

6
А-39

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ БЕЛОРУССКОЙ ССР

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ имени В. И. ЛЕНИНА

Ю. Г. БУТКОВ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ
ПОСТРОЕНИЯ СЦВМ ДЛЯ МАШИННОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИЗБИРАТЕЛЬНЫХ
СОЕДИНЕНИЙ БИС

(диссертация на русском языке)

(05.300—применение электроники в народном хозяйстве
и научных исследованиях)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МИНСК, 1971

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
БЕЛОРУССКОЙ ССР

БЕЛОРУССКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ В.И. ЛЕНИНА

Ю.Г. БУТКОВ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ СЦВМ ДЛЯ
МАШИННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИЗБИРАТЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ БИС

(Диссертация на русском языке)

(05.300 – применение электроники в народном хозяйстве и
научных исследованиях)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

МИНСК, 1971

СК
6
Д 39

Работа выполнена в Конструкторском бюро точного электронного машиностроения и Белорусском ордена Трудового Красного Знамени государственном университете им. В. И. Ленина.

Научный руководитель: кандидат технических наук доцент
А. М. ОРАНСКИЙ.

Официальные оппоненты: доктор технических наук доцент
Е. А. ЧЕРНЯВСКИЙ,
кандидат технических наук доцент
Р. И. ФУРУНЖИЕВ.

Ведущее предприятие: Киевский научно-исследовательский институт микроприборов.

Автореферат разослан " 30 " ноября 1971 года

Защита состоится на заседании Совета по присуждению ученых степеней по физико-математическим наукам (физика) Белорусского ордена Трудового Красного Знамени государственного университета имени В. И. Ленина.

О дате и времени защиты будет объявлено в газете "Вечерний Минск".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белгосуниверситета.

Отзыв в двух экземплярах просим направить по адресу: Минск, Университетский городок, БГУ имени В. И. Ленина, ученому секретарю Совета.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА
ДОЦЕНТ

(М. П. ХАЛИМАНОВИЧ)

В Директивах по девятому пятилетнему плану XXIV съезд КПСС наметил не только увеличение в 2,4 раза выпуска средств вычислительной техники, но и освоение серийного производства нового комплекса электронных вычислительных машин, приборов и средств автоматизации на базе интегральных схем (ИС). Поставленная съездом задача обеспечить машиностроительную и приборостроительную промышленность необходимым для этого количеством ИС может быть решена только в результате создания и внедрения высокопроизводительного технологического оборудования, новых методов и систем автоматизированного проектирования и производства полупроводниковых приборов.

Целью настоящей работы является исследование и разработка методов построения цифровых вычислительных машин для проектирования избирательных соединений (СЦВМ) и внедрение их в составе комплексов автоматизированного проектирования и изготовления монолитных больших интегральных схем (БИС), комплексов, позволяющих сделать производство БИС не только возможным, но и рентабельным.

В последнее время понятие БИС часто ограничивают одним классом полупроводниковых приборов, понимая под ней монолитную пластину или кристалл полупроводника, на которых с целью снижения стоимости и габаритов и повышения надежности электронной аппаратуры соединено в законченный функциональный блок (схему, устройство и пр.) большое количество элементов (базовых схем), выполняющих логические функции (И-ИЛИ-НЕ, триггеры, разряды и пр.).

При массовом производстве "на заказ" БИС широкого диапазона функционального назначения становится целесообразным применение СЦВМ, которая могла бы быстро производить расчет соединений и вводить результаты расчета в реальном масштабе времени работы уста-

повки изготовления фотоматриц, т.е. для непосредственного управления установкой, без промежуточного носителя информации.

В результате проведенных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ при непосредственном участии автора разработана система и комплекс технических средств для автоматизированного проектирования и изготовления монолитных БИС. Этот комплекс прошел отработку и опытное внедрение, на основе которого были выработаны рекомендации и предложения по созданию оборудования для промышленного производства малосерийных БИС.

Работа системы происходит следующим образом. Монолитная пластинка с отдельными базовыми схемами поступает в многозондовую установку контроля ИС, где производится 100%-ный контроль базовых схем с одновременным автоматическим выводом на перфоленту координат (номера ряда и номера элемента в ряду) и признака годности элемента. Перфолента с результатами контроля поступает в СЦВМ, куда вводят также требуемую заказчиком схему в виде общепринятой таблицы соединений (ТС) элементов, а также массивы констант, описывающих топологию и конфигурацию элементов и пластин. На основе этих данных СЦВМ производит компоновку годных элементов и расчет (трассировку) избирательных межсоединений и по результатам расчета выдает команды управления установкой экспонирования фотоматриц, на которой одновременно изготавливается комплект из четырех шаблонов межсоединений.

Последовательным нанесением проводящих и изоляционных слоев, соответствующих определенным шаблонам, выполняется коммутация базовых элементов в заданную схему БИС, а при помощи соответствующего оборудования производят сборку готовой пластинки в корпус и герметизацию его.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и приложения.

В главе I проведены теоретические исследования предпосылок и закономерностей, положенных в основу алгоритма и структуры СЦВМ.

