

ИНФОРМАЦИОННЫЕ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ

ПОИСКОВАЯ АДАПТАЦИЯ

П. М. КУРЯЧЕНКО
Б. К. ЛЕБЕДЕВ
О. В. ЛЕБЕДЕВ



КУРЕЙЧИК Владимир Викторович
ЛЕБЕДЕВ Борис Константинович
ЛЕБЕДЕВ Олег Борисович

**ПОИСКОВАЯ АДАПТАЦИЯ:
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА**

УДК 681.3.001.63

ББК 74.263.2

К 93

Курейчик В. В., Лебедев Б. К., Лебедев О. Б. **Поисковая адаптация: теория и практика.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 272 с. — ISBN 5-9221-0749-6.

Рассматриваются задачи, методы и алгоритмы адаптации, используемые для построения поисковых алгоритмов оптимизации. Описывается типовая структура адаптивного алгоритма, излагаются методы коллективной адаптации в условиях динамически изменяющейся внешней среды. Дается методика и рекомендации по представлению исходной формулировки оптимизационной задачи в виде адаптивной системы.

Излагается общий цикл проектирования СБИС, этапы конструкторского проектирования СБИС и основные задачи, решаемые на этих этапах, с учетом современных тенденций.

Описываются постановки задач автоматизированного проектирования СБИС, методики их представления в виде адаптивных систем и структуры процессов адаптивного поиска оптимальных решений для этих задач.

Предназначена для специалистов в области специальных методов оптимизации, разработчиков алгоритмов на основе перспективных методов эволюционной адаптации, разработчиков интеллектуальных САПР.

Ил. 117.

© ФИЗМАТЛИТ, 2006

© В. В. Курейчик, Б. К. Лебедев,
О. Б. Лебедев, 2006

ISBN 5-9221-0749-6

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	7
Введение	10
Список литературы	15
1. Основные задачи, решаемые при проектировании СБИС	17
1.1. Общий цикл проектирования СБИС	17
1.2. Конструкторское проектирование СБИС	22
Список литературы	31
2. Методы оптимизации в задачах проектирования СБИС . .	33
2.1. Традиционные методы оптимизации	33
2.2. Эволюционные методы оптимизации	42
2.3. Поисковые процедуры, основанные на объединении принципов эволюционной и альтернативной адаптации	48
Выводы	52
Список литературы	52
3. Задачи, методы и алгоритмы адаптации	54
3.1. Основные понятия и определения	54
3.2. Структура поискового алгоритма оптимизации	59
3.3. Параметрическая адаптация	60
3.4. Структурная адаптация	63
3.5. Альтернативная адаптация	69
3.6. Проблема представления в адаптивных алгоритмах оптимизации	73
Выводы	81
Список литературы	82
4. Покрытие на основе коллективной адаптации	84
4.1. Термины и определения	84
4.2. Формирование пространства решений	86

4.3. Организация поисковых процедур на основе коллективной адаптации для решения задачи покрытия	89
Выводы	103
Список литературы	103
5. Разбиение на основе моделирования поисковой адаптации	105
5.1. Проблемная формулировка, термины и определения	105
5.2. Постановка задачи разбиения	107
5.3. Механизмы адаптации при разбиении	111
Выводы	116
Список литературы	117
6. Планирование СБИС методом адаптивного поиска	119
6.1. Проблемная формулировка, термины и обозначения	119
6.2. Формирование плана методом свертки	121
6.3. Стохастическое планирование СБИС	126
6.4. Поиск на основе коллективной адаптации при планировании СБИС с меняющейся ориентацией модулей	130
6.5. Поиск на основе коллективной адаптации при планировании СБИС с изменяющимися размерами модулей	135
Выводы	140
Список литературы	140
7. Размещение на основе коллективной адаптации	142
7.1. Проблемная формулировка, термины и обозначения	142
7.2. Формирование моделей среды и объекта адаптации	146
7.3. Организация процесса переразмещения	149
7.4. Общая структура адаптивного поиска при размещении	152
Выводы	157
Список литературы	158
8. Глобальная трассировка как процесс коллективной адаптации	160
8.1. Проблемная формулировка, термины и обозначения	160
8.2. Распределение ресурсов коммутационного поля	163
8.3. Организация процесса коллективной адаптации при глобальной трассировке	170
Выводы	173
Список литературы	174

9. Распределение соединений между выводами на основе коллективной адаптации	176
9.1. Проблемная формулировка, термины и обозначения	176
9.2. Переключение соединений в канале	179
9.3. Организация процесса коллективной адаптации при перераспределении соединений между выводами в канале	184
Выводы	191
Список литературы	191
10. Поисковые процедуры детальной трассировки	193
10.1. Формулировка проблемы канальной трассировки	193
10.2. Расчет нижних оценок	198
10.3. Процедуры уменьшения пространства решений	202
10.4. Символьное представление решения задачи канальной трассировки	208
10.5. Эволюционная трассировка в канале на основе символьных представлений	210
Выводы	217
Список литературы	218
11. Разнесение соединений по слоям на основе поисковой адаптации	219
11.1. Проблемная формулировка, термины, определения	219
11.2. Разбиение цепей на фрагменты	222
11.3. Формирование пространства решений	225
11.4. Организация процесса коллективной адаптации при разнесении соединений по слоям	228
Выводы	234
Список литературы	234
12. Эволюционные процедуры решения комбинаторных задач на графах	236
12.1. Основные положения	236
12.2. Эволюционные механизмы формирования η -областей	241
Список литературы	244
13. Методы адаптации в процедурах генетического поиска	246
13.1. Организация процесса генетического поиска на базе адаптируемого виртуального набора популяций	246

