

4845

M-483

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

ДУБНА



1812/2-76

10/1-76

10 - 9494

И.М.Мельниченко, Н.Ю.Шкобин

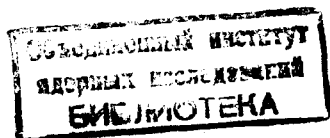
ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАЛОЙ ЭВМ

1976

10 - 9494

И.М.Мельниченко, Н.Ю.Шкобин

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАЛОЙ ЭВМ



Введение

Продолжительная эксплуатация программы ADTRAN^{1/} доказала необходимость ее применения в процессе производства печатных плат. В то же время выявился существенный недостаток: большое "мертвое" время, т.е. время, затраченное на перемещение рабочего инструмента в воздухе. Стремление оператора в процессе кодировки описания печатной платы уменьшить "мертвое" время не приводит к желаемому результату, т.к. это уменьшение недостаточно, что наиболее заметно сказывается при процессе сверления.

Данная работа в основном посвящена оптимизации движения технологических приспособлений полуавтомата ADMAR - 2 при холостом ходе. Кроме того, рассматриваются вопросы повышения уровня автоматизации технологических операций по производству печатных плат.

Это все, вместе взятое, позволяет максимально использовать производственные возможности полуавтомата ADMAR - 2 и его технологических приспособлений.

Ориентация математического обеспечения по-прежнему производится на малую ЭВМ типа PDP-8.

1. Постановка задачи

Ранее уже предлагалось и делались попытки применить методы оптимизации для повышения производитель-

ности полуавтомата ADMAP. Так, в работе^{/2/} предлагается ввести процесс оптимизации холостого хода технологических приспособлений до этапа трансляции описания печатной платы. Это предложение не совсем удачно, т.к. требует введения промежуточных операций упорядочения и запоминания информации на перфоленте, что вносит путаницу в работу, увеличивает объем документации и тем самым усложняет процесс.

В работе^{/3/} приводится один из возможных вариантов решения данной проблемы на большой ЭВМ типа БЭСМ-6. Предложенный алгоритм не имеет однозначного решения, и выбранная ЭВМ, по нашему мнению, используется нерационально.

Одной из особенностей малых ЭВМ является малая коммерческая стоимость единицы времени работы. Кроме того, малые ЭВМ обладают высокой расширяемостью по внешним устройствам и широким ассортиментом последних. Поэтому заманчиво применить малую ЭВМ для оптимизации работы полуавтомата ADMAP по изготовлению печатных плат.

Трудность переложения функций оптимизации на малую ЭВМ определяется ограниченностью оперативной памяти /оперативная память большинства малых ЭВМ не превышает 8К слов/. Для проведения оптимизации достаточно сложных плат, составляющих большинство выпускаемых в ОИЯИ, необходим объем оперативной памяти порядка 32-36К слов /при разрядности слова 12-16 бит/. Принципиально возможно осуществление оптимизации на малой ЭВМ с объемом оперативной памяти 8К слов, но в этом случае эффективность оптимизации незначительна.

Предлагается расширить оперативную память малой ЭВМ путем применения магнитных накопителей /магнитофонов, магнитных дисков или магнитных барабанов/. Очевидно, что при этом быстродействие процессора существенно снижается, но правильный выбор алгоритма оптимизации и оправданность обращения к внешним устройствам позволят получить разумную продолжительность работы программы.

2. Алгоритм оптимизации

Алгоритм оптимизации холостого хода полуавтомата ADMAP сводится к задаче построения минимального дерева, решаемой с помощью теории графов.

В основу алгоритма построения минимального дерева /другими словами, оптимизации/ положено многократное использование следующих двух теорем^{/4/}:

1. Каждая вершина минимального дерева непосредственно связана по крайней мере с одной из соседних вершин кратчайшим ребром;

2. Каждая цепь в минимальном дереве связана по крайней мере с одной из соседних цепей кратчайшим ребром.

Предположим, что на плоскости задано множество вершин Y_n . Построим полный граф и определим длину всех его ребер, используя евклидову метрику. В целях упорядочения информации удобно составить таблицу /приложение 1/, в которой по горизонтали и по вертикали отложены номера вершин, а на пересечении строк и столбцов - длины ребер.

