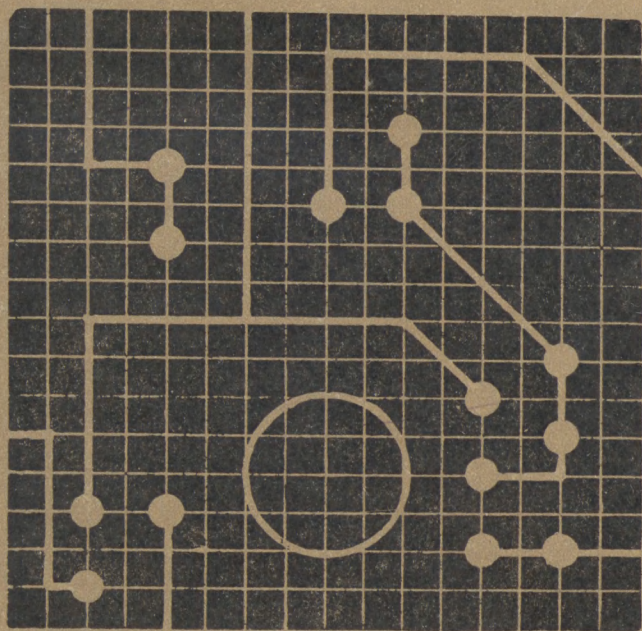


# КОНСТРУИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ



# КОНСТРУИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Допущено Министерством  
высшего и среднего специаль-  
ного образования СССР в ка-  
честве учебного пособия для  
студентов вузов, обучающихся  
по специальности «Конструиро-  
вание и производство радио-  
аппаратуры»



Москва «Высшая школа» 1973



Scan AAW

6Ф2.1  
Ж68  
УДК 621.3.037 (075)

Ж68      Конструирование и технология печатных плат.  
Учебн. пособие для радиотехнических специальностей  
вузов. М., «Высшая школа», 1973.

216 с. с илл.

Перед загл. авт.: А. Т. Жигалов, Е. П. Котов,  
К. Н. Шихаев, Б. А. Хохлов.

В книге изложены вопросы конструирования и технологии изготовления печатных плат: гибких, многослойных и полосковых; технологические требования к печатным платам; вопросы контроля печатных плат; объясняется терминология.

К  $\frac{0341-342}{001(01)-73}$  117-73

6Ф2.1

Рецензенты:

Кафедра «Конструирование и производство радиоаппаратуры» Пензенского политехнического института.

Доцент Ленинградского электротехнического института связи, канд. техн. наук Н. К. Иванов-Есипович.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Данное учебное пособие соответствует программе, утвержденной МВ и ССО СССР.

В настоящей книге авторы на базе опыта отечественной и зарубежной промышленности делают попытку систематизировать технологию изготовления печатных плат, в том числе и многослойных. В изложении материала авторы стремились конкретизировать вопросы конструирования и технологии изготовления печатных плат с тем, чтобы данный материал мог быть использован как пособие для студентов радиотехнических факультетов вузов, а также для инженеров, занимающихся разработкой и производством радиоэлектронной аппаратуры.

Авторы выражают глубокую признательность В. Д. Шпунту, А. С. Ткаченко и Е. В. Юрковскому, участвовавшим в подборе отдельных материалов книги, а также выражают благодарность сотрудникам кафедры «Конструирование и производство радиоаппаратуры» Пензенского политехнического института (зав. кафедрой К. А. Сапожников) и доценту Ленинградского электротехнического института связи канд. техн. наук Н. К. Иванову-Есиповичу за ценные советы и замечания по рецензируемой книге.

Предложения и пожелания по книге просим направлять по адресу: *Москва, 103715, Неглинная ул., 29/14, издательство «Высшая школа».*

*Авторы*



## ВВЕДЕНИЕ

Печатный монтаж — достижение науки пятидесятих годов двадцатого века. Промышленное освоение новых радиотехнических материалов, малогабаритных вакуумных, полупроводниковых и других радиотехнических приборов, а также технологических процессов способствовало бурному развитию техники печатных схем.

В нашей стране печатный монтаж применяется с 1956 г. Опыт показывает, что печатный монтаж имеет значительные преимущества перед объемным монтажом.

Печатные схемы открыли новые потенциальные возможности механизации и автоматизации производственных процессов. При производстве радиоэлектронной аппаратуры они позволяют обес-

- а) механизацию операций сборки, монтажа и пайки;
- б) повторяемость монтажного рисунка схемы, а следовательно, и идентичность параметров монтажа;
- в) возможность более полной механизации контрольно-регулирующих операций.

Печатный монтаж дает также конструктивные преимущества и прежде всего компактность аппаратуры и уменьшение ее веса.

Отечественной промышленностью достигнут высокий уровень техники применения печатных схем в аппаратуре. На некоторых заводах осуществляется комплексно-механизированное производство печатных плат от нескольких сотен до нескольких миллионов штук в год. Для производства печатных плат создан ряд оригинальных высокопроизводительных агрегатов и автоматов.

Из более двух десятков методов производства обычных печатных плат, появившихся в начале их освоения, практически в промышленности остались лишь два: метод травления фольги (химический) и метод химического и гальванического осаждения (электрохимический); применяют также комбинированные методы. При этом для формирования рисунка используют маски, полученные либо сеткографическим способом, либо фотоспособом.

Несмотря на интенсивное развитие современной радиоэлектроники, односторонние обычные печатные схемы еще долгое время будут существовать, особенно при массовом производстве

аппаратуры. Перспективы и пути их развития должны, по-видимому, заключаться в разработке экономически и технически выгодных методов повышения точности и разрешающей способности получения рисунка схемы, в увеличении габаритов печатных плат для повышения надежности и качества работы схемы, совершенствовании способов производства печатных плат на базе новых материалов и прогрессивных технологических процессов с целью полной автоматизации производства.

Новое качественное развитие современной радиоэлектроники основано на применении микросхем различной сложности. Сложность и большая функциональная насыщенность современной аппаратуры требуют реализации большого числа коммутационных соединений.

При разработке радиоэлектронных систем и быстродействующих электронно-вычислительных машин предусматривают широкое использование многослойных печатных плат (МПП), которые являются единственным способом, позволяющим решить сложную задачу коммутации компонентов схемы. Многослойные печатные платы, имея ряд особенностей, сохраняют все основные свойства обычного печатного монтажа.

Наряду с высокой трудоемкостью изготовления многослойных печатных плат, основным недостатком их является сложность внесения изменений в конструкцию платы и невозможность устранения дефектов в готовой плате. Многослойная печатная плата представляет собой сложное изделие и обуславливает новые требования к материалам, технологическим процессам, технологическому оборудованию, производственным помещениям, предусматривает новые формы организации производства, требует подготовки специальных кадров.

## **Глава 1**

### **КОНСТРУКТИВНО- ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПЕЧАТНОМУ МОНТАЖУ**

#### **§ 1. 1. Общие технические требования к печатным платам**

Изготовление печатных плат должно производиться согласно технологическому процессу, принятому на заводе-изготовителе, обеспечивающему выполнение всех требований чертежа и технических условий.

К печатным платам предъявляются следующие требования: поверхность печатных плат не должна иметь пузырей, вздутий, посторонних включений, сколов, выбоин, трещин и расслоений материала основания, снижающих электрическое сопротивление и прочность изоляции.

Одиночные вкрапления металла и следы его удаления на свободных от проводников участках, поверхностные сколы и посветления диэлектрика, ореолы, возникающие в результате механической обработки, допускаются, если расстояние от проводника до указанного дефекта составляет не менее 0,3 мм. Допускаются также отдельные дефекты диэлектрика, обнаруженные после травления и предусмотренные техническими условиями на фольгированные материалы.

Материал основания печатных плат \* должен быть таким, чтобы при механической обработке (сверление, штамповка, распиловка), не образовывались трещины, расщепления, отслоения и другие неблагоприятные явления, влияющие на эксплуатационные свойства, а также на электрические параметры плат.

Ширина печатных проводников и расстояние между ними устанавливаются требованиями чертежа.

Печатные проводники должны быть с ровными краями. Цвет медного проводника может быть от светло-розового до темно-розового. В отдельных случаях допускаются неровности по краям проводников, не уменьшающие минимальной ширины проводников и расстояния между ними, предусмотренные чертежом. Отклонение размеров контактной площадки от чертежа по ширине или длине возможно, но при этом расстояние до ближайших проводников или контактных площадок в любом месте должно быть не менее минимальных величин, оговоренных в чертеже.

---

\* Требования к материалам для основания печатных плат содержатся в технических условиях на материал.

Для повышения качества и надежности печатных проводников часто применяются гальванические покрытия, которые обеспечивают защиту проводников от коррозии, увеличивают сопротивление механическому износу, позволяют повысить предельно допустимые токи в схеме и улучшают смачиваемость припоем проводников в процессе пайки.

На печатных проводниках недопустимы «подгары», механические повреждения поверхности проводников, контактных площадок и металлизации в отверстиях. Как исключения допускаются отдельные точечные протравки, риски, царапины, вмятины, оговоренные техническими условиями на фольгированные материалы, а также аналогичные дефекты, не уменьшающие минимально допустимой ширины проводника и не нарушающие целостности гальванического покрытия.

Толщина слоя меди, осажденной на всех металлизировемых участках печатной платы (фотоэлектрохимический метод), должна быть в пределах 40—100 мкм, а на линиях земли, экранах и проводниках, лежащих по краям платы, она допускается до 150 мкм.

Требования к толщине слоя осажденного металла определяются спецификой технологического процесса. Следует также помнить, что гальванический слой металла рыхлый и обладает меньшей электропроводностью, чем медная фольга.

Увеличение толщины слоя (толщина фольги 35 или 50 мкм) обеспечивает токовую нагрузку в гальванически осажденных проводниках платы. Однако следует помнить, что с увеличением толщины гальванически нанесенного проводника прочность сцепления его с основанием платы снижается.

Для предохранения печатных проводников от воздействия внешней среды при длительном хранении перед сборкой на печатные платы наносят технологическое защитное покрытие, которое удаляется после сборки и пайки перед покрытием электроизоляционным лаком уже собранной платы. Для этих целей используют лаки, обладающие флюсующим свойством (чаще всего на основе канифоли). Покрытие должно быть равномерным и целостным.

Толщина печатной платы также ограничена. В соответствии с международными требованиями\* номинальными толщинами печатных плат являются следующие: 0,2; 0,5; 0,8; (1,0)\*\*; (1,2); 1,6; (2,0); 2,4; 3,2; 6,4 мм.

Величина допуска на толщину платы определяется чертежом. Номинальные диаметры неметаллизированных отверстий и допуски на них приведены в табл. 1.1.

Печатная плата, состоящая из материалов с различными коэффициентами температурного расширения, а также имеющая

---

\* Здесь и в дальнейшем имеются в виду требования, устанавливаемые МЭК (Международной электротехнической комиссией).

\*\* Величины, указанные в скобках, допускаются, но не рекомендуются.

Таблица 1.1.

Номинальные диаметры, мм									
0,40	0,50	0,60	0,80	1,00	1,30	1,5	1,60	2,0	2,4
Допуск ±мм									
0,05	0,05	0,05	0,05	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10

отверстия, естественно, подвержена короблению. В целях повышения механической жесткости платы необходимо, чтобы отношение ее длины к ширине не превышало 4 : 1.

Однако полностью избежать коробления невозможно, поэтому на величину допустимого коробления приняты нормы, приведенные в табл. 1.2.

Таблица 1.2.

Длина печатной платы, мм . . . . .	до 100	до 200	до 300	Свыше 300
Величина коробления (стрела прогиба), мм . . . . .	1	2,5	4	6

Прочность сцепления печатных проводников с основанием печатной платы определяет качество и надежность печатной схемы.

Недостаточная прочность сцепления часто приводит к отслаиванию печатных проводников от основания платы еще в процессе производства аппаратуры. Наиболее часто этот дефект проявляется при операции групповой пайки в результате нагрева материала основания.

Для печатных плат установлены следующие нормы прочности сцепления печатных проводников с основанием платы:

при отслаивании — не менее  $0,8 \text{ н/мм}^2$ ;

при отрыве — не менее  $1,5 \text{ н/мм}^2$ .

Печатный монтаж дает возможность механизировать ряд трудоемких операций изготовления аппаратуры, одной из которых является пайка навесных элементов. Как правило, в производстве используются методы групповой пайки. Плата подвергается термоудару по всей поверхности. В связи с этим к печатным платам предъявляются специальные требования.

Печатные платы, предназначенные для установки радиоэлементов с гибкими выводами (резисторы, конденсаторы, диоды, транзисторы), должны выдерживать не менее пяти одиночных перепаек, а печатные платы, предназначенные для установки многовыводных радиоэлементов (модули, микромодули, микросхемы, импульсные трансформаторы, реле), — не менее трех групповых перепаек.

Электрические параметры печатных плат регламентируются как в условиях эксплуатации, так и после транспортировки и

хранения в определенных условиях. Электрическая изоляция между токоведущими элементами печатной платы, не имеющими электрической связи, должна выдерживать в течение 1 мин без пробоя испытательные напряжения постоянного или переменного (амплитудное значение) тока, указанные в табл. 1.3.

Таблица 1.3.

Расстояние между проводниками, мм	Испытательное напряжение, в					
	на основе бумаги (типа ГФ)			на основе стеклоткани (типа СФ и НДФ)		
	в нормальных условиях	при пониженном атмосферном давлении		в нормальных условиях	при пониженном атмосферном давлении	
		400 мм рт. ст.	5 мм рт. ст.		400 мм рт. ст.	5 мм рт. ст.
0,2—0,5	300	150	75	500	250	100
0,6—1,0	720	360	180	1000	500	200
1,1—1,5	960	480	240	1500	750	300
1,6—2,0	1140	570	285	2000	1000	350

Сопротивление изоляции между токоведущими элементами печатных плат, не имеющими электрической связи, определяется нормами, указанными в табл. 1.4.

Таблица 1.4.

Материал основания	Сопротивление изоляции, Мом, не менее			
	в нормальных условиях	при повышенной температуре +85° С	при пониженной температуре -60° С	после 2 суток относительной влажности 95—98% и температуры +40° С
Фольгированный гетинакс	5000	20	100	0,5
Фольгированный стеклотекстолит	10 000	250	1000	5,0

Омическое сопротивление проводников на печатных платах, изготовленных различными методами, должно соответствовать табл. 1.5.

Сопротивление единичного междуслойного перехода не должно превышать 0,001 ом.

Устойчивость при механических воздействиях и прочность печатных плат обеспечивается конструкцией узла или блока.

Устойчивость при климатических воздействиях характеризует способность печатных плат сохранять внешний вид, механичес-

Таблица 1.5.

Ширина проводника, <i>мм</i>	Сопротивление, <i>ом/м</i> (не более)		
	химического	электрохимического	комбинированного
0,3	2,7	—	3,0
0,4	1,8	—	1,9
0,5	1,44	—	1,4
0,6	1,35	—	1,3
0,8	0,90	2,4	1,0
1,0	0,72	2,1	0,9
1,5	0,54	1,5	0,5
2,0	0,36	1,0	0,4

кие и электрические параметры в пределах установленных норм эксплуатации в условиях:

- а) повышенной предельной рабочей температуры;
- б) пониженной предельной рабочей температуры;
- в) инея и росы;
- г) многократных циклических изменений предельных рабочих температур;
- д) относительной влажности воздуха до 98% при температуре  $+40^{\circ}\text{C}$ ;
- е) пониженного атмосферного давления до 5 *мм рт. ст.* при нормальной и повышенной температурах;
- ж) повышенного атмосферного давления до 3 *атм*;
- з) морского тумана;
- и) быстрого изменения атмосферного давления;
- к) среды, зараженной плесневыми грибами;
- л) среды, подверженной повышенной радиации.

Надежность печатных схем влияет на надежность радиоэлектронной аппаратуры в целом. Она проверяется в составе РЭА и определяется минимальным значением вероятности безотказной работы  $P_2 \geq 0,95$  на время  $\tau = 5000$  ч при риске заказчика  $\beta \leq 0,1$ .

Приемлемое (средне-производственное) значение вероятности безотказной работы  $P_1$  на время  $\tau = 5000$  ч при риске изготовителя  $\alpha \leq 0,2$  рекомендуется устанавливать не менее 0,995.

Отказом считается полная или частичная утрата работоспособности печатных плат, нарушение печатного монтажа или выход любого электрического параметра печатной платы за пределы установленных норм.

Каждая плата имеет маркировку с указанием индекса или чертежного номера платы, а также дату изготовления и штамп ОТК о приемке. Штамп ОТК ставится в любом месте платы так, чтобы он не закрывал маркировочные знаки (цифры и буквы).

Дата изготовления ставится двумя цифрами, например: V—9 (т. е. май 1969 г.), где римскими цифрами обозначен месяц, а арабской — последняя цифра года изготовления печатной платы.



Готовые платы разделяют прокладками и упаковывают пачками в специальную тару, предохраняющую их от механических повреждений.

Доставляют платы к месту сборки партиями с указанием в сопроводительном документе количества плат, штампа ОТК завода-изготовителя, номера чертежа и даты выпуска.

Транспортировать платы можно любым видом транспорта в упаковке, защищающей от атмосферных явлений и механических повреждений.

Хранятся печатные платы в складских помещениях при относительной влажности не выше 80%, температуре от  $+5$  до  $+39^{\circ}\text{C}$ , отсутствии в воздухе кислотных и других агрессивных примесей.

Предприятие-изготовитель гарантирует соответствие плат требованиям технических условий в составе изделия в течение 10 000 ч работы при сроке службы 11 лет, и соблюдении всех норм на сборку узлов и эксплуатацию изделий с печатным монтажом.

Срок хранения плат до монтажа радиоэлементов не должен превышать 6 месяцев в условиях, предусмотренных документацией.

## **§ 1. 2. Основные принципы конструирования печатных плат**

Исходным параметром при конструировании печатных плат является шаг координатной сетки.

С помощью координатной сетки регламентируются основные геометрические размеры печатных плат. Как правило, центры всех видов отверстий на печатных платах располагаются в узлах координатной сетки.

Координатная сетка определяет размещение навесных и печатных элементов на плате, а также требования к технологическому оборудованию, оснастке и контрольной испытательной аппаратуре.

В Советском Союзе принята координатная сетка с основным шагом 2,5 мм. За рубежом широко применяется дюймовая координатная сетка с основным шагом 2,54 мм и дополнительным шагом 0,635 мм.

Основные габариты печатных плат определяются рациональной компоновкой на них навесных радиоэлементов, входящих в функционально законченную схему [например, в телевизоре блок строчной или кадровой развертки или блок усилителя промежуточной частоты (УПЧ)].

При компоновке печатной платы стремятся достигнуть максимального заполнения ее поверхности навесными элементами и разместить их так, чтобы обеспечить кратчайшие связи между ними, выполняемые печатными проводниками. Одновременно следует помнить, что печатная плата выполняет роль шасси, и

нужно ограничивать ее габариты с целью достижения заданной прочности.

При конструкторской разработке аппаратуры стремятся также к ограничению числа используемых типо-размеров плат. Так, согласно данным фирмы «Electrogerätenwerk» печатные платы имеют размеры, представленные в табл. 1.6.

Т а б л и ц а 1.6.

Класс габарита	Габарит, мм	Интервал, мм
0	Длина 10—25	2,5
	Ширина 10—25	1,25
1	Длина 25—95	5
	Ширина 10—95	2,5
2	Длина 100—200	10
	Ширина 20—200	2,5
3	Длина 210—250	10
	Длина 280	—
—	Длина 300	—
	Ширина 30—210	2,5

В союзном масштабе пока не существует стандарта, ограничивающего типо-размеры печатных плат. Их размеры определяются ведомственными нормами и ОСТАми. По данным этих документов максимальный размер печатной платы не должен превышать  $240 \times 360$  мм.

Преимущество при разработке отдается малогабаритным платам, так как крупногабаритные печатные платы имеют малую механическую прочность и сложны в изготовлении.

При определении габарита платы рекомендуется выбирать соотношение размеров сторон: 1:1; 1:2; 2:3; 2:5. Для плат с размером большей стороны до 180 мм в отдельных случаях допускается соотношение сторон до 1:4. Для плат с размером большей стороны до 360 мм соотношение сторон должно быть не менее 1:3.

Необходимо учитывать, что конфигурацию плат, отличную от прямоугольной, следует использовать только при крайней необходимости.

Толщина плат, как правило, соответствует толщине фольгированных диэлектриков и выбирается в зависимости от требований, предъявляемых к конструкции изделия, метода изготовления платы, веса и габаритов устанавливаемых элементов и в подавляющем большинстве случаев не превышает 3 мм.

По периферии печатной платы могут располагаться выемки и пазы, контуры которых рекомендуется совмещать с линиями координатной сетки.

Выемки (пазы) на внешнем контуре печатной платы, имеющие глубину больше ширины, изготавливаются под уклоном  $10^\circ$  (рис. 1.1).

Уклоны не обязательны, если выемки выполняются методом штамповки.

Все внешние и внутренние углы по контуру печатной платы и выемкам должны иметь минимальный радиус закругления 0,5 мм.

Все центры монтажных, переходных и крепежных отверстий печатных плат следует располагать в узлах координатной сетки.

Если в конструкции устанавливаемого элемента имеется два или более выводов (реле, разъемы, ламповые панели, модули и др.), расстояния между которыми кратны основному шагу координатной сетки, то центры отверстий под эти выводы обязательно располагаются в узлах сетки, а центры отверстий под остальные выводы — согласно чертежу на установку данного элемента, как указано на рис. 1.2, а.

Если в конструкции элемента отсутствуют выводы, расстояния между которыми кратны основному шагу координатной сетки, то в узле сетки располагается центр одного из отверстий, принятого за основное, а центр одного из остальных отверстий

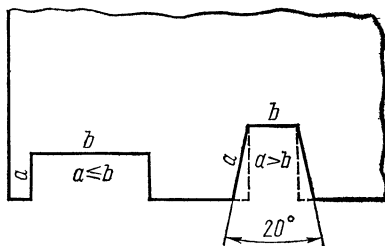
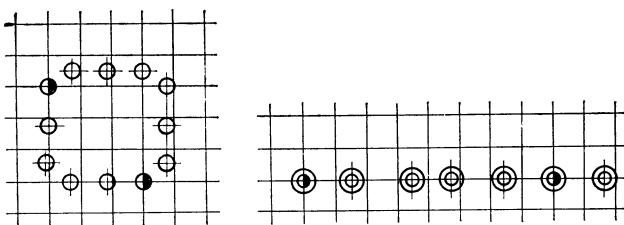
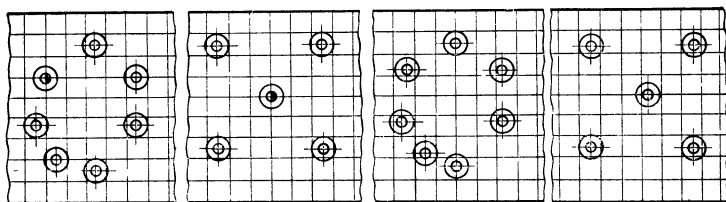


Рис. 1.1. Выемки (пазы) на внешнем контуре печатной платы



⊙ Отверстия, попадающие в узел координатной сетки

а)



⊙ Отверстия, попадающие в узел координатной сетки

б)

Рис. 1.2. Расположение центров отверстий на печатной плате (а, б)

располагается на вертикальной или горизонтальной линии координатной сетки, как указано на рис. 1.2, б.

Отверстия на печатной плате следует располагать таким образом, чтобы наименьшее расстояние между внешними контуром платы и краем отверстия было не менее толщины платы.

Переходным элементом от отверстия, в которое впаивается вывод устанавливаемого элемента, к печатному проводнику является контактная площадка.

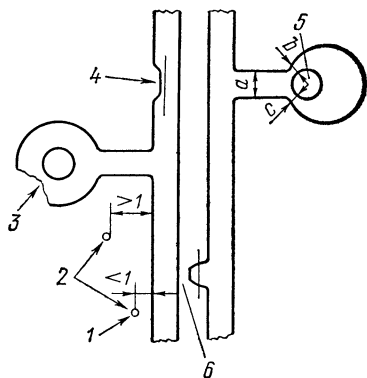


Рис. 1.3. Допуски и дефекты при изготовлении печатных проводников и контактных площадок:

1 — не допускается; 2 — включения фольги; 3 — допускается; 4 — уменьшение проводника не более чем на  $\frac{1}{8}$  (допускается); 5 — не допускается, если  $0,67 a = b + c$ ; 6 — уменьшение расстояния между проводниками более чем на  $\frac{1}{8}$  не допускается

Площадь контактных площадок следует максимально увеличивать, предусматривая формирование кольцевого пояса вокруг отверстия в месте соединения печатного проводника с контактной площадкой. Увеличение площади контактных площадок предотвращает отрыв их в процессе изготовления плат (при выполнении операций травления и лужения) и улучшает качество паяных соединений.

Минимальные размеры контактных площадок определяют, как правило, исходя из номинального диаметра отверстия.

В соответствии с международными рекомендациями минимальные размеры контактных площадок принимаются по табл. 1.7.

Ширина печатных проводников определяется следующими основными параметрами:

Таблица 1.7.

Номинальный диаметр отверстий, мм	Минимальный диаметр контактной площадки	Номинальный диаметр отверстий, мм	Минимальный диаметр контактной площадки
0,6	1,8	1,3	2,8
0,8	2,3	1,6	3,1
1,0	2,5	2,0	3,5

- 1) допустимой токовой нагрузкой;
- 2) допустимой температурой нагрева печатного проводника под максимально-допустимой токовой нагрузкой;
- 3) толщиной печатных проводников;
- 4) разрешающей способностью технологии изготовления печатных плат.

При расчете печатных проводников следует помнить, что допустимые токовые нагрузки для них значительно больше, чем

для объемных проводников. Сравнительные данные для объемных и печатных проводников на основе фольги приведены в табл. 1.8.

Таблица 1.8.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ОБЪЕМНЫХ И ПЕЧАТНЫХ ПРОВОДНИКОВ  
ПО ДАННЫМ МЕЖДУНАРОДНОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ КОМИССИИ (МЭК)

Размеры печатного проводника (толщина $\times$ ширину, мм)	Диаметр объемного проводника, мм	Допустимый ток и плотность тока для печатного проводника		Допустимый ток и плотность тока для объемного проводника (при повышении температуры до $+40^\circ\text{C}$ )		Площадь сечения фольгированного печатного проводника, мм	Сопротивление, ом/м
		$A$	$a/\text{мм}^2$	$a$	$a/\text{мм}^2$		
0,035 $\times$ 1,5	0,31	3,0	58,8	0,7	13,7	0,051	0,37
0,035 $\times$ 2,3	0,38	4,5	55,5	1,3	16,0	0,081	0,23
0,035 $\times$ 3,6	0,48	6,3	50,4	2,0	16,0	0,125	0,14
0,035 $\times$ 5,8	0,61	8,0	38,1	3,2	15,2	0,21	0,089
0,070 $\times$ 4,7	0,76	13,5	40,9	5,0	15,2	0,33	0,054
0,140 $\times$ 3,7	0,97	17,0	32,7	7,5	14,4	0,52	0,036
0,140 $\times$ 5,7	1,19	22,5	27,8	10,0	12,3	0,81	0,023
0,210 $\times$ 7,4	1,55	35,0	25,7	13,0	9,6	1,36	0,016

Для медных печатных проводников, выполненных фотохимическим методом на фольгированных диэлектриках, расчетное омическое сопротивление при температуре среды  $20^\circ\text{C}$

$$R_{20} = \frac{\rho l}{S},$$

где  $\rho = 17,2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$  — удельное объемное сопротивление меди;  $l$  — длина проводника, м;  $S$  — поперечное сечение проводника,  $\text{мм}^2$ ; (с учетом технологических допусков на ширину и толщину проводников);  $S = bh$  ( $b$  — ширина проводника, мм;  $h$  — толщина медной фольги, мм).

Расчетное омическое сопротивление проводника при повышенной температуре окружающей среды

$$R = R_{20} [1 + \alpha (t - 20)],$$

где  $t$  — установившаяся температура проводника,  $^\circ\text{C}$ ;  $\alpha \leq 4,33 \times 10^{-3} / ^\circ\text{град}$  — температурный коэффициент сопротивления меди.

При практических расчетах ширины проводников пользуются специальными таблицами зависимости ширины проводника от перегрева (превышения температуры над окружающей средой) и токовой нагрузки для конкретного фольгирования материала.

При определении номинальных размеров проводников и зазоров между ними необходимо учитывать технологические допуски на размеры и допускаемые дефекты при изготовлении (см. рис. 1.3).

Если при выборе минимальной ширины проводников руководствуются прежде всего допустимыми токовыми нагрузками

на проводник, то при выборе величины зазоров между проводниками необходимо в первую очередь учитывать сопротивление и электрическую прочность изоляции между соседними проводниками.

При расчете зазоров между проводниками считают, что электрическая прочность должна быть не меньше 1 кВ/мм. Данные по пробивному напряжению для одностороннего фольгированного гетинакса толщиной 1,5 мм представлены на рис. 1.4.

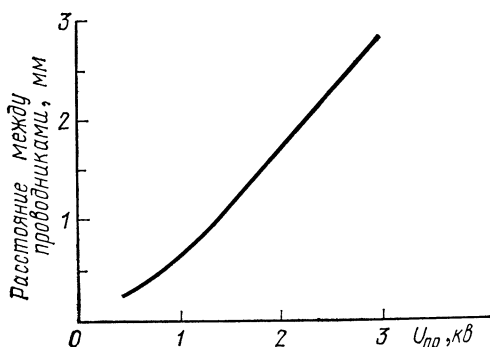


Рис. 1.4. Пробивное напряжение в зависимости от расстояния между проводниками (материал: односторонний гетинакс толщиной 1,5 мм)

Испытательное напряжение  $U_{исп} = 2/3 U_{пр}$ , номинальное напряжение  $U_{ном} = 1/3 U_{исп}$ .

Минимально допустимые зазоры между проводниками можно выбрать, исходя из номинальных напряжений, указанных в табл. 1.9 и 1.10.

Значения сопротивлений изоляции печатных плат в различных климатических условиях и электрической прочности изоляции печатных плат приведены в табл. 1.11—1.14.

При выборе расстояний необходимо учитывать также дополнительные требования, предъявляемые к работе аппаратуры в жестких климатических условиях, а также возможные замыкания в результате возникновения перемычек припоя между соседними проводниками в процессе пайки.

При расчете ширины проводников и зазоров между ними необходимо учитывать также емкость между соседними проводни-

Таблица 1.9

РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ ПРОВОДНИКАМИ  
(для высот от уровня моря до 3000 м)

Напряжение между проводниками (постоянного тока или амплитудное значение переменного тока), в	Минимально допустимый зазор между проводниками на фольгированном гетинаксе, мм
0—50	0,38
51—150	0,56
151—300	0,76
301—500	1,6
Более 500	1,6+0,05

Примечание. Для мощности до 50 Вт включительно.

