами выводов), принадлежащими подмножеству

C_i , объединяющему N_i контактов. Так, при последовательном построении связывающих деревьев ранее проведенные соединения рассматривают как препятствия, т.е. существует неоднозначность задания d_{ij} . Поэтому применение наиболее широко используемого для этого алгоритма Прима позволяет найти минимальное связывающее дерево лишь относительно ранее проведенных цепей. Единственным достоверным способом получения оптимального результата в этих условиях является полный перебор вариантов последовательностей построения бесперекрестного леса, но при этом время решения задачи выходит за допустимые пределы уже для сравнительно простых печатных плат. Характерной особенностью печатного монтажа является возможность кроме соединений типа «вывод–вывод», применяемых в проводном монтаже, использовать соединения типа «вывод–проводник» и «проводник–проводник».

Решение задачи трассировки печатных 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.

На первом этапе необходимо решить, в какой последовательности следует соединять контакты одной цепи, чтобы суммарная длина всех соединений цепи была минимальна. Эта задача сводится к задаче построения кратчайшей связывающей сети или минимального связывающего дерева.

Наибольшее распространение для решения этой задачи получил алгоритм Прима. На первом шаге алгоритма для произвольного контакта из n находится ближайшая вершина и соединяется ребром. На остальных $n-2$ шагах из множества неподсоединенных контактов выбирается тот, который находится ближе всего к группе уже связанных контактов, и соединяется кратчайшим ребром.

Алгоритм Прима применяется для определения числа пересечений проводников и оценки качества решения задачи размещения.

Для печатного монтажа лучшие результаты будут получены, если искать минимальное дерево в координатной сетке; такое дерево называется *минимальным ортогональным деревом*. Особенность задачи заключается в том, что при построении дерева допускается введение дополнительных вершин, и такое дерево называется *деревом Штейнера*. Для решения задачи в данной постановке применяется ортогональная метрика и разработаны алгоритмы, аналогичные алгоритму Прима.

Распределение проводников по слоям может быть выполнено двумя способами.

1. Последовательно проводят соединения до заполнения очередного слоя, после чего переходят к заполнению следующего слоя (при таком подходе получается большое число слоев и неравномерное их заполнение).

2. Подсчитывают возможное число пересечений проводников, совмещенных в одном слое, а затем проводят распределение по слоям.

Подсчет возможного числа пересечений проводников можно осуществить для двух различных представлений соединения двух контактов на плоскости.

1. Соединения представляются в виде прямолинейных отрезков, и их пересечения определяются по уравнениям прямых линий.

2. Соединения представляются в ортогональном пространстве, и их пересечения определяются по уравнениям прямых, параллельных осям координат, или по факту перекрытия минимальных прямоугольников, построенных для соответствующих контактов.

Определение порядка трассировки проводников в каждом слое связано с тем, что успех трассировки очередного проводника существенно зависит от конфигурации уже проведенных трасс. Так как задача не формализуется теоретическими методами, для ее решения разработаны различные эвристические алгоритмы.

Наибольшее распространение получили методы, основанные на оценке длины проводников. Здесь возможны два подхода:

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 в процессе трассировки.

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.

Для эффективного использования ресурсов многослойной печатной платы решается задача распределения строящихся проводников между слоями. Своевременное выявление конфликтов между цепями и их устранение путем разнесения соответствующих печатных проводников на различные слои позволяет существенно повысить качество трассировки.

Одновременная оптимизация всех соединений при трассировке за счет перебора всех вариантов в настоящее время невозможна. Поэтому используются в основном локально оптимальные методы трассировки, когда трасса оптимальна лишь на данном шаге при наличии ранее проведенных соединений.

Исходной информацией для решения задачи трассировки соединений обычно являются список цепей, параметры конструкции элементов и коммутационного поля, а также данные по размещению элементов и учитываемые ограничения. Критериями трассировки могут быть процент реализованных соединений, суммарная длина проводников, число пересечений проводников, число монтажных слоев, число межслойных переходов, равномерность распределения проводников, минимальная область трассировки и т.д. Часто эти критерии являются взаимоисключающими, поэтому оценка качества трассировки ведется по доминирующему критерию при выполнении ограничений по другим критериям, либо применяют аддитивную или мультипликативную форму оценочной функции, например следующего вида:

$$F = \sum_p \lambda_i f_i ,$$

где F – аддитивный критерий;
 λ_i – весовой коэффициент;
 f_i – частный критерий;
 p – число частных критериев.

Известные алгоритмы трассировки печатных плат можно условно разбить на три большие группы.