Применение методов машинного проектирования электронных схем вычислительной техники на этапе технического (или конструктивного) проектирования охватывает следующие задачи:

- распределение логической схемы по ячейкам;
- распределение ячеек функциональной схемы по пластинам БИС;
- разводку межпластинного монтажа;
- размещение ячеек по пластине БИС;
- трассировку соединений на пластине БИС.

В работе основное внимание уделено вопросам автоматизации машинного проектирования БИС при решении двух последних задач - размещения ячеек (компоновки годных базовых элементов на кристалле в заданную схему) и трассировки соединений этих элементов между собой. Задача компоновки элементов приобретает важное самостоятельное значение в связи с произвольным распределением годных и негодных элементов на поле монокристаллической пластинки.

Многие создатели алгоритмов трассировки межсоединений большое внимание в своих разработках уделяют вопросам оптимизации соединений, а точнее, минимизации их длины. Во всех алгоритмах предусмотрены подпрограммы либо для отыскания кратчайшего пути между двумя точками, либо для минимизации длины целой группы соединений. Это стремление вызвано желанием уменьшить взаимное влияние, снизить время распространения сигнала или уменьшить расход металла. В работе вопрос минимизации длины соединений рассмотрен с целью повышения степени интеграции БИС, увеличения плотности элементов и соединений.

Глобальная минимизация соединений БИС возможна в результате полного перебора всех возможных размещений элементов на плоскости или в объеме. Практически, как это показано в ряде работ, при большом числе элементов это осуществить невозможно, поэтому для практических целей рекомендуют применять способы локальной минимизации соединений.

Анализ известных алгоритмов расчета показывает, что программы поиска кратчайшего пути и оптимизации межсоединений занимают значительную часть машинного времени, что увеличивает стоимость разработки БИС, особенно при проектировании методом избирательных соединений. Поэтому перед нами стала задача, изучив некоторые закономерности релейных схем, уже при решении задачи компоновки элементов закладывать такое близкое к оптимальному расположение элементов, которое заранее предусматривает некоторую минимизацию длины будущих соединений.

При проектировании релейных схем разработчиквольно или невольно располагает отдельные элементы таким образом, чтобы обособленные, ярко выраженные блоки или функциональные узлы имели компактную, с близким расположением элементов компоновку, даже в таких нерегулярных блоках, как программы или схемы управления. Было проведено исследование ряда схем, выполняющих самые различные функции, построенных на различной элементной базе. В результате анализа полученных данных методами математической статистики получены средняя частота распределения связей в зависимости от их длины, вычисленная как

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n h_i, \quad (1)$$

где \bar{x} - среднее групповое дискретное значение относительной длины связи; h_i - относительная частота появления i -го события

при повторении процесса n раз в каждой совокупности (схеме).

По результатам статистической обработки исследованных схем 70% связей составляют соединения либо внутри самого элемента, либо с соседним элементом ($\Delta = 0$ и $\Delta = 1$). При дальнейшем возрастании Δ значение частоты распределения резко падает вниз, делая небольшие всплески, которые объясняются тем, что в каждой схеме есть регулярные обособленные группы элементов типа разрядов, ячеек памяти и др. Эти небольшие всплески не могут изменить явно выраженной закономерности преобладания в схемах близких связей над дальними.

Такая закономерность размещения элементов, позволяющая короткими связями выстраивать их в ряд, или линию, названа структурной линейностью схем.

Достаточно полное использование годных элементов пластины для размещения функциональных элементов принципиальной схемы имеет важное значение, так как расчеты и опыт проектировщиков показывают, что несоблюдение оптимальных соотношений может привести либо к невозможности соединения отдельных элементов, либо к неполному использованию поля пластины. В связи с этим при определении возможной интеграции схемы становится необходимой качественная и количественная оценка максимальной плотности компоновки элементов и соединений на пластине. Если математическую сторону алгоритма принять оптимальной, т.е. предположить возможность прокладки соединения между двумя контактами, то плотность компоновки будет определяться размерами поля, дискретностью линий печатных проводников на поле пластины или элемента, числом контактных выводов или количеством соединяемых пар точек, средней длиной проводника. В работе приводится ряд эмпирических соотношений, связывающих некоторые из этих величин, но весьма ограниченных, так как служат они

для решения узкого круга задач.

Постановку наиболее общей задачи можно представить следующим образом: определить максимальное число элементов $N_{эл}$ с порядковыми номерами от 1 до N , которые можно соединить на поле с размерами $A \times B$ дискретных шагов. В каждом элементе имеется K точек (контактов) с порядковыми номерами от 1 до K , расположенных по заданному закону на поле элемента. Эти точки необходимо соединять с некоторыми контактами других элементов с помощью горизонтальных и вертикальных (в общем случае - любых) линий. Вероятность P необходимости соединения двух точек a_i и a_j элементов с порядковыми номерами i и j является функцией этих номеров. Минимальный дискретный шаг проводника равен t .