Процесс построения минимального дерева начинается с формирования строки Π' , включающей ребра, соединяющие первую вершину со всеми остальными /см. первый столбец таблицы в приложении 1/. Элементы строки Π' снабжаются индексом вершины a из уже построенной части минимального дерева, которая имеет кратчайшее ребро до соответствующей вершины, еще не включенной в минимальное дерево; индекс a назовем указателем вершины. Далее из строки Π' выбирается минимальный элемент Π'_i , и в таблицу минимального дерева заносится ребро (Y_a, Y_i) . Таким образом, в минимальное дерево оказалась включенной новая вершина с i -м номером. Для этой вершины формируется новая строка N' -длины ребер, соединяющих ее с остальными вершинами. Затем строка Π' склеивается со строкой N' /склеивание заключается в том, что каждый элемент строки Π'' становится равным минимуму из соответствующих элементов строк Π' и N' , причем, если минимальным является элемент из N' , то соответствующий указатель a заменяется

на i /. После этого снова выбирается минимальный элемент, но уже из склеенной строки Π'' . Описанный процесс повторяется до тех пор, пока не будет получено минимальное дерево.

Данный алгоритм достаточно просто реализуется на ЭВМ и требует небольших затрат машинного времени. К недостаткам данного алгоритма следует отнести значительные затраты ресурсов оперативной памяти, что совершенно нереально при использовании малой ЭВМ.

Поэтому рассмотренный алгоритм был модернизирован с целью приспособления его к малой ЭВМ.

2.1. Модернизация алгоритма оптимизации

Рациональное использование оперативной памяти ЭВМ достигается введением в алгоритм оптимизации процесса вычисления длин ребер между ранее оптимизированной и оставшимися вершинами, т.е. в каждом цикле оптимизации следует формировать строку. При этом число одновременно оптимизируемых точек определяется объемом буфера и может достигать значительной величины /в данном случае порядка 2000/.

Расстояние между двумя точками трактуется как максимальное приращение координат ΔX или ΔY ; предварительно вычисляются

$$\Delta x = |x_n - x_{n-1}|,$$

$$\Delta y = |y_n - y_{n-1}|,$$

далее выбирается наибольшая величина приращения, т.к. она определяет величину перемещения технологических приспособлений полуавтомата ADMAP. При процессе оптимизации из имеющихся $\max \Delta x(\Delta y)$ выбирается минимальное значение.

В рассматриваемой метрике круг вырождается в квадрат и алгоритм в ряде случаев не дает однозначного решения. Таким образом, необходимо введение дополнительных критериев эффективности, в результате алгоритм оптимизации становится "многокритериальной /лексикографической/ задачей" /5/. Задание набора строго ранжированных по важности критериев $K_1, K_2 \dots K_n$ позволяет не только выделить некоторые стратегии в качестве оптимальных, но и упорядочить все стратегии из множества U по степени предпочтительности.

Применительно к данному случаю дополнительные критерии определяются спецификой установки полуавтомата ADMAP в принятое исходное положение /левый верхний угол координатного стола; $X=0, Y=100$ /. Это задает направление оптимизации:

а/ в направлении Y -сверху вниз;

б/ в направлении X -слева направо.

С целью сокращения числа необработанных точек в оптимизированной области при неоднозначности выбора по первому критерию вводится второй критерий, выбирающий точки, имеющие наибольшую ординату /данному критерию удовлетворяет не более двух точек/. Если неоднозначность решения по второму критерию не достигнута, то применяется третий критерий, определяющий точку с наименьшей абсциссой. Таким образом достигается однозначность решения задачи оптимизации.

Иллюстрация рассмотренного алгоритма оптимизации приведена в *приложении 3*.

2.2. Дополнительные пути оптимизации

Разработанный алгоритм оптимизации полностью удовлетворяет технологическим процессам сверления.

Технологические процессы рисования специфичны и, требуя видоизменения алгоритма оптимизации, позволяют применять пути, повышающие ее эффективность.

Видоизменение алгоритма оптимизации заключается в том, что в качестве точки, относительно которой ми-

нимизируются последующие соединения, выбирается точка, соответствующая концу ранее построенного соединения. В остальном алгоритм полностью сохраняется. Важно отметить, что при определении оптимального перемещения рассматриваются не только начала соединений, но их окончания. При выборе в качестве оптимальной точки конца соединения эта точка интерпретируется как его начало, и соединение обрабатывается в обратной последовательности.