13.1.1. Принципы построения виртуальных популяций (247).	
13.1.2. Генетические операторы для виртуального множества популяций (251).	
13.1.3. Адаптация виртуального набора популяций (251).	
13.1.4. Организация процедуры генетического поиска с адаптацией виртуального набора популяций (253).	
13.2. Параллельная обработка информации на основе генетических алгоритмов	256
Выводы.	263
Список литературы	263
Заключение.	265
Предметный указатель	267

Предисловие

Нет на свете излишества прекраснее, чем излишество благодарности.

Блез Паскаль

Дальнейшие перспективы повышения качества и сложности создаваемых устройств в различных областях науки и техники ведущие специалисты мира связывают с интеллектуализацией процессов автоматизированного проектирования и производства. При этом одной из центральных задач является создание эффективных средств решения оптимизационных задач и задач принятия решений. Активно научными разработками в этой области заняты специалисты США, Японии и Западной Европы. Наличие мощных инструментальных средств позволяет значительно повысить качество выпускаемой продукции и, следовательно, захватить рынки сбыта своей продукции. В настоящее время отмечается значительный интерес ученых в нашей стране и за рубежом к исследованию вопросов интеллектуализации проектирования, основанный на комбинации поисковых алгоритмов и знаний об области проектирования. В их основе лежат фундаментальные разработки по эволюционной адаптации, синергетике и гомеостатике.

Активно развивается нетрадиционный подход к решению базовых оптимизационных задач, основанный на применении эволюционных и квантовых вычислений. Разработками в указанной области занимаются как за рубежом, так и у нас в стране. Алгоритмы эволюционной адаптации поиска — сравнительно молодое, но активно развивающееся научное направление, по которому регулярно проводятся международные научно-технические конференции и семинары, издаются сборники статей, монографии, ведется активная работа по расширению сфер приложения.

Эволюционный поиск как метод решения сложных оптимизационных задач является мощным, гибким и универсальным вычислительным средством. Универсальность его связана с тем, что он, по сути дела, моделирует биологическую эволюцию, с одной стороны, и позволяет легко вводить разного рода эвристики,

отражающие опыт, эрудицию и пристрастия разработчика, — с другой. Такое объединение опыта природы (в эволюции) и личного опыта разработчика (в эвристиках) позволяет синтезировать эффективные алгоритмы для решения сложных вычислительных задач, что многократно подтверждено на практике.

В рамках научной школы Таганрогского государственного радиотехнического университета (ТРТУ) на протяжении многих лет проводятся теоретические и экспериментальные исследования ряда актуальных проблем эволюционного моделирования. В их основе лежат фундаментальные разработки по изучению механизмов эволюционного развития на основе синергетических и гомеостатических принципов управления, новые методы для решения класса задач с приведенными выше особенностями. Теоретический уровень ожидаемых результатов сопоставим с мировым, а по ряду позиций опережает аналогичные зарубежные разработки в данной области науки.

К числу важнейших направлений научных исследований членов научной школы ТРТУ относится разработка новых методов решения задач автоматизированного проектирования с использованием новых технологий эволюционных вычислений. Важнейшим направлением в рамках общей научной проблематики являются: построение фундаментальной теории интеллектуальных САПР, разработка алгоритмов интеллектуализации и адаптации проектных процедур и операций в меняющихся условиях реальных процессов автоматизированного проектирования, поиск новых подходов, разработка и совершенствование алгоритмов решения проектных задач с элементами искусственного интеллекта.

Монография включает ряд оригинальных исследований авторов, базирующихся на методически проработанных исследованиях ведущих российских и зарубежных ученых, труды которых приведены в списке литературы и на которые ссылаются авторы.

Авторы не претендуют на полноту изложения основных принципов адаптации и методов проектирования СБИС (сверхбольшие интегральные схемы). В большей степени целью является изложение практического применения методов адаптации для построения поисковых оптимизационных процедур, в частности, для решения основных задач автоматизированного проектирования СБИС. Все адаптивные поисковые алгоритмы, описываемые в монографии, разработаны авторами и реализованы в виде программных модулей и апробированы. Авторы надеются, что данная монография будет являться частью фундаментальной теории

автоматизированного проектирования, разрабатываемой в настоящее время.

В книге использованы результаты научно-исследовательских работ, выполненных при частичной финансовой поддержке программы развития научного потенциала высшей школы на 2006–2008 годы (проекты РНП.2.1.2.2238, 2.1.2.3193).

Авторы выражают глубокую признательность ректору ТРТУ Владиславу Георгиевичу Захаревичу, чья поддержка сыграла важную роль при написании монографии.