На практике часто встречается обратная задача - при заданных $K, N_{эл}$ и $A \times B$ оценить возможность решения задачи. Строгого математического решения поставленная задача до сих пор не имеет, поэтому приходится идти на ряд существенных упрощений, которые, естественно, приводят к ориентировочным результатам. В случае линейного расположения элементов можно при анализе не учитывать слой вертикальных линий, который не оказывает существенного влияния на плотность компоновки, так как основная нагрузка падает на горизонтальные линии. Число элементов $N_{эл}$, размещаемых на пластине, можно определить, используя выведенное в работе соотношение

$$N_{эл} = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{AB}{t^2 + \frac{L_{ср} t c}{K_3}} - n_{вн} \right), \quad (2)$$

- где α - среднее число задействованных на элементе контактов;
- t - шаг линии соединений;
- t^2 - площадь, занимаемая контактом;

- $L_{ср}$ - средняя длина одного соединения;
- c - число линий, приходящихся на один контакт;
- $n_{вн}$ - число внешних выводов, т.е. число контактов, находящихся на границе расчетного поля;
- K_3 - коэффициент заполнения горизонтали, т.е. отношение суммы длин L_i , проведенных на i -ой горизонтали, к общей длине этой горизонтали A_i .

Чтобы с помощью формулы (2) оценить количество элементов, которые можно разместить на пластине, необходимо знать среднюю длину одной линии по горизонтали $L_{ср}$. Можно показать, что среднее значение расстояния между двумя точками, расположенными на одной линии H , равно математическому ожиданию этой величины, т.е.

$$L_{ср} = M(Z) = \int_0^H z \Phi'(z) dz = \frac{1}{H} \left. \frac{z^2}{2} \right|_0^H = \frac{H}{2}, \quad (3)$$

где Z - случайная величина, равная расстоянию между двумя произвольными точками, взятыми на отрезке $[0 - H]$, а функция распределения случайной величины Z по линии H

$$\Phi(z) = \int_0^H dx_1 \int_{x_1}^{x_1+z} p(x_1, x_2) dx_2 = \frac{1}{H^2} \int_0^H dx_1 \int_{x_1}^{x_1+z} dx_2 = \frac{z}{H}. \quad (4)$$

Таким образом, если размер пластины по горизонтали равен H , то средняя величина линии при равной вероятности соединения точек линии между собой $L_{ср} = \frac{H}{2}$. Нетрудно видеть, что если рассматривать квадратное поле, на котором имеются точки со случайными координатами x_1, y_1 и x_2, y_2 , то

$$L_{ср}^* = \frac{H\sqrt{2}}{2} \approx 0,7H. \quad (5)$$

Практически $L_{ср}$ и $L_{ср}^*$ будут всегда меньше полученных выше значений. Как было показано, вероятность соединения расположенных

рядом элементов значительно выше, чем отдаленных. Проведенный статистический анализ ряда схем показал, что при линейном расположении средняя длина горизонтальной составляющей соединения $l_{cp} = 0,141$ и коэффициент заполнения $K_3 = 0,6 - 0,8$. Также важной является обратная задача, особенно один из ее вариантов, который позволяет решить формула (2): при заданной степени интеграции (числе элементов $N_{эл}$) и определенных линейных размерах элемента определить число координатных линий, проходящих на элемент, т.е. оптимальные размеры элемента в шагах координатной сетки, чтобы можно было разместить элементы вплотную друг к другу.

Как видно, для вычисления плотности компоновки элементов БИС на пластине по формуле (2) необходимо определение многих статистических коэффициентов и выполнения ряда ограничений. Предложен метод, позволяющий с достаточной практической точностью производить прикидочную оценку плотности размещения соединений на заданном координатном поле пластины, в котором наиболее общей характеристикой плотности соединений БИС является число соединяемых на пластине пар точек.

Координатную сетку модели, в которой производится трассировка соединений, можно представить в виде однородного графа $G(C, U)$ множество вершин C , которого определяется декартовым произведением $A \times B$, причем координаты узлов сети $x \in A$ и $y \in B$.

Как известно, в однородном графе степени z число ребер v_u равно

$$v_u = \frac{1}{2} v_c z, \tag{6}$$

где v_c - число вершин графа.

Приняв за ребро однородного графа, объединяющего координатную сеть, одно элементарное перемещение линии соединения по координатному полю пластинки БИС, определим максимально возможную длину проводников, которые можно разместить на поле. Если по технологическим соображениям ввести ограничение прокладки линии соединений в одном слое только по одному координатному направлению, тогда суммарная длина ребер графа однородного координатного поля для S - слойного монтажа

$$v_u = \frac{S}{4} v_c z. \tag{7}$$

Определив максимальную длину линий в графе однородной координатной сети, найдем число соединений N_c , которое можно осуществить на заданном поле. Соединения между элементами БИС, размещаемые в однородном графе координатной сети по его ребрам, можно рассматривать как несвязный граф (лес), имеющий n вершин и состоящий из k связных компонент (деревьев). Вершинами этого графа являются соединяемые контакты a_i , компонентами - разветвленная цепь электрических соединений. Если известна средняя длина одного соединения l_{cp} в относительных координатных шагах, то можно определить число контактов N_k , объединяемых в схеме:

$$N_k = \frac{v_u}{l_{cp}}. \tag{8}$$

На основании теоремы о том, что лес, состоящий из k компонент и имеющий n вершин, содержит $(n - k)$ ребер, число соединений N_c пар точек

$$N_c = \frac{v_u}{l_{cp}} - k. \tag{9}$$

Но число компонент зависит от общего числа соединений N_c при определенном коэффициенте связности σ , определяющем степень объединения соединений пар точек в связную компоненту, т.е.