Таблица 1.10.

## РАССТОЯНИЕ МЕЖДУ ПРОВОДНИКАМИ ДЛЯ ВЫСОТ БОЛЕЕ 3000 м

Напряжение между проводниками (постоянного тока или амплитудное значение переменного тока), в	Минимально допустимый зазор между проводниками, мм	Напряжение между проводниками (постоянного тока или амплитудное значение переменного тока), в	Минимально допустимый зазор между проводниками, мм
0—50	0,56	171—250	3,2
51—100	0,76	251—500	6,4
101—170	1,6	Более 500	6,4+0,125

Примечание. Для мощности до 50 вт включительно.

Таблица 1.11.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ИЗОЛЯЦИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Расстояния между проводниками, мм	Испытательное напряжение, в					
	Диэлектрики фольгированные					
	на основе бумаги (типа ГФ)			на основе стеклоткани (типа СФ и НДФ)		
	Нормальные условия	Пониженное давление		Нормальные условия	Пониженное давление	
		400 мм рт. ст.	5 мм рт. ст.		400 мм рт. ст.	5 мм рт. ст.
0,2—0,5	300	150	75	500	250	100
0,6—1,0	720	360	180	1000	500	200
1,1—1,5	960	480	240	1500	750	300
1,6—2,0	1140	570	285	2000	1000	350

Примечание. Испытание электрической прочности изоляции в условиях пониженного давления производится при наличии технических требований (ТТ) на аппаратуру.

ками. Зависимости емкости между соседними проводниками от ширины проводников и зазоров между ними приведены на рис. 1.5.

В ряде конструкций на печатных платах размещают печатные контакты (печатные разъемы) под ножевые разъемы.

Печатные контакты располагаются на краю печатной платы и выполняются в виде прямоугольных площадок большей ширины, чем печатный проводник. На их поверхности наносится износостойчивое токопроводящее покрытие, чаще всего благородные металлы (золото, серебро, палладий).

При конструировании печатных разъемов следует учитывать технологические допуски и разрешающую способность метода изготовления платы.

Форма и размер краевых печатных контактов, а также величина зазора между ними зависят от целого ряда требований и



Таблица 1.12.

## СОПРОТИВЛЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ БЕЗ ВЛАГОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Наименование материалов	Метод изготовления печатных плат	Расстояние между проводниками, мм (не менее)	Сопротивление изоляции, Мом (не менее)				
			В нормальных условиях	После выдержки в камере влаги при относительной влажности 95—98% и температуре $20 \pm 2^\circ \text{C}$ в течение суток	После воздействия повышенной температуры в течение 2 ч		После выдержки в камере холода при температуре $-60 \pm 2^\circ \text{C}$ в течение 2 ч
					$85 \pm 2^\circ \text{C}$	$100 \pm 2^\circ \text{C}$	
Фольгированный гетинакс: ГФ-1П, ГФ-2П Фольгированный диэлектрик на основе стеклоткани: СФ-1, СФ-2, НФД-180-1, НФД-180-2	Химический	0,2}	5000	0,5	20	—	100
	Комбинированный	0,3}					
	Химический	0,2}	1000	5,0	250	150	1000
	Комбинированный	0,3}					

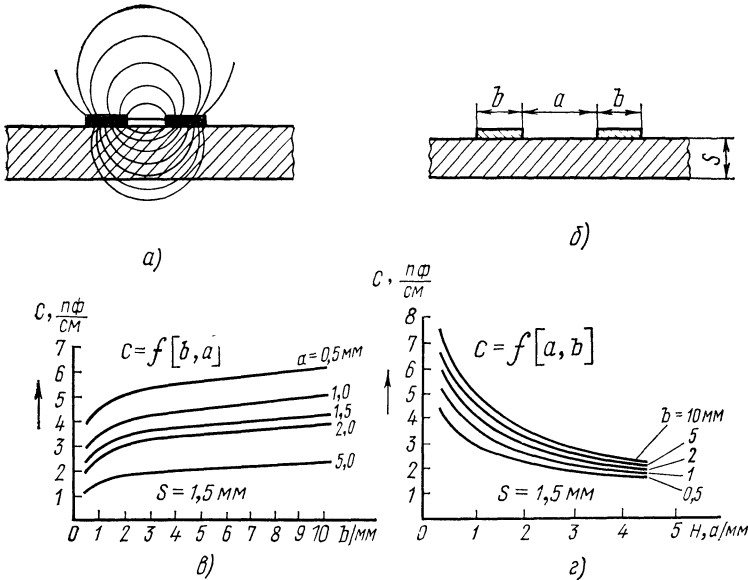


Рис. 1.5. Распределенная емкость на сантиметр длины проводников в зависимости от ширины проводников (в) и расстояния между ними (г):

а — ход силовых линий между двумя проводниками; б — разрез печатной платы с проводниками

Таблица 1.13.

**СОПРОТИВЛЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ ПОСЛЕ ПРОВЕДЕНИЯ  
ИСПЫТАНИЙ НА ВЛАГОУСТОЙЧИВОСТЬ И ВЫДЕРЖКИ  
В НОРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ**

Наименование материала	Сопротивление изоляции, <i>Мом</i>				
	Выдержка в нормальных условиях (после испытаний на влагоустойчивость при относительной влажности 95—98% и температуре 40±2° С)				
	после 48 ч влаги		после 30 суток влаги		
	2 ч	1 сут.	2 ч	1 сут.	2 сут.
Фольгированный ди- электрик на основе стек- лоткани (типа СФ и НФД)	200	10 000	100	1000	3000

прежде всего от величины подводимого тока, рабочего напряже-  
ния и величины требуемого сопротивления изоляции между со-  
седними контактами.

Электрические характеристики печатных разъемов, однако  
могут меняться в широких пределах в зависимости от возможно-

Таблица 1.14.

**СОПРОТИВЛЕНИЕ ИЗОЛЯЦИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ С ВЛАГОЗАЩИТНЫМИ  
ПОКРЫТИЯМИ В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ**

Наименование материала	Метод изготов- ления печатных плат	Расстояние между проводни- ками, мм (не менее)	Сопротивление изоляции, <i>Мом</i> (не менее)						
			нормальные условия	после выдерж- ки в камере влаги при от- носительной влажности 95— 98% и темпе- ратуре 40+2° С		после воздей- ствия повы- шенной темпе- ратуры в тече- ние 2 ч			после воздей- ствия пони- женной тем- пературы в течение 2 ч
				2 суток	30 суток	85 ± 2° С	100 ± 2° С	120 ± 2° С	
Фольгированный гетинакс ГФ-1П, ГФ-2П	Химичес- кий	0,2	5 000	15	—	20	—	—	1000
	Комбини- рованный	0,3							
Фольгированный диэлектрик на ос- нове стеклоткани	Химичес- кий	0,2	10 000	50	5	500	300	—	5000
СФ-1, СФ-2	Комбини- рованный	0,3							
НФД-180-1	Химичес- кий	0,2	10 000	50	5	500	300	100	5000
НФД-180-2	Комбини- рованный	0,3							

Примечание. Прочерк означает, что в этих условиях материал неработоспособен.

# ХИМИЧЕСКИЙ

Число проводни- ков	Класс изготов- ленных плат	Расстояния между двумя отверстиями					
		Диаметры отверстий					
		0,6 0,6	0,6 1,0	0,6 1,0	0,6 1,5	0,6 1,8	1,0 1,0
0	А и Б	3,22	3,42	3,47	3,67	3,82	3,62
	А	2,12	2,32	2,47	2,57	2,72	2,52
	Б	1,77	1,97	2,12	2,22	2,37	2,17
1	А и Б	5,42	5,52	5,77	5,87	6,02	5,82
	А	3,52	3,72	3,87	3,97	4,12	3,92
	Б	2,47	2,67	2,82	2,92	3,07	2,87
2	А и Б	7,62	7,82	7,97	8,07	8,22	8,02
	А	4,82	6,02	5,17	5,27	5,42	5,22
	Б	3,17	3,37	3,52	3,62	3,77	3,57
3	А и Б	9,82	10,02	10,17	10,27	10,42	10,22
	А	6,12	6,32	6,41	6,37	6,72	6,52
	Б	3,87	4,07	4,22	4,32	4,47	4,27
4	А и Б	12,02	12,22	12,97	12,47	12,62	12,42
	А	7,42	7,62	7,77	7,87	8,02	7,82
	Б	4,57	4,77	4,92	5,02	5,17	4,97
5	А и Б	14,22	14,42	14,57	14,67	14,82	14,62
	А	8,72	8,92	9,07	9,17	9,32	9,12
	Б	5,27	5,47	5,62	5,72	5,87	5,67
6	А и Б	16,42	16,62	16,77	16,87	17,02	16,82
	А	10,02	10,22	10,37	10,47	10,62	10,42
	Б	5,97	6,17	6,32	6,42	6,57	6,37
7	А и Б	18,62	18,82	18,97	19,07	19,22	19,02
	А	11,32	11,52	11,67	11,77	11,92	11,72
	Б	6,67	6,87	7,02	7,12	7,27	7,07
8	А и Б	20,82	21,02	21,17	21,27	21,42	21,22
	А	12,62	12,82	12,97	13,07	13,22	13,02
	Б	7,37	7,57	7,72	7,82	7,97	7,77
9	А и Б	23,02	23,22	23,37	23,47	23,62	23,42
	А	13,92	14,12	14,27	14,87	14,52	14,32
	Б	8,07	8,27	8,48	8,52	8,67	8,47
10	А и Б	25,22	25,42	25,57	25,67	25,82	25,62
	А	15,22	15,42	15,57	15,67	15,82	15,62
	Б	8,77	8,97	9,12	9,22	9,37	9,17

Допуски на диаметры отверстий: 0,6<sup>+0,10</sup> 1,0<sup>+0,12</sup> 1,3<sup>+0,12</sup> 1,5<sup>+0,12</sup> 1,8<sup>+0,12</sup> 2,0<sup>+0,12</sup>

Таблица 1.15.

## МЕТОД

для прокладки  $n$ -го количества проводников, мм $d_1$  и  $d_2$  (первого и второго), мм

1,0 1,3	1,0 1,5	1,0/1,8 1,3/1,5	1,0/2,0 1,5/1,5	1,3 1,3	1,3 1,8	1,3/2,0 1,5/1,0	1,8 1,8
3,77 2,67 2,32	3,87 2,77 2,42	4,02 2,92 2,57	4,12 3,02 2,67	3,92 2,82 2,47	4,17 3,07 2,72	4,27 3,17 2,82	4,42 3,32 2,97
5,97 4,07 3,02	6,07 4,17 3,12	6,22 4,32 3,27	6,32 4,42 3,37	6,12 4,22 3,17	6,37 4,47 3,42	6,47 4,57 3,52	6,62 4,72 3,67
8,17 5,37 3,72	8,27 5,47 3,82	8,42 5,62 3,97	8,52 5,72 4,07	8,32 5,52 3,81	8,57 5,77 4,12	8,67 5,87 4,22	8,82 5,02 4,37
10,37 6,67 4,42	10,47 6,77 4,52	10,62 6,92 4,61	10,72 7,03 4,77	10,52 6,82 4,57	10,77 7,07 4,82	10,27 7,17 4,92	11,02 7,32 5,07
12,57 7,97 5,12	12,67 8,07 5,22	12,82 8,22 5,37	12,92 8,32 5,47	12,72 8,12 5,27	12,97 8,37 5,52	13,07 8,47 5,62	13,22 8,62 5,77
14,77 9,27 5,82	14,87 9,37 5,92	15,02 9,52 6,07	15,12 9,67 6,17	14,92 9,42 5,97	15,17 9,87 6,22	15,27 9,77 6,32	15,42 9,92 6,47
16,97 10,57 6,52	17,07 10,67 6,62	17,22 10,92 6,77	17,32 10,92 6,87	17,12 10,72 6,67	17,31 10,97 6,92	17,47 11,07 7,02	17,62 11,22 7,17
19,17 11,87 7,22	19,27 11,91 7,32	19,42 12,12 7,47	19,52 12,22 7,57	19,32 12,02 7,37	19,57 12,27 7,62	19,67 12,37 7,12	19,82 12,52 7,87
21,37 13,17 7,92	21,47 13,27 8,02	21,82 13,42 8,11	21,72 13,52 8,27	21,52 13,32 8,07	21,77 13,57 8,32	21,87 13,67 8,42	22,02 13,82 8,57
23,57 14,41 8,62	23,67 14,57 8,72	23,82 14,72 8,87	23,92 14,82 8,97	23,72 14,52 8,77	23,91 14,87 9,02	24,07 14,07 9,12	24,22 15,12 9,27
25,77 15,77 9,32	25,87 15,87 9,42	26,02 16,02 9,57	26,12 16,12 9,67	25,92 15,92 9,47	26,17 16,17 9,72	26,27 15,27 9,82	26,42 16,42 9,97

## КОМБИНИРОВАННЫЙ НЕГАТИВНЫЙ МЕТОД

Число проводов	Пределы узкого места	Класс изготовления плат	Расстояние между отверстиями для прокладки $n$ -го количества проводников, мм															
			Диаметр отверстий $d_1$ и $d_2$ (первого и второго), мм															
			0,8	0,8	0,8	1,0	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,3	1,3	1,3	1,3	1,8	1,8
0	$l_{\max}$ $l_{\min}$ $l_{\min}$	А и Б А Б	3,60 2,70 2,00	3,80 2,90 2,20	3,95 3,05 2,35	4,05 3,15 2,45	4,20 3,30 2,60	4,00 3,10 2,40	4,15 3,25 2,55	4,25 3,35 2,65	4,30 3,40 2,70	4,55 3,55 2,95	4,40 3,50 2,80	4,50 2,60 2,90	4,65 3,75 3,05	4,80 3,90 3,20	1,8	1,8
1	$l_{\max}$ $l_{\min}$ $l_{\min}$	А и Б А Б	5,85 4,15 3,00	6,05 4,35 3,20	5,20 4,50 3,35	6,30 4,60 3,45	6,45 4,75 3,60	6,25 4,55 3,40	6,40 4,70 3,55	6,50 4,80 3,65	6,55 4,85 3,70	6,80 5,10 3,95	6,65 4,95 3,80	6,75 5,05 3,90	6,90 5,20 4,05	7,05 5,35 4,20	1,8	1,8
2	$l_{\max}$ $l_{\min}$ $l_{\min}$	А и Б А Б	8,10 5,50 3,90	8,30 5,70 4,10	8,45 5,85 4,25	8,55 5,95 4,35	8,70 6,10 4,50	8,50 5,90 4,30	8,65 6,05 4,45	8,75 6,15 4,55	8,80 6,20 4,60	9,05 6,45 4,85	8,90 6,30 4,70	9,00 6,40 4,80	9,15 5,55 4,95	9,30 5,70 5,10	1,8	1,8
3	$l_{\max}$ $l_{\min}$ $l_{\min}$	А и Б А Б	10,35 5,85 4,80	10,55 7,05 5,00	10,70 7,20 5,15	10,80 7,30 5,25	10,95 7,45 5,40	10,75 7,25 5,20	10,90 7,40 5,35	11,00 7,50 5,45	11,05 7,55 5,50	11,30 7,80 5,75	11,15 7,65 5,60	11,25 7,75 5,70	11,40 7,90 5,85	11,55 8,05 6,00	1,8	1,8
4	$l_{\max}$ $l_{\min}$ $l_{\min}$	А и Б А Б	12,60 8,20 5,70	12,80 8,40 5,90	12,95 8,55 6,05	13,05 8,65 6,15	13,20 8,80 6,30	13,00 8,60 6,10	13,15 8,75 6,25	13,25 8,85 6,35	13,30 8,90 6,40	13,55 9,15 6,65	13,40 9,00 6,50	13,50 9,10 6,60	13,65 9,25 6,75	13,80 9,40 6,90	1,8	1,8
5	$l_{\max}$ $l_{\min}$ $l_{\min}$	А и Б А Б	14,85 9,55 6,60	15,03 9,75 6,80	15,20 9,90 6,95	15,30 10,00 7,05	15,45 10,15 7,20	15,25 9,95 7,00	15,40 10,10 7,15	15,50 10,20 7,25	15,55 10,25 7,30	15,80 10,50 7,55	15,65 10,35 7,40	15,75 10,45 7,50	15,90 10,50 7,65	16,50 10,75 7,80	1,8	1,8

Число проводов	Пределы узкого места	Класс изготовления плаг	Расстояние между двумя отверстиями для прокладки $n$ -го количества проводов, мм															
			0,8	0,8	0,8	1,0	0,8	1,0	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	1,3	1,3	1,3	1,0	1,8
			0,8	0,8	0,8	1,0	0,8	1,0	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	1,3	1,3	1,3	1,0	1,8
6	$l_{\max}$ $l_{\min}$ $l_{\min}$	А и Б А Б	17,10 10,90 7,50	17,30 11,10 7,70	17,45 11,25 7,85	17,55 11,35 7,95	17,70 11,50 8,10	17,50 11,30 7,90	17,65 11,45 8,05	17,75 11,55 8,15	17,80 11,60 8,20	18,05 11,85 8,45	17,90 11,70 8,30	18,00 11,80 8,40	18,00 11,80 8,40	18,00 11,80 8,40	18,00 11,80 8,40	18,00 11,80 8,40
7	$l_{\max}$ $l_{\min}$ $l_{\min}$	А и Б А Б	19,35 12,25 8,40	19,55 12,45 8,60	19,70 12,60 8,75	19,80 12,70 8,85	19,95 12,85 9,00	19,75 12,65 8,80	19,90 12,80 8,95	20,00 12,90 9,05	20,05 12,95 9,10	20,30 13,20 9,35	20,15 13,05 9,20	20,25 13,15 9,30	20,25 13,15 9,30	20,25 13,15 9,30	20,25 13,15 9,30	20,25 13,15 9,30
8	$l_{\max}$ $l_{\min}$ $l_{\min}$	А и Б А Б	21,60 13,60 9,30	21,80 13,80 9,50	21,95 13,95 9,65	22,05 14,05 9,75	22,20 14,20 9,90	22,00 14,00 9,70	22,15 14,15 9,85	22,25 14,25 9,95	22,30 14,30 10,00	22,55 14,55 10,25	22,40 14,40 10,10	22,50 14,50 10,20	22,50 14,50 10,20	22,50 14,50 10,20	22,50 14,50 10,20	22,50 14,50 10,20
9	$l_{\max}$ $l_{\min}$ $l_{\min}$	А и Б А Б	23,85 14,95 10,20	24,05 15,15 10,40	24,20 15,30 10,55	24,30 15,40 10,65	24,45 15,55 10,80	24,25 15,35 10,60	24,40 15,50 10,75	24,50 15,60 10,85	25,55 15,65 10,90	24,80 15,90 11,15	24,65 15,75 11,00	24,75 15,85 11,10	24,75 15,85 11,10	24,75 15,85 11,10	24,75 15,85 11,10	24,75 15,85 11,10
10	$l_{\max}$ $l_{\min}$ $l_{\min}$	А и Б А Б	26,10 16,30 11,10	26,30 16,50 11,30	26,45 16,65 11,45	26,55 16,75 11,55	26,70 16,90 11,70	26,50 16,70 11,50	26,65 16,85 11,65	26,75 16,95 11,75	26,80 17,00 11,80	27,05 17,25 12,05	26,90 17,10 11,90	27,00 17,20 12,00	27,00 17,20 12,00	27,00 17,20 12,00	27,00 17,20 12,00	27,00 17,20 12,00

Примечания. Диаметр отверстия: 0,8; 1,0; 1,3; 1,5; 1,8; 2,0.  
Диаметр зонки отверстия: 1,1<sup>+0,2</sup>; 1,5<sup>+0,2</sup>; 1,8<sup>+0,2</sup>; 2,0<sup>+0,2</sup>; 2,3<sup>+0,2</sup>; 2,5<sup>+0,2</sup>.

# КОМБИНИРОВАННЫЙ ПОЗИТИВНЫЙ МЕТОД

Количество проводников	Пределы узкого места	Класс изгото- вления плат	Расстояние между двумя отверстиями для прокладок $d_1$ и $d_2$ (первого и второго), мм															
			Диаметр отверстий $d_1$ и $d_2$ (первого и второго), мм															
			0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,3	1,3	1,3	1,8
0	$l_{\max}$	3,70	3,95	4,10	4,20	4,35	4,45	4,60	4,70	4,50	4,75	4,85	5,00					
	$l_{\min}$	2,20	2,45	2,60	2,70	2,85	2,95	3,10	3,20	3,00	3,25	3,35	3,50					
	$l_{\min}$	2,00	2,25	2,40	2,50	2,65	2,75	2,90	3,00	2,80	3,05	3,15	3,30					
1	$l_{\max}$	5,95	6,20	6,35	6,45	6,60	6,70	6,85	6,95	6,75	7,00	7,10	7,25					
	$l_{\min}$	3,75	4,00	4,15	4,25	4,40	4,50	4,65	4,75	4,55	4,80	4,90	5,05					
	$l_{\min}$	2,90	3,15	3,30	3,40	3,55	3,65	3,80	3,90	3,70	3,95	4,05	4,20					
2	$l_{\max}$	8,20	8,45	8,60	8,70	8,85	8,95	9,10	9,20	9,00	9,25	9,35	9,50					
	$l_{\min}$	5,20	5,45	5,60	5,70	5,85	5,95	6,10	6,20	6,00	6,25	6,35	6,50					
	$l_{\min}$	3,70	3,95	4,10	4,20	4,35	4,45	4,60	4,70	4,50	4,75	4,85	5,00					
3	$l_{\max}$	10,45	10,70	10,85	10,93	11,10	11,20	11,35	11,45	11,25	11,50	11,60	11,75					
	$l_{\min}$	6,65	6,90	7,05	7,15	7,30	7,40	7,55	7,65	7,45	7,70	7,80	7,95					
	$l_{\min}$	4,50	4,75	4,90	5,00	5,15	5,25	5,40	5,50	5,30	5,55	5,65	5,80					
4	$l_{\max}$	12,70	12,95	13,10	13,20	13,35	13,45	13,60	13,70	13,50	13,75	13,85	14,00					
	$l_{\min}$	8,10	8,35	8,50	8,60	8,75	8,85	9,00	9,10	8,90	9,15	9,25	2,40					
	$l_{\min}$	5,30	5,55	5,70	5,80	5,95	6,05	6,20	6,30	6,10	6,35	6,45	6,60					
5	$l_{\max}$	14,95	15,20	15,35	15,45	15,60	15,70	15,85	15,95	15,75	16,00	16,10	16,25					
	$l_{\min}$	9,55	9,80	9,95	10,05	10,20	10,30	10,45	10,55	10,35	10,60	10,70	10,85					
	$l_{\min}$	6,10	6,35	6,50	6,60	6,75	6,85	7,00	7,10	6,90	7,15	7,25	7,40					



Количество проводников	Пределы узкого места	Класс изготовления плат	Расстояние между двумя отверстиями для прокладки $n$ -го количества проводников, мм											
			Диаметр отверстий $d_1$ и $d_2$ (первого и второго), мм											
			0,8	0,8	0,8	1,0	0,8	0,8	0,8	1,0	1,0	1,0	1,3	1,3
6	$l_{\max}$ $l_{\min}$ $l_{\min}$	А и Б А Б	17,20	17,45	17,60	17,70	17,85	17,95	18,10	18,20	18,35	18,50	18,75	19,00
			11,00	11,25	11,40	11,50	11,65	11,75	11,90	12,00	12,15	12,30	12,45	12,60
7	$l_{\max}$ $l_{\min}$ $l_{\min}$	А и Б А Б	6,90	7,15	7,30	7,40	7,55	7,65	7,80	7,90	8,05	8,20	8,35	8,50
			19,45	19,70	19,85	19,95	20,10	20,20	20,35	20,45	20,60	20,75	20,90	21,05
8	$l_{\max}$ $l_{\min}$ $l_{\min}$	А и Б А Б	12,45	12,70	12,85	12,95	13,10	13,20	13,35	13,45	13,60	13,75	13,90	14,05
			7,70	7,95	8,10	8,20	8,35	8,45	8,60	8,70	8,85	9,00	9,15	9,30
9	$l_{\max}$ $l_{\min}$ $l_{\min}$	А и Б А Б	21,70	21,95	22,10	22,20	22,35	22,45	22,60	22,70	22,85	23,00	23,15	23,30
			13,90	14,15	14,30	14,40	14,55	14,65	14,80	14,90	15,05	15,20	15,35	15,50
10	$l_{\max}$ $l_{\min}$ $l_{\min}$	А и Б А Б	8,50	8,75	8,90	9,00	9,15	9,25	9,40	9,50	9,65	9,80	9,95	10,10
			23,95	24,20	24,35	24,45	24,60	24,70	24,85	24,95	25,10	25,25	25,40	25,55
10	$l_{\max}$ $l_{\min}$ $l_{\min}$	А и Б А Б	15,35	15,60	15,75	15,85	16,00	16,10	16,25	16,35	16,50	16,65	16,80	16,95
			9,30	9,55	9,70	9,80	9,95	10,05	10,20	10,30	10,45	10,60	10,75	10,90

Примечания.

$$l_{A \min} = \frac{d_{\text{зентк 1}} + d_{\text{зентк 2}}}{2} + 1,45n + 1,1,$$

Диаметр отверстия 0,8; 1,0; 1,3; 1,5; 1,8; 2,0;

$$l_{B \min} = \frac{d_{\text{зентк 1}} + d_{\text{зентк 2}}}{2} + 0,8n + 0,9,$$

$$l_{AB \max} = \frac{d_{\text{зентк 1}} + d_{\text{зентк 2}}}{2} + 2,25n + 2,5,$$

го нагрева в месте контакта, рода и качества покрытия контактной поверхности, удельного давления между контактами разъема и площади контакта, а также других конструктивных и технологических особенностей ножевых разъемов.

### **§ 1. 3. Некоторые общие указания по конструированию токопроводящего рисунка печатной платы**

Рисунок печатной платы или печатный монтаж — система печатных проводников, обеспечивающих электрическое соединение элементов схемы или экранирование — должен быть выполнен рационально, т. е. с максимальным использованием всей плоскости платы.

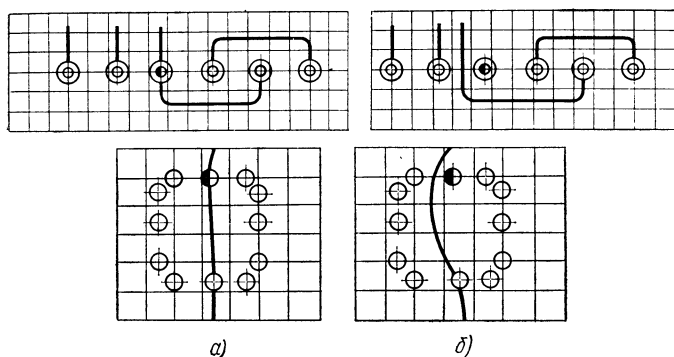
Печатные проводники и контактные площадки рекомендуется выполнять без резких перегибов и острых углов, так как это затрудняет технологию изготовления (печать, травление, пайку), а также приводит к концентрации напряжений при нагреве (вследствие различных ТКЛР) и отслаиванию проводников.

С целью сокращения количества узких мест и возможности прокладки проводников по более удобному и короткому пути обычно пользуются специальными таблицами, которые облегчают проектирование (табл. 1.15, 1.16, 1.17). Следует иметь в виду, что класс А определяет размер платы не более  $240 \times 360$  мм с шириной проводников  $0,5 \div 0,8$  мм, а класс Б — размер платы не более  $120 \times 180$  мм с шириной проводников  $0,2 \div 0,4$  мм. Часто для рационального размещения проводников в сложных схемах прорабатывают не менее трех-четырёх вариантов.

Для устранения узких мест рекомендуется прокладывать печатные проводники под навесными радиоэлементами, используя при этом отверстия под невключенные в схему выводы многоконтактных навесных элементов (типа колодок, разъемов, модулей), как указано на рис. 1.6, а также «раздвигать» проводники после выхода из узких мест и доводить их ширину до значений, соответствующих ширине проводников в свободных местах. Протяженность проводников в узких местах по возможности должна быть ограничена, как показано на рис. 1.7.

При необходимости экранирования печатного монтажа экран следует выполнять не сплошным, а с вырезами. Вырезы могут иметь щелевидную (а), овальную (б) или круглую (в) форму, они предохраняют экран от вспучивания и отслаивания. Примеры выполнения экранов показаны на рис. 1.8.

При попадании в зону экрана монтажных отверстий, около каждого отверстия, на расстоянии  $1\text{--}1,5$  мм от кромки отверстия в экране, необходимо делать  $2\text{--}4$  секторных выреза шириной  $1\text{--}1,5$  мм с расстояниями между ними  $1\text{--}2$  мм, как это показано на рис. 1.9.



⊕ Отверстия под выводы, не включенные в схему

Рис. 1.6. Прокладывание печатных проводников под навесными элементами с использованием отверстий, не включенных в схему:

а — правильно; б — неправильно

Рис. 1.7. Расположение печатных проводников в узких местах печатной платы

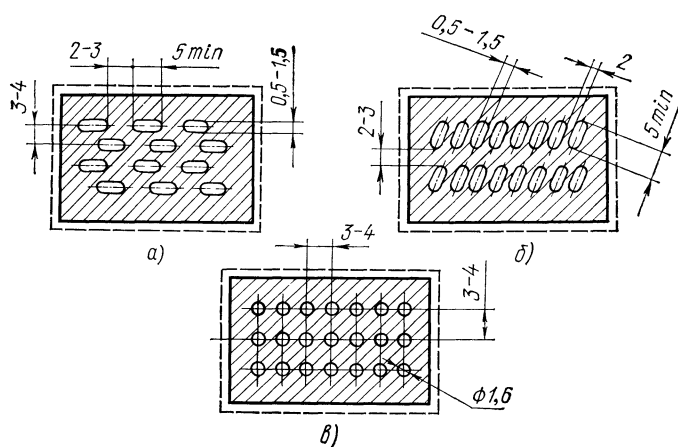
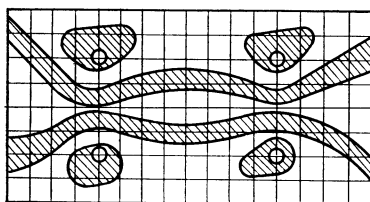


Рис. 1.8. Примеры выполнения экранов печатного монтажа

Монтажные и переходные отверстия, а также металлизированные крепежные отверстия должны иметь контактные площадки для осуществления надежного присоединения элементов к плате.

Расстояние между краем платы и кромкой или зенковкой монтажных, переходных и крепежных отверстий рекомендуется выдерживать не менее толщины платы.