1. Волновые алгоритмы, основанные на идеях Ли и разработанные Ю. Л. Зиманом и Г. Г. Рябовым. Данные алгоритмы получили широкое распространение в существующих САПР, поскольку они позволяют легко учитывать технологическую специфику печатного монтажа со своей совокупностью конструктивных ограничений. Эти алгоритмы всегда гарантируют построение трассы, если путь для нее существует.

2. Ортогональные алгоритмы, обладающие большим быстродействием, чем алгоритмы первой группы. Реализация их на ЭВМ требует в 75–100 раз меньше вычислений по сравнению с волновыми алгоритмами. Такие алгоритмы применяют при проектировании печатных плат со сквозными металлизированными отверстиями. Недостатки этой группы алгоритмов связаны с получением большого числа переходов со слоя на слой, отсутствием 100 %-й гарантии проведения трасс, большим числом параллельно идущих проводников.

3. Алгоритмы эвристического типа. Эти алгоритмы частично основаны на эвристическом приеме поиска пути в лабиринте. При этом каждое соединение проводится по кратчайшему пути, обходя встречающиеся на пути препятствия.

Волновой алгоритм Ли является классическим примером использования методов динамического программирования для решения задач трассировки печатных соединений. Общим для этих алгоритмов является разбиение монтажного поля на ячейки, размер и плотность которых определяют плотность и конфигурацию печатных проводников. Наибольшее распространение на практике получило разбиение рабочего поля на правильные квадраты, что

обеспечивает простую адресацию ячеек в прямоугольной системе координат и привычную форму соединений. Размеры ячеек определяются конструктивно-технологическими требованиями, предъявляемыми к печатному монтажу. Так как в каждой ячейке обычно размещается только один вывод или печатный проводник, максимальные размеры ячеек определяются допустимой точностью воспроизведения проводников. Минимальные размеры ячеек обуславливаются соотношением

$$d \geq b_{np} + l_3,$$

где d – расстояния между центрами соседних ячеек;

b_{np} – минимальная ширина печатного проводника;

l_3 – минимальное расстояние между соседними проводниками.

Соединение выводов конструктивных элементов осуществляется в результате последовательного заполнения ячеек трассами, конфигурация которых является локально оптимальной (соединения проводятся оптимальным образом лишь по отношению к ранее построенным проводникам) в соответствии с выбранными критериями трассировки.

Все ячейки монтажного поля подразделяют на занятые и свободные. Занятыми считаются ячейки, в которых уже расположены проводники, построенные на предыдущих шагах, или находятся монтажные выводы элементов, а также ячейки, соответствующие границе платы и запрещенным для прокладки проводников участкам. Каждый раз при проведении новой трассы можно использовать лишь свободные ячейки, число которых по мере проведения трасс сокращается.

На множестве свободных ячеек коммутационного поля моделируют волну влияния из одной ячейки в другую, соединяемых впоследствии общим проводником. Первую ячейку, в которой зарождается волна влияний, называют источником, а вторую – приемником волны. Чтобы иметь возможность следить за прохождением фронта волны влияний, его фрагментам на каждом этапе присваивают некоторые веса:

$$P_k = P_{k-1} + j(f_1, f_2, \dots, f_g),$$

где P_k и P_{k-1} – веса ячеек k -го и $(k-1)$ -го фронтов;

$j(f_1, f_2, \dots, f_g)$ – весовая функция, являющаяся показателем качества проведения пути, каждый параметр которой $f_i (i = 1, 2, \dots, g)$ характеризует путь с точки зрения одного из критериев качества (длины пути, числа пересечений и т.п.).

На величину P_k накладывают одно ограничение – веса ячеек предыдущих фронтов не должны быть больше весов ячеек последующих фронтов. Фронт распространяется только на соседние ячейки, которые имеют с ячейками предыдущего фронта либо общую сторону, либо хотя бы одну общую точку. Процесс распространения волны продолжается до тех пор, пока её расширяющийся фронт не достигнет приемника или на Θ -м шаге не найдется ни одной свободной ячейки, которая могла бы быть включена в

очередной фронт, что соответствует случаю невозможности проведения трассы при заданных ограничениях.

Если в результате распространения волна достигла приемника, то осуществляют «проведение пути», которое заключается в движении от приемника к источнику по пройденным на этапе распространения волны ячейкам, следя за тем, чтобы значения P_k монотонно убывали. В результате получают путь, соединяющий эти две точки. Из описания алгоритма следует, что все условия, необходимые для проведения пути, закладываются в правила вычисления веса ячеек.