$\kappa = \frac{N_c}{\sigma}$ и тогда

$$N_c = \frac{v_u}{l_{cp}} \cdot \frac{\sigma}{\sigma+1} \quad (10)$$

Результаты, вычисленные по формулам (2) и (10), хорошо согласуются между собой и с опытными данными, т.е. предложенные методы позволяют с достаточной точностью определять возможную степень интеграции БИС.

Глава II посвящена постановке, классификации и анализу основных задач трассировки избирательных межсоединений.

При трассировке, как правило, решается одна из следующих задач.

1. Требуется провести кратчайший путь между двумя вершинами в графе связывающей координатной сети.
2. Дано множество вершин связывающей координатной сети ($n \in A \times B$), требуется связать их ребрами одного дерева (построить связный граф) с тем, чтобы суммарная длина их оказалась минимальной.
3. Дано множество вершин связывающей координатной сети. Требуется построить κ связных компонент (деревьев) с тем, чтобы суммарная длина всех ребер оказалась минимальной.
4. В графе связывающей координатной сети найти оптимальный по ряду параметров путь между двумя вершинами.
5. В графе связывающей координатной сети найти оптимальный путь между n вершинами, с достаточным приближением близкий к минимальному.
6. В графе связывающей координатной сети построить κ связных компонент (деревьев) удовлетворяющих ряду ограничений и требований с тем, чтобы суммарная длина их ребер в достаточной степени приближалась к минимальной.

алгоритмы трассировки соединений можно разделить на два типа: алгоритмы построения кратчайшего пути и эвристические алгоритмы.

Алгоритмы первого типа решают в основном задачу трассировки кратчайшего соединения между двумя контактами, и лишь некоторые из них решают задачи трассировки, связанные с минимизацией длины одной компоненты (разветвленной цепи) или всех соединений пластины. При проектировании межсоединений БИС элементарная задача трассировки кратчайшего соединения двух контактов формулируется следующим образом.

Для данного графа $G(C, M)$ и двух его вершин a и b найти путь наименьшей длины, ведущий из a в b .

Из принципа оптимальности получена основная система нелинейных алгоритмических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} u_i &= \min(u_{ij} + u_j), \quad i = 1, 2, \dots, N-1 \\ u_N &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где u_i - путь перехода из начальной вершины a в желаемую b вдоль кратчайшего пути ($i, j = 1, 2, \dots, N$).

В отличие от многих других систем уравнений, полученных из принципа оптимальности, никакой последовательный метод определения неизвестных здесь непосредственно не усматривается, поэтому применен метод последовательных приближений. Сначала установлена единственность решения уравнений для того, чтобы получить уверенность, что последовательность, которая сходится к решению, сходится к искомому нами решению, т.е. определяет желаемое нами кратчайшее расстояние. Затем проведено отыскание численного решения путем применения метода последовательных приближений.

В качестве исходного приближения $u_a^{(0)}, i = 1, 2, \dots, N$, положено

$$U_a^{(0)} = U_{iN}, \quad i = 1, 2, \dots, N-1, \quad U_{NN} = 0, \quad (12)$$

что соответствует непосредственному переходу из начальной точки в заданную. Если не имеется подобного звена непосредственного перехода, т.е. $U_{aN} = \infty$, полагают для удобства вычислений $U_{aN} = 10^{10}$ или любому большому числу.

Следующее приближение получим

$$\left. \begin{aligned} U_a^{(1)} &= \min\{U_{ij} + U_j^{(0)}\}, \quad i = 1, 2, \dots, N-1 \\ U_N^{(1)} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Эти вычисления на машине выполняются довольно легко, минимизация проводится путем непосредственного сравнения встречающихся сумм. От k -го к $(k+1)$ -му приближению переходят при помощи соотношений

$$\left. \begin{aligned} U_a^{(k+1)} &= \min\{U_{ij} + U_j^{(k)}\}, \quad i = 1, 2, \dots, N-1 \\ U_N^{(k+1)} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Физическая интерпретация последних соотношений такова. Величина $U_a^{(k)}$ соответствует минимальному пути перехода по сети от узла a к узлу b без промежуточных вершин. Величина $U_a^{(k)}$ есть минимальный путь перехода от узла a к узлу b при наличии не более одного промежуточного узла, $U_a^{(k)}$ — при наличии не более k промежуточных вершин графа. Из этого можно видеть, что последовательные приближения монотонно убывают, т.е.

$$0 \leq U_a^{(k+1)} \leq U_a^{(k)}, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (15)$$

Эта процедура аппроксимации конечна по существу, а так как оптимальный путь от a к b не может иметь никаких петель, он

может содержать не более $(N-2)$ промежуточных вершин, или не более $(N-2)$ итераций.