Если одна и та же точка описывается неоднократно, то соответствующие ей технологические операции /сверление, обрисовка "качества"/ выполняются только один раз и при последующем употреблении не рассматриваются.

В программе ADTRAN^{/1/} последовательность кодов управления при обрисовке "качества" точки была постоянной, не зависела от направления подвода пера, включала в себя значительные "холостые" перемещения. Избавление от приведенных недостатков позволяет, как показывают расчеты, повысить эффективность оптимизации на 3-4%, что существенно при изготовлении сложных печатных плат.

2.3. Значение оптимизации

Оптимизация позволяет решить целый ряд проблем:

1. Повышения производительности полуавтомата ADMAP.

2. Освобождения оператора от необходимости контролировать при кодировании "холостой" ход технологических приспособлений полуавтомата ADMAP, т.к. последовательность их движения определяется конфигурацией платы и алгоритмом оптимизации.

3. Повышения скорости кодирования описаний печатных плат благодаря концентрации внимания оператора на этой операции.

4. Привлечения к процессу кодирования операторов более низкой квалификации.

5. Повышения качества рисунка печатной платы на фольгированном диэлектрике в результате улучшения растекания краски и предотвращения образования капли.

6. Экономии перфоленты.

Дальнейшее повышение эффективности оптимизации может быть достигнуто путем реализации более сложных алгоритмов /например, метода итераций/ на большой ЭВМ, но желаемых результатов это не даст.

В качестве информационного языка следует использовать хорошо себя зарекомендовавший в эксплуатации символический язык описания печатных плат^{/1/}. Однако практика конструирования потребовала некоторой его модернизации. Прежде всего это коснулось конфигурации контактных площадок.

"Качество" М позволяет достичь высокой плотности печатного монтажа, но имеет малую площадь сцепления с диэлектрическим основанием. Поэтому демонтаж интегральных схем может вызвать отслоение /отрыв/ проводников от диэлектрика, т.е. привести к необратимому нарушению печатной схемы.

Предполагается ввести в символический язык новые "качества" Н и Р, имеющие прямоугольную конфигурацию и сочетающие в себе положительные свойства "качеств" В и М. Ориентация контактных площадок в горизонтальном и вертикальном направлениях повышает универсальность их применения без существенного снижения плотности печатного монтажа. Данные контактные площадки имеют развитую площадь, обладают лучшим сцеплением и имеют отверстия диаметром 0,8 мм, что положительно сказывается на ремонтоспособности печатных плат.

Представление "качеств" Н и Р в кодах полуавтомата ADMAP приведено в *приложении 4*. Там же, на *рис. 3*, показана конфигурация предложенных контактных площадок. Наряду с введением новых "качеств" сохранены без изменений "качества" В и М.

Разработанная ранее библиотека стандартных блоков дополнена следующими новыми описаниями.

1. Разводка интегральных схем /ИС/ серии "Логика-2" /горизонтальная ориентация/ с применением "качества" Р.

2. Разводка ИС серии "Логика-2" /вертикальная ориентация/ с применением "качества" Н.

3. Разводка ИС серии "Посол" с применением "качества" В.

Новым блокам присвоены номера 96.0, 96.1, 96.2 соответственно, и их схематическое представление приведено на *рис. 1 приложения 2*. Приведенным описаниям соответствуют размеры:

$$x = 6, \quad y = 3;$$

$$x = 3, \quad y = 6;$$

$$x = 4,8, \quad y = 4,8.$$

В качестве основного носителя информации наряду с магнитными лентами по-прежнему используются перфоленты.

3. Технологические операции

Технологические операции рисования позитивной и негативной сторон печатной схемы, сверления больших и малых отверстий стали уже традиционными на полуавтомате ADMAP. Однако они полностью не исчерпывают возможностей имеющегося оборудования.

Рисунки негативной и позитивной сторон схемы чаще всего существенно различаются по количеству соединений /негативной стороне свойственно меньшее количество соединений/. Поэтому часть точек, не составляющих на негативной стороне соединения, в целях сокращения времени кодировки и работы полуавтомата ADMAP, не кодируется. При изготовлении печатных плат ответственного назначения это недопустимо. Выходом из создавшегося положения является применение нового режима работы, условно названного "Дополнение негативной стороны".