Как правило, расстояния между отверстиями на печатной плате выдерживаются с допуском  $\pm 0,2$  мм в узких местах и до  $\pm 0,5$  мм в свободных местах, за исключением расстояний между

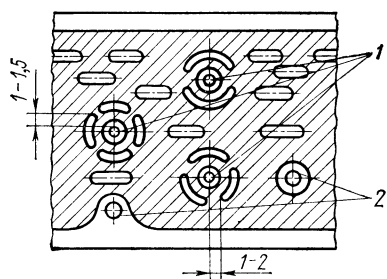


Рис. 1.9. Выполнение монтажных отверстий, попавших в зону экрана:

1 — монтажные отверстия; 2 — отверстия крепежные и технологические

центрами взаимосвязанных отверстий (например, отверстий под выводы элементов с жесткими выводами: модули, разъемы, колодки и т. д.), которые выдерживаются с допуском, оговариваемым в чертежах на плату под установку этих элементов. На каждой плате рекомендуется предусматривать не менее двух технологических базовых отверстий, с диаметром не менее 1,3 мм, расположенных в узлах координатной сетки по углам платы, которые в дальнейшем могут быть ис-

пользованы как крепежные отверстия, при креплении собранной платы в блоке.

В целом процесс конструирования печатных плат достаточно сложный и трудоемкий, поэтому при их разработке применяются различные технологические методы и приемы, облегчающие эту работу. На некоторых из них мы остановимся в следующих параграфах.

#### § 1. 4. Проектирование печатных плат с помощью магнитных матриц

При конструировании радиоэлектронной аппаратуры проектирование и разработка документации печатных плат являются трудоемким процессом.

Повышает качество проектирования и сокращает срок и трудоемкость разработки документации метод моделирования на магнитных матрицах. Чаще всего этот метод используется при разработке одно- и двусторонних печатных плат.

В целом процесс разработки печатных схем методом магнитных матриц состоит из следующих основных этапов:

- а) выбора оптимального варианта модели печатной платы;
- б) изготовления фотооригинала;

- в) разработки рабочего чертежа печатной платы;
- г) разработки сборочного чертежа печатного узла.

Разработка односторонних печатных плат выполняется следующим образом.

На магнитную матрицу (плиту) накладывается лист чертежной бумаги с нанесенной на нее координатной сеткой. На нем липкой лентой (чаще красного цвета) выкладывается контур платы требуемой конфигурации и размеров (в выбранном масштабе).

В контуре печатной платы раскладываются в соответствии с принципиальной электрической схемой шаблоны радиоэлементов, микромодулей и других компонентов.

На элементах — шаблонах изображены контактные площадки в местах, соответствующих выводам элементов. Шаблоны на магнитной матрице располагают таким образом, чтобы центры контактных площадок совпадали с узлами координатной сетки.

Все шаблоны компонентов схемы выполнены из тонкой стальной ленты в выбранном масштабе и окрашены в соответствующий цвет. Они легко и плотно притягиваются к магнитной матрице.

На полученную таким образом модель печатной схемы накладывают прозрачную чертежную бумагу с нанесенной координатной сеткой, совмещают ее с координатной сеткой на модели схемы и мягким карандашом наносят трассировку печатных проводников согласно принципиальной схеме.

Если все печатные проводники не удается разместить или обнаруживается наличие узких мест, затрудняющих трассировку, рассматривают новый вариант размещения элементов — шаблонов. Этот процесс выполняется до получения приемлемого варианта модели разрабатываемой печатной схемы.

После этого приступают к изготовлению фотооригинала печатной платы.

На модель печатной схемы накладывают прозрачный лист бумаги с трассировкой печатных проводников и новый лист прозрачной бумаги или малоусадочного прозрачного материала (например, винипроз) с нанесенной координатной сеткой. Узлы координатной сетки на прозрачном материале совмещают с узлами координатной сетки прозрачного листа бумаги и магнитной матрицы. Для удобства работы все слои скрепляют в пакет липкой лентой. На прозрачный материал по модели печатной схемы, выполненной на магнитной матрице, наклеивают контактные площадки, изготовленные из красной липкой ленты.

Контактные площадки заготавливаются требуемой конфигурации и в соответствующем масштабе.

Печатные проводники по рисунку на прозрачном листе бумаги выполняются также липкой лентой соответствующей ширины.

Рекомендуемый масштаб фотооригинала, как и масштаб всей модели печатной схемы, 4 : 1.

Проводники на фотооригинале не должны иметь резких перегибов и острых углов. Места сужения и расширения печатных проводников должны выполняться с плавными переходами. При прокладке печатных проводников на фотооригинале ленту не следует натягивать во избежание ее отслаивания.

На изготовленном таким образом фотооригинале липкой лентой выкладывается чертежный номер и указываются габаритные размеры платы.

Полученный фотооригинал во избежание деформации и отслаивания проводников фотографируют в соответствующем масштабе сразу же после изготовления.

Рабочий чертеж печатной платы после получения фотооригинала выполняется следующим образом.

С фотооригинала при помощи электрографического аппарата получают копию в масштабе 1:2. Полученную копию вклеивают в бланк-чертеж, выполненный на ватмане типографским методом. Заполняют штамп, наносят необходимые размеры, проекции, маркировку, заполняют таблицу отверстий и т. д. Все это выполняют либо мягким карандашом, либо черной тушью.

Рабочий чертеж печатной платы должен соответствовать всем требованиям принятого оформления чертежей.

С полученного таким образом рабочего чертежа печатной платы делают копию на кальке также при помощи электрографического аппарата. Полученный на кальке чертеж и становится подлинником рабочего чертежа печатной платы.

Аналогично изготавливается и сборочный чертеж печатного узла. Разница состоит в том, что электрофотография делается с модели печатной схемы, выполненной на магнитной матрице.

Проектирование двусторонних печатных плат на магнитных матрицах выполняется аналогично односторонним платам.

Разница состоит в том, что трассировка печатных проводников между элементами-шаблонами для удобства выполняется двумя цветами. Лицевая сторона платы делается одним цветом, обратная сторона — другим.

Фотооригинал для каждой стороны платы изготавливается отдельно. Метод магнитных матриц может быть использован также при проектировании многослойных печатных плат. Изготовление фотооригиналов каждого слоя в этом случае ведется последовательно.

Метод проектирования печатных схем на магнитных матрицах позволяет в значительной степени упростить и механизировать процесс создания конструкторской документации, а также сократить вероятность субъективных ошибок в документации, неизбежных при обычной разработке последней.

Описанный электрографический способ изготовления документации на печатные схемы применяется на стадиях эскизного и технического проектирования, т. е. когда документация отрабатывается.

На стадии изготовления рабочей документации для повыше-

ния качества подлинников рабочих чертежей на печатные платы и печатные схемы рекомендуется изготовление документации фоторепродукционным способом.

## **§ 1. 5. Особенности конструирования многослойных печатных плат (МПП)**

Общее число слоев МПП выбирается в зависимости от сложности электрической схемы. Большинство МПП выполняется с числом слоев от 4 до 12. Число слоев печатной платы прежде всего зависит от числа проводников.

Слои МПП, как правило, определяются при разделении электрической схемы на функциональные цепи (желательно, чтобы каждая функциональная цепь располагалась на отдельном слое). Так, например:

- а) слой с печатным монтажом цепей питания;
- б) слой с печатным монтажом цепей нулевого потенциала;
- в) слой с печатным монтажом сигнальных цепей и т. д.

Первым слоем МПП принято считать слой со стороны установки навесных элементов.

При конструировании МПП учитывают взаимовлияние печатных слоев и отдельных проводников. Устранение взаимовлияния достигается рациональным расположением слоев относительно друг друга или введением специальных экранирующих слоев и проводников.

Суммарную толщину МПП выбирают, исходя из требований механической прочности и обеспечивают соответствующим подбором толщин промежуточных слоев и склеивающей прокладки.

Конструктор должен также выбирать правильное отношение между толщиной платы и диаметром отверстия. На практике это отношение не превышает 3:1. Например, если толщина платы равна 1,5 мм, то диаметр отверстия должен быть не менее 0,5 мм. Рекомендуется, чтобы толщина изоляционного слоя между печатными слоями монтажа была вдвое больше толщины печатных проводников.

Минимально допустимую толщину межслойной изоляции выбирают, исходя из электрических требований к конкретной печатной схеме. Но, из технологических соображений, она должна быть не менее  $0,15 \div 0,20$  мм.

Печатные слои МПП выполняются:

- а) для наружных слоев — по нормам плат класса Б;
- б) для внутренних слоев — по нормам плат класса А, с шириной проводников и зазоров не менее 0,5 мм.

Конструктивно МПП может выполняться из различных сочетаний одно- и двусторонних печатных слоев.

Рекомендуемый диаметр контактных площадок в местах переходов составляет 0,8—1,0 мм, а минимальный диаметр пере-



ходных отверстий, как было сказано, определяется в зависимости от толщины МПП из соотношения:

$$D_{\text{min}} = \frac{1}{3} M, \text{ мм, но не менее } 0,5 \text{ мм,}$$

где  $M$  — толщина МПП, мм.

Диаметр переходного отверстия  $D_{\text{отв}}$  и диаметр вывода навесного элемента  $D_{\text{выв}}$  находятся в следующей зависимости:

$$D_{\text{отв}} = D_{\text{выв}} + (0,2 \div 0,4) \text{ мм.}$$

Если переходные отверстия МПП зенкуются, то диаметр зенковки  $D_{\text{зенк}} = D_{\text{отв}} + (0,1 \div 0,35) \text{ мм}$ , при этом угол зенковки равен  $70-90^\circ$ .

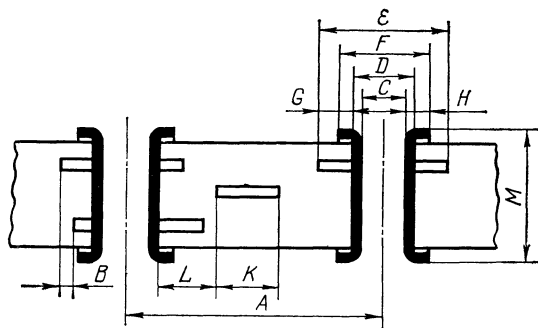


Рис. 1.10. Размеры элементов многослойной печатной платы

Для всех методов получения печатных проводников в целях упрощения расчетов рекомендуется принимать допустимую плотность тока  $20 \text{ а/мм}^2$ .

Наружные слои МПП, как правило, выполняются без печатных проводников. На них рекомендуется располагать только контактные площадки для сверления сквозных отверстий межслойных соединений и площадки для получения паяных или сварных соединений.

Во избежание повреждений выполнение (нанесение рисунка и травление) наружных слоев проводится всегда в последнюю очередь.

Как правило, контактные площадки наружных слоев имеют большие размеры, чем внутренние.

Для расчета многослойных печатных плат необходимо знать максимально возможную плотность монтажа, точность обработки, допустимые габариты и число слоев.

На рис. 1.10 приводится в качестве примера из зарубежной практики поперечный разрез многослойной печатной платы, выполненной методом металлизации отверстий, в котором буквами

РАЗМЕРЫ ЭЛЕМЕНТОВ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ И ДОПУСКИ НА ЭТИ РАЗМЕРЫ

Таблица 1.18.

Элементы конструкции МПП	МПП с расстоянием между центрами отверстий менее 2,54 мм		МПП с расстоянием между центрами отверстий более 2,54 мм	
	рекомендуемые размеры, мм	допуски на рекомендуемые размеры	рекомендуемые размеры, мм	допуски на рекомендуемые размеры, мм
А. Расстояние между центрами отверстий, когда отверстие: менее 150 более 150	Не менее 1,27	Допустимые отклонения $\pm 0,75$ $\pm 0,125$	Не менее 2,54	Допустимые отклонения $\pm 0,125$ $\pm 0,175$
В. Допустимое смещение контактных площадок на различных слоях	—	Допустимое отклонение 0,76	—	Допустимое отклонение 0,125
С. Минимальный диаметр сквозного отверстия после металлизации	0,457 или $\frac{1}{32}$ толщины платы и больше диаметра вывода навесного элемента на 0,125	+0,076 (для 90% отверстий) $\pm 0,127$ (для остальных отверстий)	Не менее $\frac{1}{32}$ толщины платы и больше диаметра вывода на 0,25	Допустимое отклонение $\pm 0,125$
Д. Диаметр просверленного отверстия	—	Допустимое отклонение $\pm 0,025$	—	Допустимое отклонение $\pm 0,05$
Е. Минимальный диаметр контактных площадок на внутренних слоях	—	Больше диаметра просверленного отверстия на 0,35	—	Больше диаметра просверленного отверстия на 0,75
Ф. Минимальный диаметр контактных площадок на внешних слоях платы	—	—	—	Больше диаметра отверстий на 0,75

Продолжение табл. 1.18

Элементы конструкции МПП	МПП с расстоянием между центрами отверстий менее 2,54 мм		МПП с расстоянием между центрами отверстий более 2,54 мм	
	рекомендуемые размеры, мм	допуски на рекомендуемые размеры	рекомендуемые размеры, мм	допуски на рекомендуемые размеры, мм
Г. Ширина кольца (контактных площадок) на внутренних слоях	—	Минимальная 0,025	—	Минимальная 0,025
Н. Ширина кольца контактной площадки на внешнем слое платы	—	Минимальная 0,050	—	Минимальная 0,0125
Н <sub>1</sub> . Ширина кольца контактной площадки, к которой крепятся выводы (на внешних слоях платы)	—	Минимальная 0,050	—	Минимальная 0,050
К. Ширина проводников	Желательно не менее 0,25	Желательно отклонение $\pm 0,05$	Желательно не менее 0,50	Допустимое отклонение $\pm 0,075$ для внутренних слоев и $\pm 0,10$ для внешних 0,25
К <sub>1</sub> . Минимальная ширина проводников	—	0,125	—	0,25
Л. Расстояние между просверленным отверстием и проводником	Не менее 0,25	Не менее 0,075	Не менее 0,6	Не менее 0,25
М. Толщина многослойной платы и допуски при толщине: до 1,78 свыше 1,78	Максимальная в 3 раза больше сквозного отверстия	Максимальная в 3 раза больше минимального диаметра сквозного отверстия $\pm 0,175$ $\pm 10\%$ от толщины	Максимальная в 3 раза больше минимального диаметра сквозного отверстия —	$\pm 0,175$ $\pm 10\%$ от толщины

*A, B, C, D* и т. д. обозначены размеры ее элементов, а в табл. 1.18 приведены числовые значения этих размеров.

В табл. 1.18 платы разделены на две группы: с расстоянием между сквозными отверстиями менее 2,54 и более 2,54 мм. Платы с расстоянием менее 2,54 мм изготовить значительно труднее. Максимально возможные размеры многослойной печатной платы, удовлетворяющей всем размерам ее элементов, приведенным в этой таблице, с учетом точности современных средств обработки (травления рисунка, полученного копированием через фотошаблоны; точности сверлильного станка; совмещения слоев при склеивании многослойной платы) и других факторов, могут быть не более квадрата со стороной 500 мм. Следует помнить, что чем больше площадь многослойной печатной платы, тем больше вероятный процент брака. В отечественной практике МПП с габаритами больше 350×350 мм не применяются.

Согласно приведенной таблице максимальная толщина платы в три раза больше диаметра сквозного отверстия. Исходя из этого следует, что увеличивая диаметр отверстий, можно увеличить предельную толщину платы, но это, в свою очередь, снижает плотность расположения печатных проводников. Учитывая все приведенные факторы, многослойные печатные платы изготавливают толщиной не более 3 мм.

Как было сказано, существует прямая зависимость между толщиной многослойной платы и числом ее слоев. Расчеты показали, что применение существующих фольгированных медью тонких слоистых пластиков и склеивающих прокладок минимально возможной толщины позволяет изготовить плату с числом слоев не более 20.

При изготовлении таких плат, состоящих из большого числа слоев с плотным монтажом на каждом слое, возникают различные технологические трудности, ограничивающие число слоев и плотность монтажа.

При изготовлении МПП самым сложным является получение надежных межслойных соединений, что и определяет в основном качество и надежность МПП. Поэтому на практике количество слоев стремятся максимально ограничить.

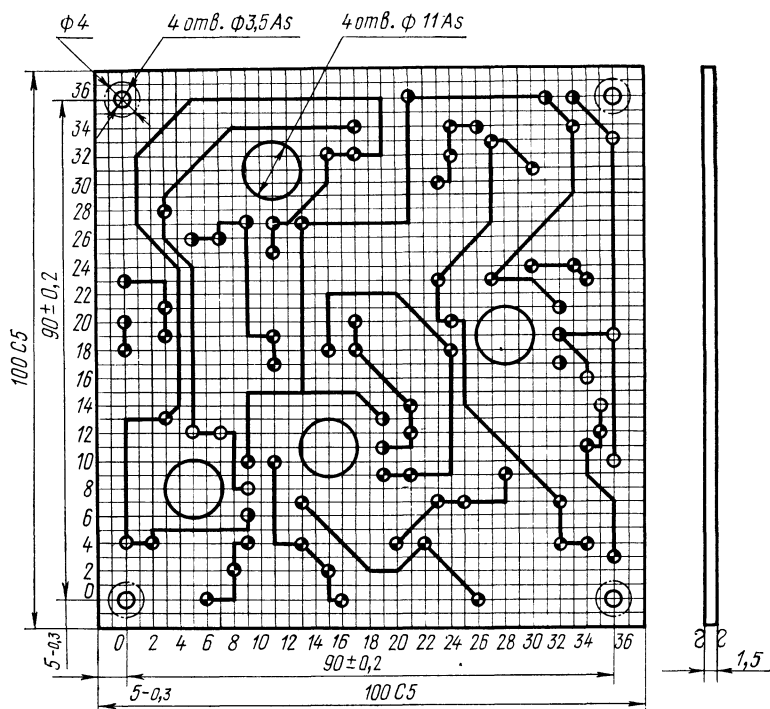
Часто встречающийся на практике метод проектирования МПП основан на одновременном эскизировании вручную топологии печатной платы по слоям.

Для этого берут ряд тонких листов прозрачной чертежной бумаги или малоусадочной пленки с нанесенной координатной сеткой. Число листов соответствует закладываемому числу слоев МПП. Все листы и оригинал внешнего (первого) слоя совмещают по узлам координат и скрепляют между собой с одной стороны так, чтобы каждый из них был легко доступен. Подготовленный таким образом пакет помещают на стол с подсветом.

На каждом листе бумаги мягким карандашом или черной тушью наносится рисунок печатной схемы, соответствующей определенному функциональному слою МПП.

XXX \* XXX \* LXX

## ПРИМЕР

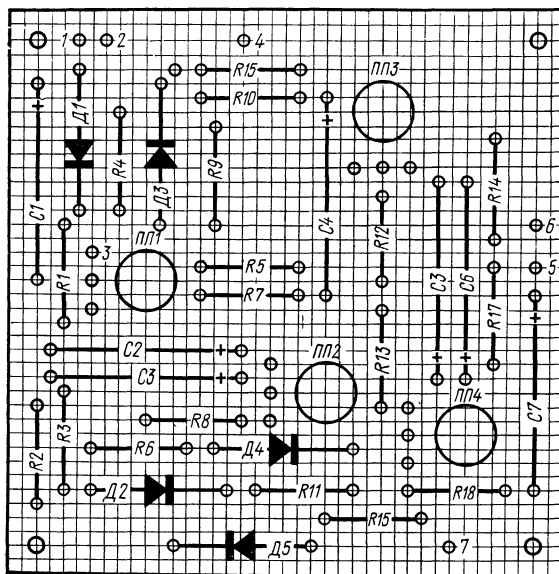


1. Плату изготовить химическим методом
2. Плата должна соответствовать НГО.077.000
3. Шаг координатной сетки 2,5 мм
4. Конфигурацию проводников выдерживать по координатной сетке с отклонением от чертежа  $\pm 1,0$  мм
- 5.

Параметры элемент, платы, кроме мест оговоренных особо	Размеры, мм, не менее	
	в своб. мест.	в узких местах
Ширина проводников	1,5	0,5
Расстояние между двумя проводниками	1,0	0,8
Расстояние между двумя контактн. площ. или проводн. и контактной площадкой	1,0	0,5

6. Форма контактной площадки - произвольная, в тип  $\pm 0,2$  мм
7. Предельные отклонения размеров между центрами отверстий, кроме оговоренных особо, в узких местах  $\pm 0,2$  мм, в свободных местах  $\pm 0,3$  мм
8. Места, обведенные штрих - пунктирной линией, проводниками

Рис. 1.11. Пример оформления чертежа печатной платы (а, б); в, г, д, е, ж — слои; и — таблицы контрольных цепей



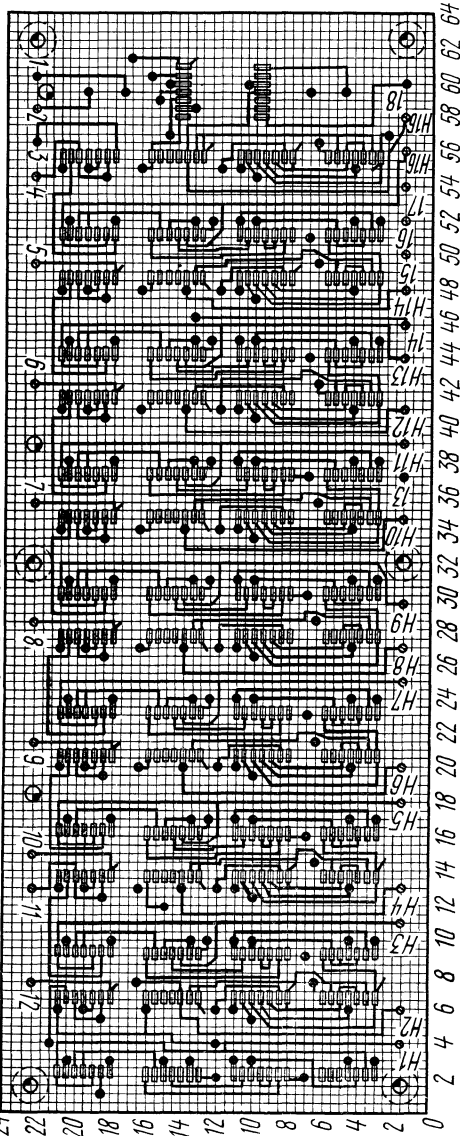
9. Маркировку производить краской МКЭ4 по НГО.028.000. Шрифт 3 по НГО.010.007.

Условное обозначение отверстий	Диаметр, мм	кол.
	1,5A <sub>5</sub>	16
	1,0A <sub>5</sub>	52
	0,8A <sub>5</sub>	9

				XX7. XXX. XXX.					
ИЗМ	Лист	№ докум	Подпись	Дата	Плата	Листа	Масса	Масш	
Разработ									2:1
Проектиров						Лист		Листов	1
Т. констр					Гетинакс Ф-1-35-1,5				
Н. кнтр					ГОСТ-10316-70				

Рис. 1.11, а

# ПРИМЕР ОФОРМЛЕНИЯ



1. Плату изготовить комбинированным позитивным методом;

2. Плата должна соответствовать 077.000

3. Шаг координатной сетки 1,25 мм

4. Конфигурация проводников поддерживать по координатной сетке с отклонением от черт.  $\pm 1,0$  мм

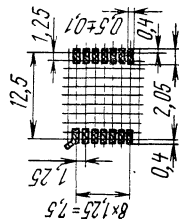
Параметры элементов печатной платы (кроме оговоренных особо)	Размеры, мм не менее	
	в свободных местах	в узких местах
Ширина проводника	1,5	0,5
Расстояние между двумя проводниками	1,0	0,6
Расстояние между двумя контактными площадками или проводниками контактной площадки	1,0	0,4

6. Форма контактных площадок произвольная, в  $\text{тип} = 0,15$  мм

7. Межцентровые расстояния между отверстиями выполнять с точностью: в узком месте  $\pm 0,2$  мм; в свободном месте  $\pm 0,5$  мм

8. Точность выполнения расстояния между центрами контактных площадок в группе  $\pm 0,1$  мм

I



Условное обозначение	Диаметр мм	Диаметр зондов, мм	Наличие металлизации	Количество
●	0,6 A <sub>5</sub>	0,9 <sup>+0,2</sup> × 70 с 2-х сторон	Есть	168
⊙	1,5 A <sub>5</sub>	1,5 <sup>+0,2</sup> × 70 с 2-х сторон	Есть	34
○	1,8 A <sub>5</sub>	—	Нет	3
⦿	2,0 A <sub>5</sub>	—	Нет	6

9. Маркировку производить краской МКЗ4 по нГО. 028.000. Шрифт 3 по ГОСТ 007

10. Площадь металлизации F<sub>мет</sub> = 38 см<sup>2</sup>

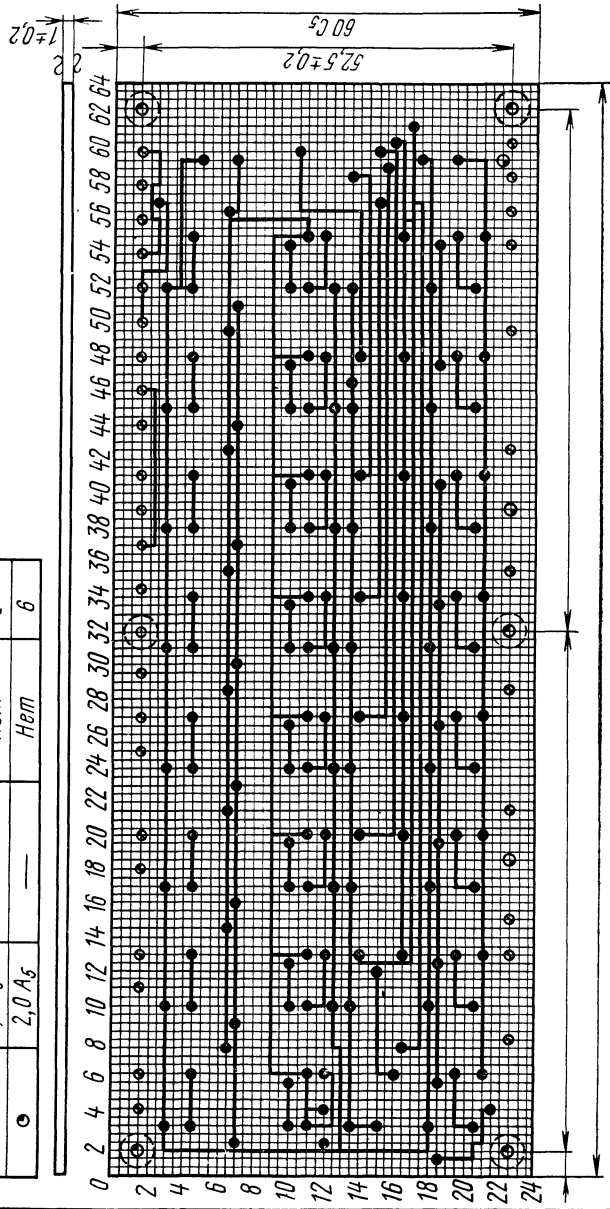
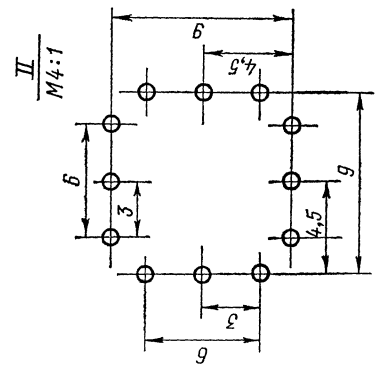
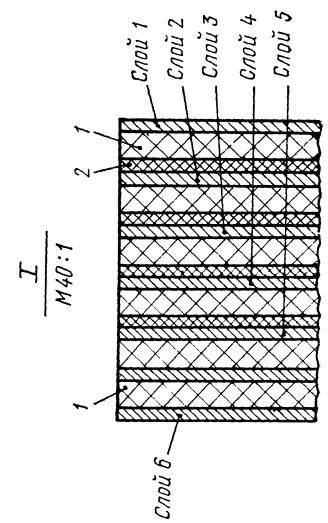
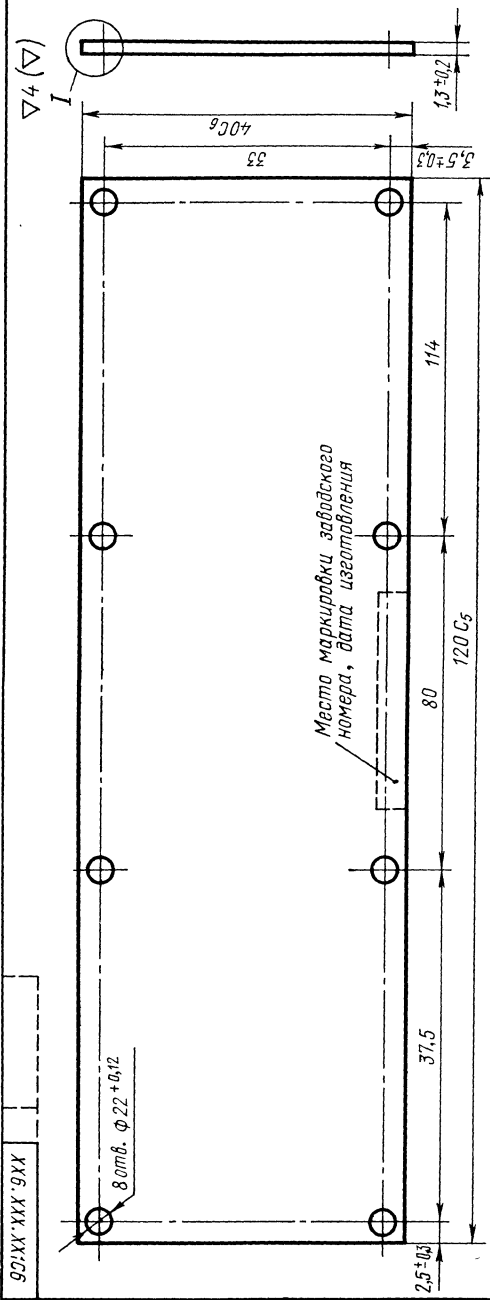