Авторы также приносят искреннюю благодарность участникам научной школы по теории графов, генетическим алгоритмам, эволюционному моделированию и разработке на их основе интеллектуальных САПР за обсуждение публикуемых материалов. Большая благодарность студентам и аспирантам кафедры САПР ТРТУ за апробацию приведенных в книге алгоритмов.

Особую благодарность авторы выражают рецензентам — ведущему научному сотруднику Института проблем передачи информации РАН, доктору биологических наук Хашаеву З. Х.-М., заведующему кафедрой Прикладной математики Московского энергетического института, доктору технических наук, профессору, лауреату премии президента РФ Еремееву А. П., чьи замечания и пожелания способствовали улучшению содержания и стиля книги.

Книга будет полезна для студентов, аспирантов, разработчиков алгоритмов на основе перспективных методов эволюционной адаптации. Самостоятельное значение и интерес представляют для разработчиков САПР СБИС, изложенные в книге, адаптивные алгоритмы решения основных задач автоматизированного проектирования СБИС.

Монография может быть также полезна студентам и аспирантам, желающим углубить свои знания в области специальных методов оптимизации. Все замечания будут с благодарностью приняты.

Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 06-01-140-74).

Авторы

Введение

Как ни безупречно произведение, от него не останется камня на камне, если автор, прислушиваясь к критике, поверит всем своим судьям, ибо каждый из них потребует исключить именно то место, которое меньше всего ему понравилось.

Жан Де Лабрюйер

Важнейшим направлением в рамках общей научной проблематики является построение фундаментальной теории интеллектуальных САПР, разработка алгоритмов интеллектуализации и адаптации проектных процедур и операций в меняющихся условиях реальных процессов автоматизированного проектирования, поиск новых подходов, разработка и совершенствование алгоритмов решения проектных задач с элементами искусственного интеллекта.

Особенностью проектирования СБИС является большая область поиска решения. По этой причине существует проблема, связанная с огромным числом возможных проектных решений, которые необходимо исследовать, чтобы выбрать решение, которое отвечало бы входным требованиям.

Основные задачи синтеза и формирования топологии СБИС — покрытие, разбиение, размещение, глобальная трассировка, перераспределение соединений между выводами, распределение соединений между слоями и т. д. — являются *NP*-полными [1]. Из теории алгоритмов известно, что для задач класса *NP* в природе не существует алгоритма, кроме алгоритма полного перебора, который гарантировал бы нахождение глобального оптимума. Понятно, что для задач большой размерности этот алгоритм неприемлем. Поэтому большой класс разработанных к настоящему времени алгоритмов проектирования СБИС основан на различных эвристиках, обеспечивающих получение решений в полиномиальное время. Основным недостатком этих алгоритмов (последовательных

и итерационных) является невысокое качество результатов из-за попадания в «локальные ямы», малая пригодность для задач большой размерности, плохая приспособленность для реализации на современных технических средствах, отсутствие альтернатив. Одним из возможных методов решений этой проблемы является использование методов случайного направленного поиска, основанного на моделировании естественных процессов. К таким относятся бурно развивающиеся в последнее время методы поисковой адаптации на основе механизмов самоорганизации, генетического поиска и эволюционного развития [2, 3].

Слово адаптация, широко используемое в современной научно-технической литературе, заимствовано из биологии, где оно означает приспособление живых организмов к изменяющимся окружающим условиям. Адаптация многолика и разнообразна. Известны такие проявления адаптации, как эволюция, привыкание, обучение и самообучение, организация и самоорганизация и т. д. [4, 5].

Изучение законов биологической эволюции показало, что в их основе лежит закон взаимной адаптации.

Существование и развитие живой системы (в том числе человека) — суть процесс взаимной опережающей многоуровневой адаптации компонентов системы между собой и системы с внешней средой [6].

Опережающий характер взаимной адаптации системы со средой обуславливает заблаговременное формирование определенной структуры системы. При ожидаемом выходе параметров среды за пределы некоторого диапазона система должна своевременно изменить свою структуру и способ функционирования — стратегию.

В процессах внутренней и внешней взаимной адаптации людей можно выделить ряд уровней: социальный, психологический, физиологический, биологический и генетический.

Многоуровневый характер адаптации человека к динамическим внешним условиям доказан во многих исследованиях. К процессу многоуровневой адаптации человека относятся также процессы его эволюции, обучения, профессионального отбора, оперативной перестройки его психологических процессов. Другими словами *биологическая эволюция* — это процесс изменения структур живых систем в ходе их взаимной опережающей многоуровневой адаптации с внешней средой.

Наблюдения в области адаптации живых организмов привели к идее «наделить» указанным свойством технические системы.

Это достигается введением в конструкцию технической системы возможности приспособления к новым ситуациям, заранее не предвиденным, для того, чтобы в процессе функционирования эта система изменялась и улучшала свои характеристики.

Огромный материал, накопленный в мире за прошедшие десятилетия, неизмеримо расширил и во многом изменил существующие представления о принципах эволюционного развития живых организмов и разработанных на их основе эволюционных методов вычислений

Значительный вклад в разработку технических устройств и моделей, имитирующих процессы адаптации, внесли: В. И. Варшавский, В. Ф. Ванда, А. А. Красовский, Д. А. Поспелов, Л. А. Растринин, В. Г. Редько, В. П. Сигорский, В. Г. Срагович, В. Л. Стефанюк, Г. Хакен, М. Л. Цетлин, Я. З. Цыпкин, и другие отечественные и зарубежные ученые [4–17].