Этот метод последовательных приближений, анализ которого дан в работе, является основой многих алгоритмов нахождения кратчайшего пути между двумя вершинами сетевого графа и позволяет всегда отыскать решение задачи, если только оно существует. Однако лишь в простейших рассуждениях можно рассматривать соединения как путь между двумя вершинами сети. В действительности чаще всего приходится решать задачу соединения оптимальным образом нескольких вершин, так как зачастую длинная разветвленная электрическая цепь связывает несколько контактов, и решение сводится к отысканию минимального дерева.

Аналогично предыдущим рассуждениям исследованы численные методы решения и этой задачи, причем в этом случае учтено то обстоятельство, что технологические и электрические свойства разветвленной цепи соединений позволяют строить дерево соединений, начиная очередное соединение не только из вершины, которая является контактом, а из любой промежуточной вершины сетевого графа, вошедшего в ранее проведенное соединение. Это свойство позволяет еще более минимизировать каждое дерево графа.

Граф соединений всей БИС, вообще говоря, не связанный. Если он к тому же не содержит циклов, то каждая его связная компонента (разветвленная цепь) представляет дерево. В таком случае, интерполируя принятую терминологию, граф всей БИС можно назвать лесом. Задача построения минимального леса аналогична предыдущей, решается теми же методами, хотя сложность и время решения значительно увеличивается, поэтому зачастую задачу ограничивают определением оптимального дерева, с достаточной степенью приближающегося к минимальному. По вполне понятным причинам при построении леса деревьев возможно определение только локально-оптимального результата,

так как последующее дерево будет зависеть от конфигурации предыдущих, последовательности их построения и может значительно отличаться от минимального. Поэтому в работе приводится методика оптимизации не только кратчайшего по длине пути, но и второго по краткости, третьего и т.д.

При трассировке межсоединений БИС на рассмотренные выше решения приходится накладывать ряд ограничений, в основном технологического порядка: запрещение пересечений соединяющих проводников в одном слое, отыскание пути с минимальным числом пересечений уже проведенных проводников, требования минимального числа углов и переходов из слоя в слой и ряд других требований. Одновременная оптимизация пути по нескольким параметрам значительно усложняет все предыдущие задачи и приводит к постановке и решению наиболее общей задачи оптимального соединения.

Отнесем к каждому звену связной компоненты или простейшего соединения контактов i и j некоторую функцию оптимальности F_{ij}

$$F_{ij} = \sum_1^S (p_{ij} + z_{ij} + \dots + q_{ij}), \quad (16)$$

где p_{ij} , z_{ij} и т.д. S - величин, определяемых каким-либо параметром ограничения (например, числом пересечений, числом переходов из слоя в слой и т.д.). Причем каждому параметру приписывается определенный вес относительно других, с тем чтобы искомая функция получилась сравнимой.

Построение соединений всей пластины в этом случае можно сформулировать следующим образом: необходимо найти K связных компонент (деревьев) с тем, чтобы суммарная длина их ребер в достаточной степени приближалась к минимальной и сумма всех функций оптимальности, отнесенных к каждому соединению, была бы минимальной, т.е.

$$F = \min \left(\sum_{i=1}^K F_{ij} \right) = \min \left[\sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^S (p_{ij} + z_{ij} + \dots + q_{ij}) \right]. \quad (17)$$

В работе далее рассмотрены основные положения машинных алгоритмов нахождения кратчайшего пути, к числу которых относятся волновые и потенциальные алгоритмы и их многочисленные модификации.

Для упрощения расчета и сокращения времени некоторые проектировщики БИС идут по пути использования упрощенных, так называемых эвристических алгоритмов, которые в основном представляют собой либо способы проведения путей по набору определенных оптимизирующих правил без исследования окрестностей, либо трассировку пути перебором стандартных конфигураций соединений. Поскольку каждый эвристический алгоритм обладает принципиальными индивидуальными основами, рассмотрены некоторые из них, наиболее известные и характерные.

В главе приводится разработка способов представления модели соединений и основных модификаций алгоритма трассировки, реализованного в СЦВМ. При машинном проектировании соединений БИС и печатных плат в памяти вычислительной машины строится модель соединений схемы, отображающая топологию в каждой точке координатного поля. Существующие методы моделирования координатного поля - топографический, потенциальный и другие требуют при трассировке соединений большого объема информации и, как следствие, применение запоминающих устройств большой емкости.

Модель представляет собой координатную сетку, каждому узлу которой соответствует определенное фиксированное положение координатного стола или луча установки экспонирования фотшаблонов, а расстоянию между ближайшими узлами соответствует одно элементарное дискретное перемещение исполнительного механизма. На координатной сетке полностью отображается картина соединений - контакты, поворо-

ты, пересечения, разветвления соединений и другие ситуации.