В этом режиме работы программа исключает из описания позитивной стороны характерные точки, образующие соединения на негативной стороне. Оставшиеся в

результате отбора точки, соответствующие позитивной стороне, рассматриваются программой как принадлежащие негативной стороне, и на основании этого выводится управляющая перфолента, предназначенная для рисования соответствующих контактных площадок.

В качестве иллюстрации к изложенному материалу в *приложении 5* показано соответствие операций выбираемым "качествам" точек.

В комплект полуавтомата ADMAP входит технологическое приспособление, именуемое "головкой воскования". Данное приспособление служит для защиты металлизированных отверстий от травления. Необходимость защиты металлизированных отверстий вызвана спецификой технологического процесса: процесс металлизации следует за сверлением отверстий и предшествует процессам рисования и травления. Процесс защиты металлизированных отверстий /для краткости далее называемый воскованием/ выполняется перед операцией травления. Следует отметить, что воскование осуществляется как с позитивной, так и с негативной стороны печатной платы.

До сих пор воскование является ручной операцией. В некоторой мере она может быть автоматизирована с помощью управляющих перфолент операций сверления больших и малых отверстий /коды сверления и воскования идентичны/, но этим не достигается эффективное использование имеющегося оборудования. Предлагается ввести в программу новые режимы работы:

1. "Воскование позитивной стороны".
2. "Воскование негативной стороны".

Тогда для данных режимов будут получены специальные управляющие перфоленты, осуществляющие на полуавтомате ADMAP воскование выбранных точек независимо от их диаметров. Преимущества новых технологических операций очевидны.

Предложенные режимы можно сделать более универсальными: двухвариантными с точки зрения использования описания печатной платы /см. *приложение 5*/. Действительно, воскование всех отверстий необходимо только для печатных плат ответственного назначения /выбор

точек производится по описанию позитивной стороны/. Во всех остальных случаях достаточно выполнить металлизацию только тех отверстий, которые являются переходными с одной стороны печатной платы на другую. Выбор точек производится по описанию негативной стороны.

Принципиально новый режим работы на полуавтомате ADMAP без дополнительного оборудования может быть осуществлен специальной установкой рабочего инструмента в сверлильной головке. Устройство сверлильной головки позволяет регулировать выход сверла. Это может быть достигнуто двумя путями:

установкой сверла на соответствующую величину выхода;

изменением расстояния между концевыми выключателями.

В результате удается автоматизировать процесс зенкования отверстий на высокочастотных печатных платах, которые характеризуются наличием значительной поверхности "земляного" контура, и отверстий, не имеющих соединения с "землей". При этом допускается значительное упрощение конфигурации "земляного" контура и, как следствие, сокращение времени кодирования и продолжительности работы полуавтомата ADMAP.

Для получения соответствующих управляющих перфолент требуется создание нового режима работы программы, условно названного "сверление конических отверстий".

Анализ высокочастотных печатных плат наталкивает на мысль о двух вариантах данного режима, определяемых количеством зенкуемых отверстий, если количество отверстий, подлежащих зенкованию, значительно, то следует задать программе, какие из отверстий, указанные в описании платы, не подлежат зенкованию. Тогда заданные отверстия будут исключены из описания, а для оставшихся - выдается управляющая перфолента. В противном случае следует задать отверстия, подлежащие зенкованию, и управляющая перфолента будет получена только для указанных отверстий. Управляющий код операции зенкования соответствует коду сверления.

Применение в качестве промежуточного носителя информации магнитной ленты позволяет, при совмещении описаний позитивной и негативной сторон печатной платы, облегчить работу оператора у пульта ЭВМ. Для этого в программу следует ввести режим работы, "получение комплекта управляющих перфолент". Тогда после отработки одного из режимов программа автоматически переходит на следующий режим без участия оператора.

В комплект управляющих перфолент должны входить наиболее употребительные. Опыт работы и анализ печатных схем показывают, что этот комплект должен состоять из следующих управляющих перфолент:

1. Сверление больших отверстий.
2. Сверление малых отверстий.
3. Рисование позитивной стороны.
4. Рисование негативной стороны.
5. Воскование позитивной стороны.
6. Воскование негативной стороны.