Рис. 1.11, б



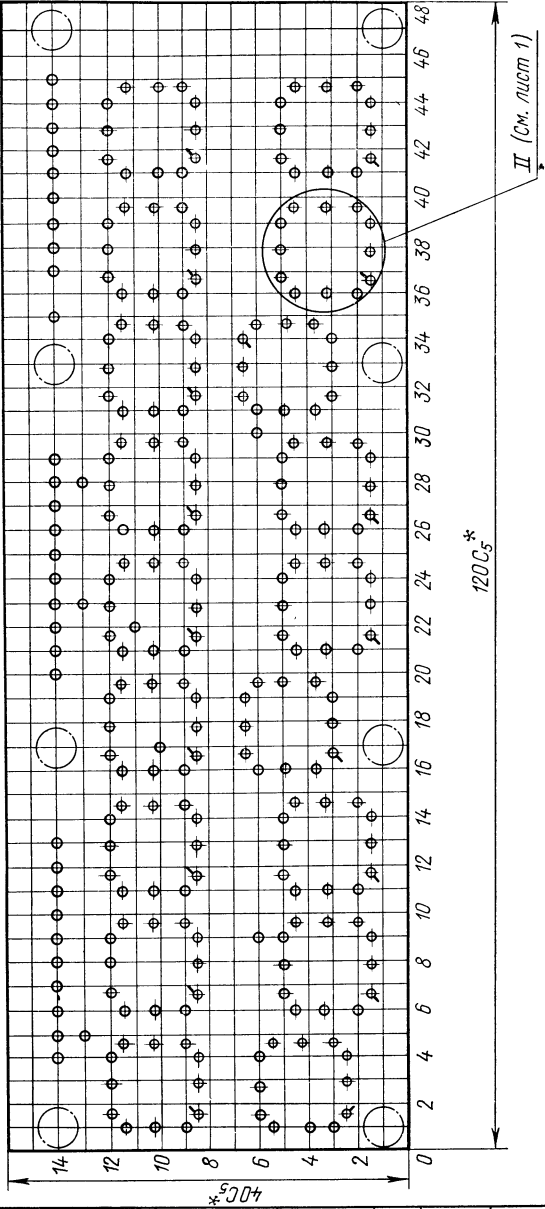
92:XX'XX'9XX





921XX XXX 9XX

Лаз. 1 (Печатный слой 1)



Пример оформления

XX6 XXX XX165		Лист 1 из 2	
Платформа		Многоосложная	
Сборочный чертеж		Лист 2 из 2	
Исполнитель		Проверен	
Исполнитель		Проверен	
Исполнитель		Проверен	



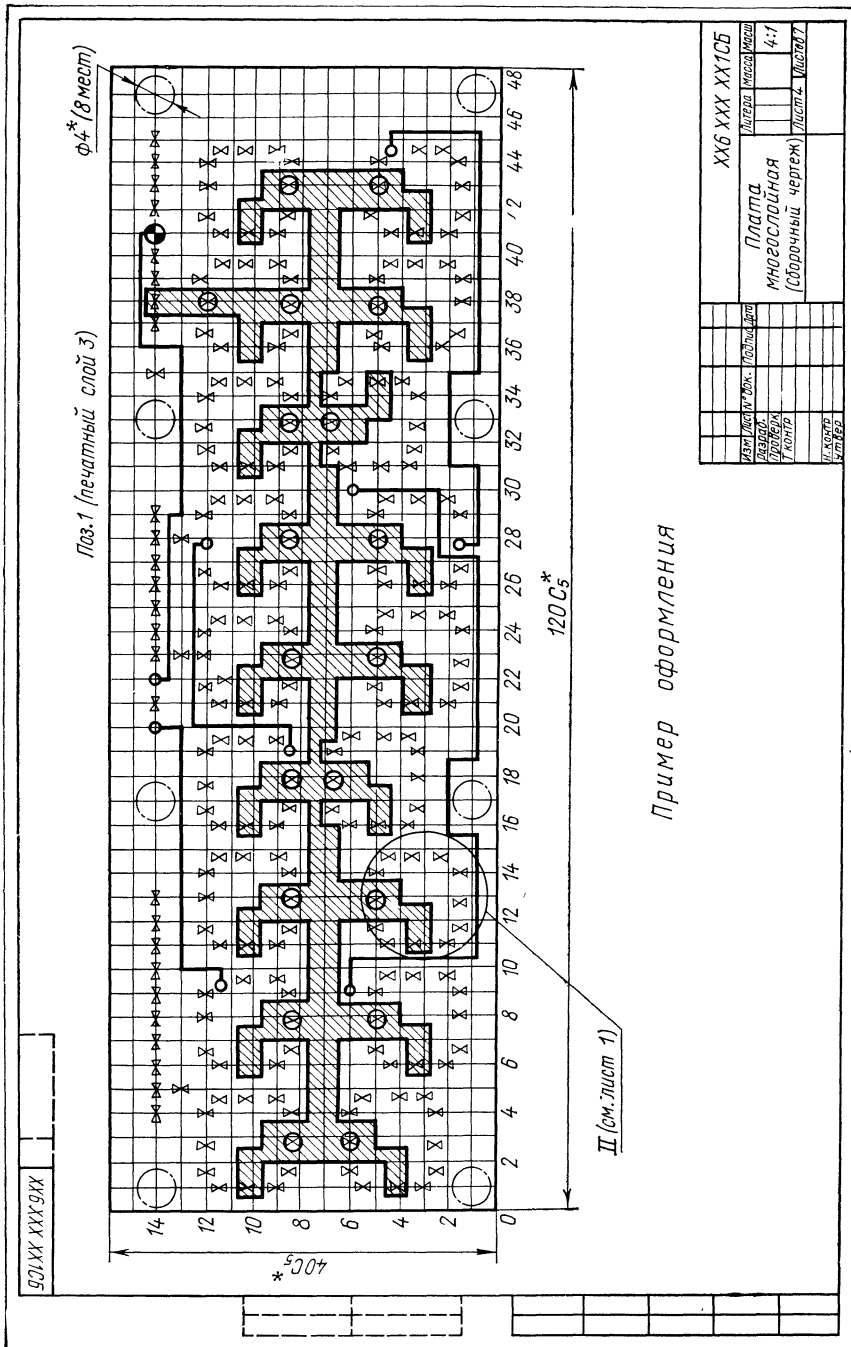
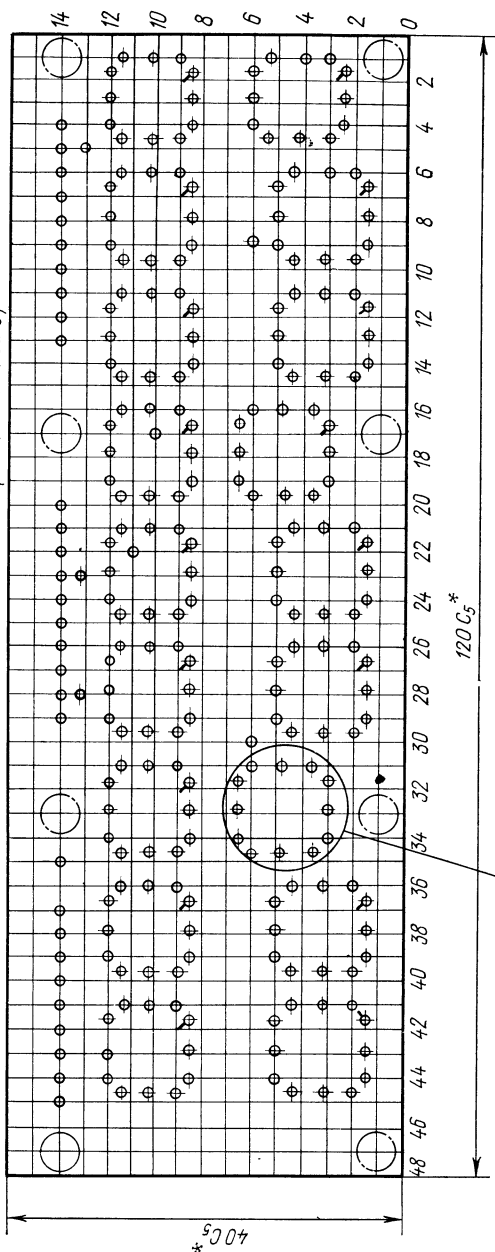


Рис. 1.11, е

Доз.1 (Печатный слой 6)


$$II(\text{см. лист 1})$$

### Пример аформления

[illegible]







Прокладка проводников сначала идет легко и быстро, но с приближением к завершению процесс прокладки замедляется. Как правило, прокладка оставшихся 20% соединений представляет наибольшие трудности и приводит к пересмотру ранее нанесенных соединений. При этом приходится менять схему соединений в отдельных слоях и даже переносить часть проводников с одного слоя платы на другой, чтобы освободить место для нового еще не продолженного проводника.

Весь процесс проектирования МПП данным методом весьма трудоемкий и вместе с тем требует, чтобы всю работу выполнял один человек. По опыту зарубежных фирм трудоемкость разводки восьмислойной МПП с 2000 отверстий, без применения ЭВМ, с учетом контроля соединений составляет 80—100 ч.

После разработки и контроля топологических эскизов МПП по слоям приступают к изготовлению оригиналов отдельных слоев МПП.

Изготовление оригиналов отдельных слоев МПП производится с помощью липкой ленты на прозрачной малоусадочной пленке. Для этого топологический эскиз конкретного слоя скрепляется с листом пленки, и по рисунку липкой ленты выкладываются печатные проводники и контактные площадки. После проверки ширины проводников и расстояний между ними полученный фотооригинал фотографируют на стеклянную фотопластинку в нужном масштабе. Таким образом получают фотонегатив для каждого слоя МПП.

Процесс изготовления фотооригиналов менее трудоемок и занимает от 35 до 50 ч; несколько часов требуется на фотосъемку, обработку и ретушь негативов слоев МПП.

В целом разработка восьмислойной МПП с 2000 отверстий описанным методом выполняется за 100—175 ч.

Геометрические размеры элементов печатного монтажа каждого слоя проектируемой МПП и допуски на эти размеры рекомендуются те же, что изложены в табл. 1.18.

### **Оформление чертежей печатных плат**

Конструкция печатных плат однозначно определяется чертежом, выполняемым в соответствии с ЕСКД. Чертеж нумеруется десятичным номером, имеет наименование «плата» и содержит основные проекции с печатными проводниками и отверстиями.

На чертежах платы наносится координатная сетка, размер шага которой оговаривается в технических требованиях чертежа.

Нанесение координатной сетки на чертеж производится в соответствии с масштабом, указанным в штампе чертежа.

Масштаб чертежа обычно выбирается 2 : 1 или 4 : 1. Как правило, чертеж платы с шагом координатной сетки 0,5 мм выполняется в масштабе 4 : 1. Примеры оформления чертежей приведены на рис. 1.11, а, б, в, г, д, е, ж, з, и.

Расчетные расстояния между центрами отверстий, расположенных в узлах координатной сетки с шагом  $m=2,5$  и  $m=0,5$ , приведены на рис. 1.12.

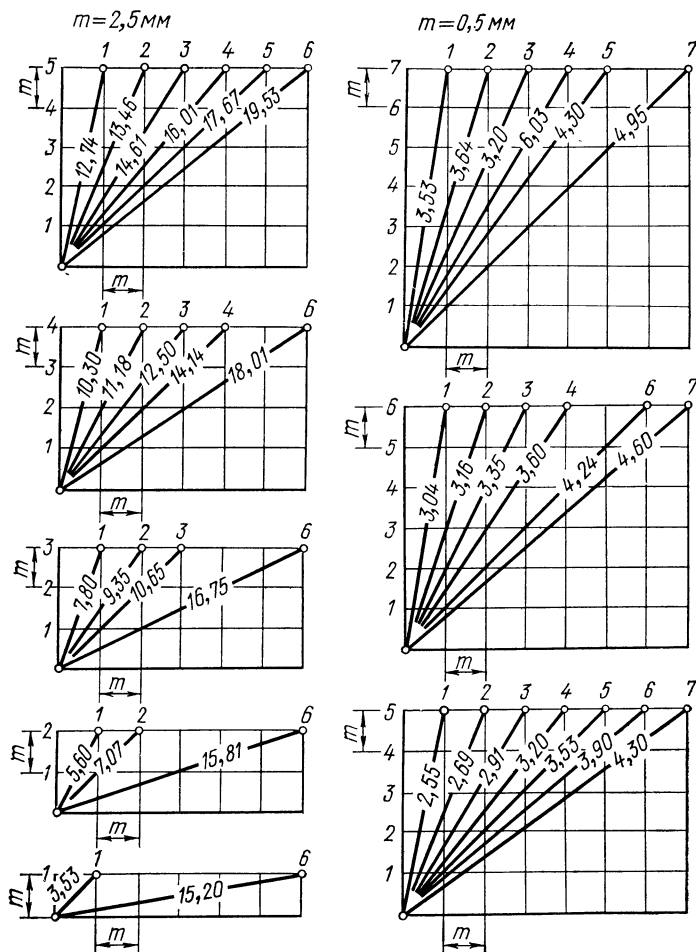


Рис. 1.12. Графики расстояния между центрами отверстий, расположенных в узлах координатной сетки с шагом равным  $m$

ГОСТ 10317—72 «Платы печатные. Основные размеры» предусматривает применение координатных сеток с шагом 2,5 и 1,25 мм.

Расчетная ширина печатного проводника, имеющего по длине переменное сечение, на чертеже указывается на каждом участке между двумя соседними монтажными отверстиями (рис. 1.13). Если при этом проводник с переменным сечением

переходит с одной стороны платы на другую, то размеры его указываются на каждом участке платы между двумя отверстиями на обеих сторонах.

Конфигурация проводников и контактных площадок в свободных местах выдерживается по координатной сетке с отклонениями от чертежа в пределах  $\pm 2$  мм;  $\pm 1,5$  мм;  $\pm 1,0$  мм;  $\pm 0,5$  мм в зависимости от сложности и насыщенности чертежа

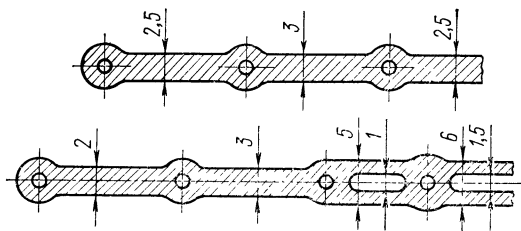


Рис. 1.13. Печатный проводник, имеющий по длине переменное сечение

платы. Места, которые нельзя занимать проводниками и контактными площадками, на чертеже показываются штрих-пунктирной линией. При необходимости эти места оговариваются размерами.

Для различия диаметров отверстий следует применять

условные обозначения, которые изображаются на обеих проекциях платы при двустороннем и на одной — при одностороннем расположении проводников. Пример обозначения отверстий приведен в табл. 1.19.

Таблица 1.19.

Условные обозначения отверстий	Диаметры отверстий, мм	Диаметры зенковок, мм	Наличие металлизации в отверстиях	Число отверстий
	$\varnothing 0,8$	$\varnothing 1,2^{+0,2} \times 70^\circ$ с двух сторон	Металлизировано	60
	$\varnothing 1,3$	$\varnothing 2,0^{+0,2} \times 70^\circ$ с двух сторон	Металлизировано	14
	$\varnothing 3,5$		Не металлизировано	4

Размеры диаметров отверстий, их число, размеры диаметров зенковок, условные обозначения диаметров отверстий и указание о металлизации в отверстиях обычно выносятся на поле чертежа.

При простановке координат отверстий за базы принимаются осевые линии, проходящие через центр первого отверстия, находящегося в левом нижнем углу основной проекции платы, или осевые линии, проходящие через центры отверстий, расположенных на плате в крайнем левом и в крайнем нижнем рядах.

Размеры на координаты отверстий должны проставляться от базовых линий слева направо и снизу вверх.

При маркировке плат руководствуются следующими правилами.

Указания номеров плат, отверстий или схемных обозначений выполняются согласно требованиям соответствующих нормалей на маркировку. Маркировка может располагаться на одной из двух сторон платы (номер платы или ее условное обозначение рекомендуется указывать со стороны установки радиоэлементов).

На платах, изготовленных химическим методом, цифрами, буквами или линиями могут маркироваться места расположения навесных элементов. В этом случае линии ставятся на оси, соединяющей центры двух отверстий, и не доходят до краев отверстий на 1—1,5 мм.

В межплатных конструкциях маркируются все отверстия печатной платы, в том числе и крепежные; в этом случае маркировка наносится с обеих сторон платы.

Маркировка выполняется краской, устойчивой к воздействию спиртобензиновой смеси и других растворителей.

Маркировка также может выполняться травлением рисунка или наращиванием металла по рисунку. В этом случае все знаки маркировки, как правило, объединяются.

При выполнении маркировки способом, которым выполняется печатный монтаж, в технических требованиях чертежа способ маркировки не указывается.

В технических требованиях чертежа печатной платы помимо особых, вносимых конструктором, указываются обязательные требования (см. рис. 1.11, *а, б, в, г, д, ж, з, и*).

## **§ 1. 6. Конструирование печатных плат с помощью систем автоматизированного проектирования (машинное проектирование)**

Ручной метод конструирования печатных плат, особенно многослойных, представляет весьма трудоемкий процесс, а в отдельных случаях просто неприемлем. Все более широко начали внедряться системы автоматизированного проектирования, которые состоят из ряда последовательно действующих алгоритмов.

Непосредственно к задачам конструирования печатных плат из всего набора алгоритмов конструкторского проектирования относятся алгоритмы трассировки соединений и размещения узлов. Хотя результаты компоновки в значительной степени влияют на конструкцию платы (впрочем, как и выбор функциональной и принципиальной электрической схем проектируемого уст-

ройства), при решении этой задачи существующими методами автоматизированного проектирования редко учитываются ограничения, накладываемые параметрами плат. Исходными данными для компоновки являются электрическая схема и выбранная система модулей. Поэтому не будем рассматривать компоновку элементов в узлы как этап конструирования печатных плат. Отметим только, что при решении задач компоновки должен быть выполнен ряд требований:

1. Число деталей в одном узле должно соответствовать габаритам конструкции узла; рассеиваемая на выбранном наборе деталей мощность не должна превышать допустимой для данной конструкции узла величины.

2. Число функциональных узлов, полученных в результате компоновки, должно быть минимальным.

3. Число связей между контактами различных узлов должно быть минимальным, а число связей между деталями внутри узла — максимальным.

4. Каждый узел должен быть связан с минимальным числом других узлов.

Может быть сформулирована задача компоновки узлов в блок, которая решается с теми же требованиями к результату. В дальнейших рассуждениях будем считать, что набор модулей, располагающихся на плате, задан.

При ручном проектировании печатной платы конструктор на чертеже заготовки стремится таким образом расположить шаблоны, эквивалентные узлам и трассам, чтобы с одной стороны полученная монтажная схема соответствовала электрической, а с другой стороны были выполнены все нормы на конструирование печатной платы (ширина проводников, расстояния между проводниками, размеры контактных площадок, расстояния между отверстиями на плате и т. п.). Это весьма трудоемкий процесс, выполняемый методом проб и ошибок. Как правило, требуется, чтобы всю работу по конструированию отдельной платы выполнял один человек. Даже опытные конструкторы проектируют плату средней сложности в течение нескольких недель, допуская при этом ошибки.

В отличие от человека цифровая вычислительная машина (ЦВМ) не может сразу отбросить негодные варианты конструкции, а проверяет либо все возможные, либо часть возможных ситуаций (в зависимости от выбранных методов). Однако, в силу того, что ЦВМ обладает гигантским по сравнению с человеком быстродействием при решении элементарных задач, представляется возможным предложить такие алгоритмы работы ЦВМ, которые анализируют большое число вариантов и выбирают наиболее приемлемый, или которые находят единственное, но требующее трудоемких вычислений решение.

Работа всех алгоритмов машинного конструирования осуществляется шагами или циклами.

При решении задачи размещения узлов на плате в течение

одного шага (цикла) в зависимости от принятого метода или производится улучшение полученного на предыдущем шаге размещения, или определяется место на плате для очередного модуля.

При машинном проектировании соединений за один цикл также в зависимости от метода решения задачи либо определяется очередной отрезок трассы, либо выявляется возможность проведения пути по различным направлениям.

При решении всех перечисленных задач автоматического конструирования печатная плата (или ее слой) заменяется моделью, описываемой дальше. Такое представление позволяет формально описывать все возможные ситуации трассировки проводников на платах, что является необходимым при машинных методах конструирования.

Каждый слой печатной платы заменяется дискретным ограниченным двумерным пространством. Форма дискретных элементов принципиально может быть различной и неодинаковой даже для одной платы. Требуется только, чтобы выбранный набор конфигураций элементов позволял полностью покрывать все пространство. Желательно также, чтобы геометрически элемент обладал одинаковыми свойствами во всех разрешенных для проведения трасс направлениях. Однако это правило на практике не всегда выполняется. В дальнейшем будем рассматривать наиболее широко применяемое в настоящее время разбиение пространства платы на равные квадраты. Такое разбиение весьма удобно для машинной обработки информации, так как позволяет соотнести каждому дискретному элементу координаты в ортогональной системе. Размеры элементов задаются принятой координатной сеткой и зависят от конструктивных размеров устанавливаемых на плате узлов и применяемых методов конструирования.

Дискретные элементы называются занятыми, если по ним проходят уже проложенные трассы, и запрещенными, если на них расположены отверстия или другие технологические и конструктивные элементы (надписи на печатной плате, контрольные контакты и т. д.).

Хотя контактная площадка под вывод навесного узла может занимать несколько дискретных элементов, в дальнейшем будем считать контактным полем один центральный элемент. Таким образом задача трассировки сводится к соединению внутри каждого множества некоторых непересекающихся множеств точек при условии выполнения определенных принятым методом трассировки ограничений.

Соседними элементами будем называть элементы, имеющие общие стороны. Следовательно, любой дискретный элемент, включая краевые, имеет четыре элемента.

Проведение трассы из данного элемента разрешается только в соседний. Таким образом, в принятой геометрии кратчайшее расстояние между двумя элементами с координатами  $x_1, y_1$  и

$x_2, y_2$  вычисляется по формуле:

$$d = (x_1 - x_2) + (y_1 - y_2).$$

Заметим, что координаты каждого элемента определяются координатной сеткой и являются целочисленными.

Введем понятие окрестности элемента.  $K$ -окрестностью называется множество элементов, в которые можно попасть за  $k$  шагов, если с каждым шагом удаляться от данного элемента. Таким образом, 1-окрестность включает 4 элемента, а  $K$ -окрестность —  $4K$  элемента.

Отметим, что возможны другие способы разбиения пространства платы на квадратные дискретные элементы. Например, когда для данного элемента соседними являются 6 или 8 элементов.

В первом случае возможно проведение трасс под углами к оси абсцисс  $0^\circ, 60^\circ$  и  $120^\circ$ , а число элементов  $K$ -окрестности  $6K$ . Во втором случае трассы могут проводиться под углами  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  и  $135^\circ$ ,  $K$ -окрестность включает  $8K$  элементов.

Другие способы разбиения пространства платы, например, на равносторонние треугольники или шестиугольники на практике не применяются, так как однозначное отнесение координат к каждому элементу затруднено, а положительные стороны таких разбиений — возможность прокладки трасс под различными углами — не окупает усложнения программ конструирования и увеличения машинного времени и требуемого объема памяти ЗУ.

Размещение узлов в значительной степени влияет на конструкцию печатной платы, так как определяет рисунок печатных проводников на плате. Неудачное размещение узлов приведет к большому числу пересечений трасс, в результате чего будет невозможно проложить все соединения без пересечений на ограниченном числе слоев реальной печатной платы.

Таким образом, задача размещения является предшествующей задаче проектирования соединительных проводников и преследует цель создания такой ситуации на плате, при которой будет гарантировано проведение всех требуемых трасс.

В соответствии с этой основной целью при размещении узлов (модулей) приняты следующие основные критерии качества:

1. Суммарная длина всех проводников на плате должна быть минимальной. Физический смысл этого критерия заключается в том, что кратчайшие проводники занимают меньшее количество дискретных элементов пространства платы. Таким образом обеспечивается большее число вариантов проведения трасс на свободных элементах.

Однако на практике этот критерий не всегда позволяет создать близкую к оптимальной конструкцию платы, ибо он только косвенно учитывает связанность модулей между собой.

В результате возможно такое решение, при котором связанные узлы могут быть разнесены на большие расстояния, а про-

странство между ними может быть занято соединениями между другими модулями. Тем не менее данный критерий находит широкое применение в существующих алгоритмах размещения, так как все-таки дает некоторые гарантии удачного решения задачи размещения.

2. Соседние модули должны иметь максимальное число связей. Смысл этого критерия очевиден. С одной стороны создается ситуация, при которой нет или мало препятствий (занятых или запрещенных элементов) между наиболее связанными модулями, а с другой стороны обеспечивается проведение кратчайшим путем большого числа связей.

Данный критерий в настоящее время широко применяется. Его существенное преимущество заключается в том, что алгоритмы, основанные на реализации этого критерия, просты и требуют малого времени для решения задачи размещения.

3. Длина самой протяженной связи должна быть минимальна. Алгоритмы, построенные на базе этого критерия, стремятся так разместить узлы на плате, чтобы длина всех проводников стремилась к среднему значению. Основанием для рассматриваемого критерия служит то обстоятельство, что длинные трассы пересекают большее число путей прокладки проводников, мешая таким образом успешному решению задачи трассировки.

Данный критерий обычно используется в комбинации с другими основными критериями размещения.

4. Число пересечений связей минимально. Очевидно, что этот критерий качества определяет самую суть задачи размещения.

Однако для своей реализации он требует совместного решения задач размещения узлов и трассировки.

Эта проблема ставит непреодолимые трудности в необходимом машинном времени и объеме памяти запоминающих устройств (ЗУ) и современными алгоритмами не решается.

Однако в некоторых алгоритмах требования данного критерия качества учитываются.

В настоящее время разработано большое число алгоритмов для решения задачи размещения, в основу которых положены те или иные критерии. В зависимости от основных методов эти алгоритмы можно разделить на следующие основные группы:

1. Метод последовательной оптимизации, при котором начальная произвольная расстановка модулей на плате целенаправленно и последовательно улучшается в соответствии с принятым критерием качества.

2. Метод перестановки модулей, реализуемый перебором различных размещений до получения первого приемлемого решения. Если, например, в качестве критерия принята минимальная суммарная длина всех трасс  $L$ , то задача может решаться в следующей последовательности: вычисляется величина  $L_0$  для начального размещения; затем переставляются два модуля и снова вычисляется  $L_1$ ; если  $L_1 < L_0$ , то эта ситуация фиксируется в памяти ЦВМ. Подобный процесс выполняется заранее за-



данное число раз, после чего решением считается такое размещение, при котором суммарная длина связей минимальна.

3. Метод последовательного размещения узлов на плате, который применяется, как правило, при реализации второго критерия качества. В этом случае первым размещается модуль, наиболее связанный с разъемом платы, затем модуль, наиболее связанный с первым модулем и разъемом. Этот процесс повторяется, пока не будут размещены все модули на плате.

Рассмотрим некоторые алгоритмы размещения функциональных узлов, применяемых в современных системах автоматизированного конструирования печатных плат. Действующие алгоритмы требуют для своей реализации в среднем 10—30 мин машинного времени для ЦВМ средней мощности (типа М-220, Урал-14 и т. д.).

Для упрощения алгоритмов размещения будем в дальнейшем условно рассматривать модуль как точку на плате, приписав ей координаты дискретного элемента, соответствующего геометрическому центру реального модуля. Таким образом, расстояние между двумя размещенными на плате узлами определяется в выбранной геометрии платы по формуле

$$r_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|.$$

Разъем на плате также рассматривается как множество точек, которым соотнесены координаты дискретных элементов, расположенных на соответствующем краю пространства платы. Введем следующие обозначения, используемые в данном параграфе:

$L_n$  — суммарная длина всех связей между модулями после  $i$ -го решения задачи размещения;  $L_0$  — суммарная длина всех связей между модулями при начальном размещении;  $\Delta L_n$  — приращение суммарной длины всех связей на плате в результате выполнения  $n$ -го цикла решения задачи размещения;  $r_{ij}$  — расстояние между модулями с номерами  $i$  и  $j$ ;  $K_{ij}$  — число связей между модулями с номерами  $i$  и  $j$ ;  $E = \{E_i\}$  — множество модулей на плате;  $E^{(n)}$  — множество неразмещенных модулей после  $n$ -го цикла решения задачи;  $E_i^{(n)}$  — модуль, размещенный на  $n$ -ом шаге решения задачи;  $N$  — общее количество модулей на плате;  $D = \{D_i\}$  — множество точек на плате, в которых размещаются модули;  $D^{(n)}$  — множество свободных точек на плате после  $n$  шагов решения задачи размещения;  $D_i^{(n)}$  — точка на плате, занятая модулем на  $n$ -ом цикле размещения;  $L^{(i)}$  — суммарная длина связей модуля  $E_i$  (точки  $D_i$ ) с остальными модулями (точками на плате, в которых размещаются модули);  $S^{(i)}$  — связность модуля  $E_i$ .

Значение этой величины будет раскрыто при описании конкретных алгоритмов.

**Алгоритм последовательной  
оптимизации размещения узлов  
на плате с помощью групповой  
перестановки**

В основу алгоритма положен метод направленной оптимизации размещения модулей на плате при выполнении требований критерия минимизации суммарной длины всех связей между модулями.

Работа алгоритма происходит циклически. В течение одного цикла вычисляются величины приращений суммарной длины связей на плате для всех возможных попарных перестановок модулей, число которых равно  $\frac{N(N-1)}{2}$ . Затем из всего множества перестановок, дающих отрицательные приращения, выделяется некоторое подмножество, которое должно удовлетворять условиям:

- а) выбранное подмножество перестановок позволяет максимально уменьшить суммарную длину всех связей;
- б) любой модуль может менять свое место только один раз;
- в) в подмножество входят такие попарные перестановки, при которых модули, меняющиеся местами, не связаны ни с одним модулем из других пар.

Очевидно, что несоблюдение хотя бы одного из двух последних условий может ухудшить результат размещения по сравнению с первоначальным, так как при этом может произойти увеличение длины связей между модулями из разных пар.

Рассмотрим математическое обоснование описываемого алгоритма.

Если  $r_{it}$  есть расстояние между двумя модулями, а  $K_{it}$  — число связей между ними, то суммарная длина всех связей между узлами  $E_i$  и  $E_t$

$$R_{it} = r_{it} K_{it} \quad (1.1)$$

Распространяя это выражение на все множество модулей, получаем следующее выражение для определения суммарной длины связей модуля  $E_i$  со всеми остальными:

$$L^{(i)} = \sum_{t=1}^N r_{it} K_{it} \quad (1.2)$$

Отсюда легко вычислить суммарную длину всех связей:

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N L^{(i)} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^N K_{it} r_{it} \quad (1.3)$$

Если выделить из всего множества модулей на плате модули  $E_i$  и  $E_j$ , то суммарная длина связей этих модулей со всеми остальными определится, как

$$L^{(i,j)} = L^{(i)} + L^{(j)} - r_{ij}K_{ij} = \sum_{t=1}^N (r_{it}K_{it} + r_{jt}K_{jt}) - 2r_{ij}K_{ij}. \quad (1.4)$$

При попарной перестановке модулей  $E_i$  и  $E_j$  суммарная длина связей их со всеми остальными модулями станет равна

$$L^{(j,i)} = \sum_{t=1}^N (r_{it}K_{jt} + r_{jt}K_{it}). \quad (1.5)$$

Таким образом, можно вычислить изменение суммарной длины связей модулей  $E_i$  и  $E_j$  со всеми остальными, полученное при их перестановке:

$$\Delta L^{(i,j)} = L^{(ij)} - L^{(j,i)} = 2r_{ij}K_{ij} - \sum_{t=1}^N (r_{it} - r_{jt})(K_{it} - K_{jt}). \quad (1.6)$$

По формуле (1.6) вычисляется матрица приращений для всех попарных перестановок, на основании анализа которой и производятся перемещения модулей на плате.