Чтобы исключить неопределенность при проведении пути для случая, когда несколько ячеек имеют одинаковый минимальный вес, вводят понятие путевых координат, задающих предпочтительность проведения трассы. Каждое направление кодируют двоичным числом по $\text{mod } q$, где q – число просматриваемых соседних ячеек. При этом чем более предпочтительно то или иное направление, тем меньший числовой код оно имеет. Например, если задаться приоритетным порядком проведения пути сверху, справа, снизу и слева, то коды соответствующих путевых координат будут 00, 01, 10, и 11. Приписание путевых координат производят на этапе распространения волны. При проведении пути движение от ячейки к ячейке осуществляют по путевым координатам.

Пример, иллюстрирующий работу волнового алгоритма для фрагмента печатной платы, представлен на рис. 8.

Существенными недостатками волнового алгоритма являются малое быстродействие и большой объем оперативной памяти ЭВМ, необходимый для хранения информации о текущем состоянии всех ячеек коммутационного поля, возможность построения лишь соединений типа «ввод–вывод». Попытки устранить указанные недостатки привели к созданию ряда модификаций волнового алгоритма.

Модифицированным алгоритмом Ли является *метод встречной волны*. В данном методе источниками волн являются обе ячейки, подлежащие электрическому объединению. При этом на каждом k -м шаге поочередно строят соответствующие фронты первой и второй волн, распространяющихся из этих ячеек. Процесс продолжается до тех пор, пока какая-либо ячейка из

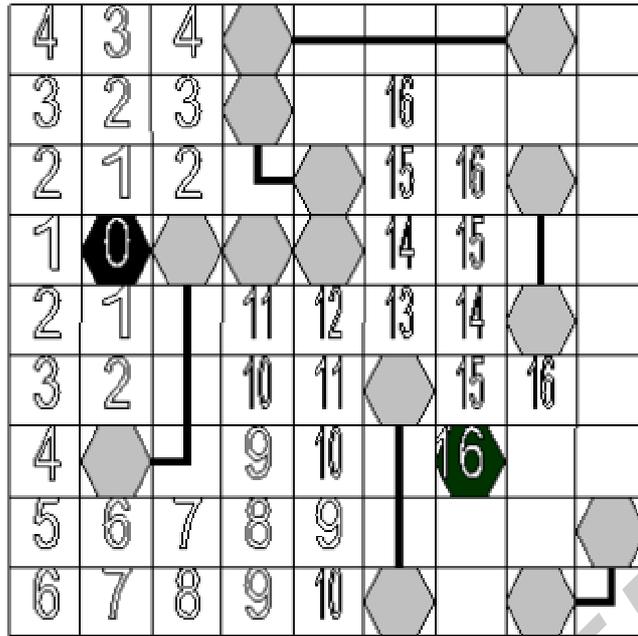


Рис. 8. Волновой алгоритм трассировки печатных плат

фронта первой волны не попадет на фронт второй волны или наоборот. Проведение пути осуществляют из данной ячейки в направлении обоих источников по правилам, описанным в волновом алгоритме Ли.

Оценим число ячеек, просматриваемых на этапе распространения волны, при использовании в качестве источников одной или двух объединяемых точек. Пусть расстояние между этими точками R . Тогда для первого случая в момент достижения волной ячейки-приемника площадь просмотренной окрестности имеет величину $Q^{(2)} \leq pR^2$ (знак равенства соответствует отсутствию преград пути распространения волны). Для второго случая в момент встречи фронтов двух волн площадь просмотренной окрестности $Q^{(2)} \leq 2p(0,5R)^2 = 0,5pR^2$.

Таким образом, при использовании метода встречной волны просматриваемая площадь, а следовательно, и время, затрачиваемое на этапе распространения волны, уменьшаются примерно вдвое.

Недостатком метода является необходимость выделения дополнительного разряда памяти на каждую рабочую ячейку поля для хранения информации о принадлежности её к первой или второй волне. Однако выигрыш в повышении быстродействия восполняет указанный недостаток, поэтому данный метод наиболее широко используют при трассировке.

В лучевом алгоритме выбор ячеек для определения пути между соединяемыми точками A и B производят по заранее заданным направлениям, подобным лучам. Это позволяет сократить число просматриваемых алгоритмом ячеек, а следовательно, и время на анализ и кодировку их состояния, однако, приводит к снижению вероятности нахождения пути сложной конфигурации и усложняет учет конструктивных требований к технологии печатной платы.

Работа алгоритма заключается в следующем.