После окончания работы в соответствующих режимах программа автоматически переходит на контроль управляющих перфолент.

Предложенный метод оптимизации холостого хода технологических приспособлений позволяет достаточно легко формализовать и автоматизировать вычисления, направленные на повышение производительности полуавтомата ADMAP-2.

На основе этого метода, а также принципиальных изменений и дополнений основных положений программы ADTRAN были разработаны алгоритм и универсальная рабочая программа. Получаемые с помощью этой программы управляющие перфоленты позволяют максимально приблизить полуавтомат ADMAP-2 к условиям мелкосерийного и индивидуального производства, свойственным лабораториям и подразделениям ОИЯИ.

В заключение авторы приносят искреннюю благодарность за полезные советы и обсуждения Д.А.Смолину, С.С.Кириллову, В.И.Гурскому, а также Т.И.Шитиковой за содействие и помощь с оформлением работы.

Приложение 1

Таблица алгоритма оптимизации

	1	2	3	...	...	$n-1$	n
1	0	$R(y_1, y_2)$	$R(y_1, y_3)$	...	...	$R(y_1, y_{n-1})$	$R(y_1, y_n)$
2	$R(y_2, y_1)$	0	$R(y_2, y_3)$	...	...	$R(y_2, y_{n-1})$	$R(y_2, y_n)$
3	$R(y_3, y_1)$	$R(y_3, y_2)$	0	...	...	$R(y_3, y_{n-1})$	$R(y_3, y_n)$
...	...	...	...	0	...	...	...
...	...	...	...	...	0	...	...
$n-1$	$R(y_{n-1}, y_1)$	$R(y_{n-1}, y_2)$	$R(y_{n-1}, y_3)$	...	...	0	$R(y_{n-1}, y_n)$
n	$R(y_n, y_1)$	$R(y_n, y_2)$	$R(y_n, y_3)$	...	...	$R(y_n, y_{n-1})$	0

Приложение 2

Изображение новых стандартных блоков

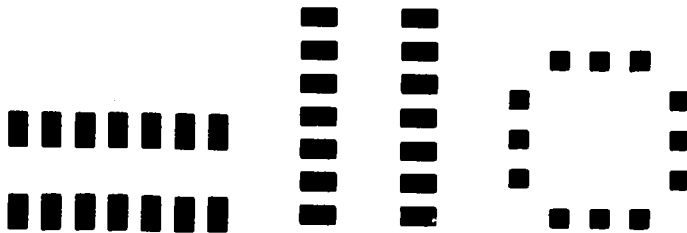


Рис. 1

Приложение 3

Иллюстрация алгоритма оптимизации

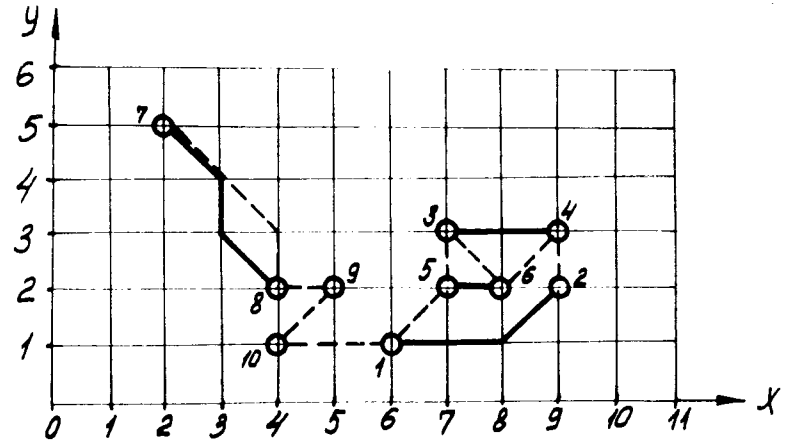


Рис. 2

№ точки	Расстояние до точки										Критерий		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3
7	4	7	5	7	5	6	-	3	3	4	8,9	8,9	8
8	2	5	3	5	3	4	-	-	1	1	9,10	9	-
9	1	4	2	4	2	3	-	-	-	1	1,10	1,10	10
10	2	5	3	5	3	4	-	-	-	-	1	-	-
1	-	3	2	3	1	6	-	-	-	-	5	-	-
5	-	2	1	2	-	1	-	-	-	-	3,6	3	-
3	-	2	-	2	-	1	-	-	-	-	6	-	-
6	-	1	-	1	-	-	-	-	-	-	2,4	4	-
4	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-

Примечание: 1. Путь перемещения сверлильного приспособления: 7-8-9-10-1-5-3-6-4-2.
 2. В графе "Критерий" указаны номера выбранных точек в соответствии с критериями.