В настоящее время в технических системах существуют два подхода к организации адаптационных процессов [11].

При первом подходе адаптивные процессы поддерживают объект в состоянии, определяемом целью и, в этом смысле, адаптация является управлением.

При втором подходе адаптивные процессы связаны с максимизацией эффективности функционирования некоторого объекта. Здесь адаптация рассматривается как оптимизация.

В адаптивных системах управления информация об объекте и внешних воздействиях собирается в ходе эксплуатации, сразу же обрабатывается и используется для выработки управляющих воздействий. Это позволяет повысить качество управления в условиях неопределенности и нестабильности объекта и среды функционирования. Методы адаптивного управления в сложных системах на сегодняшний день уже достаточно развиты [12, 13].

При втором подходе решение задачи адаптации сводится к определению такого управляющего воздействия, при котором достигается максимальная эффективность работы объекта. При этом одновременно выполняются все жесткие требования, предъявляемые к этому объекту [13–15]. Такая задача является задачей оптимизации (максимизации эффективности) в обстановке ограничений.

Обычно адаптация в САПР [16] рассматривается как адаптация в сложной системе, состоящей из 4-х основных компонентов: комплекса программных средств, комплекса технических средств, объекта проектирования и пользователя.

Основным объектом адаптации является комплекс программных средств, а, следовательно, и математическое обеспечение, на

основе которого разработаны прикладные программы, входящие в его состав.

В качестве внешней среды, к которой адаптируется комплекс программных средств, в основном рассматривается множество объектов проектирования (ОП), хотя в общем случае могут также рассматриваться и другие компоненты.

Адаптация комплекса программных средств к объекту проектирования означает возможность САПР приспосабливаться к потоку объектов проектирования в изменяющихся условиях с целью достижения оптимального проектирования на основе поступающей априорной и апостериорной информации. Достижение цели адаптации осуществляется путем изменения структуры и параметров программного обеспечения и пакетов прикладных программ, входящих в состав комплекса программных средств.

С другой стороны, процесс разработки проекта с помощью САПР может быть представлен как адаптивный поисковый процесс, целью которого является достижение объектом проектирования оптимального состояния, при котором его оценки эффективности достигают наилучших значений.

В этом случае в качестве объекта адаптации выступает сам объект проектирования. Внешняя среда определяется на основе анализа проблемной области специфики решаемой задачи. Объект адаптации рассматривается как обучающаяся система, помещенная в среду, характеризующуюся вероятностной реакцией.

В качестве модели обучающейся системы Цетлин М. Л. [17] предложил вероятностный обучающийся автомат, названный автоматом адаптации. Основы поведения обучающихся автоматов, адаптирующихся к среде, можно представить следующим образом. Автомат адаптации способен воспринимать два входных сигнала: поощрение (удовлетворительное состояние объекта в среде) и наказание (неудовлетворительное состояние объекта в среде). Состояние автомата адаптации соответствует некоторой альтернативе проектного решения. В процессе адаптации на основе откликов внешней среды автомат переходит в состояние, соответствующее лучшей альтернативе проектного решения. Обобщением идеи Цетлина М. Л. о целесообразном поведении стохастических автоматов явились работы Варшавского В. И., посвященные коллективному поведению автоматов адаптации.

Описанный подход оказался продуктивным при разработке адаптивных поисковых алгоритмов. В 70 годы прошлого века в рамках теории случайного поиска Растригин В. Г. предложил ряд алгоритмов, использующих идеи бионического поведения особей. Развитие этих работ нашло отражение в цикле работ

Букатовой И. Л. по эволюционному моделированию. Следующим шагом был подход, предложенный Неймарком Ю. И. к организации поиска на основе коллектива независимых автоматов, моделирующих процессы развития.

В работе рассматриваются методы адаптации применительно к синтезу адаптивных поисковых алгоритмов оптимизации проектных решений, которые ранее не нашли отражения в отечественной и зарубежной литературе.

В первой главе рассматривается общий цикл проектирования СБИС. Описываются этапы конструкторского проектирования СБИС и основные задачи, решаемые на этих этапах с учетом современных тенденций.

Во второй главе приводится обзор основных методов оптимизации, используемых при решении задач проектирования СБИС, и, в частности, методов эволюционной адаптации и генетического поиска.

В третьей главе рассматриваются задачи, методы и алгоритмы адаптации, используемые для построения поисковых адаптивных алгоритмов оптимизации. Особое внимание уделяется описанию структур обучающихся автоматов и механизмов смены состояний. Описывается типовая структура адаптивного алгоритма, излагаются методы коллективной адаптации в условиях стационарной и динамически изменяющейся внешней среды. Приводится методика и рекомендации по представлению оптимизационной задачи в виде адаптивной системы.

В последующих главах рассматриваются алгоритмы, построенные на основе принципов адаптации, для решения основных задач в САПР СБИС — покрытия, разбиения размещения, планирования, глобальной трассировки, рассматриваемой как задача распределения ресурсов, распределения соединений между выводами, детальной трассировки разнесения соединений по слоям.