Рассмотрим структурную схему алгоритма (рис. 1.14).

1. Вычисление матрицы расстояний между точками на плате, в которых размещаются модули

$$R = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1N} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & \dots & r_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{N1} & r_{N2} & r_{N3} & \dots & r_{NN} \end{vmatrix}. \quad (1.7)$$

Эта матрица вычисляется один раз и действительна для всех циклов алгоритма.

Очевидно, что  $r_{11} = r_{22} = \dots = r_{NN} = 0$ .

2. Составление матрицы связей между модулями. Элемент матрицы  $K_{ij}$  численно равен количеству проводников, соединяющих контакты модулей  $E_i$  и  $E_j$ .

$$K = \begin{vmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \dots & K_{1N} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \dots & K_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ K_{N1} & K_{N2} & K_{N3} & \dots & K_{NN} \end{vmatrix}. \quad (1.8)$$

Матрица связей составляется для каждого цикла алгоритма. В первом цикле используются данные матрицы связей начального размещения модулей  $K_0$ , во втором цикле работы алгоритма в матрицу  $K_1$  занесены результаты перестановок, вычисленных в первом цикле и т. д.

3. Вычисление элементов матрицы приращений суммарной длины всех связей производится по формуле (1.6) для всех возможных попарных перестановок.

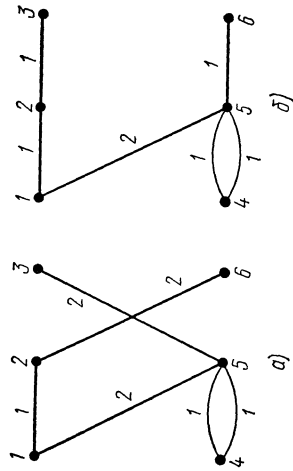
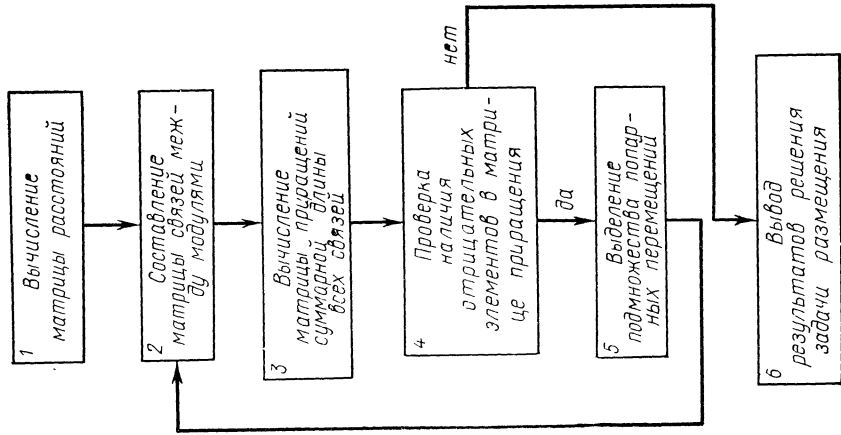


Рис. 1.15. Первоначальное размещение модулей и расстановки между точками на плате, представленное в виде графа (а); полученное после первого цикла алгоритма в виде графа (б)

Рис. 1.14. Структурная схема алгоритма последовательной оптимизации размещения узлов на плате с помощью групповой перестановки

4. Блок 4 алгоритма проверяет наличие отрицательных элементов в матрице приращений, что означает возможность оптимизации имеющегося на плате размещения модулей. В случае, если отрицательных элементов нет, т. е. любая перестановка модулей приводит к увеличению суммарной длины всех связей, то результат размещения, полученный в предыдущем цикле алгоритма, является окончательным.

5. Если условие 4 выполняется, то проводится анализ всего множества отрицательных элементов матрицы приращений и выделение подмножества элементов, соответствующих попарным перемещениям, которые удовлетворяют рассмотренным ранее требованиям.

Попарные перемещения производятся по индексам выделенных элементов матрицы приращений и учитываются при составлении в следующем цикле алгоритма матрицы связей между модулями.

Проиллюстрируем работу алгоритма следующим простым примером решения задачи размещения шести модулей.

Пусть начальное размещение модулей и геометрические расстояния между точками, в которых они размещаются, характеризуются матрицами  $R$  и  $K_0$ .

$$R = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 2 & 1 & 2 & 3 \\ 1 & 0 & 1 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 0 & 3 & 2 & 1 \\ 1 & 2 & 3 & 0 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 2 & 1 & 0 & 1 \\ 3 & 2 & 1 & 2 & 1 & 0 \end{vmatrix}, \quad K_0 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix}.$$

Такое размещение можно представить в виде графа (рис. 1.15, а), вершины которого соответствуют модулям, а ребра — связям между ними  $L_0=9$ .

По формуле (1.7) вычисляется матрица приращений суммарной длины всех связей при попарных перестановках модулей:

$$\Delta L_0 = \begin{vmatrix} -1 & 0 & 2 & 0 & -1 \\ & -1 & 0 & 0 & 2 \\ & & 1 & 4 & -2 \\ & & & 0 & 0 \\ & & & & 1 \end{vmatrix}.$$

Отрицательными являются элементы  $\Delta L^{(1,2)}=-1$ ,  $\Delta L^{(1,6)}=-1$ ,  $\Delta L^{(2,3)}=-1$ ,  $\Delta L^{(3,6)}=-2$ . Видно, что оптимальное подмножество элементов состоит всего из одного  $\Delta L^{(3,6)}$ , определяющего перестановку модулей  $E_3$  и  $E_6$ , причем суммарная длина связей сокращается на 2. Таким образом  $L_1=7$ . Размещение, полученное после первого цикла алгоритма, показано на рис. 1.15, б.

Во втором цикле составляется новая матрица связей, соответствующая полученному размещению, и вычисляется новая матрица приращений

$$K_1 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}, \Delta L_1 = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 2 & 2 & 1 \\ & 1 & 1 & 4 & 2 \\ & & 3 & 4 & 2 \\ & & & 0 & 0 \\ & & & & 3 \end{vmatrix}.$$

Так как  $\Delta L_1$  не содержит отрицательных элементов, то размещение на рис. 1.15, б является окончательным и улучшить его нельзя.

Рассмотренный алгоритм не требует анализа такого большого числа ситуаций, как при переборе вариантов размещения. Задача решается в течение небольшого количества циклов. Однако алгоритм имеет весьма серьезные недостатки. Его применение вызывает необходимость в большом объеме памяти ЗУ и выполнение каждого цикла требует большого машинного времени. Так только для хранения оперативной информации, заложенной в матрицах, необходимо использовать  $\frac{N}{2}(5N-1)$  ячеек.

памяти, что для среднего размера плат с семьюдесятью модулями составляет 12 215 ячеек. Для вычисления матрицы приращений необходимо в каждом цикле выполнить  $\frac{N(N^2-1)}{2}$  операций

умножения и  $\frac{N(N-1)(2N+1)}{2}$  операций сложения, что для плат с 70 модулями примерно равно 17 000 умножений и около 350 000 сложений.

#### **Алгоритм последовательного размещения узлов на печатной плате**

В основу алгоритма положена оценка связности неразмещенного модуля с множеством других неразмещенных модулей и с множеством уже размещенных модулей. Под связностью будем понимать количество связей. Каждый выделенный модуль может быть размещен на любой из свободных точек на плате. Находится наиболее приемлемая позиция модуля, т. е. такая, где в наибольшей степени выполняется критерий минимальности суммарной длины связей на плате. Следует однако отметить, что этот критерий качества выполняется не для всех связей, а для связей между уже размещенными модулями.

В силу того, что выделение очередного модуля из множества неразмещенных производится по принципу связности, данный

алгоритм также отвечает требованиям максимальности связей между расположенными модулями.

Рассматриваемый алгоритм решает задачу размещения за  $N$  шагов, причем на каждом шаге выделяются один из неразмещенных модулей и соответствующее ему место на плате.

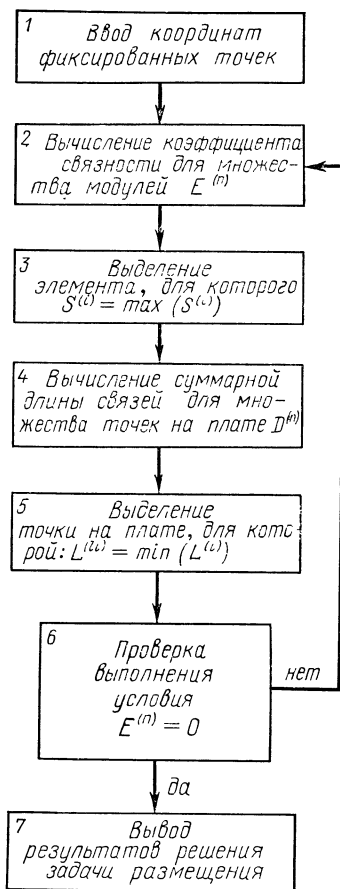


Рис. 1.16. Структурная схема алгоритма последовательного размещения узлов на печатной плате

Структурная схема алгоритма представлена на рис. 1.16.

1. Ввод координат фиксированных точек на плате. Перед началом решения задачи размещения модулей на плате фиксированными точками являются контакты разъема, которые при принятой модели платы размещены в заранее определенных местах и связаны с модулями.

Таким образом, по мере решения задачи размещения сначала заполняется зона, прилегающая к разъему, а затем все более удаленные от него области пространства платы.

2. Коэффициент связности для множества неразмещенных модулей  $E^{(n)}$  вычисляется по следующей формуле:

$$S^{(i)} = \sum_{j=1}^{n-1} K_{ij} - \sum_{j=n+1}^N K_{ij}. \quad (1.9)$$

Таким образом, коэффициент связности модуля  $E_i^n$  показывает, насколько больше сумма связей его с размещенными модулями суммы его связей с неразмещенными.

3. С помощью блока 3 выделяется наиболее связанный с фиксированными (размещенными) модулями свободный модуль.

4. Вычисление суммарной длины связей для множества точек на плате производится из предположения, что в эти точки помещен выделенный блоком 3 модуль.

Очевидно, что при выполнении этой операции нет необходимости высчитывать  $L^{(i)}$  для всего множества незанятых точек, а достаточно рассмотреть только соседние с уже занятыми:

$$L^{(i)} = \sum_{j=1}^{n-1} r_{ij} K_{ij}. \quad (1.10)$$

5. Из множества незанятых точек на плате для размещения определенного блоком 3 модуля выделяется такая, для которой величина  $L^{(i)}$  минимальна.

Если еще не все модули размещены, то начинается следующий шаг алгоритма по выделению и размещению модуля  $E_i^{(n+1)}$ .

Рассмотренные алгоритмы являются в настоящее время основными алгоритмами размещения узлов на плате.

Их различные модификации входят в состав большинства действующих систем автоматизированного проектирования радиоэлектронной аппаратуры.

#### **Методы и алгоритмы автоматического проектирования соединений на плате**

Наиболее сложным и трудоемким этапом при машинном конструировании печатной платы является трассировка, основная задача которой состоит в проектировании электрических соединений между контактными элементами, к которым припаиваются выводы модулей и контакты разъемов.

Исходными данными для трассировки служат принципиальная электрическая схема и результаты, полученные в процессе размещения модулей на плате. Таким образом, на пространстве платы имеется ряд некоторым образом расположенных непересекающихся множеств элементов. Требуется соединить элементы внутри каждого множества, выполнив при этом следующие заданные условия:

1. Соединения должны соответствовать принципиальной схеме.

2. Соединения должны быть кратчайшими. Это условие налагается требованиями минимизации взаимных наводок и времен задержки, миниатюризации аппаратуры и экономическими предпосылками.

Кроме того, очевидно, что проводники меньшей длины занимают меньшее число элементов платы, следовательно, оставляют больше возможностей для проведения других соединений.

3. Число пересечений трасс на плате должно быть минимальным. В силу того, что на одном слое печатной платы проводники не должны пересекаться, это условие определяет минимизацию числа слоев платы (что понижает стоимость ее изготовления) и числа переходов со слоя на слой, являющихся наиболее трудоемкими в изготовлении и ненадежными конструктивными элементами многослойной печатной платы.

4. Распределение соединений на плате должно приближаться к равномерному. Выполняя это условие, проводят большое число трасс без пересечений, избегая увеличения плотности трасс в отдельных зонах платы.

Ни один из существующих алгоритмов трассировки не удовлетворяет полностью всем перечисленным условиям.



Причиной этого является то, что единую задачу конструирования печатной платы искусственно делят на два последовательных этапа: размещение узлов и трассировка соединений, причем оба этапа выполняются по несогласованным и даже противоречивым критериям качества. (Например, критерий минимальности суммарной длины всех проводников при размещении и критерий минимальности пересечений цепей при трассировке.) В результате полученная конструкция платы не является оптимальной. Существующие алгоритмы трассировки и размещения не позволяют, как правило, проложить все трассы на плате ограниченных размеров с ограниченным числом слоев. При этом в связи с ростом числа модулей на плате и повышением требований к компактности процент непроложенных трасс все увеличивается.

Поэтому в качестве основного критерия выдвигается минимальность числа непроведенных соединений. Введение этого критерия требует качественно нового подхода ко всем проблемам машинного конструирования платы. Следует рассматривать единую задачу создания конструкции платы, решение которой при принятых общих критериях имеет оптимум (или область оптимума).

Рассмотрим основные применяемые алгоритмы трассировки соединений.

1. *Волновой алгоритм* и его модификации (иногда его называют по имени автора С. И. Ли). Этот алгоритм в процессе нахождения трассы моделирует волны, распространяющиеся от источника с прямолинейной геометрией. Волновой алгоритм является наиболее универсальным из существующих и позволяет построить любую сложную трассу между двумя элементами, на плате, если она вообще может быть построена. Различные модификации волнового алгоритма соответствуют различным ограничениям, накладываемым на условие задачи трассировки.

Существенным недостатком волнового алгоритма является необходимость в большом объеме памяти запоминающего устройства и большом машинном времени.

В реальных печатных платах с помощью волнового алгоритма удается проложить до 90—95% всех трасс за несколько часов работы на ЦВМ средней мощности.

2. *Лучевой алгоритм*, названный так потому, что он моделирует на пространстве распространение луча. Модификации лучевого алгоритма определяются количеством моделируемых лучей и дополнительными блоками программ, позволяющими расширить область применения алгоритма.

Лучевой алгоритм менее универсален, чем волновой, и позволяет прокладывать около 80% трасс, но более экономичен (время трассировки одной платы на ЦВМ средней мощности 10—15 мин).

3. *Маршрутные алгоритмы*, названные так потому, что они строят трассу по кратчайшим маршрутам, а в случае встречи с

препятствием тем или иным способом обходят его. Маршрутные алгоритмы отличаются по математическим методам, положенным в их основу.

Так же как и лучевые, маршрутные алгоритмы позволяют находить около 80% трасс на печатной плате за 5—15 мин на ЦВМ средней мощности.

**Волновой алгоритм нахождения кратчайшего пути без пересечений множества занятых и запрещенных элементов.** Алгоритм может найти применение при конструировании однослойной печатной платы и отдельных слоев многослойной печатной платы в том числе, когда недопустим переход проводника со слоя на слой.

В основу алгоритма положены следующие критерии качества трассировки:

- а) соединения между элементами внутри каждого связного множества должны быть наименьшей длины;
- б) пересечения трасс между собой и трасс с запрещенными элементами не допускаются.

Решение задачи трассировки при применении волнового алгоритма выполняется в 2 этапа:

1. Моделирование распространения волны на пространстве платы и определение возможности прокладки трассы.

На этом этапе на каждом шаге моделирования создается фронт волны. Во множество элементов 1-фронта будут входить все соседние с исходным элементом  $A$  элементы. В общем случае часть элементов 1-фронта будет свободна, а остальные — заняты или запрещены. В состав элементов 2-фронта входят все элементы пространства, которые являются соседними для свободных элементов 1-фронта и не являются исходным элементом, в состав элементов 3-фронта входят все элементы пространства, которые являются соседними для свободных элементов 2-фронта и не входят в состав 1-фронта. В состав элементов  $K$ -фронта входят все элементы пространства, которые являются соседними для свободных элементов  $(K-1)$ -фронта и не входят в множество элементов фронтов с номерами  $K-2$ .

Введем следующие обозначения:

- $\{P_K\}$  — множество элементов  $K$ -окрестности элемента  $A$ ,
- $\{\Phi_K\}$  — множество элементов  $K$ -фронта волны,
- $\{F_K\}$  — подмножество свободных элементов  $K$ -фронта волны,
- $\{C_K\}$  — подмножество занятых элементов  $K$ -фронта,
- $\{Z_K\}$  — подмножество запрещенных элементов  $K$ -фронта.

Очевидны следующие соотношения:

$$\{\Phi_1\} = \{P_1\}; \quad \{\Phi_K\} = \{F_K\} + \{C_K\} + \{Z_K\}. \quad (1.11)$$

Для пространства, не имеющего занятых и запрещенных элементов, справедливо следующее:

$$\{P_K\} = \{\Phi_K\} = \{F_K\}.$$

На каждом шаге формирования фронта волны проводится проверка двух условий: 1.  $B \in \{F_K\}$ ; 2.  $\{F_K\} = 0$ .

Выполнение первого условия означает, что элемент  $B$  входит в состав  $K$ -фронта волны, распространяемой от  $A$ , т. е. проведение трассы  $AB$  возможно.

При анализе второго условия проверяется существование возможности распространения волны. Если все элементы фрон-

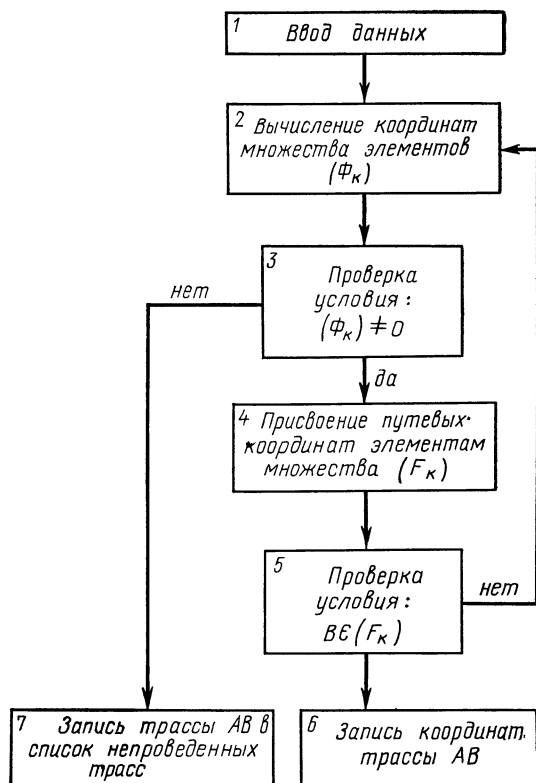


Рис. 1.17. Структурная схема волнового алгоритма нахождения кратчайшего пути без пересечений множества занятых и запрещенных элементов

та волны являются занятыми или запрещенными, а элемент  $B$  в состав  $K$ -фронта не вошел, то проведение трассы  $AB$  без пересечения невозможно.

2. Определение искомого соединения по путевым координатам, вычисленным в процессе распространения волны.

Рассмотрим структурную схему алгоритма (рис. 1.17).

1. *Ввод данных.* В оперативное запоминающее устройство вводятся координаты исходного и конечного элементов трассы

$$|x_a, y_a|, |x_b, y_b|.$$

2. *Вычисление координат множества элементов  $\{\Phi_K\}$ .* Для множества  $\{\Phi_1\}$  это будут элементы с координатами  $(x_{a+1}, y_a)$ ,  $(x_{a-1}, y_a)$ ,  $(x_a, y_{a+1})$ ,  $(x_a, y_{a-1})$ . Для множеств  $\{\Phi_K\}$  элементы определяются согласно рассмотренному ранее правилу. Отметим, что для принятой геометрии пространства координаты двух соседних элементов отличаются на  $\pm 1$  по одной из координат.

3. *Проверка условия  $\{F_K\} \neq 0$ .* В процессе этой проверки выясняется, входит ли в множество элементов  $K$ -фронта хотя бы один свободный элемент. Если все элементы заняты или запрещены, то распространение волны прекращается и трасса  $AB$  заносится в список непроведенных.

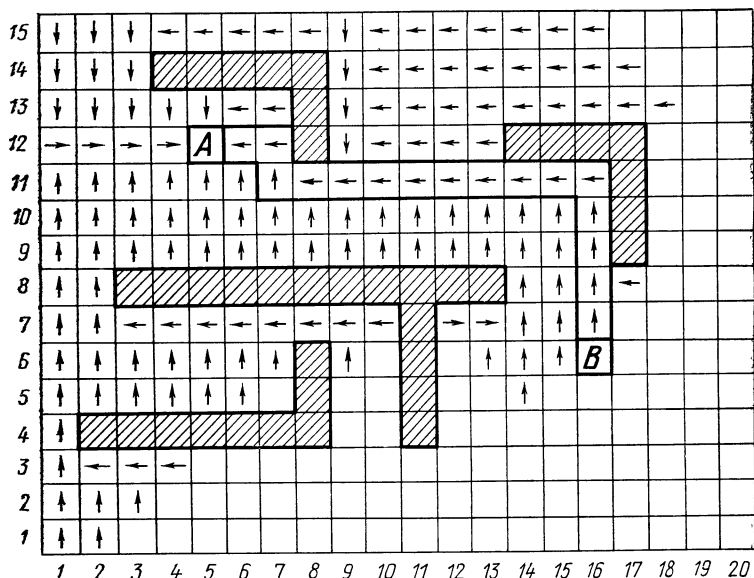


Рис. 1.18. Пример выполнения трассировки печатного монтажа с помощью волнового алгоритма

4. *Присвоение путевых координат элементам  $\{F_K\}$ .* Эта процедура необходима для определения наикратчайшего пути от элемента  $K$ -фронта к исходному элементу  $A$ .

Путевой координатой элемента  $K$ -фронта называется номер одного из соседних ему элементов  $(K-1)$ -фронта, выбранный по одному из приоритетных порядков.

На рис. 1.18 приведен пример выполнения трассировки с помощью описываемого алгоритма. Заштрихованными областями показаны занятые (запрещенные) элементы. Полученное соединение  $AB$  обозначено очерченной контуром областью. В примере в качестве приоритетного принят порядок: верхний, левый, нижний, правый элемент  $(K-1)$ -фронта. Это означает, что для некоторого элемента  $K$ -фронта путевой координатой является номер соседнего элемента  $(K-1)$ -фронта, имеющего ту же абсциссу, а

ординату на 1 больше. Если такой элемент в составе  $(K-1)$ -фронта отсутствует, то присваивается номер элемента, имеющего ту же ординату, а абсциссу на 1 меньше. При отсутствии и такого элемента, путевая координата определяется по номеру элемента  $(K-1)$ -фронта с той же абсциссой, а ординатой на 1 меньше и т. д.

На рис. 1.18 путевые координаты каждого элемента, попавшего во фронты распространения волны, обозначены стрелками, показывающими на тот элемент, номер которого служит путевой координатой.

5. *Проверка условия:*  $B \in \{F_k\}$ . Определяется: достиг ли фронт распространения волны элемента  $B$ . Если нет, то создается  $(K+1)$ -фронт; если условие выполняется, то этап моделирования волны оканчивается, трасса  $AB$  может быть построена. На рис. 1.18 фронт достиг элемента  $B$  на 17 шаге распространения волны.

6. *Запись координат трассы  $AB$ .* Выполняется, начиная с конечного элемента  $B$ .

По путевой координате элемента  $B$  находят координаты соответствующего элемента предыдущего фронта; затем по путевой координате этого элемента находят координаты последующего элемента и т. д.

Полученный путь является кратчайшим в выбранной геометрии. На рис. 1.18 длина трассы  $AB$ .

$$d_{AB} = |x_a - x_b| + |y_a - y_b| = 17.$$

Если бы между элементами  $A$  и  $B$  находилось препятствие (некоторое множество занятых или запрещенных элементов), то алгоритм провел бы трассу по пути кратчайшего обхода. Рассмотренный алгоритм является наиболее простым в реализации модификацией волнового алгоритма, но обладает рядом недостатков:

1. Мало пригоден для трассировки многослойных печатных плат, так как стремление обойти любое препятствие заставляет чрезмерно удлинять соединения. В результате в каждом слое удается проложить небольшое число трасс.

2. Длинные проводники, обходящие ранее проложенные соединения и идущие параллельно им, являются причиной больших взаимных индуктивностей и емкостей между проводниками, т. е. схема получается непомехоустойчивой.

3. Рассмотрен был алгоритм с постоянным приоритетным порядком присваивания путевых координат. Такой порядок приводит к тому, что все трассы будут стремиться к краям платы. Например, в рассмотренном примере проводники будут проходить в верхней левой части пространства, создавая там повышенную плотность трасс. В результате затрудняется задача построения соединений без пересечения, а отдельные элементы вообще блокируются. Возможны различные способы борьбы с этим явлением:

а) создание случайного приоритета, т. е. из нескольких приоритетных порядков для каждой трассы случайным образом выбирается один. Недостаток этого способа — усложнение алгоритма;

б) выбор для трасс, у которых полусумма ординат конечных элементов больше половины высоты платы, приоритетного порядка, который заставляет трассы прижиматься к верхней границе платы, а для трасс, у которых полусумма ординат конечных точек меньше половины высоты платы, порядка, который заставляет пути прижиматься к нижней границе платы. Такой способ не дает чрезмерного уплотнения трасс у одной из границ платы, и кроме того, разряжает плотность проводников в центре платы, т. е. в зоне, где проходит наибольшее количество трасс;

в) применение модификации волнового алгоритма для проведения пути, минимально приближающегося к другим проводникам. Этот алгоритм будет рассмотрен.

**Волновой алгоритм прокладки пути с минимальным числом пересечений.** Этот алгоритм может найти применение при машинном конструировании многослойных печатных плат. Его преимущество перед рассмотренным алгоритмом заключается в расширении возможностей соединения блокированных элементов. При этом разрешается пересечение ранее проложенных трасс, т. е. вводится операция деблокировки. После выполнения трассировки с помощью описываемого алгоритма необходимо применять алгоритм раскладки проводников по слоям.

В основу алгоритма положен следующий критерий качества: *число пересечений ранее проложенных трасс должно быть минимальным.*

При рассмотрении работы алгоритма будем считать запрещенными элементы, на которых расположены контактные площадки и переходные отверстия, а также элементы, через которые проходят 2 проводника и в которых проводник изгибается. Пересечение запрещенных элементов прокладываемой трассы безусловно недопустимо.

Структурная схема алгоритма приведена на рис. 1.19.

1. *Ввод данных.* В оперативное запоминающее устройство вводятся координаты исходного и конечного элементов трассы

$$|x_a, y_a| \text{ и } |x_b, y_b|.$$

2. *Вычисление координат множества элементов  $\{\Phi_K\}$ .* Эта операция выполняется так же, как и в предыдущем алгоритме.

3. *Проверка выполнения условия  $\{F_K\} \neq 0$ .* Если в состав элементов  $K$ -фронта входят незанятые элементы, то распространение волны осуществляется так же, как и в предыдущем алгоритме. В случае, когда множество незанятых элементов  $K$ -фронта равно нулю, т. е. когда дальнейшее распространение волны без пересечения ранее проложенных трасс невозможно, делается переход к выполнению блока 4.

На рис. 1.20 приведен пример определения трассы  $AB$  с помощью описываемого алгоритма. Заштрихованными зонами показаны ранее проложенные проводники. Видно, что после 8 шагов распространение фронта волны во всех направлениях заблокировано множеством занятых и запрещенных элементов.

4. Формирование фронта волны, состоящего из множества элементов  $\{C_k\}$ . В случае невыполнения условия 3 происходит

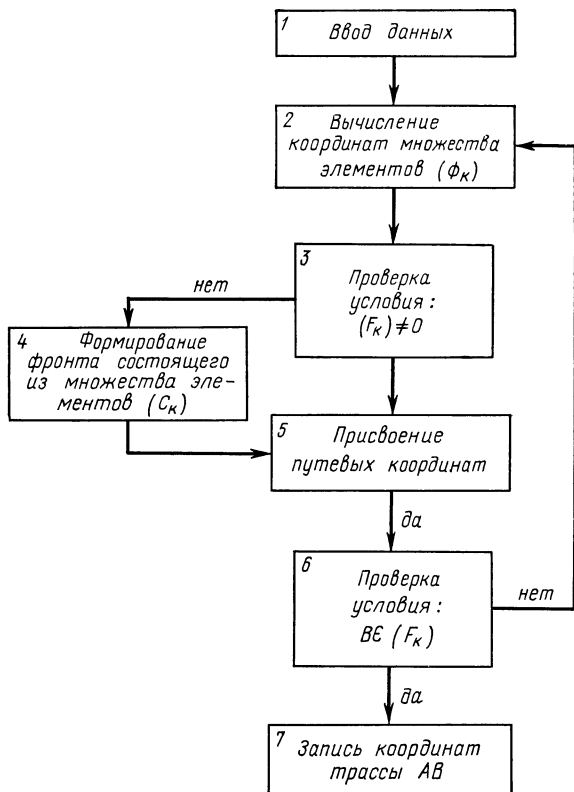


Рис. 1.19. Структурная схема волнового алгоритма прокладки пути с минимальным числом пересечений

создание нового фронта волны, в которую включаются все занятые элементы, преградившие путь распространению волны. Происходит прорыв преграды, состоящей из занятых элементов, сразу по всем направлениям.

На рис. 1.20 показано, что в состав фронта не входят запрещенные элементы с координатами (2,4), (9,12) и (10,5).