Задается число лучей, распространяемых из точек A и B , а также порядок присвоения путевых координат (обычно число лучей для каждой ячейки-источника принимается одинаковым). Лучи $A(1), A(2), \dots, A(n)$ и $B(1), B(2), \dots, B(n)$ считают одноименными, если они распространяются из одноименных источников A или B . Лучи $A(i)$ и $B(i)$ являются разноименными по отношению друг к другу. Распространение лучей производят одновременно из обоих источников до встречи двух разноименных лучей в некоторой ячейке C . Путь проводится из ячейки C и проходит через ячейки, по которым распространялись лучи (рис. 9).

При распространении луча может возникнуть ситуация, когда все соседние ячейки будут заняты. В этом случае луч считается заблокированным и его распространение прекращается.

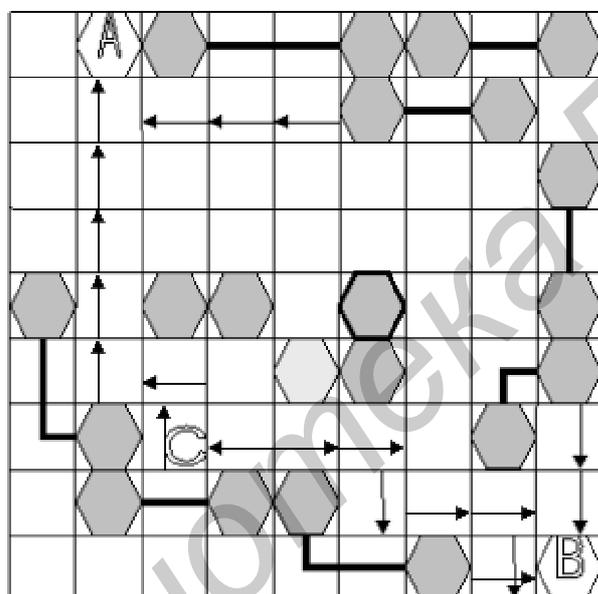


Рис. 9. Лучевой алгоритм трассировки печатной платы

Лучи:

$A(1)$: вверх, влево

$A(2)$: влево, вверх

$B(1)$: вниз, вправо

$B(2)$: вправо, вниз

На втором шаге луч $B(1)$ оказывается заблокированным, а на четвертом шаге блокируется и луч $A(2)$. Лучи $A(1)$ и $B(2)$ встречаются в ячейке C на восьмом шаге.

Обычно с помощью лучевого алгоритма удается построить до 70–80 % трасс, остальные проводят, используя волновой алгоритм или вручную. Его применение особенно выгодно при проектировании плат с невысокой плотностью монтажа.

Канальные методы трассировки определяют одно из самостоятельных направлений решения задач топологического синтеза. Эти

методы имеют определенные преимущества перед другими, но им присущи также и недостатки. Наибольшее распространение каналные методы получили при проектировании больших интегральных схем. Однако это не исключает их использование в практике трассировки монтажных плат.

Основной единицей модели монтажного пространства при канальной трассировке является канал, представляющий множество свободных для трассировки вертикальных и горизонтальных каналов-магистралей, расположенных между рядами запрещенных для трассировки зон. Соединения между соседними каналами осуществляются через так называемые проходные блоки или через внешнюю область монтажа. Процесс канальной трассировки обычно разделяют на несколько этапов:

1. Создание канала. На этом этапе элементы уже размещены, и интервалы между ними достаточны для проведения любых проводников питания и заземления, которые должны находиться в этих интервалах, и имеется некоторое пространство для проводников других цепей. При создании канала все пустое пространство вокруг элементов занимает каналом. Основная цель здесь состоит в том, чтобы выполнить разделение как можно проще; «простота» формально определена тем условием, чтобы общая длина ребер, разделяющих прямоугольные каналы, была минимальна.

2. Глобальная трассировка. В процессе глобальной трассировки для каждой цепи определяется последовательность каналов, которую она должна занять. Здесь возможно использование алгоритмов нахождения кратчайшего пути.

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

4. Трассировка соединений в каналах. Выбрав позиции для всех точек пересечения границ между каналами, можно проложить трассы проводников внутри каждого канала отдельно, зная, что прокладывание трассы в одном канале не повлияет на другой.

Наиболее известным методом канальной трассировки является метод стволов и ветвей. В этом методе при трассировке имеет место одно ограничение, состоящее в том, что каждой группе соединительных проводников соответствует одна горизонтальная трасса (ствол). Поэтому, определив, какую горизонтальную дорожку следует использовать в данном случае, задачу трассировки вертикальных проводников (ветвей) можно решить автоматически.