Описываются постановки задач, методики их представления в виде адаптивных систем и структуры процессов адаптивного поиска оптимальных решений.

В заключительной главе рассматриваются эволюционные процедуры решения комбинаторных задач на графах: выделения максимального внутренне-устойчивого подмножества, нахождения клики, нахождения максимального паросочетания в графе, раскраски графа.

Каждая глава книги завершается выводами.

В целом, изложенный в книге подход, по мнению авторов, составляет перспективное направление в теории и практике создания эффективных поисковых процедур для решения оптимизационных задач автоматизированного проектирования.

Лучшие из книг — те, которые дают больше всего пищи для размышлений, и при этом на самые различные темы.

А. Франс

Список литературы

1. *Naveed Sherwani*. Algorithms for VLSI physical design automation. — Boston /Dordrecht/ London: Kluwer academic publishers, 1995.
2. *Лебедев Б. К.* Адаптация в САПР. — Таганрог: Изд-во ТРТУ, 1999.
3. *Лебедев Б. К.* Методы поисковой адаптации в задачах автоматизированного проектирования СБИС. — Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2000.
4. *Цыпкин Я. З.* Адаптация и обучение в автоматических системах. — М.: Наука, 1975.
5. *Поспелов Д. А.* Фантазия или наука: на пути к искусственному интеллекту. — М.: Наука, 1982.
6. *Венда В. Ф.* Системы гибридного интеллекта. Эволюция, психология, информатика. — М.: Машиностроение, 1990.
7. *Поспелов Д. А.* Ситуационное управление: теория и практика. — М.: Наука, 1986.
8. *Редько В. Г.* Эволюция, нейронные сети, интеллект. — М.: КомКнига, 2005.
9. *Варшавский В. И.* Коллективное поведение автоматов. — М.: Наука, 1973.
10. *Хакен Г.* Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. — М.: Наука, 1991.
11. *Растринин Л. А.* Адаптивные компьютерные системы. — М.: Знание, 1987. 64 с.
12. *Срагович В. Г.* Адаптивное управление. — М.: Наука, 1981.
13. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. — М.: Наука, 1987.

14. Куропаткин П. В. Оптимальные и адаптивные системы. — М.: Высшая школа, 1980.
15. Растринин Л. А. Адаптация сложных систем. — Рига: Зинатне, 1981.
16. Сигорский В. Г. Проблемная адаптация в системах автоматизированного проектирования // Известия высших учебных заведений: Радиоэлектроника. 1988. Т. 31, № 6.
17. Цетлин М. Л. Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. — М.: Наука, 1969.

1. ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СБИС

Исследуя природу, естествоиспытатель должен следовать какой-то математической модели.

Галилей

1.1. Общий цикл проектирования СБИС

Основу элементной базы современных радиоэлектронных устройств (РЭА) составляют большие интегральные схемы (БИС) и сверхбольшие интегральные схемы (СБИС). С момента появления интегральных схем резко изменились их основные характеристики и быстродействие, размеры и стоимость.

В настоящее время в СБИС время переключения составляет наносекунды. Количество транзисторов в современных СБИС составляет от нескольких миллионов до сотни миллионов на одном кристалле. Отдельные твердотельные элементы (транзисторы и т. д.) достигают размеров нанометрового диапазона. В соответствии с законом Мура размеры микроэлектронных устройств должны уменьшаться вдвое каждые четыре года. В прогнозе к 2012 г. линейные размеры самых миниатюрных компонентов должны снизиться до 50 нм (нанометров, $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$). Предполагается, что отношение сложности схемы к ее стоимости будет увеличиваться. Соотношение высокой сложности интегральной схемы с ее низкой стоимостью дают возможность их широкого применения, что дает возможность заявить о том, что XXI век будет веком информационного общества [1.1–1.4].

Производство БИС (больших интегральных систем) и СБИС подобно производству сложного интегрального продукта разбивается на три этапа: проектирование, изготовление, тестирование.

Проектирование СБИС — это сложный, занимающий много времени, процесс. Сроки разработки электронного устройства, содержащего СБИС в качестве компонентов, могут превышать период, в течение которого изделие пользуется спросом. Учитывая это обстоятельство, разработка СБИС должна осуществлять-

ся в кратчайшие сроки, с наименьшими затратами. Одним из путей достижения этой цели является автоматизация процесса проектирования, начиная с высшего уровня представления требований к системе и кончая уровнем физического представления.

Ввиду сложности современных СБИС ни один из трех этапов не может быть выполнен без средств автоматизированного проектирования.

Автоматизация проектирования — это многоаспектная, многоуровневая проблема. Она охватывает исследования, разработку, производство и эксплуатацию технических, математических, программных, информационных, организационных, методических средств и управление жизненным циклом продукции [1.8–1.14].

При проектировании СБИС в настоящее время выполняется следующая общепринятая последовательность этапов (шагов): системная спецификация; функциональное проектирование; логическое проектирование; схемное проектирование; конструкторское проектирование; технологическое проектирование; изготовление кристаллов (чипов); сборка, размещение блоков в корпусах, тестирование и контроль. [1.1, 1.5–1.7].