5. Присвоение координат. Эта процедура применяется к множеству незанятых элементов  $\{F_k\}$  в случае выполнения условия 3, или к множеству занятых элементов  $\{C_k\}$  при невыполнении этого условия. В рассматриваемом примере

6. Проверка выполнения условия  $B \in \{F_K\}$ , т. е. проверяется, входит ли конечный элемент трассы  $B$  в множество элементов  $K$ -фронта. В случае отрицательного результата проверки формируется новый фронт распространения волны. При этом, если в данном цикле моделирования волны действовала операция 4, то в состав фронта войдут только незанятые элементы, соседние

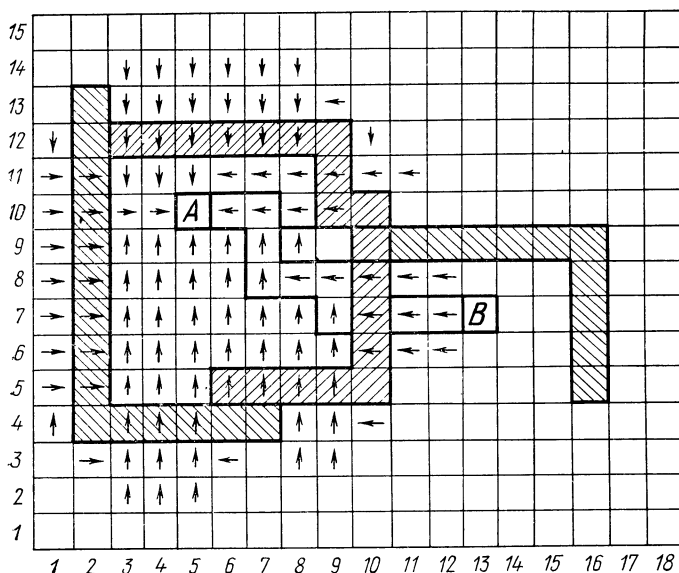


Рис. 1.20. Пример определения трассы с помощью волнового алгоритма прокладки пути с минимальным числом пересечений

а) запрещенные элементы, в которых проводник меняет свое направление;

б) занятые элементы, соседние с занятыми элементами предыдущего фронта с координатами (2,12), (6,4), (7,4), (9,9) и (10,10);

в) запрещенный элемент (10,9), через который проходят 2 трассы.

Если условие 6 выполняется, то моделирование волны прекращается, соединение  $AB$  может быть проведено.

7. *Запись координат трассы АВ* выполняется так же, как в предыдущем алгоритме, с тем добавлением, что в состав трассы АВ могут войти элементы, уже занятые другими трассами.



Для проведения последующих трасс эти элементы становятся запрещенными [элемент с координатами (10,7) на рис. 1.20].

В рассматриваемом примере трасса  $AB$  длиной  $d = |5-13| + |10-7| = 11$  проведена за 12 шагов. Потеря времени произошла за счет того, что алгоритм искал путь без пересечений. Вообще рассматриваемый алгоритм обладает тем недостатком, что не позволяет находить соединения кратчайшей длины среди всех соединений с одинаковым числом пересечений ранее проложенных трасс. Причина этого обстоятельства — в процессе поиска пути без пересечений волной сначала моделирующей на всем пространстве незанятых элементов вокруг  $A$  и только после этого преодолевающей блокирующие трассы. В результате место преодоления преграды кратчайшим проводником может оказаться от конечного элемента  $B$  дальше, чем место прорыва другими проводниками. Поэтому другие проводники, естественно, достигнут элемента  $B$  раньше.

Рассмотренным модификациям волнового алгоритма присущ общий недостаток: прокладывая трассы, стремящиеся к одной из границ пространства платы, они одновременно прижимают трассы друг к другу (см. рис. 1.18 и 1.20). Это явление может вызвать блокировку конечных элементов трасс и служит причиной взаимных наводок между проводниками. В целях борьбы с указанными недостатками разработана следующая модификация волнового алгоритма.

**Волновой алгоритм для проведения пути, минимально приближающегося к другим трассам.** Как было сказано раньше, основное назначение этого алгоритма — создание конструкции печатной платы с равномерной загрузкой пространства трассами. Число пересечений проводников и их длина при этом несущественны.

Основной критерий качества может быть сформирован следующим образом: элементы, входящие в искомое соединение, должны иметь минимальное число соседних элементов, принадлежащих ранее проложенным трассам.

При описании алгоритма введем обозначение:

$\{\Phi_K^{(m)}\}$  — подмножество элементов  $K$ -фронта, имеющих соседние занятые и запрещенные элементы.

Рассмотрим структурную схему алгоритма (рис. 1.21).

1. *Ввод данных.* Операция, аналогичная для всех рассмотренных алгоритмов.

2. *Вычисление координат множества элементов  $\{\Phi_K\}$ .* Этот блок также подобен ранее рассмотренным.

3. *Проверка условия  $\{\Phi_K^{(0)}\} \neq 0$ .* В процессе этой проверки выявляется наличие в  $K$ -фронте элементов, не имеющих занятых (запрещенных) соседних элементов. Если такие имеются, то  $K$ -фронт создается из них и только этим элементам приписываются путевые координаты. Для простоты изложения будем считать, что приоритетный порядок присвоения путевой координаты выбран таким же, как и в ранее рассмотренных примерах.

Смысл процесса 3 и соответствующих ему операций блока 6 заключается в том, что при каждом цикле моделирования фронта волны предпочтение прежде всего отдается элементам, около которых нет ранее проложенных трасс.

4. Проверка условия  $\{\Phi_k^1\} \neq 0$ . В том случае, когда ни один элемент фронта не свободен от соседства занятых элементов,

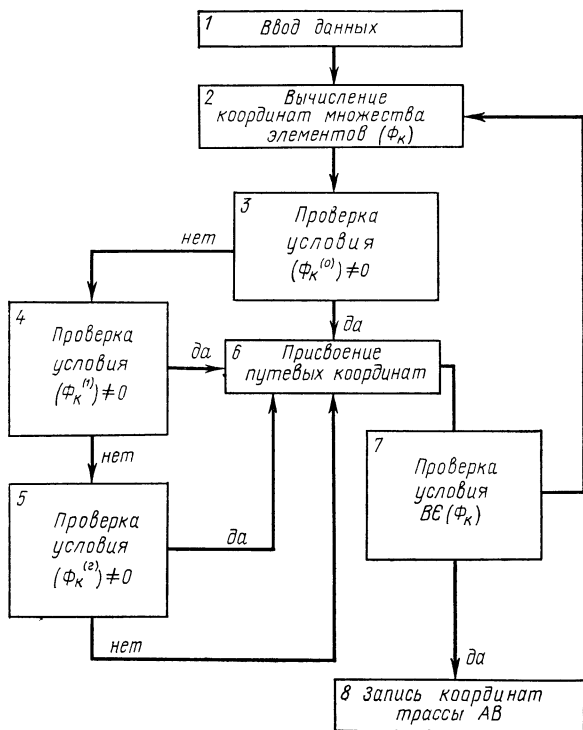


Рис. 1.21. Структурная схема волнового алгоритма для проведения пути, минимально приближающегося к другим трассам

**K**-фронт формируется из всех элементов, имеющих один соседний занятый элемент.

Из рис. 1.22 видно, что при распространении волны на множествах  $\{\Phi_k^0\}$  на шестом шаге были достигнуты элементы с координатами (6,5), (7,6), (9,7), (3,14) и (4,15), на девятом шаге достигнут элемент (1,15). Дальнейшее распространение волны по элементам, не имеющим по соседству трасс, невозможно, тогда моделируется фронт одновременно из всех элементов, имеющих по одному занятому соседнему элементу. В дальнейшем, распространяя волну по элементам (7,5), (7,4) и т. д. удается провести трассу через множество элементов, не имеющих рядом проложенных проводников.

5. Проверка условия  $\{\Phi_k^2\} \neq 0$ . В результате этой процедуры в  $K$ -фронт волны включаются элементы с двумя соседними занятыми элементами, а при их отсутствии — тремя.

Очевидно, что больше трех соседних элементов, на которых еще не моделировалось распространение волны при выбранной геометрии, быть не может, так как каждый элемент имеет только 4 соседних, причем минимум один из них принадлежит множеству элементов предыдущего фронта.

6. Операция присвоения путевых координат выполняется так же, как в предыдущих алгоритмах, но на различных подмноже-

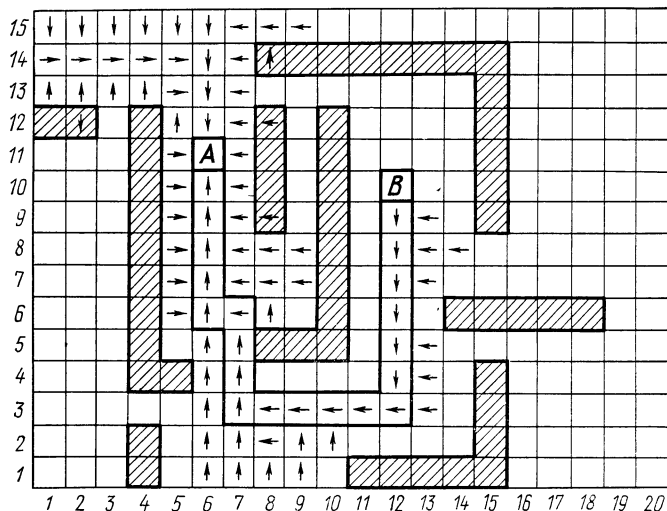


Рис. 1.22. Пример определения трассы с помощью волнового алгоритма для проведения пути, минимально приближающегося к другим трассам

ствах элементов, входящих в состав множества  $\{\Phi_k\}$ , в зависимости от результатов, полученных при работе блоков 3, 4 и 5.

Блоки 7 и 8 аналогичны ранее рассмотренным.

Из примера на рис. 1.22 видно, что возможно провести кратчайшую трассу  $AB$  с двумя пересечениями и длиной 7 или трассу без пересечений длиной 11. С помощью рассматриваемого алгоритма проложен проводник длиной 21, но расположенный в наименее заполненной области пространства платы.

**Волновой алгоритм прокладки пути с минимальным числом изменений направления.** Алгоритм может найти применение в печатных платах с регулярным монтажом, когда на одном слое проводятся только горизонтальные трассы, а на другом — только вертикальные. При этом изменение направления проводника означает переход с одного слоя на другой. Алгоритм позволяет минимизировать количество межслойных соединений.

Будем считать, что при прокладке трассы разрешается пересекать ранее проложенные соединения. Запрещенными элементами являются концы проводников и места их изгибов, т. е. элементы, которые заняты под переходы со слоя на слой.

Введем следующие обозначения:  $\{\bar{\Phi}_K\}$  — множество элементов  $K$ -фронта, имеющих путевую координату того же направления,

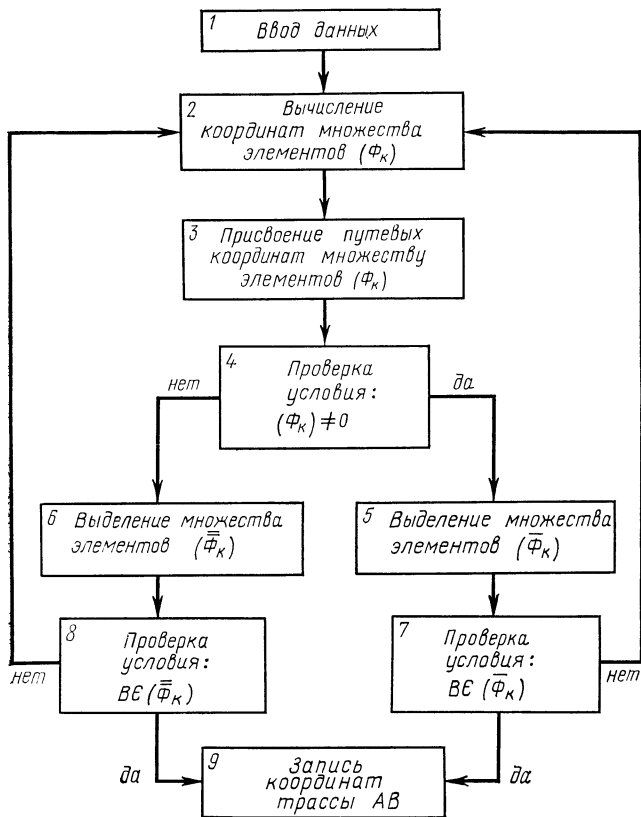


Рис. 1.23. Структурная схема волнового алгоритма прокладки пути с минимальным числом изменений направления

что и у элементов  $(K-1)$ -фронта, по номерам которых присваиваются путевые координаты элементам  $K$ -фронта.

$\{\bar{\Phi}\}$  — множество элементов  $K$ -фронта, имеющих путевую координату другого направления, чем у элементов  $K-1$ -фронта, по номерам которых присваиваются путевые координаты элементам  $K$ -фронта.

Структурная схема алгоритма приведена на рис. 1.23.

Первые три блока принципиально ничем не отличаются от описанных ранее.

Такими на рис. 1.24 будут, например, элементы с координатами  $(5, 8)$ ,  $(3, 10)$  и  $(5, 14)$ .

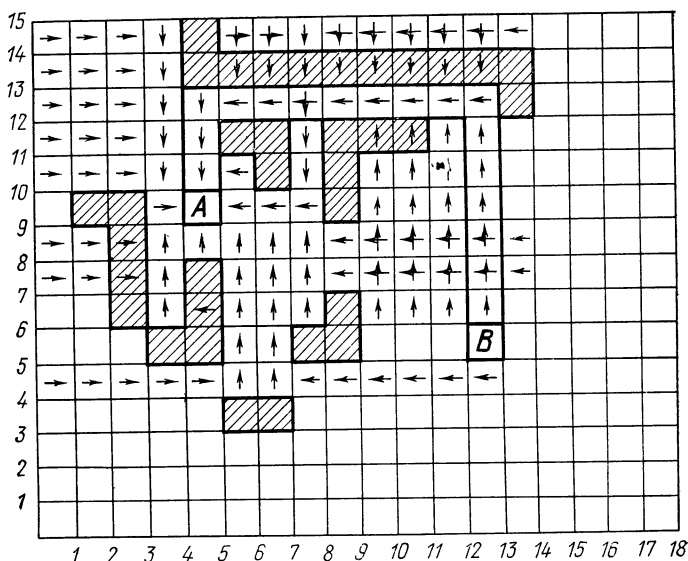


Рис. 1.24. Пример определения трассы с помощью волнового алгоритма прокладки пути с минимальным числом изменений направления

Таким образом, приоритет имеют направления распространения фронта волны, на которых проводник не меняет своего направления. Эту операцию выполняет блок 5. В том случае, если дальнейшее прямолинейное распространение волны невозможно из-за наличия запрещенных элементов на всех направлениях, с помощью блока все проводники меняют свое направление и в дальнейшем опять делается попытка достичь конечного элемента  $B$  без изменения направления распространения волны.

Особенностью алгоритма является возможность присвоения двух путевых координат одному элементу. Неоднозначность направления трассы учитывается при работе блока 7.

Если при записи координат трассы  $AB$  встретился элемент с двумя путевыми координатами, то предпочтение отдается той из них, которая не меняет направления проводника. Например, на рис. 1.24 дан случай, когда при прохождении трассы через эле-

менты с координатами (13, 8) и (13, 9) приоритет имеет вертикальное направление.

В приведенном примере имеется возможность прокладки кратчайшей трассы без пересечений, но с тремя изменениями направления. Алгоритм построил более длинную (на 6 элементов) трассу, но с двумя изменениями направления.

Нами рассмотрено 4 модификации волнового алгоритма, причем в основу каждой положены различные критерии качества. На практике задача трассировки, как правило, формулируется более сложно, так как требуется одновременно удовлетворять нескольким критериям. Если между критериями качества имеются количественные соотношения, то создание такого алгоритма не представляет труда.

Естественно, что будет усложняться первый этап алгоритма (моделирование распространения волны и определение путевых координат); этап определения трассы практически не изменяется.

Поясним сказанное на примере. Предположим, что требуется прокладывать кратчайшие трассы с минимумом перечислений ранее проложенных проводников. Задано, что одно пересечение эквивалентно  $n$  лишним элементам пути. В этом случае, если фронт волны встречает при своем распространении препятствие в виде занятых элементов на некоторых направлениях, в течение последующих  $n$  шагов на этих направлениях фронт не меняется, а затем переходит препятствие. Таким образом, волна моделируется, переходит с неравномерной скоростью распространения на пространстве платы в зависимости от ситуации.

Возможна и другая постановка задачи в случае, когда известен приоритет критериев качества. Сначала алгоритм делает попытки проложить трассу удовлетворяя всем критериям. Если это не удастся, то отбрасывается наименее важный критерий и делается попытка провести проводник и т. д.

Волновой алгоритм обладает наибольшей универсальностью из всех известных алгоритмов, однако ему присущи весьма серьезные недостатки. Как было показано, моделирование распространения волны вызывает необходимость в анализе большого числа элементов. В пределе это могут быть все элементы пространства платы, число которых на одном слое современных многослойных плат может достигать 1 млн. В связи с этим применение волнового алгоритма ставит в ряде случаев невыполнимые требования в смысле машинного времени и объема памяти ЭВМ. Это заставляет конструкторов во многих случаях применять менее универсальные, но более экономичные алгоритмы трассировки.

**Двухлучевой алгоритм трассировки без пересечения ранее проложенных проводников.** Так же, как и волновой, лучевой алгоритм прокладывает трассу в два этапа.

1. Распространение фронтов лучей от обоих конечных элементов трассы по заранее определенным направлениям. Моделирование лучей оканчивается, когда на некотором элементе встре-

чаются лучи, распространяемые от разных концов трассы. В дальнейшем будем называть их разноименными лучами. Одновременно с моделированием всем элементам, по которым проходит луч, присваиваются путевые координаты, соответствующие номерам элементов, входящих в  $(K-1)$ -фронт и соседним элементам  $K$ -фронта. Таким образом направление путевых координат всегда противоположно направлению распространения.

Будем обозначать лучи, распространяемые от элемента  $A$  —  $A$ -лучами, а от элемента  $B$  —  $B$ -лучами. При двухлучевом алгоритме от каждого конечного элемента распространяется по 2 луча:  $A_1$ -луч,  $A_2$ -луч,  $B_1$ -луч,  $B_2$ -луч. Следовательно, в этом случае каждый  $K$ -фронт содержит не более 4 элементов. Распространение каждого луча прекращается, когда он попадает в элемент, все соседние элементы которого являются занятыми или запрещенными.

2. Прокладка искомой трассы производится от элемента, в котором встретились разноименные лучи (элемента, имеющего признаки одноименных лучей), по путевым координатам и продолжается до достижения конечных элементов.

Признаком того, что данную трассу можно проложить, является появление на пространстве платы элемента, имеющего признаки разноименных лучей. Обозначим его  $u_{ab}$ .

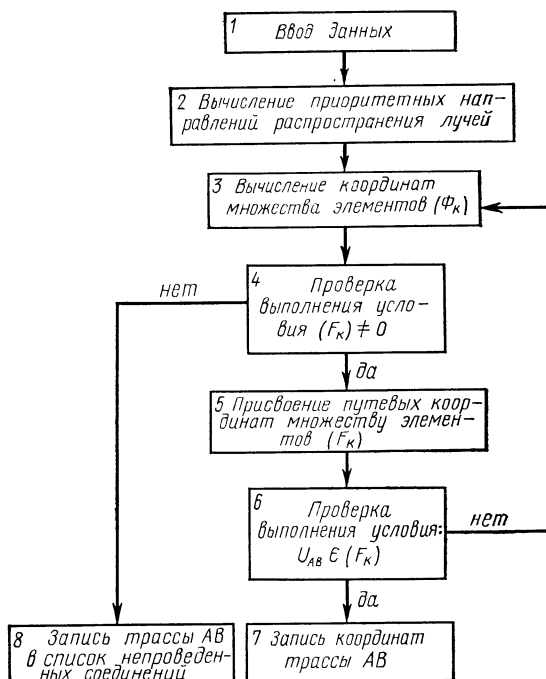


Рис. 1.25. Структурная схема двухлучевого алгоритма трассировки без пересечения ранее проложенных проводников

Рассмотрим структурную схему алгоритма (рис. 1.25).

1. *Ввод данных.* В запоминающее устройство заносятся координаты конечных элементов трассы  $|x_a, y_a|$  и  $|x_b, y_b|$ .

2. *Вычисление приоритетных направлений распространения лучей* выполняется по следующим формулам:

$$\alpha = \text{sign}(x_a - x_b), \quad \alpha = \begin{cases} 1 & \text{при } x_a - x_b \geq 0 \\ 0 & \text{при } x_a - x_b < 0 \end{cases}$$

$$\beta = \text{sign}(y_a - y_b), \quad \beta = \begin{cases} 1 & \text{при } y_a - y_b \geq 0 \\ 0 & \text{при } y_a - y_b < 0 \end{cases} \quad (1.12)$$

Могут встретиться 4 ситуации приоритетных направлений распространения лучей, приведенные в табл. 1.20.

Т а б л и ц а 1.20.

$\alpha$	0	1	0	1
$\beta$	0	0	1	1
Приоритетные направления распространения $\alpha$ -луча	вверх — вправо	вверх — влево	вниз — вправо	вниз — влево
Приоритетное направление распространения $\alpha$ -луча	вправо — вверх	влево — вверх	вправо — вниз	влево — вниз
Приоритетное направление распространения $\beta$ -луча	вниз — влево	вниз — вправо	вверх — влево	вверх — вправо
Приоритетное направление распространения $\beta$ -луча	влево — вниз	вправо — вниз	влево — вверх	вправо — вверх

Для примера, приведенного на рис. 1.26,

$$\alpha = \text{sign}(5 - 16) = 0,$$

$$\beta = \text{sign}(12 - 6) = 1.$$

Следовательно,  $A_1$ -луч должен распространяться вниз — вправо. Это означает, что главным приоритетным направлением является направление, когда элемент  $K$ -фронта имеет ту же абсциссу, что и элемент  $(K-1)$ -фронта, а ординату на 1 меньше. В случае если это направление блокируется занятым или запрещенным элементом, движение луча выполняется по направлению, при котором элемент  $K$ -фронта имеет ту же ординату, что и элемент  $(K-1)$ -фронта, а абсциссу на 1 больше. Распространение луча в этом направлении осуществляется до тех пор, пока не освободится путь для главного приоритетного направления.



$A_2$ -луч должен распространяться в направлении вправо — вниз, т. е. у него приоритетные направления поменялись местами и главным стало направление вправо.

$B$ -лучи имеют приоритетные направления распространения обратные тем, которые приписаны  $A$ -лучам.

3. *Вычисление координат множества элементов  $\{\Phi_K\}$ .* Как было сказано выше, множество  $\{\Phi_K\}$  включает при двухлучевом алгоритме не более 4 элементов.

4. *Проверка выполнения условия  $\{F_K\} \neq 0$ ,* т. е. проверяется, имеются ли в составе фронта лучей свободные элементы. Если

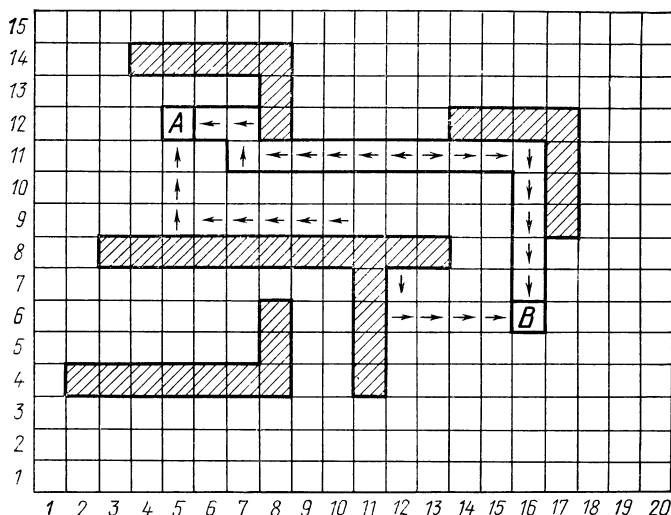


Рис. 1.26. Пример выполнения трассировки печатного монтажа с помощью двухлучевого алгоритма

их нет, то распространение лучей прекращается и трасса заносится в список непроведенных соединений.

На рис. 1.26 видно, что после 5 шагов  $B_2$ -луч дальше распространяться не может, так как оба его приоритетных направления заблокированы занятыми элементами.

5. *Присвоение путевых координат множеству свободных элементов  $K$ -фронта* производится, как было описано.

6. *Проверка выполнения условия  $a_{AB} \in \{F_K\}$ ,* т. е. определяется, имеет ли хотя бы один элемент из числа входящих в  $K$ -фронт признаки разноименных лучей. В приведенном примере на девятом шаге этим свойством будут обладать элементы с координатами (12, 11), и (13, 11), в которых произошла встреча  $A_2$ -луча и  $B_1$ -луча. Следовательно, можно приступить к определению координат трассы  $AB$  (блок 7). Исходным элементом при этом может быть выбран первый из подвергнутых анализу и удовлетворяющий условию 6.

Если условие  $b$  не выполняется, то алгоритм моделирует следующий фронт распространения лучей.

Чтобы выявить экономичность двухлучевого алгоритма по сравнению с волновым, достаточно сопоставить рис. 1.18 и рис. 1.26, на которых показано решение одной и той же задачи. Видно, при лучевом алгоритме потребовалось проанализировать в 3—5 раз меньше элементов, чем при волновом, с соответствующим выигрышем в машинном времени и объеме требуемой памяти.

Особенностью двухлучевого алгоритма является построение с его помощью трассы, имеющей наименьшую длину из всех возможных. Однако универсальность его весьма ограничена. Лучи легко блокируются даже при несложных ситуациях на пространстве платы.

С целью расширения возможности двухлучевого алгоритма можно ввести некоторые усложнения в него, которые проиллюстрируем на примере  $B_2$ -луча (см. рис. 1.26).

Если все лучи заблокированы, то выполняется следующая процедура: возвращают фронт луча на 1 элемент назад и пытаются провести трассу по второму приоритетному для данного луча направлению. Если эта операция опять приводит к блокировке луча, фронт возвращают еще на один элемент назад, повторяют попытки проведения трассы по второму приоритетному направлению и т. д. При этом все просмотренные элементы в дальнейшем считаются для данного луча запрещенными. Если после одной из попыток выявляется возможность перехода на главное приоритетное направление распространения, то этот переход выполняется.

Чтобы чрезмерно не увеличивать время трассировки, эта процедура может быть повторена ограниченное число раз.

Для  $B_2$ -луча сначала возвращают фронт в элемент с координатами (13, 6) и пытаются распространить луч вверх. Через 1 шаг он снова блокируется. Тогда фронт возвращается в элемент (14, 6) и луч распространяется через элементы (14, 7), (14, 8), (14, 9), (13, 9) и т. д. до встречи с  $A_1$ -лучом.

Чтобы выровнять распространение лучей, тот луч, который возвращается на  $n$  элементов назад, затем распространяется в течение  $n$  шагов.

С помощью двухлучевого алгоритма можно также решить задачу построения трассы с наименьшим числом пересечений. Для этого в алгоритм необходимо ввести дополнительный блок, который при невыполнении условия  $\{F_k\} \neq 0$  (блок 4) разрешает  $A$ -лучам пересечь препятствие. Если при дальнейшем распространении  $A$ -лучи опять окажутся заблокированными, то дается разрешение на пересечение преграды  $B$ -лучам и т. д.

**Четырехлучевой алгоритм трассировки без пересечения ранее проложенных трасс.** Возможности лучевого алгоритма можно повысить, если моделировать распространение лучей от каждого

конечного элемента трассы в четырех направлениях. Таким образом в состав  $K$ -фронта входит не более 8 элементов.

В отличие от двухлучевого алгоритма луч считается заблокированным на элементе, если он со всех сторон окружен занятыми или запрещенными элементами. Для двухлучевого алгоритма достаточно блокировки приоритетных направлений. Следствием этого является большая свобода проведения трасс при четырехлучевом алгоритме.

В отличие от двухлучевого алгоритма в состав блок-схемы четырехлучевого не входит блок вычисления приоритетных направлений распространения лучей. Приоритеты выбраны постоянными. Будем считать, что установлены следующие приоритетные направления:

$A_1$ -луч и  $B_1$ -луч: вверх, вправо, вниз, влево;

$A_2$ -луч и  $B_2$ -луч: вправо, вниз, влево, вверх;

$A_3$ -луч и  $B_3$ -луч: вниз, влево, вверх, вправо;

$A_4$ -луч и  $B_4$ -луч: влево, вверх, вправо, вниз.

Недостаток четырехлучевого алгоритма заключается в том, что получаемое соединение не всегда кратчайшее.

Процедура присвоения путевых координат выбрана такой же, как и при двухлучевом алгоритме, путевая координата имеет направление, противоположное направлению распространения луча.

Блок-схема алгоритма такая же, как и на рис. 1.25. Необходимо только исключить блок 2.

Иллюстрацией к действию алгоритма может служить рис. 1.27, из которого видно, что  $B_2$ -луч после 8 шагов блокирован, а соединение проведено  $A_3$ -лучом и  $B_3$ -лучом.

Полученная трасса далека от кратчайшей и прижимается к краям пространства.

Возможно применение других приоритетных направлений распространения лучей, которые при данной ситуации на пространстве платы позволят получить более приемлемую трассу. Однако при других ситуациях соединение опять может получиться неудовлетворительным. По этим причинам четырехлучевой алгоритм не нашел широкого применения.

Так как процедуры распространения фронтов волны и лучей и процедуры присвоения путевых координат при волновом и лучевом алгоритмах весьма близки по своему содержанию, то возможно и целесообразно создание комбинированного алгоритма, использующего сильные стороны составляющих его алгоритмов. При этом в начале процесса трассировки, когда ситуация на пространстве платы несложна, используются методы лучевого алгоритма, а на конечной стадии трассировки — волнового.

**Алгоритм проведения кратчайшей связывающей сети.** Во всех рассмотренных до сих пор задачах приводились трассы, связывающие два элемента. Однако на практике чаще встречаются случаи, когда требуется соединить несколько элементов. Возникает проблема, как построить связывающую сеть, чтобы суммар-

ная длина всех проводников была наименьшей. Данная задача решается описываемым далее алгоритмом, называемым иногда по имени его автора Р. К. Прима.

Прим нашел решение и доказал его оптимальность для случая, когда данное множество элементов связывается сетью прямых линий. Мы заменим в своих рассуждениях понятие «прямая линия» понятием «кратчайшее расстояние», не интересуясь, каким образом будет проведена кратчайшая трасса между двумя элементами.

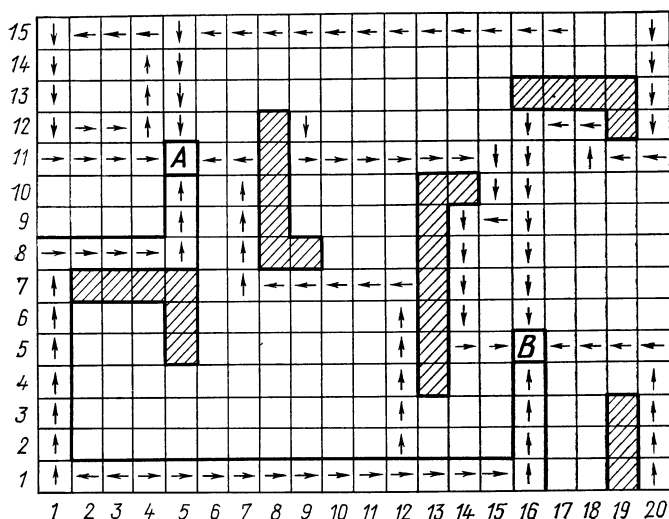


Рис. 1.27. Пример выполнения трассировки печатного монтажа с помощью четырехлучевого алгоритма

В основу алгоритма положены следующие основные принципы:

1. Всякий изолированный элемент соединяется с ближайшим к нему другим изолированным элементом.