Разработаны два способа записи линии соединения в координатной сетке модели. В одном из них предполагается запись всей информации о входе и выходе линии в узлах сетки, во втором характеризуются промежутки между узлами.

На основании вышеизложенных предпосылок разработан эвристический алгоритм, довольно просто реализуемый в СЦВМ и названный линейным (под линейностью алгоритма подразумевается его стремление выстраивать соединения в узкий угол параллельных линий со значительным преобладанием горизонтальной составляющей соединения над вертикальной).

Трассировка соединений осуществляется последовательно, шаг за шагом переходя из одной точки модели в другую, соседнюю. Алгоритм трассировки состоит из ряда подпрограмм:

- подпрограммы выхода соединений из исходного контакта, когда из размеченного условным признаком контакта делается необходимое количество шагов, чтобы найти первую свободную горизонталь;
- подпрограммы движения по свободной горизонтали до сравнения координат по X ;
- подпрограммы подхода к заданному контакту;
- подпрограммы движения по "своей" линии (ранее проведенной линии разветвленной цепи).

Подробно рассмотрены возможные ситуации и отходные модификации алгоритма, результаты анализа, полученные при моделировании и отработке алгоритма на ЭВМ "Минск-22".

Глава III посвящена разработке структуры СЦВМ, предназначенной для проектирования избирательных межсоединений БИС и автоматического управления установкой экспонирования фотоматриц. СЦВМ

состоит из

- запоминающего устройства (ЗУ) с произвольным доступом, память которого постоянно распределена на массивы геометрической модели соединений, карты годности базовых схем и таблицы соединений;
- преобразователя координат (дешифратора) точки модели в адрес запоминающего устройства;
- регистров адреса текущих и заданных координат;
- блоков переходов - программных блоков условных переходов от точки к точке модели (блоков логических операций проведения соединений, реализующих алгоритм трассировки);
- схемы анализа точек, которая представляет собой дешифратор регистра точек;
- схемы записи точек - для поразрядной записи кода в регистр точек;
- блока компоновки годных базовых элементов в заданную схему, состоящего из блока опроса карты годности, счетчика линейки годности и дешифратора признака годности;
- регистра характеристик точек;
- блоков ввода и вывода;
- виртуальной сверхоперативной памяти.

Через блок ввода в ЗУ вводят два оперативных массива информации, карту годности (КГ) и таблицу соединений (ТС), и ряд служебных массивов (констант), определяющих особенности конфигурации базовых элементов и всего кристалла. ТС и константы вводят массивами в групповом режиме (+ I адреса), режим ввода КГ адресный, по адресу элемента в модели.

Размещение (компоновка) элементов является первой по последовательности задачей проектирования. Она представляет собой форму

рование на конкретной пластине заданной функциональной схемы (узла, блока, устройства). Компоновка заключается в переборе по определенному алгоритму всех элементов монокристалла и присвоении годным элементам функциональных номеров заданной схемы.

После компоновки память машины необходимо подготовить для проведения расчетов соединения, т.е. очистить ее от использованных массивов и таблиц и разметить геометрическую модель. При расчете соединений в памяти машины должны находиться два оперативных массива, таблица соединений и модель соединений, а также два массива констант - таблицы разрешенных вертикалей и горизонталей. При трассировке соединений из ЗУ по адресу счетчика соединений извлекается очередное соединение. Координаты исходной точки (X_i и Y_i) заносит в регистр текущих координат, а заданной точки (X_0 и Y_0) - в регистр заданных координат. По адресу начальной точки в регистр точки считывают информацию, характеризующую начальную точку модели, и по результату анализа ее соответствующей схемой, после сравнения координат, программные блоки переходов выдают приращение одной из координат (ΔX_i или ΔY_i), показывающее, в каком направлении от исходной точки производится движение рассчитываемой линии соединения. Одновременно в точку модели в ЗУ через схему записи и регистр точки записывают ряд признаков, характеризующих прохождение линии через точку.

Затем анализируется следующая точка, в которую пришли в результате первого шага. Каждая точка характеризуется рядом признаков, записанных в памяти машины и позволяющих однозначно определять направление движения рассчитываемой трассы и возможные препятствия. Анализ точек, приращение координат и переход движения с одной координаты на другую (поворот линии) производится до тех

пор, пока схемы сравнения не покажут совпадения содержимого регистров текущей и заданной точек (координат). На этом прокладка данного соединения в модели заканчивается, и из таблицы соединений извлекаются начальные и заданные координаты следующего соединения. Таким образом в памяти СЦВМ получают точно-координатную модель соединения БИС. Сигналом "окончание расчета" через блок вывода производится начальная подготовка блоков установки экспонирования фотошаблонов. Блок вывода по запросу установки последовательно, в порядке, определяемом движением стола, считывает из ЗУ характеристики всех точек модели, дешифрирует эти признаки и выдает по нескольким каналам импульсы, открывающие или закрывающие лучи засветки фотошаблонов. Одни каналы управляют проведением горизонтальных и вертикальных отрезков соединений, другие осуществляют вывод контактных окон и переходов в межслойной изоляции для соединения вертикальных и горизонтальных отрезков соединения. При необходимости визуального контроля рассчитанных соединений или поиска оптимального варианта решения с пульта машины производят вывод модели соединений на электрохимическую бумагу.