Системная спецификация. Первый этап проектирования цифровых СБИС заключается в разработке спецификации системы. Системная спецификация есть высший уровень представления системы. Факторы, учитываемые в процессе составления системной спецификации, включают: математическое представление, описание функционирования, физические принципы.

Рассматриваются также стили проектирования и технологические процессы изготовления изделий. Спецификация систем есть компромисс между технологичностью, экономичностью и требованиями рынка. Конечным результатом спецификации является описание размеров, скорости, мощности и принципов функционирования СБИС. Описывается также основная архитектура системы.

Функциональное проектирование. На этом шаге определяются основные, функциональные единицы системы. Кроме того, определяются требуемые соединения между функциональными элементами. Определяется область, мощность и другие параметры каждого элемента. Рассматриваются поведенческие аспекты системы. Ключевая идея данного этапа есть определение поведения входов, выходов и задержек для каждого элемента без спецификации его внутренней структуры.

Логическое проектирование. На этом шаге для обеспечения заданного функционирования определяются управляющие потоки информации, размеры битовых строк и слов, разрабатываются алгоритмы регистровых передач, арифметические и логические операции. При разработке логического описания используется язык VHDL или Verilog [1.5–1,7]. Это описание может использоваться для моделирования и верификации. Описания включают булевы выражения и информация о временных задержках. Булевы выражения минимизируются для достижения минимальных логических конструкций. Итак, логическое конструирование системы — это моделирование и тестирование для верификации корректности системы.

Схемное проектирование. Целью схемного проектирования является разработка схем, реализующих результаты логического проектирования. Булевы выражения преобразуются в схемы. Схемное моделирование используется для верификации, корректности и временных задержек каждой компоненты. Результаты схемного проектирования представляются в виде схем [1.7, 1.8].

Конструкторское проектирование. На этом шаге схемное представление каждой компоненты преобразуется в геометрическое представление. Это представление есть множество геометрических образов, которые выполняют требуемые логические функции соответствующих компонентов. Соединения между различными компонентами рассматриваются как геометрические образы. Геометрическое представление называется *топологией схемы (Layout)*. В процессе конструкторского проектирования топологии схемы обязательно предусматриваются различные типы верификации. Результатом конструкторского проектирования является набор фотошаблонов (масок), необходимых для изготовления СБИС [1.1, 1.3, 1.9].

Технологическое проектирование. После верификации топология готова к производству. На этом этапе проектируются различные технологические процессы и их маршруты, связанные с изготовлением твердотельной структуры, включающие фотолитографию и диффузию с использованием набора масок. Маски используются на каждом шаге изготовления твердотельной структуры. Обычно на одной пластине диаметром 20 см включаются сотни и тысячи чипов (кристаллов) [1.1].

Сборка, изготовление корпусов, тестирование и контроль. На последних этапах осуществляется разработка проектной документации для сборки, изготовления корпусов, те-

стирования и контроля интегральных схем. При сборке один или несколько чипов размещают на плате, которая помещается в отдельном защитном корпусе, и осуществляют подводку соединений от контактов корпуса к контактам чипа.

В настоящее время СБИС обладает следующими отличительными особенностями [1.1]:

- *значительно возросшими задержками между соединениями.* В настоящее время длина соединений в одной СБИС, например, достигает 20 км. Произошло перераспределение временных задержек в вентилях и межсоединениях в сторону относительного увеличения задержек межсоединений. Сейчас уже более 60 % общей временной задержки происходит из-за межсоединений и эта тенденция сохраняется;
- *увеличением области межсоединений.* Увеличение размера области, отводимой для межсоединений, опережает рост размера области, предназначенной для активных элементов (транзисторов). В настоящее время в СБИС, содержащей 10 миллионов транзисторов и использующей 4 слоя металлизации, около 40 % площади отводится под межсоединения. Возрастает число переходов из слоя в слой, что вырастает в отдельную проблему [1.8, 1.9];
- *увеличением слоев металлизации.* В связи с возросшими потребностями для реализации межсоединений, новые технологии дают возможность использовать повышенное число слоев металлизации — 3, 5 и более, что в принципе усложняет процесс конструкторского проектирования;
- *увеличением требований при планировании СБИС.* Наличие значительных временных задержек требует более тщательного подхода к планированию СБИС. В связи с этим планирование СБИС, с учетом временных задержек, необходимо проводить на ранних этапах конструкторского проектирования;
- *высокоуровневый синтез.* В связи с необходимостью сокращения времени проектирования основных блоков СБИС используются системы автоматизированного синтеза на высоких уровнях описания объектов. Существуют два типа синтеза. Логический синтез — это процесс превращения функционального описания в логическое и схемное описание. Высокоуровневый синтез — это процесс превращения функционального или макроархитектурного описания в топологию схемы.

С учетом современных тенденций структура проектирования СБИС показана на рис. 1.1 [1.1].



Рис. 1.1. Структура проектирования СБИС

Развитие технологии позволило создавать специализированные СБИС типа «система-на-кристалле» (СнК). Эти изменения привели к новой методологии проектирования и производства СБИС (СнК) и аппаратуры на их основе [1.3]. Эта методология основана на многократном повторении ранее созданной интеллектуальной собственности (*Intellectual property* — IP) в виде заранее разработанных IP-блоков. СнК позволяют осуществлять интеграцию основных цифровых и управляющих компонентов на одном кристалле. Проектирование систем-на-кристалле возможно только при условии повторного использования IP. Это требует введение стандартов и нового подхода к проектированию и, в частности, к размещению как самих IP блоков, так и элементов внутри них [1.3].