2. Всякий изолированный фрагмент сети соединяется с ближайшим к нему изолированным элементом.

Под фрагментом сети будем понимать подмножество элементов, связанных между собой.

Расстояние от изолированного элемента до фрагмента определяется как расстояние от данного элемента до ближайшего к нему элемента из подмножества, входящего в состав фрагмента.

Обозначим  $r_{ij}$  — кратчайшее расстояние между элементами с номерами  $i$  и  $j$ ;

$n$  — число элементов, связываемых сетью;

$\{m_i\}$  — подмножество элементов, входящих в состав фрагмента сети;

$\{l_i\}$  — подмножество изолированных элементов.

Рассмотрим структурную схему алгоритма (рис. 1.28).

1. *Вычисление матрицы расстояний.* По формуле  $r_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|$ , определяем кратчайшее расстояние между **всеми** элементами, которые должны быть соединены. Результаты **вы-**числений сведены в матрицу.

$$\{r_{ij}\} = \begin{vmatrix} r_{12} & r_{13} & r_{14} \dots r_{1n} \\ & r_{23} & r_{24} \dots r_{2n} \\ & & r_{34} \dots r_{3n} \\ & & & \dots \dots \\ & & & & r_{(n-1)n} \end{vmatrix}.$$

Матрица содержит  $\frac{n(n-1)}{2}$  чисел. Каждое число записы-  
вается в соответствующую ячейку памяти ЗУ. Кроме расстояния

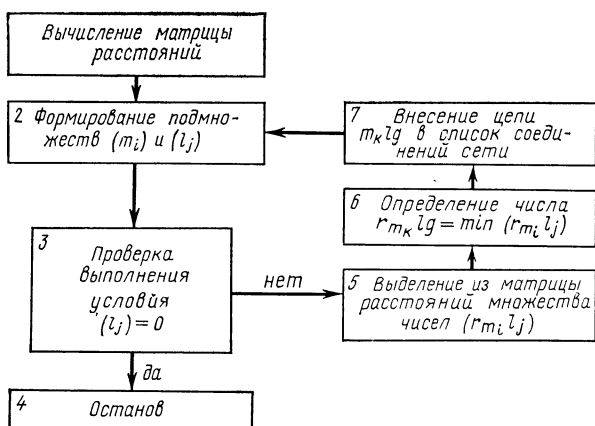


Рис. 1.28. Структурная схема алгоритма проведения кратчайшей связывающей сети

между элементами  $i$  и  $j$  в ячейку заносятся признаки этих элементов.

2. *Формирование подмножеств  $\{m_i\}$  и  $\{l_i\}$ .* На первом шаге алгоритма в состав  $\{m_i\}$  может быть включен любой элемент, так как данный алгоритм инвариантен. При каждом последующем шаге (цикле) количество элементов, входящих в подмножество  $\{m_i\}$ , увеличивается, а входящих в подмножество  $\{l_i\}$  соответственно уменьшается на один.

3. *Проверка выполнения условия  $\{l_i\} = 0$ .* Если в состав множества элементов сети входит только один элемент, то работа алгоритма заканчивается на первом шаге. Если число элементов больше одного, то работа алгоритма происходит циклично, при-

чем на каждом цикле определяется одна из цепей сети. Так как число цепей равно  $(n-1)$ , то вся задача решается за  $(n-1)$  циклов.

4. *Выделение из матрицы расстояний множества чисел  $\{r_{mi}l_j\}$* , т. е. из всего множества чисел матрицы выделяются числа, определяющие расстояния каждого элемента фрагмента со всеми изолированными элементами.

Если на первом шаге в состав фрагмента включен первый элемент, то на первом цикле блоком 5 будет выделена первая строка матрицы.

5. *Определение числа  $r_{m_k}lg = \min \{r_{m_i}l_j\}$* . Из множества чисел, выделенных блоком 5, находится наименьшее число, которое соответствует длине новой цепи фрагмента. Признаки этого числа определяют номера элементов, между которыми эта цепь должна быть проведена, и номер нового элемента, который войдет в множество  $\{m_i\}$ .

6. Блоком 7 новая цепь заносится в список *кратчайших соединений сети*.

Результат решения задачи можно переложить на язык теории графов следующим образом: алгоритм строит кратчайшее дерево, ребра которого соединяют все вершины заданного множества вершин. Отсутствие циклов в графе определяется действием блока 5, который не допускает соединений между вершинами, уже вошедшими в состав фрагмента. Недостаток алгоритма в применении к конструированию печатных плат заключается в том, что он допускает соединение одной вершины со всеми остальными. Для устранения этого недостатка в алгоритм можно включить блок, который после соединения некоторой вершины с другим допустимым числом цепей исключает эту вершину из дальнейшего рассмотрения.

**Маршрутные алгоритмы трассировки.** Маршрутные алгоритмы трассировки получили такое название потому, что при их применении ЦВМ строит соединение по маршруту, определяемому координатами конечных элементов трассы и математическими методами, положенными в основу данного алгоритма.

Если при волновом и лучевом алгоритмах на первом этапе (распространение волны или луча) определяются все возможные для данного алгоритма пути прокладки трассы, а уже затем строится наиболее приемлемое соединение, то маршрутные алгоритмы стремятся проложить трассу сразу, причем по кратчайшему пути. Если при этом встречается препятствие в виде занятых или запретных элементов, то в действие вступает блок определения путей обхода. В состав маршрутных алгоритмов входят блоки упорядочивания проложенной трассы после ее проведения, назначение которых заключается в спрямлении полученных соединений. Иногда функции этого блока выполняются блоком определения обходных путей.

Рассмотрим некоторые примеры маршрутных алгоритмов. На рис. 1.29, а изображена структурная схема алгоритма, на

каждом цикле работы которого происходит определение координат очередного элемента трассы, удовлетворяющего условиям:

1. Элемент должен быть соседним по отношению к последнему по номеру элементу искомой трассы.

2. Выбранный элемент должен быть наименее удаленным от конечного элемента трассы.

Таким образом строится кратчайшее соединение между двумя исходными элементами. Недостаток алгоритма заключается в том, что трасса, проложенная с его помощью, имеет ступенча-

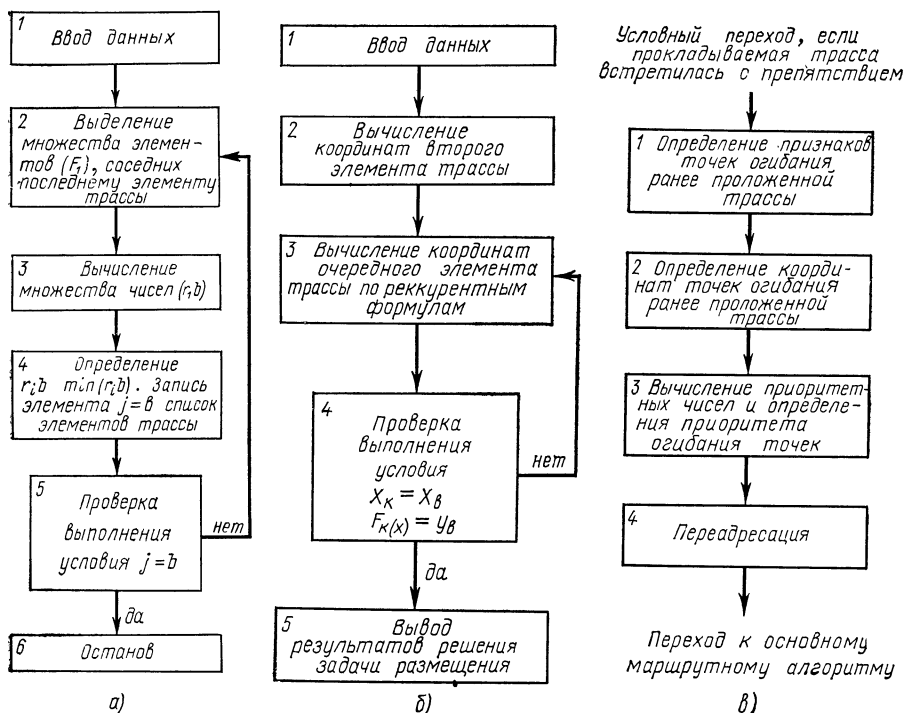


Рис. 1.29. Структурная схема маршрутного алгоритма трассировки (а, б, в)

тую форму, что вызывает необходимость в ее сглаживании с помощью интегрирующих цепей при нанесении вычисленного пути на чертеж или фотооригинал слоя печатной платы.

Рассмотрим блок-схему алгоритма.

1. **Ввод данных.** С помощью этого блока оперативное запоминающее устройство ЦВМ заносит координаты начального и конечного элементов трассы  $A(x_a, y_a)$  и  $B(x_b, y_b)$ .

2. **Выделение множества элементов  $\{F_1\}$ , соседних последнему элементу трассы,** т. е. из всех элементов 1-окрестности последнего по номеру элемента трассы выделяются свободные для прокладки пути элемента. На первом цикле алгоритма последним элементом трассы будет исходный элемент  $A$ .

3. *Вычисление множества чисел  $\{r_i b\}$ .* С помощью этого блока по формуле  $r_i b = |x_i - x_b| + |y_i - y_b|$  вычисляются кратчайшие в выбранной геометрии расстояния от всех элементов, выделенных блоком 2, до конечного элемента трассы  $B$ .

4. *Определение ближайшего к элементу  $B$  элемента из 1-окрестности последнего по номеру элемента трассы и занесение его координат (номера) в список элементов искомого пути.*

5. С помощью блока 5 проверяется: не достиг ли конечный элемент трассы  $B$ . Признаком выполнения условия может быть соотношение  $r_i b = 0$ .

В случае выполнения условия 5 прокладка трассы заканчивается, при отрицательном итоге проверки определяется следующий элемент трассы (переход к блоку 2).

Возможно построение маршрутного алгоритма на основе применения рекуррентного уравнения вида:

$$F(x) = 2F(x \pm h) - F(x \pm 2h) + \Delta, \quad (1.13)$$

где  $x$  — абсцисса элемента, занимаемого трассой на данном шаге;  $F(x)$  — ордината элемента, занимаемого трассой на данном шаге;  $F(x \pm h)$  — ордината элемента, занимаемого трассой на предыдущем шаге;  $F(x \pm 2h)$  — ордината элемента, отстоящего от вычисляемого на два шага;  $\Delta$  — функция, определяющая вид прокладываемой трассы: при  $\Delta = 0$  — строится прямолинейная трасса, при  $\Delta = \text{const}$  — алгоритм генерирует семейство парабол;  $h$  — величина изменения абсциссы элементов трассы на каждом шаге  $h = 1, 2, 3$ .

Работа алгоритма производится циклически, причем в течение каждого цикла вычисляются координаты очередного элемента трассы и определяется, не достигла ли трасса конечного элемента.

Ордината очередного элемента трассы вычисляется в соответствии с выражением (1.13), а абсцисса по формуле:

$$x_k = x_{k-1} + h. \quad (1.14)$$

Как видно из выражения (1.13), для определения ординаты очередного элемента трассы необходимо знать ординаты двух предыдущих элементов. Поэтому вычисление трассы по (1.13) возможно, начиная с третьего элемента. Первым элементом трассы является исходный элемент  $A$ , ордината второго элемента может быть вычислена для линейной трассы по формуле:

$$F_2(x) = F(x_a) + \frac{F(x_a) - F(x_b)}{x_a - x_b} h. \quad (1.15)$$

Структурная схема алгоритма приведена на рис. 1.29, б. Особое достоинство данного алгоритма — простота формул вычисления координат элементов трассы.

В отличие от волнового и лучевого алгоритмов маршрутные алгоритмы не дают возможности обхода встретившегося на пути



трассы препятствия (занятые и запрещенные элементы). Поэтому в состав общего алгоритма трассировки при использовании методов маршрутов приходится вводить блоки, огибающие препятствие по пути, наиболее приближенному к прямой линии, соединяющей конечные элементы трассы.

Рассмотрим один из возможных алгоритмов, выполняющих операции вычисления множества точек обхода препятствий, определения их приоритета и выделение тех элементов, через которые должна пройти трасса.

Структурная схема алгоритма представлена на рис. 1.29, в.

Для вычисления огибающей трассы в состав основного маршрутного алгоритма должны быть включены операции вычисления ближайших незанятых элементов около концевых элементов трасс и в местах их изгиба. Таким образом, в состав информации о каждой проложенной трассе, кроме координат всех ее элементов входят сведения о координатах точек, через которые можно проложить соединение, огибающее эту трассу.

1. *Определение признаков точек огибания ранее проложенной трассы* производится в случае встречи искомой трассы с препятствием. По координатам встреченного занятого (запретного) элемента выясняют номер трассы, к которой он принадлежит.

2. *Координаты всех точек, через которые можно провести огибающую трассу*, определяются обращением к ЗУ по адресу (номеру) ранее проложенной трассы.

3. *Вычисление приоритетных чисел* определяет очередность точек огибания ранее проложенной трассы. Очевидно, что в первую очередь следует попытаться провести наименее удаленную от маршрута огибающую трассу. Если сделать этого не удастся и огибающая трасса снова наталкивается на препятствие, то делается попытка продолжить соединение, более удаленное от маршрута, чем первое, но менее удаленное, чем другие возможные огибающие трассы и т. д.

В том случае, когда алгоритм прокладывает линейные трассы, приоритетные числа определяются по формуле:

$$\Delta = |x_k - x_t|,$$

где  $x_k$  — абсцисса элемента, в котором прокладываемая трасса встретилась с препятствием;  $x_t$  — абсцисса точки обхода ранее проложенной трассы.

Очевидно, что чем меньше  $\Delta$ , тем огибающая трасса располагается ближе к маршруту.

4. *Переадресация* заключается в изменении сначала координат конечной точки трассы на координаты точки обхода, а затем в замене начального элемента трассы точкой обхода. Таким образом алгоритм вместо отрезка прямой, соединяющего начальный и конечный элементы искомого проводника, прокладывает путь по ломаной, состоящей из двух прямых отрезков. Первый отрезок заключен между начальным элементом трассы и точкой

обхода, а второй — между точкой обхода и конечным элементом трассы.

Если на пути обхода трасса снова встречает препятствие, то процедура его огибания такая же за исключением случая, когда препятствие (занятый элемент) относится к тому же проводнику, который огибается. При этом делается попытка провести обходную трассу через следующую по приоритету точку огибания.

В данной главе описаны только основные принципы построения программ и основные методы автоматического конструирования печатных плат. Практически рассмотрены только главные направления решения задач размещения узлов и проектирования связей на плате.

Реальные программы машинного конструирования гораздо объемнее, т. е. в их состав кроме основного алгоритма входят многочисленные вспомогательные блоки, учитывающие различные ограничения, которые накладываются как на конечные результаты, так и на сами процессы размещения или трассировки. Например, при сложной ситуации на плате возможны случаи, когда ЭЦВМ, имея задачу проложить соединение и последовательно обойти встречающиеся препятствия, генерирует весьма сложную трассу, пересекающую большое число путей для прокладки других соединений и требующих значительного числа шагов работы алгоритма.

Возможны также случаи, когда трасса прокладывается по некоторому замкнутому контуру, так и не встречая конечного элемента. В обоих этих случаях вступает в действие блок, ограничивающий число шагов прокладки каждой трассы. Если на заранее определенное число шагов соединение не может быть определено, то оно заносится в список непроложенных трасс, которые затем строятся либо с помощью других алгоритмов, либо вручную.

Здесь не рассматривались проблемы, влияющие на рисунок проводников на плате, как порядок проведения соединений и разложение трасс по слоям печатной платы. В настоящее время нет теоретически обоснованного алгоритма для определения порядка проведения трасс, однако из практики известно, что если сначала проектировать наиболее короткие проводники, а затем более длинные, то задача трассировки решается быстрее и прокладывается большее число соединений. Таким образом, в большинстве современных алгоритмов введены блоки определения очереди проведения трасс, действующие по этому принципу.

**ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ****§ 2. 1. Фольгированные  
диэлектрики, применяемые для  
изготовления печатных плат**

Фольгированный диэлектрик состоит из электроизоляционного основания, покрытого, как правило, медной фольгой с одной или двух сторон. В качестве основания фольгированных диэлектриков применяется стеклотекстолит на фенольной или эпоксидной основе.

Медная фольга, используемая для плакирования диэлектрика, изготавливается гальваническим способом и должна иметь чистоту не менее 99,5%. Толщина фольги 35 или 50 мкм.

Для специальных целей выпускаются фольгированные диэлектрики, покрытые другими металлами, например никелевой фольгой.

Качество фольгированных диэлектриков устанавливается специальными техническими условиями или государственными стандартами.

Рассмотрим некоторые общие требования технологического порядка, предъявляемые к фольгированным диэлектрикам.

Для обеспечения высокого качества печатных плат на поверхности медной фольги не допускается вздутий, морщин, проколов, глубоких царапин, раковин, следов смолы и клея.

Любое изменение цвета или загрязнение фольги должно легко удаляться раствором соляной кислоты с удельным весом 1,02 или соответствующим органическим растворителем.

Изоляционное основание также должно отвечать ряду требований, например после удаления медной фольги на материале основания не должно быть раковин, отверстий, пор и посторонних включений. Основание должно быть однородным по цвету и не должно иметь на поверхности металлических включений.

Толщина листа фольгированного диэлектрика в любой его точке (включая металлическую фольгу) не должна отклоняться от номинальной более, чем на указанную в табл. 2.1 величину.

Прогиб (коробление) листов размером не менее 460 мм определяется по формуле

$$a_L = d \left( \frac{L}{1000} \right)^2,$$

где  $a_L$  — величина стрелы прогиба листа;  $d$  — величина стрелы прогиба листа на длине 1 м;  $L$  — длина листа, на котором производят замер стрелы прогиба.

Таблица 2.1.

Номинальная толщина, <i>мм</i>	Допуск, <i>мм</i>	Номинальная толщина, <i>мм</i>	Допуск, <i>мм</i>
0,2	$\pm 0,01$	1,5	$\pm 0,20$
0,5	$\pm 0,05$	2,5	$\pm 0,30$
0,8	$\pm 0,015$	3,0	$\pm 0,30$
1,0	$\pm 0,20$		

Величина  $d$  для различных толщин одно- и двусторонних фольгированных диэлектриков не должна превышать 3% от величины  $L$ .

Прочность сцепления фольги с диэлектриком при отслаивании должна быть не менее 1,1 н/мм, при отрыве — не менее 90 н.

Фольгированный диэлектрик должен выдерживать воздействие теплового удара при температуре  $260 \pm 5^\circ \text{C}$  в течение 20 сек без вздутия фольги и расслаивания диэлектрика.

Сопротивление диэлектрика изгибу должно быть не менее 30 000 н/см<sup>2</sup>. Водопоглощение не должно превышать величин, указанных в табл. 2.2.

Таблица 2.2.

Толщина, <i>мм</i> . . . . .	0,8	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Водопоглощение, % . . . .	3	3	2	2	2	2

Поверхностное сопротивление диэлектрика во время нахождения в камере влажности должно быть не менее  $10^{10} *$  ом, после восстановления — не менее  $5 \cdot 10^{10} **$  ом.

Удельное объемное сопротивление диэлектрика во время нахождения в камере влажности должно быть не менее  $5 \cdot 10^{11} *$  ом·см, после восстановления — не менее  $10^{12} **$  ом·см.

Диэлектрическая проницаемость после воздействия влажного тепла не должна превышать 5,5\*\*\*. Тангенс угла диэлектрических потерь после воздействия влажного тепла не должен превышать 0,05 на частоте  $10^6$  гц.

В технических условиях на материал даются соответствующие методики, по которым проверяются изложенные требования.

\* После воздействия относительной влажности воздуха 93,2% и температуры  $40 \pm 2^\circ \text{C}$  в течение 4 суток.

\*\* После пребывания в нормальных атмосферных условиях при температуре 15—35° С, атмосферном давлении 645—795 мм рт. ст. и относительной влажности 45—75% в течение 1—2 ч.

\*\*\* После воздействия относительной влажности воздуха 94,2% и температуры  $40 \pm 2^\circ \text{C}$  в течение 4 суток.

К фольгированным диэлектрикам предъявляется и ряд чисто технологических требований. Например, фольгированный диэлектрик должен обладать технологичностью при резке, штамповке, сверлении. При этом он не должен расслаиваться с тем, чтобы в процессе металлизации не было проникновения химических реагентов в толщу изоляционного материала, снижающих его электроизоляционные свойства.

К тонким фольгированным диэлектрикам, предназначенным для изготовления многослойных печатных плат, предъявляются дополнительные требования.

На нефольгированной стороне односторонних фольгированных диэлектриков не допускаются жирные пятна и смазки, которые могут послужить препятствием при склеивании многослойной платы.

Толщина изоляционного основания для МПП должна соответствовать величинам, указанным в табл. 2.3.

Т а б л и ц а 2.3

Номинальная толщина основания, мм	Допуск, мм
0,05 ÷ 0,11	±0,025
Более 0,11 ÷ 0,15	±0,040
Более 0,15 ÷ 0,30	±0,050
Более 0,30 ÷ 0,80	±0,075

Изоляционный материал должен стабильно сохранять размеры каждого отдельного промежуточного слоя, воспроизведенного с фотооригинала, на протяжении всего технологического процесса изготовления МПП.

При изготовлении МПП применяются склеивающие прокладки из изоляционного материала.

Склеивающая прокладка представляет собой стеклоткань, пропитанную эпоксидной смолой в стадии полутверждения (стадия В). Для изготовления склеивающей прокладки должна применяться электроизоляционная бесщелочная стеклоткань толщиной 25, 40, 60 и 100 мкм. На склеивающей прокладке не должно быть инородных частиц, видимых невооруженным глазом участков, не пропитанных смолой, крошек нерастворенной смолы и других загрязнений.

Процесс склеивания МПП очень сложный и поэтому к склеивающей прокладке предъявляются специфические требования, существенно влияющие на качество склеивания МПП.

Содержание смолы в склеивающих прокладках лежит в пределах 45—52 %.

Содержание смолы может быть различным в зависимости от типа склеивающей прокладки и составляет 42 ÷ 50 %.

Содержание летучих веществ допускается не более 0,75%, содержание растворимых — не менее 80%. Время клейкости должно быть 20÷240 сек, причем чем оно меньше, тем легче протекает процесс склеивания.

Электрические свойства стеклотекстолита толщиной 0,9 мм, изготовленного из склеивающей прокладки, должны быть не хуже электрических свойств фольгированных диэлектриков, применяемых для изготовления МПП.

Клеящие свойства прокладки должны сохраняться в течение 90 суток со дня ее изготовления, но при этом должны соблюдаться специальные условия хранения.

Срок годности склеивающей прокладки может быть значительно продлен, если ее хранить при охлаждении.

Учитывая большую потребность радиопромышленности в фольгированных материалах для изготовления многослойных жестких и гибких печатных плат, в СССР разработаны фольгированные диэлектрики различных марок, приведенных в табл. 2.4.

Тонкие фольгированные стеклотекстолиты ФДТ, ФДМ, ФДМЭ могут применяться в интервале температур  $-60 \div +120^\circ \text{C}$ . При соответствующем технологическом процессе они допускают

Таблица 2.4

Наименование материала	Марка материала	ГОСТ, ТУ, нормаль
Гетинакс фольгированный	ГФ-1-Н ГФ-2-Н	ГОСТ 10316—62 МРТУ 16-509-001—64
Стеклотекстолит фольгированный	СФ-1 СФ-2	ГОСТ 10316—62 МРТУ 16-509-001—64
Диэлектрик низкочастотный фольгированный	НФД-180-1 НФД-180-2	ТУ ИЖ 44—65
Диэлектрик тонкий фольгированный	ФДТ-1 ФДТ-2	ТУ ИЖ 47—64
Диэлектрик фольгированный для многослойного монтажа	ФДМ-1 ФДМ-2	ТУ ИЖ 51—66
Диэлектрик фольгированный для микроэлектронных устройств	ФДМЭ	ТУ ИЖ 54—67
Фольгированный травящийся диэлектрик для многослойного печатного монтажа	ФДМТ-1 ФДМТ-2	ТУ ИЖ 67—70
Стеклотекстолит фольгированный с повышенной прочностью сцепления и нагревостойкостью	СФ-200-1-50 СФ-200-2-50	ТУ ИЖ 63—69
Фольгированный диэлектрик для вычислительной техники	ФДВТ-1 ФДВТ-2 ФДВТ-К-1 ФДВТ-К-2	ТУ ИЖ-60—68 ТУ ИМО-509-005—68
Стеклотекстолит фольгированный с нанесенным светочувствительным слоем на фольгу	СФС-2	
Жесткий травящийся фольгированный диэлектрик формующийся	НФДОР-80	ТУ ИЖ 45—66

Таблица 2.5

Наименование материала	Толщина, мм	Прочность сцепления, г/см				Удельный вес, г/см <sup>3</sup>		Удельное поверхностное сопротивление, Ом		Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом/см		Диэлектрические потери и диэлектрическая проницаемость при частоте 10 <sup>6</sup> гц			пробивная напряженность, кВ/мм, не менее
		в исходном состоянии	после выдержки при 120° С в течение 15 ч	после выдержки в атмосфере с относительной влажностью 95—98% при +40° С в течение 48 ч	после выдержки в расплавленном припое при 245° С в течение 5 сек	с фольгой	без фольги	после сушки 4 ч при 70° С с относительной влажностью 65% и 6 ч при 20±2° С	после выдержки при 95±3% от-носительной влажности и 40° С в течение 48 ч	после сушки 4 ч при 70° С с относительной влажностью 65% и 6 ч при 20±2° С	после выдержки при 95±3% от-носительной влажности и +40° С в течение 48 ч	после сушки 4 ч при 70° С с относительной влажностью 65% и 6 ч при 20±2° С			
ФДМ-1	0,20± ±0,04	1300	1300	1300	1300	2,30— 3,20	1,50— 1,80	1014	1012	1014	1013	0,025—4,0	0,030	20	
ФДМ-2	0,25± ±0,04					3,50— 3,90	1,60— 1,90								
ФДТ-1	0,5± ±0,1	1200	1300	1200	1200	2,20— 3,20	1,5— 1,80	1014	1012	1014	1013	0,025—4,0	0,030	20	
ФДТ-2						3,50— 4,00	1,60— 1,90								
ФДМЭ-1	0,1± ±0,03	1200	1300	1200	1200	2,20— 3,00	1,50— 1,80	1014	1012	1014	1013	0,025—4,0	0,030	30	

изготовление одно- и двусторонних печатных плат, из которых можно прессовать различные многослойные печатные платы.

В качестве наполнителя для указанных материалов применяется стеклоткань марки Э толщиной 0,1; 0,06 и 0,025 мм. Применение стеклоткани в качестве наполнителя позволило получить диэлектрики с высокой механической прочностью и повышенной теплостойкостью. Для того чтобы максимально использовать положительные свойства стеклоткани (прочность, теплостойкость, диэлектрические показатели) в качестве связующего применяют эпоксидную смолу ЭД-6, имеющую хорошую адгезию к стекловолкну, обладающую достаточно высокой механической прочностью, хорошими диэлектрическими характеристиками, при отверждении дающую небольшую усадку и т. д.

Для отверждения смолы ЭД-6 применяется фенолформальдегидная смола. Стеклоткань пропитывается спиртотолуольным раствором, состоящим из эпоксидной и фенолформальдегидных смол в соотношении 70 : 30 из расчета сухой основы.

Для склеивания фольги с основанием используется фенолполивинилбутиральный клей марки БФ-4. При изготовлении ФДТ и ФДМ применяется клей с введенным пылевидным кварцем (40% кварца к сухой основе клея). Кварц вводят с целью повышения адгезии и теплостойкости клея. При изготовлении ФДМЭ клей БФ-4 используется без кварца, так как ввиду незначительной толщины диэлектрика отдельные частицы кварца могут продавливать материал при прессовании.

При изготовлении всех видов фольгированных диэлектриков используется медная электролитическая оксидированная фольга толщиной 50 мкм для стеклотекстолита марки ФДТ и толщиной 35 мк — для ФДМ и ФДМЭ.

Основные физико-механические и диэлектрические характеристики материалов приведены в табл. 2.5.

Фольгированные диэлектрики по требованию потребителей могут быть приравнены к пропитанной стеклоткани, технические характеристики которой даны в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Характеристика стеклоткани, %	Марки диэлектрика		
	ФДТ (3—0,1)	ФДМ (3—0,06)	ФДМЭ (3—0,025)
Содержание смолы	42—50	42—50	45—50
Содержание летучих веществ	0,4—1,5	0,9—1,5	1,5—2
Содержание растворимой смолы, не менее	80	80	80

Гибкий фольгированный диэлектрик марки ФГ применяется для изготовления гибких однослойных и многослойных печатных плат.



Гибкий диэлектрик ФГ может длительное время эксплуатироваться в интервале температур  $(-60) \div (+80)^{\circ}\text{C}$ .

Однослойные гибкие платы при параллельном расположении проводников шириной 2—2,5 мм выдерживают не менее 300 перегибов с радиусом закругления 3 мм и углом перегиба  $70^{\circ}$ . Однослойные и четырехслойные печатные платы при параллельном расположении проводников шириной 0,6 мм выдерживают не менее 150 перегибов при том же радиусе и угле закругления.

В качестве наполнителя для гибкого диэлектрика применяется капроновая ткань толщиной 90—100 мк. Капроновая ткань по сравнению с натуральным шелком, лавсаном или нитроном обеспечивает наибольшую гибкость материала. Капроновая ткань пропитывается лаком, состоящим из спиртового раствора фенолополивинилбутирального клея БФ-2 и толуольного раствора эпоксидной смолы ЭД-6, взятых в соотношении  $70 \div 30$  в пересчете на сухую основу.

Для склеивания 35 мкм медной электролитической фольги с капроновым основанием применяется фенолополивинилбутиральный клей БФ-4, смешанный с пылевидным кварцем (40% к сухой основе клея).

Для уменьшения усадки диэлектрика капроновую ткань перед пропиткой обрабатывают изопропиловым спиртом.