Приложение 4

Представление "качеств" точек

H: SS, $y+, x-, P, x-, x-, y-, y-, x+, x+, \bar{P}, x+, x+, P, x+, x+, y+, y+, x-, x-, \bar{P}, x-, y-$;

P: SS, $x-, y+, P, y+, y+, x+, x+, y-, y-, \bar{P}, y-, y-, P, y-, y-, x-, x-, y+, y+, \bar{P}, y+, x+$;

J: SS, $\bar{P}, x^{\pm}y^{\pm}, x^{\pm}y^{\pm}, x^{\pm}y^{\pm}, x^{\pm}y^{\pm}, P$;

I: SS, $\bar{P}, x^{\pm}y^{\pm}, x^{\pm}y^{\pm}, P$.

Примечание: Последовательность управляющих кодов при обрисовке "качеств" точек может быть изменена программой.

Конфигурация прямоугольных контактных площадок

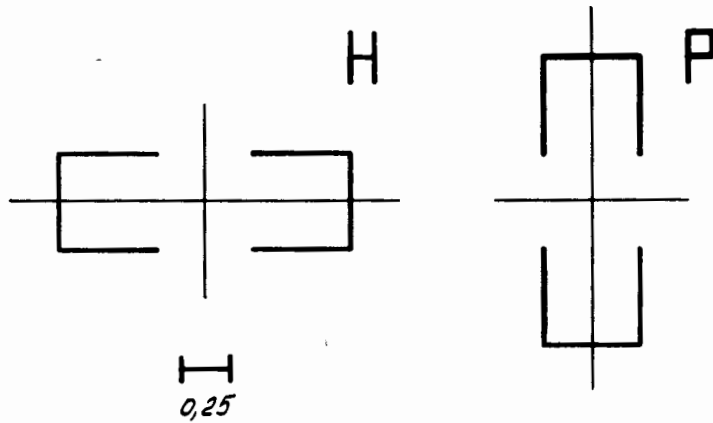


Рис. 3

Приложение 5

Соответствие операций и "качеств" точек

ОПЕРАЦИИ	"Качества" точек																		
	+B	-B	+M	-M	+H	-H	+P	-P	+J	-J	+I	-I	+T	-T	+S	-S	+C	-C	
Рисование положительной стороны	V	-	M	-	H	-	P	-	J	-	I	-	T	-	-	-	-	-	-
Рисование отрицательной стороны	-	V	-	M	-	H	-	P	-	J	-	I	-	T	-	-	-	-	-
Дополнение отрицательной стороны	V	-	M	-	H	-	P	-	J	-	I	-	T	-	-	-	-	-	-
Сверление больших отверстий	-	-	-	-	D	-	-	D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Сверление малых отверстий	-	-	-	-	D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Воскование положительной стороны (1 вариант)	D	-	D	-	D	-	D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Воскование положительной стороны (2 вариант)	-	D	-	D	-	D	-	D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Воскование отрицательной стороны (1 вариант)	D	-	D	-	D	-	D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Воскование отрицательной стороны (2 вариант)	-	D	-	D	-	D	-	D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Зенкование отверстий	D	-	D	-	D	-	D	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Литература

1. Н.Ю.Шкобин, Й.Эсенски. ОИЯИ, 11-8166, Дубна, 1974.
2. В.М.Котов, Й.Эсенски. ОИЯИ, 10-6146, Дубна, 1971.
3. В.Л.Пахомов. ОИЯИ, 10-8468, Дубна, 1974.
4. М.Е.Штейн, Б.Е.Штейн. Методы машинного проектирования цифровой аппаратуры, "Советское радио", 1973.
5. В.В.Подиновский, В.М.Гаврилов. Оптимизация по последовательно применяемым критериям. "Советское радио", 1975.

*Рукопись поступила в издательский отдел
28 января 1976 года.*