Трассировка в областях пересечения производится на самом последнем этапе проектирования топологии и, если она оказывается невозможной, топологию приходится проектировать заново.

Из методов трассировки, появившихся сравнительно недавно, можно отметить метод периферийной трассировки и проектирование методом рекапитуляции. Основу первого составляет принцип, согласно которому проводники каждой трассируемой цепи должны создавать «минимум помех»

для трассировки последующих цепей. Этому принципу удовлетворяет расположение синтезируемых проводников по периферии модели поля трассировки.

Проектирование печатного монтажа методом рекапитуляции рассматривает трассировку проводников как итерационный процесс, развитие которого сопровождается изменениями в состоянии модели поля.

Библиотека БГУИР

ЛИТЕРАТУРА

1. Деньдобренко, Б. Н. Автоматизация конструирования РЭА / Б. Н. Деньдобренко, А. С. Малика. – М. : Высш. шк., 1980.
2. Курейчик, В. М. Математическое обеспечение конструкторского и технологического проектирования с применением САПР / В. М. Курейчик. – М. : Радио и связь, 1990.
3. Морозов, К. К. Автоматизированное проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры / К. К. Морозов, В. Г. Одинокоев, В. М. Курейчик. – М. : Радио и связь, 1983.
4. Автоматизация схемотехнического проектирования : учеб. пособие для вузов / В. Н. Ильин [и др.]. – М. : Радио и связь, 1997.
5. Ульман, Дж. Вычислительные аспекты СБИС : пер. с англ. / под ред. П. П. Пархоменко. – М. : Радио и связь, 2001.
6. Автоматизированное конструирование монтажных плат РЭА : справ. специалиста / А. Т. Абрамов [и др.] ; под ред. Л. П. Рябова. – М. : Радио и связь, 1996.
7. Автоматизированное проектирование СБИС на базовых кристаллах / А. И. Петренко [и др.]. – М. : Радио и связь, 1998.
8. Проектирование СБИС : пер. с япон. / М. Ватанабэ [и др.]. – М. : Мир, 1988.
9. Беклешов, В. К. САПР в машиностроении : организационно-экономические проблемы / В. К. Беклешов, Г. А. Морозова. – Л. : Машиностроение, 1999.
10. Автоматизированное проектирование микросхем для вторичных источников питания / В. И. Анисимов [и др.]. – Л. : ЛЭТИ, 1996.
11. Селютин, В. А. Автоматизированное проектирование топологии БИС / В. А. Селютин. – М. : Радио и связь, 1993.
12. Разевиг, В. Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DESIGN LAB 8.0 / В. Д. Разевиг. – М. : Солон, 1999.
13. Разевиг, В. Д. Система проектирования цифровых устройств OrCAD / В. Д. Разевиг. – М. : Солон-Р, 2000.
14. Разевиг, В. Д. Система сквозного проектирования аппаратуры ACCEL EDA 2000 / В. Д. Разевиг. – М. : Солон-Р, 2002.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Цель и предмет автоматизированного проектирования радиоэлектронных средств (РЭС). Основные понятия.....	3
2. Классификация проектных задач.....	7
3. Моделирование в процессе автоматизированного проектирования РЭС.....	8
4. Схема алгоритма методики моделирования РЭС.....	10
5. Основные этапы автоматизированного проектирования РЭС.....	12
6. Особенности компоновки конструктивных модулей.	13
7. Особенности размещения конструктивных элементов.....	19
8. Особенности трассировки электрических соединений РЭС.....	25
ЛИТЕРАТУРА	38

Библиотека БГУИР

Учебное издание

Галузо Валерий Евгеньевич
Мельничук Виталий Витальевич
Образцов Николай Сергеевич
Пинаев Александр Иванович

**АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНСТРУКТОРСКОГО
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**

Учебно-методическое пособие
для студентов специальностей I-38 02 03
«Техническое обеспечение безопасности»
и I-39 02 01 «Моделирование и компьютерное
проектирование радиоэлектронных средств»
дневной формы обучения

Редактор Н. В. Гриневич
Корректор М. В. Тезина

Подписано в печать 02.05.2007.	Формат 60x84 1/16.	Бумага офсетная.
Гарнитура «Таймс».	Печать ризографическая.	Усл. печ. л. 2,33.
Уч.-изд. л. 2,0.	Тираж 300 экз.	Заказ 418.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
ЛИ №02330/0056964 от 01.04.2004. ЛП №02330/0131666 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровка, 6