1.2. Конструкторское проектирование СБИС

На этом этапе схемное представление каждой компоненты преобразуется в геометрическое представление — множество геометрических образов, которые выполняют требуемые логические функции соответствующих компонентов. Соединения между различными компонентами рассматриваются как геометрические образы. Геометрическое представление называется *топологией* схемы (*Layout*) [1.2]. В процессе конструкторского проектирования топологии схемы обязательно предусматриваются различные типы верификации.

Результатом конструкторского проектирования является набор фотошаблонов (масок), необходимых для изготовления СБИС.

В зависимости от типа конструкции и технологии изготовления методы конструкторского проектирования СБИС делятся на два класса: методы на основе заказных СБИС и методы на основе полузаказных СБИС [1.1, 1.2, 1.9].

К заказным СБИС относят схемы, в которых все функциональные элементы и связи между ними полностью разрабатываются в соответствии с заданиями пользователей. Заказные СБИС включают полную «с нуля» разработку топологии. Базовыми элементами являются твердотельные структуры активных и неактивных элементов (транзисторы, резисторы, диоды, линии задержки и т. д.). Результатом конструкторского проектирования является топологический чертеж, на котором отражены как твердотельные структуры, так и коммутации между ними. При изготовлении заказной СБИС изготавливаются все элементы топологического чертежа.

Проектирование заказных СБИС является трудоемким и дорогостоящим процессом. Заказная СБИС целесообразна в том случае, если выпускается очень большими сериями. С другой стороны, заказные СБИС позволяют добиться более высоких значений функциональных характеристик, чем рассматриваемые ниже полузаказные СБИС. При проектировании заказных СБИС обычно используют иерархический подход, при котором схема разбивается на блоки, те, в свою очередь, на подблоки и т. д. [1.9].

Полузаказные СБИС делятся на СБИС на основе стандартных ячеек, базовых кристаллов, программируемых логически матриц.

При проектировании СБИС на основе стандартных ячеек предварительно формируется библиотечный набор ячеек. Каждая

ячейка реализует заданный набор функций и для нее разработан топологический чертеж (как твердотельных структур, так и коммутаций). Любая проектируемая схема покрывается ячейками библиотечного набора.

При проектировании СБИС на основе базового кристалла предполагается использование заготовок чипов, на которых уже реализованы твердотельные структуры (как правило, это вентили), размещенные стандартным образом. В этом случае топологический чертеж ячейки из библиотечного набора содержит только компоненты коммутации между вентилями для реализации некоторых функций.

Проектирование СБИС на основе программируемых логических матриц предполагает использование заготовок чипов, на которых стандартным образом реализованы твердотельные структуры (транзисторы), а также проводники для передачи логических сигналов и шины земли и питания. Определены точки возможного подключения транзисторов к проводникам и шинам. Задача программирования (проектирования) заключается в определении точек, в которых транзисторы будут связаны с проводниками, после чего схема будет реализовывать заданную функцию. Подсоединение осуществляется с помощью сварки под действием импульса лазерного луча.

Входной информацией для конструкторского проектирования служат функциональные схемы, а выходом — топология схемы. Основными этапами являются покрытие, разбиение, планирование, размещение, трассировка, сжатие (компакция), экстракция и верификация [1.11].

Покрытие. Задача покрытия заключается в преобразовании исходной функциональной схемы в принципиальную, т.е. в схему соединения элементов (модулей), номенклатура которых (библиотечный набор) задана. Известны функциональные и конструктивные параметры элементов набора, и априори они могут реализовать все функции схемы. В результате покрытия функциональной схемы элементами заданного набора получается электрическая принципиальная схема, функционально эквивалентная исходной [1.9].

Разбиение. СБИС может содержать несколько миллионов транзисторов, поэтому в связи с ограниченными возможностями вычислительных средств (память, скорость) топология всей схемы не может быть спроектирована в целом. Для этого выполняется разбиение схемы на части и группирование компонентов в блоки. Основными параметрами разбиения электрической

схемы СБИС являются: размер и число блоков, количество соединений между блоками, величина задержек сигналов и т. п. В результате разбиения формируется множество блоков и список соединений между ними. В очень больших схемах ($n > 10^6$, где n — число элементов схемы) используется иерархическая структура разбиения [1.2, 1.3].

Планирование и размещение. Задача планирования СБИС заключается в размещении на поле кристалла блоков, полученных на этапе разбиения, имеющих заданную площадь и не имеющих фиксированных размеров. Блоки и кристалл имеют форму прямоугольников. При планировании решаются сразу две задачи: определяется взаимное расположение блоков друг относительно друга, т. е. их размещение, а также фиксируются размеры

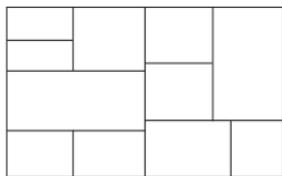


Рис. 1.2. Пример «гильотинного разреза»

каждого блока. В результате планирования строится план кристалла, представляющий собой охватывающий прямоугольник, разделенный горизонтальными и вертикальными сегментами на прямоугольники, в которых следует поместить соответствующие блоки. Заметим, что прямоугольники не пересекаются между собой. В качестве плана кристалла часто используют план, получаемый путем рекурсивного использования «гильотинного разреза», т. е. последовательного разрезания прямоугольников на две части (рис. 1.2) [1.1].