В СЦВМ через блок обмена информацией предусматривается выход на универсальную ЭВМ. Если алгоритм трассировки, заложенный в СЦВМ, не в состоянии осуществить некоторое количество соединений, то информация об этих соединениях передается по каналам связи в вычислительный центр, где одним из универсальных алгоритмов выполняют нерешенные соединения, используя устройства и блоки СЦВМ, т.е. возвращая в нее директивные приращения координат и характеристики точек. Возможен другой вариант взаимодействия, когда в универсальную ЭВМ передают полностью всю модель с указанием непроеденных соединений, откуда она возвращается уже в готовом виде.

Проработаны вопросы организации памяти СЦВМ, которая может быть выполнена непосредственной или ступенчатой. В автономном варианте работы СЦВМ наиболее целесообразно использование в качестве памяти либо ОЗУ большой емкости с произвольной выборкой, либо быстродействующего накопителя циклического типа, такого, как магнитный барабан, магнитные диски или накопитель на отрезках магнитной ленты циклического типа. В работе рассмотрено построение памяти в различных вариантах. При обработке координатного поля на специализированных устройствах время обработки одной точки поля $t_{обр}$ значительно меньше времени обращения T_0 к основному ЗУ для чтения старых $T_{счит}$ и записи $T_{зап}$ новых, измененных характеристик точек. Однако потери времени при обращении к памяти являются часто нежелательными, а при работе в реальном масштабе времени могут оказаться недопустимыми. Поэтому предложена методика построения сверхоперативной виртуальной памяти для последовательной обработки информации координатного поля, сокращающей время обращения к памяти.

Перезапись и обработку характеристик точек производят целыми массивами, для чего все координатное поле разбивают на определенное количество блоков информации. Размеры блоков $m \times n$ устанавливаются в зависимости от соотношения времени обращения к ЗУ, времени обработки информации и вероятности движения по той или иной координате. Процесс перезаписи блоков информации возможен двумя основными способами: при последовательной смене блоков точек, непосредственно участвующих в обработке, и с организацией предварительного просмотра прилежащих блоков точек с определенным уровнем опережения (на один - два обращения к основному ЗУ вперед).

Время цикла обработки блока точек $T_{ци}$ без опережения обращения будет равно

$$T_{ци} = T_{зап} + T_{счит} + n_i(t_{обр} + 2t_{\beta}), \quad (18)$$

где n_i - число точек, обработанных внутри i -го блока точек; t_{β} - время записи считывания в регистре информации виртуальной памяти. Практически принято время обращения к виртуальной памяти и время обработки рассматривать как одно целое t_0 , так что в дальнейшем рассмотрении ограничиваются выражением

$$T_{ци} = T_{зап} + T_{счит} + n_i t_0. \quad (19)$$

Из выражения (19) можно определить размеры блока точек $n(m)$, так как оптимальным следует считать соотношение

$$T_{зап} + T_{счит} = n_{max} t_0, \quad (20)$$

откуда

$$n_{max} = \frac{T_{зап} + T_{счит}}{t_0}. \quad (21)$$

Соотношение $k = \frac{n}{m}$ определяется вероятностью движения по той или другой координате.

В общем случае при организации i -го уровня опережения размеры блока определяются как

$$n = \frac{2^i (T_{зап} + T_{счит})}{t_0}. \quad (22)$$

Весьма важным вопросом при проектировании соединений ГИС является разработка системы графического взаимодействия человека с машиной, которая требует как высокооперативного устройства взаи-

модействия на ЭЛТ, так и печатающего устройства вывода графической информации. Для этого были разработаны специальные блоки и устройства и рассмотрено построение на их основе специализированных комплексов проектирования БИС.

Для экспериментальной проверки теоретических положений разработана и внедрена в опытную эксплуатацию в составе системы машинного проектирования и изготовления монолитных БИС СЦВМ для трассировки избирательных соединений и автоматического управления установкой экспонирования шаблонов.

В заключительной главе дан анализ результатов опытной эксплуатации СЦВМ в составе автоматизированной системы проектирования и изготовления монолитных БИС. Применение СЦВМ позволило

а) путем многократного повышения коэффициента использования оборудования и уменьшения стоимости СЦВМ относительно универсальной машины значительно снизить стоимость производства БИС;

б) в результате специализации блоков и устройств резко сократить общее время расчета соединений от нескольких часов на универсальной ЭВМ до нескольких секунд на СЦВМ;

в) осуществлять автоматическое управление установкой экспонирования фотошаблонов без промежуточного носителя информации.

В приложении даны фотографии изготовленных БИС, фотошаблонов и выведенных на фотохимическую бумагу образцов рассчитанных соединений ряда схем, таблицы анализа частоты распределения связей по длине, а также модификации и варианты алгоритма трассировки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

I. В работе произведен анализ и исследованы различные методы и алгоритмы проектирования избирательных соединений монолитных БИС.

2. Для обоснования выбора алгоритмов компоновки элементов и трассировки соединений рассмотрен вопрос минимизации длины соединений, для чего в результате проведенного статистического анализа были найдены некоторые закономерности релейных схем, позволявшие уже при решении задачи компоновки элементов закладывать такое близкое к оптимальному размещению элементов, которое заранее предусматривает относительно минимальную длину соединений.

3. Проведенный статистический и формальный анализ рассчитанных БИС показал необходимость выполнения определенных соотношений между количеством координатных линий модели и общим количеством соединений. Была разработана методика определения максимальной плотности компоновки элементов (степени интеграции) на кристалле, иначе говоря — определение оптимального соотношения между числом соединяемых контактов и площадью пластины, предоставляемой для проведения избирательных соединений.

4. Дан анализ и проведены классификация и постановка основных задач трассировки соединений, которые соответствуют двум группам алгоритмов — построения кратчайшего пути и эвристическим.

5. В результате перечисленных (пп. 2-4) предпосылок разработан простой и удобный для машинной реализации (в виде специализированного электронного блока) эвристический алгоритм проектирования БИС, который делится на две самостоятельные программы — компоновку годных элементов на кристалле в заданную схему и расчет (трассировку) соединений этих элементов между собой.

6. Проведенные исследования позволили разработать структуру СЦВМ, предназначенной для проектирования избирательных соединений БИС и автоматического управления установкой экспонирования фотошаблонов, значительно сократившей время, необходимое на проектирование и изготовление монолитных БИС.

7. Проработаны вопросы организации памяти СЦВМ в различных режимах работы, со структурной иерархией различных накопителей и с непосредственным использованием запоминающего устройства с произвольным доступом. Разработана методика построения сверхоперативной виртуальной памяти для последовательной обработки информации координатного поля - при решении топологической задачи.

8. Рассмотрены вопросы применения графической системы взаимодействия "человек - машина" при проектировании избирательных соединений и некоторые особенности построения специализированных комплексов проектирования БИС.

9. Для экспериментальной проверки теоретических положений разработана и внедрена в опытную эксплуатацию в составе системы машинного проектирования и изготовления монолитных БИС СЦВМ для трассировки избирательных соединений и автоматического управления установкой экспонирования шаблонов. В работе дан анализ результатов опытной эксплуатации СЦВМ и приведены рекомендации для дальнейшего совершенствования структуры и методов построения СЦВМ для трассировки соединений.

Основные положения диссертации были доложены на Всесоюзном семинаре по автоматизации проектирования радиоэлектронной аппаратуры (Ленинград, 1971), III Всесоюзном совещании по запоминающим устройствам (Ленинград, 1968), на Всесоюзном семинаре "Организация технической эксплуатации ЭВМ "Минск-2/22", организация ВЦ и автоматизированных систем на базе ЭВМ "Минск" (Москва, 1969) на Республиканской научно-технической конференции молодых ученых (Минск, 1969), на Республиканской научно-технической конференции НТО РЭИС (Минск, 1970), а также опубликованы в следующих работах:

1. Рудко В.А., Бутков Ю.Г., Бабер А.И. Проектирование соединений БИС с применением специализированной цифровой вычислительной

машины. "Электронная техника", серия У1, Микроэлектроника, выпуск 5, Москва, 1970.

2. Рудко В.А., Бутков Ю.Г., Бабер А.И. Представление модели соединений и печатных плат в ЭВМ. Сб. докладов Республиканской научно-технической конференции НТО РЭИС, Минск, 1969.

3. Бабер А.И., Бутков Ю.Г., Райхман Я.А., Рудко В.А., Фурман Н.А. Об одном алгоритме трассировки избирательных межсоединений БИС. "Обмен опытом в радиопромышленности", № 7, Москва, 1971.

4. Строцев Ю.В., Бутков Ю.Г., Варванцев Ю.С. Методы организации накопления информации при решении экономических задач. Сб. докладов Республиканской научной конференции "Вопросы оптимального планирования народного хозяйства БССР", НИИЭМП, Минск, 1969.

5. Строцев Ю.В., Бутков Ю.Г. Особенности группировки и сортировки информации в накопителе циклического типа. Сб. докладов научно-технической конференции молодых ученых Белоруссии, БТИ, Минск, 1969.

6. Строцев Ю.В., Бутков Ю.Г., Рудко В.А. Виртуальная память при обработке информации. "Промышленность Белоруссии", № 7, Минск, 1971.

7. Бутков Ю.Г., Бабер А.И. О плотности компоновки элементов больших интегральных схем. "Электронная техника", серия У1, Микроэлектроника, выпуск 1, Москва, 1971.

8. Фурман Н.А., Рудко В.А., Бутков Ю.Г., Бабер А.И. Вывод графической информации из ЭВМ. Сб. докладов Республиканской научно-технической конференции НТО РЭИС, Минск, 1970.