Задача размещения заключается в определении для каждого элемента каждого блока конкретного места на поле кристалла. В связи с большой размерностью иногда задача планирования лучше выполняется инженером-конструктором, чем автоматизированным способом. При планировании и размещении учитываются такие характеристики, как длина связи, их распределение по полю кристалла, возможные временные задержки, количество критических связей, площадь и размеры кристалла. Основная цель размещения — это создание «наилучших условий» для последующей трассировки. Формального определения понятия «наилучших условий» нет, так как оно является расплывчатым. Поэтому вводят критерии и оценки, оптимизация которых приводит к трассировке плат и кристаллов с заданным качеством. К настоящему времени при размещении распространение получили оценки суммарной длины соединений. Более предпо-

чительными являются оценки, учитывающие число неизбежных пересечений соединениями некоторых линий или контуров («критических сечений») на коммутационном поле. На их основе выполняется распределение ресурсов коммутационного поля для трассировки.

Трассировка. Задача трассировки может быть сформулирована следующим образом. По заданной схеме соединений проложить маршруты прохождения проводников на плоскости или нескольких плоскостях, чтобы реализовать заданные электрические соединения с учетом заранее введенных ограничений. Ограничениями могут быть: число слоев трассировки, размеры области трассировки, ширина проводников, минимальное расстояние между проводниками, максимальная длина связи, число переходов из слоя в слой и др. Задача трассировки наиболее трудоемкая в общей проблеме автоматизации проектирования [1.4]. Это связано с такими факторами, как огромная размерность задач, многообразие способов конструктивно-технологической реализации трасс, многокритериальность задачи, большое число ограничений.

В связи с большой сложностью при трассировке используется иерархический подход. В современных системах автоматизированного проектирования СБИС используется двухуровневая трассировка — глобальная и детальная.

На первом этапе все пространство трассировки разбивается на области. На рис. 1.3 представлен пример разбиения условного кристалла. Заштрихованные области предназначены для размещения в них ячеек (размещаемых элементов), не заштрихованные — для трассировки. Задача глобальной трассировки заключается в распределении соединений по областям. При этом определяются списки соединений, пересекающих границы областей.

Детальная трассировка заключается в реализации соединений в каждой области.

Основными областями, формируемыми в процессе глобальной трассировки, является канал (рис. 1.4, а) и коммутационный блок (рис. 1.4, б).

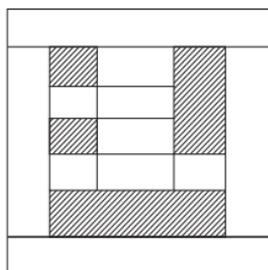


Рис. 1.3. Пример разбиения условного кристалла

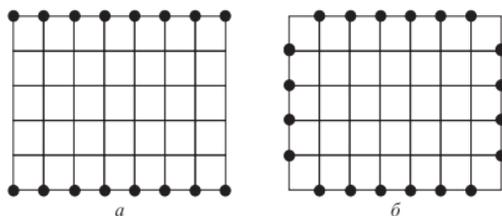


Рис. 1.4. Основные области, формируемые в процессе глобальной трассировки (а — канал, б — коммутационный блок)

Канал — это область трассировки, ограниченная двумя линейками контактов. Контакты помечаются номерами связывающих их соединений. Соединения располагаются внутри области. Известны также списки соединений, пересекающих левую и правую границы канала. Коммутационный блок — это прямоугольная область, ограниченная четырьмя линейками контактов. Иногда для этих областей используют единое название — канал. Основной целью при трассировке в канале является стопроцентная реализация соединений с минимизацией ширины канала. При трассировке соединений в коммутационном блоке его размеры зафиксированы, поэтому основная цель здесь — стопроцентная реализация соединений.

Основная цель глобальной трассировки — это оптимальное использование ресурсов коммутационного поля. Результатом распределения соединений является создание в областях «благоприятных» условий для детальной трассировки.

Фактически каждая область трассировки ограничена зонами, в которых расположены ячейки. Новой тенденцией в конструкторском проектировании является использование областей, расположенных над ячейками. Тогда некоторые соединения или их фрагменты могут быть направлены в область над ячейкой (*over-the-cell*), что приводит к разгрузке основных областей трассировки (рис. 1.5). На рис. 1.5 Я₁–Я₉ являются ячейками кристалла, НЯО — область над ячейкой (надъячеечная область).

Детальная трассировка сначала выполняется в надъячеечных областях (НЯО), а затем в каналах и коммутационных блоках.

Одним из эффективных приемов снижения плотности областей трассировки и их разгрузки является перераспределение соединений между эквивалентными выводами вентиля. На рис. 1.6, а показан эскиз трассировки в канале до перераспределения соединений, на рис. 1.6, б — после перераспределения.