Основные физико-механические и диэлектрические характеристики гибкого фольгированного диэлектрика:

предел прочности при растяжении...	не менее $400 \text{ кг/см}^2$
толщина диэлектрика, мм:	
одностороннего ФГ-1 . . . . .	$0,12 \pm 0,03$
двустороннего ФГ-2 . . . . .	$0,16 \pm 0,04$
Удельный вес, $\text{г/см}^3$ :	
ФГ-1 с фольгой . . . . .	3,0—4,0
ФГ-2 с фольгой . . . . .	4,0—5,0
ФГ-1 и ФГ-2 без фольги . . . . .	1,3—2,0
Прочность сцепления фольги с основанием на полосу шириной 10 мм в исходном состоянии . . . . .	не менее $1000 \text{ г}$
после выдержки в течение 40 ч при $40 \pm 2^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности $95 \pm 3\%$ . . . . .	не менее $800 \text{ г}$
после погружения в припой при температуре $220 \pm 5^{\circ}\text{C}$ в течение 5 сек с маской . . . . .	не менее $800 \text{ г}$
Удельное поверхностное электрическое сопротивление, ом:	
в исходном состоянии . . . . .	не менее $10^{12}$
после выдержки в течение 48 ч при $40 \pm 2^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности $95 \pm 3\%$ . . . . .	не менее $10^{10}$
Удельное объемное электрическое сопротивление, ом·см, не менее:	
в исходном состоянии . . . . .	$10^{12}$
после выдержки в течение 48 ч при $40 \pm 2^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности $95 \pm 3\%$ . . . . .	$10^{10}$

Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте $10^6$ гц, не более:	
в исходном состоянии . . . . .	0,035
после выдержки в течение 30 суток при $40+2^\circ$ С и относительной влажности $95\pm 3\%$ . . . . .	0,11
Диэлектрическая проницаемость при частоте $10^6$ гц в исходном состоянии . .	не более 4,5
Электрическая прочность в направлении, перпендикулярном слоям, в исходном состоянии . . . . .	не менее 15 кВ/мм
Гибкий фольгированный диэлектрик по требованию потребителей может поставляться в комплекте с пропитанной капроновой тканью, технические характеристики которой следующие:	
содержание смолы . . . . .	47—53%
содержание летучих . . . . .	2—5%
содержание растворимой смолы . .	не менее 40%

В производстве МПП с высокой плотностью рисунка схемы (малой шириной проводников и малыми зазорами между ними) основной проблемой становится размерная нестабильность диэлектрических материалов, используемых в качестве основы.

Этим осложняется расчет допусков на линейные размеры МПП. Получить требуемые размеры (в пределах расчетных допусков) практически невозможно даже при самом тщательном ведении процесса обработки.

Например, для МПП с шагом координатной сетки 1,25 мм размерная нестабильность диэлектрического основания должна быть не более 0,03%, что на практике весьма трудно получить, особенно при изготовлении промежуточных слоев.

Другое требование к материалу основания МПП диктуется расширением рабочего диапазона частот. Оно заключается в необходимости снижения диэлектрической постоянной материала промежуточного слоя МПП с 5 до 2 без ухудшения прочих свойств. С этой целью в настоящее время ведутся разработки специальных пленок для гибких схем из таких материалов, как политетрафторэтилен, высокотемпературные полиамиды и др.

При разработке новых слоистых материалов для печатных плат делаются попытки вводить активирующие добавки в смолу, применяемую в качестве связующей. Эти добавки по своей природе являются катализатором для процесса химического меднения и одновременно повышают адгезию гальванически наносимого слоя меди к материалу. Такие материалы позволяют не применять хлориды олова или палладия в процесс металлизации отверстий в платах.

В связующее вводят наполнитель, благодаря чему при механической обработке образуется шероховатая поверхность, обеспечивающая хорошую прочность сцепления химической меди с основным материалом. Компонентами наполнителя могут служить закись или окись меди или смесь этих порошков, которая восстанавливается до металлической, образуя каталитические

центры. Возникновение каталитических центров обеспечивает более прочное сцепление меди и увеличение скорости процесса химического меднения.

Металлизация внутренних поверхностей отверстий в таких материалах протекает значительно легче и совсем незначительно повышает стоимость готовых изделий.

Для изготовления многослойных печатных плат, как уже было сказано выше, применяют тонкие фольгированные пластики.

Фольгированные медью слоистые пластики не должны иметь деформации размеров, должны быть термостойки, обладать требуемой стойкостью к химикатам, не поглощать влаги.

Таковыми пластиками, обладающими необходимыми электрическими и механическими характеристиками, являются стекло-текстолитовые пластики, пропитанные эпоксидной смолой.

Для соединения слоев платы также применяют склеивающие прокладки, пропитанные эпоксидной смолой.

Эпоксидная смола в этих прокладках имеет полутвержденное состояние. Склеивание платы производится нагреванием под давлением, в результате которого эпоксидная смола из жидкого состояния переходит в твердое.

## **§ 2. 2. Общие требования и нормы на изготовление фотооригиналов**

При разработке печатных схем используются всевозможные рисунки печатного монтажа, которые содержат линейные и фигурные элементы. Наиболее распространенные виды элементов рисунка печатных плат представлены на рис. 2.1.

Здесь, к линейным элементам отнесены:

*А* — отрезки прямых, параллельных осям координат; *Б* — отрезки прямых с углами наклона, кратными  $45^\circ$ ; *В* — отрезки прямых с углами наклона, кратными  $15^\circ$ ; *Г* — отрезки прямых с любыми углами наклона; *Д* — дуги с центральными углами, кратными  $45^\circ$  и начинающиеся в любой точке окружности, а оканчивающиеся обязательно на осях координат; *Е* — дуги любой длины и целые окружности.

К фигурным элементам относятся:

*Ж* — фигуры, ограниченные прямоугольниками со сторонами, параллельными осям координат; *З* — фигуры, ограниченные прямоугольниками, наклоненными к осям координат; *И* — фигуры, ограниченные прямоугольными треугольниками, катеты которых параллельны осям координат; *К* — фигуры, ограниченные тупоугольными треугольниками, одна сторона которых параллельна одной из осей координат; *Л* — фигуры, ограниченные дугами и целыми окружностями.

Каждый фигурный элемент характеризуется площадью, а линейный — длиной.

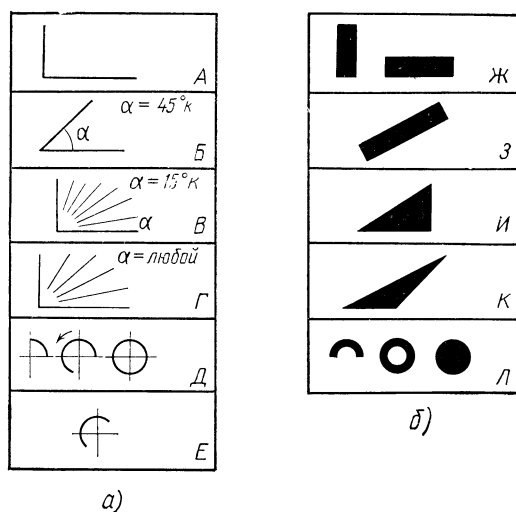


Рис. 2.1. Виды элементов рисунка печатного монтажа:  
а — линейные; б — фигурные

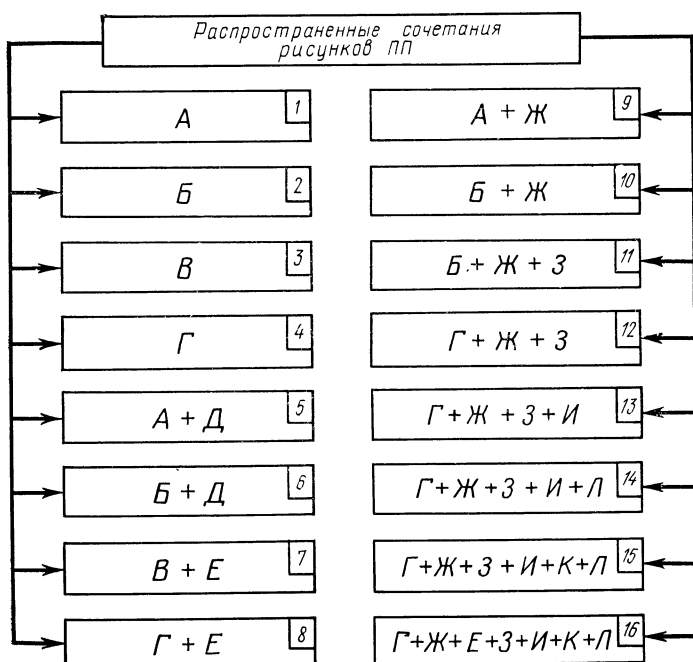


Рис. 2.2. Наиболее распространенные сочетания рисунков печатного монтажа

Изучение топологии различных типов печатных плат показало, что в большинстве случаев вышеприведенных элементов достаточно, чтобы воспроизвести рисунок любой сложности комбинацией их в нужной последовательности.

Наиболее распространенные сочетания элементов рисунков печатных плат приведены на рис. 2.2.

Частота повторения различных фигур элементов в полосковых печатных платах приведена на рис. 2.3. Здесь под элементами полосковых печатных плат понимаются полосы различных конфигураций, определяющие электрические параметры схемы.

Для изготовления фотооригиналов рисунков печатных плат существует несколько методов. Рассмотрим три из них.






<i>Фигуры</i>					
<i>Содержание в %</i>	26	9	42	11	12

Рис. 2.3. Частота повторения различных фигур элементов в полосковых печатных платах

1. Вычерчивание изображения на ватмане или специальной пленке.

2. Накладка контрастных полос (аппликация).

3. Метод скрайбирования.

Фотооригиналы выполняются, как правило, тушью или гуашью на жестких подложках, имеющих стабильные размеры (алюминий, силикатное стекло, оргстекло и др.) и вычерчиваются обычно в масштабах 2 : 1, 4 : 1, специально подготовленных чертежниками.

Для односторонних плат фотооригиналы выполняются на одной стороне ватмана (пленки), для двусторонних — на двух сторонах одного листа по общей разметке центров отверстий.

Недостаток данного метода — в высокой трудоемкости и сравнительно невысокой точности рисунка, которая ограничена разрешающей способностью человеческого глаза ( $\pm 0,2$  мм).

Метод аппликаций состоит в использовании специальной калиброванной светонепроницаемой липкой ленты различной ширины, выполняемой с допуском  $\pm 0,25$  мм.

Ленты различной конфигурации могут приклеиваться к специальным подложкам (целлулонд, винипроз и др.) для получения требуемого рисунка схемы.

К недостаткам метода следует отнести трудности расположения ленты с требуемой точностью и невозможностью автоматизации этого процесса.

Метод скрайбирования осуществляется резанием темной непрозрачной эмали, нанесенной на стеклянную подложку. Данный

метод обеспечивает наиболее точное выполнение рисунка схемы.

Фотооригиналы выполняются, как правило, в позитивном изображении: проводники и экраны — черные (цветные), пробельные места — белые.

При наличии больших экранов, занимающих всю или большую часть площади платы, фотооригиналы (во избежание коробления листа) рекомендуется выполнять в негативном изображении.

Изображение на фотооригинале выполняется контрастным, без просветов, белых точек, подтеков, смазанных линий и пятен. Края проводников, контактных площадок, экранов изображаются четкими и ровными. В центре каждой контактной площадки (в том числе и у отверстий в зоне экрана) рекомендуется оставлять незачерненный кружок минимального размера, если сверление отверстий производится по разметке.

Ширина печатных проводников на фотооригинале должна быть выполнена с учетом возможного сужения линий при контактном репродуцировании, нанесении и проявлении фоторезиста, а также подтравливания. Уменьшение ширины проводников становится заметным при ширине, меньшей 0,5 мм. Если фотооригинал изготавливается липкой лентой, то трудно бывает компенсировать сужение линий на фотошаблоне намеренным увеличением их ширины на макете, так как лента обычно имеет стандартную ширину. Кроме того, ширина ленты несколько меняется в процессе изготовления макета из-за натяжений и давлений, а при контактном репродуцировании под отслоившуюся ленту может проникнуть свет, что также приводит к сужению проводника.

Ширину печатных проводников, как правило, увеличивают на  $(0,05 \div 0,1) \cdot M$  относительно ширины, заданной чертежом, а зазоры выполняют в соответствии с техническими требованиями чертежа. Например, если в технических требованиях чертежа указывается минимальная ширина проводника  $0,5 \cdot M$  и минимальный зазор  $0,7 \cdot M$ , то на фотооригинале следует вычерчивать проводник шириной  $0,55 \cdot M$  и зазор между проводниками не менее  $0,7$  мм, где  $M$  — масштаб увеличения фотооригинала.

При фотохимическом методе изготовления печатных плат контактные площадки в узких местах выполняются наружным диаметром, равным диаметру отверстия плюс  $0,45 \cdot M$ .

Края контактных площадок микромодульного узла в узких местах выполняются из расчета:

а)  $\frac{d_{\text{отв}}}{2} + (0,45 \cdot M)$  — в местах расположения контактных площадок на расстоянии  $2,5 \cdot M$  без проложенного между ними проводника;

б)  $\frac{d_{\text{отв}}}{2} + (0,3 \cdot M)$  — в местах прокладки одного проводника на расстоянии  $2,5 \cdot M$ .

В качестве примера приведем для отдельных методов правила изготовления контактных площадок.

При комбинированном (позитивном и негативном) методе изготовления печатных плат контактные площадки в свободных местах выполняются наружным диаметром, равным диаметру зенковки плюс  $1,5 \cdot M$ , но не более  $4 \cdot M$ .

Контактные площадки в узких местах, а также контактные площадки микромодульного узла выполняются наружным диаметром, равным диаметру зенковки.

При сеточно-химическом методе изготовления печатных плат контактные площадки в свободных местах выполняются внутренним диаметром, равным  $0,8 \cdot M$  и наружным диаметром, равным диаметру отверстия, плюс  $(3,0 \pm 0,2) \cdot M$ .

Контактные площадки в узких местах выполняются внутренним диаметром, равным  $0,8 \cdot M$ , и шириной в узком месте, равной минимальному размеру, оговоренному в чертеже.

При подготовке фотооригиналов для МПП на каждый слой МПП изготавливают отдельный фотооригинал, на котором вычерчивают все элементы данного слоя.

На фотооригинале каждого слоя МПП наносятся базовые элементы, определяющие взаимное расположение слоев относительно друг друга. Вычерчивание фотооригиналов производят по предварительной разметке центров монтажных и переходных отверстий согласно чертежу в соответствии с выбранным масштабом.

На фотооригинале указывают расстояния между центрами базовых элементов, необходимые для контроля размеров при фотографировании или для проверки полученных фотошаблонов.

На фотооригиналах за пределами изображений печатной схемы допускается нанесение надписей с технологическими указаниями, если они необходимы. Так, например, указываются дополнительные сведения:

- а) изготовитель и шифр изделия;
- б) масштаб;
- в) метка обреза;
- г) центры отверстий и т. д.

В качестве основного оборудования, используемого при изготовлении фотооригиналов, применяются координатно-расточные станки, универсальные измерительные микроскопы, а также координатографы. В качестве инструмента и приспособлений при изготовлении фотооригинала используются:

- а) установочные микроскопы;
- б) пунктирные иглы с различной шириной штриха;
- в) рапидографы;
- г) рисовальные устройства типа рейсфедера;
- д) приспособления для рисования окружностей;
- е) граверный инструмент с режущими кромками из сапфира;
- ж) торцевые фрезы для скрайбирования;
- з) специальные резцы и др.

Координатографы снабжаются либо отсчетными устройствами для удобства работы с ними, либо системами программного управления, имеющими также отсчетные цифровые устройства.

Некоторые координатографы комплектуются специализированными вычислительными машинами.

Общим недостатком методов изготовления фотооригиналов является невозможность получения негатива (позитива) фотошаблона без промежуточного этапа масштабного фотографирования, что исключает полную их автоматизацию.

## **§ 2. 3. Изготовление фотошаблонов с помощью ЭВМ**

Возрастающие требования миниатюризации, сложность и высокая плотность расположения элементов на плате, а также расширение диапазона частот налагают жесткие требования на величину и точность расположения печатных проводников и других элементов печатной схемы. Удовлетворение этих требований при изготовлении большого числа фотошаблонов обычными методами становится почти невозможным. Большую часть проблем, связанных с точностью рисунка печатной схемы, можно устранить использованием для этих целей специальных машин-автоматов с вычислительными устройствами.

В связи с этим возник новый способ изготовления рисунков печатных схем с помощью засветки светочувствительных материалов световым лучом, минуя промежуточные стадии получения фотооригиналов и масштабного фотографирования, т. е. способ изготовления фотошаблонов в масштабе 1 : 1 с достаточно высокой точностью и производительностью.

Отправным моментом при автоматизированном производстве фотошаблонов является получение первоначального эскиза соединений изготавливаемой схемы с весьма точно очерченными границами. Эта информация соответственно обрабатывается и преобразуется в удобную для введения в машину форму. Один из наиболее простых методов заключается в том, что оператор перемещает специальный механизм по столу, на котором находится эскиз схемы, а машина производит запись расположения элементов и проводников в двухкоординатной системе. Необходимая дополнительная информация, например данные о ширине проводников, диаметре отверстий и т. п. программируются вручную и вводятся в память машины. Таким образом, обеспечивается полная информация для машины, изготавливающей фотооригинал печатной платы.

Однако этот метод не решает проблемы ускорения процесса изготовления фотошаблонов и не является экономичным, если рисунок схемы достаточно сложен, особенно при изготовлении шаблонов для многослойных печатных плат.

Существенное ускорение изготовления фотошаблонов и повы-



шение их точности возможно только созданием систем и программ, которые позволяли бы осуществлять вычерчивание фотошаблонов с помощью вычислительных машин, т. е. непосредственно в момент машинного проектирования платы.

В большинстве разрабатываемых для этих целей систем программирование начинается с определения логики соединений, а затем машина анализирует имеющуюся информацию о схеме, разбивает всю систему на отдельные блоки, определяет физическое расположение элементов схемы на отдельных печатных платах, схему взаимных соединений и выдает информацию в надлежащей форме непосредственно в машину, осуществляющую вычерчивание фотооригинала. По записям проведенного машиной анализа конструктор может при необходимости вводить коррекцию в процессе вычерчивания печатной схемы на любой ее стадии.

Наряду с сокращением времени применение таких программ дает возможность осуществлять непрерывный контроль входных данных, что исключает ошибки.

Другим преимуществом является выдача данных для управления контрольной аппаратурой и механизмом сверления отверстий в печатных платах, а также запись рисунка печатной схемы на перфоленду (или другой носитель) для последующего его воспроизведения. Обычно для этих целей используются фотокоординатографы или рисующие автоматы с программным управлением. Таким образом, чертеж печатной платы, записанный на перфоленте, легко воспроизводится в виде фотошаблона на фотопластинке.

К настоящему времени указанные пути и способы находят свое отражение в новом развивающемся направлении — проектировании радиоэлектронной аппаратуры с помощью ЭВМ или машинном проектировании радиоэлектронной аппаратуры.

Наибольшее распространение машинное проектирование нашло в области цифровой аппаратуры, так как ее работа наиболее просто поддается формализованному описанию.

В общем виде процесс машинного проектирования приведен на структурной схеме рис. 2.4.

Исходной информацией процесса, поставляемой человеком, является общий алгоритм работы устройства, система элементов (модулист) и возможные схемные и конструктивные ограничения.

ЭВМ решает все внутренние вопросы проектирования, связанные с функциональными и принципиальными схемами с разбивкой на узлы, с разводкой проводников (трассировка) по отдельным слоям и воспроизведением рисунка слоев печатной платы в том случае, если все эти процессы поддаются математическому описанию.

Основные успехи машинного проектирования в настоящее время относятся к технологии получения фотошаблонов, а именно:

а) автоматизированной разводке проводников (трассировке) принципиальных схем узлов (создание рисунков слоев многослойных плат);

б) автоматизированному изготовлению фотошаблонов (воспроизведению рисунков слоев многослойных плат).

Используемые алгоритмы разводки проводников (трассировки) позволяют получить рисунки отдельных слоев со следующими особенностями:

а) все проводники схемы составлены только из отрезков прямых линий;

б) траектории проводников возможны только по направлениям, параллельным осям координат и под углом, кратным  $45^\circ$  к ним.

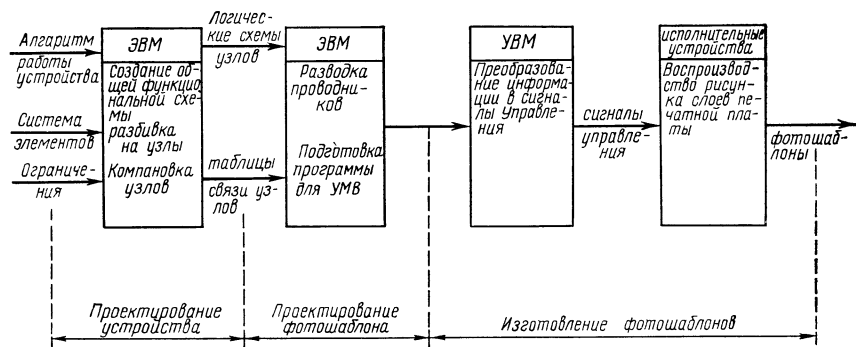


Рис. 2.4. Структурная схема процесса машинного проектирования печатной платы

В случаях сложной логической схемы с большим числом связей автоматизированная разводка проводников (трассировка) иногда может не дать реализацию всех связей. В таких случаях оставшееся число связей раскладывается конструктором вручную.

Конечным этапом проектирования является чертеж или программа рисунка платы, используемая далее на этапе изготовления фотошаблона на автоматизированных исполнительных устройствах. Программа представляет собой стандартный программ-носитель (перфокарты, перфоленты) с закодированной информацией о конкретной последовательности действий исполнительных устройств.

В случае машинного проектирования программа получается автоматически на выходе ЭВМ, в случае ручной разводки — готовится программистом на устройстве подготовки программ (координатоскопы).

В процессе автоматизированной разводки на ЭВМ могут быть также получены программы для работы автоматизированных устройств контроля печатных плат и станков для сверления отверстий в них.

При воспроизведении рисунков печатных плат на автоматизированных установках используются, в основном, три процесса:

- 1) вычерчивание на бумаге;
- 2) скрайбирование непрозрачной эмали, нанесенной на стекло;
- 3) экспонирование световым лучом на фотопленке или пластине.

Т а б л и ц а 2.7

Наименование	Тип	Характеристика
Координатограф с программным управлением	ЭМ-703	<p>Приспособлен для черчения, скрайбирования, экспонирования световой головкой.</p> <p>Траектории линий — прямые с любым наклоном, дуги окружности.</p> <p>Заготовка: стекло, пленка.</p> <p>Размер стола — <math>1200 \times 1200</math> мм.</p> <p>Скорость — до 5500 мм/мин.</p> <p>Точность — 0,05 мм.</p> <p>Занимаемая площадь — <math>30 \text{ м}^2</math></p>
Координатограф с программным управлением	Минск-2000	<p>Приспособлен для экспонирования.</p> <p>Траектории линий — прямые под углом, кратным <math>45^\circ</math> к осям координат.</p> <p>Заготовка — фотопластины.</p> <p>Размер стола — <math>500 \times 500</math> мм.</p> <p>Скорость — 600 мм/мин.</p> <p>Точность — 0,05 мм.</p> <p>Занимаемая площадь — <math>20 \text{ м}^2</math> в комплекте с координатоскопом Минск-2002 *</p>
Координатограф с программным управлением и устройством кодирования чертежей	Минск-2001	<p>Приспособлен для экспонирования фотошаблонов и кодирования чертежей.</p> <p>Траектория линий — прямые под углом, кратным <math>45^\circ</math> к осям координат.</p> <p>Заготовка — фотопластины.</p> <p>Размер стола — <math>500 \times 500</math> мм.</p> <p>Скорость — 1200 мм/мин.</p> <p>Точность — 0,04 мм.</p> <p>Занимаемая площадь — <math>20 \text{ м}^2</math></p>
Координатограф с программным управлением	Альфа (ПК-1М)	<p>Приспособлен для вычерчивания и экспонирования.</p> <p>Траектория линий — любые из прямых и окружностей.</p> <p>Скорость — 300 мм/мин.</p> <p>Точность — 0,05 мм.</p> <p>Размер стола — <math>900 \times 700</math></p>

\* В случае выполнения чертежа печатной платы ручной разводки с учетом особенностей машинного проектирования процесс подготовки программ может быть автоматизирован с помощью так называемых координатоскопов. Принцип работы таких устройств заключается в последовательном ручном обходе читающей головкой всех проводников и целых фрагментов рисунка, чертежа платы в автоматическом преобразовании этих перемещений в электрические сигналы и автоматической перфорации на программноносителе в коде и адресе применяемого координатографа.

Основным технологическим оборудованием для выполнения операций по воспроизведению рисунка печатной платы являются координатографы с программным управлением, оснащенные в зависимости от применяемой технологии чертежными, резцовыми или световыми головками.

Для работы координатографа необходимы: заготовка и программа рисунка, выходным продуктом является субшаблон (шаблон, требующий дополнительной фотообработки).

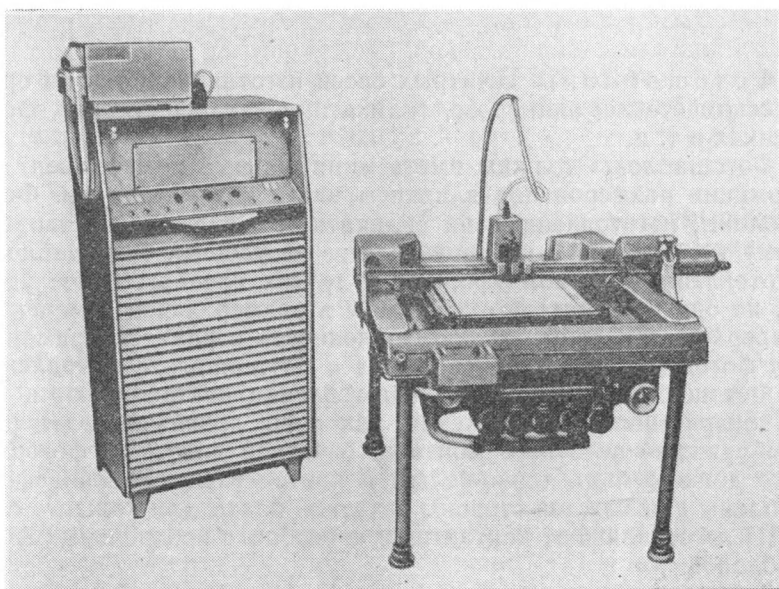


Рис. 2.5. Координатограф с программным управлением типа «Альфа»

При выборе конкретного типа координатографа для изготовления фотошаблонов необходимо оценивать четыре основных фактора:

1) технические возможности (приспособленность к определенному виду технологии, размер стола, наличие комплекта инструмента, возможность воспроизводства различных траекторий, материал заготовки и т. п.);

2) производительность (скорость перемещения по координатам, времени смены инструмента, времени ввода кадра программы и т. п.);

3) точность (дискретность, точность обработки координат, точность траекторий, точность отдельных фрагментов и т. п.);

4) эксплуатационные качества (программоноситель, габариты, занимаемая площадь, стоимость, надежность, эстетичность и т. п.).

Широкое применение находят координатографы с программным управлением, выпускаемые отечественной промышленностью. Основные характеристики этих координатографов даны в табл. 2.7.

На рис. 2.5 изображен координатограф с программным управлением типа «Альфа».

## **§ 2. 4. Требования к фотошаблонам. Контроль и хранение**

Фотошаблоны печатных слоев изготавливаются на органическом стекле, винипрозе, силикатных фотопластинках, фотопленках и т. д.

Фотошаблоны должны иметь минимальный коэффициент деформации размеров под влиянием влаги и температуры. Фотошаблоны, изготовленные на силикатном стекле, удовлетворяют этому требованию, но в производстве не удобны. Фотошаблоны, изготовленные на полиэфирных и других пленках, более удобны, но они недостаточно устойчивы в размерах при изменениях температуры и влаги. В промышленности стремятся применять для фотошаблонов малоусадочные и безусадочные фотопленки.

Фотошаблоны в процессе изготовления контролируются как по контрастности изображения, так и по линейным размерам. Изображение печатного монтажа печатной платы на фотошаблоне должно быть черно-белым и контрастным. Рабочие фотошаблоны для каждой стороны печатной платы или каждого слоя МПП изготавливают контактным способом с контрольных фотошаблонов.

Технологические (базовые) отверстия в фотошаблонах сверлятся (пробиваются) в специальных приспособлениях. Фиксирование фотошаблонов и заготовки платы в приспособлении производится по базовым элементам печатной схемы.

При совмещении фотошаблонов двухсторонней печатной платы смещение центров отверстий допускается в пределах  $\pm 0,05$ — $0,1$ . Проверка производится совмещением фотошаблонов, соответствующих обеим сторонам платы, эмульсионной стороной внутрь и просмотром их в проходящем свете на специальном столе или по контрольному отпечатку с последующим сверлением контрольных отверстий.

При хранении фотошаблонов должны соблюдаться специальные условия, обеспечивающие сохранность эмульсионного слоя и стабильность линейных размеров, т. е. хранение рекомендуется производить при температуре  $20 \pm 5^\circ \text{C}$  и относительной влажности  $65 \pm 5\%$ .

Контрольный экземпляр фотошаблона, предназначенный для размножения рабочих фотошаблонов, должен изготавливаться только на силикатных фотопластинках.

Переход на автоматизированные методы изготовления фотошаблонов выдвигает следующие дополнительные требования к ним:

а) фотошаблоны должны быть изготовлены на заготовках с жесткой основой (безусадочные фотопленки или силикатные фотопластинки);

б) операция воспроизведения рисунка должна быть произведена с точной фиксацией заготовки в приспособлении, т. е. с точной привязкой рисунка к внешним базам фотошаблона;

в) система базирования заготовки при воспроизведении рисунка должна быть единой для всего дальнейшего технологического процесса изготовления многослойной печатной платы (вплоть до операции сверления отверстий в плате);

г) в качестве такой системы может быть принято базирование на штифтах, базирование в угол и т. д.

## **§ 2. 5. Основные промышленные способы изготовления печатных плат**

Наибольшее распространение в промышленном производстве получили одно- и двусторонние печатные платы.

Только в нашей стране в 1970 г. было произведено более 100 млн. штук печатных плат различного назначения.

Сейчас известно более 100 различных технологических способов изготовления печатных плат. Однако по мере роста объема промышленного выпуска фольгированных диэлектриков количество технологических способов производства плат значительно сокращалось. Такие, например, способы как фотоэлектрохимический, прессования, армирования, переноса и другие уже не применяются.

Современные промышленные способы изготовления печатных плат основаны на использовании фольгированных диэлектриков, т. е. на получении токопроводящего рисунка схемы методом травления. Разновидности способов сводятся к методу получения рисунка, например, фотоспособом или трафаретной печатью.

Основных промышленных способов изготовления печатных плат — два:

1. Способ травления фольгированного диэлектрика без металлизации отверстий. Применяется, главным образом, для изготовления односторонних печатных плат.

2. Способ травления двустороннего фольгированного диэлектрика с электрохимической металлизацией отверстий. Применяется для изготовления двусторонних печатных плат.

При изготовлении односторонних печатных плат для нанесения рисунка схемы широко используется метод трафаретной, или сетчатой, печати и последующее травление фольги. Изготовление

печатных плат таким способом получило в промышленности название сеточно-химического метода.

При изготовлении двусторонних печатных плат, главным образом, используется метод фотопечати с последующим травлением, т. е. фотохимический метод. Отверстия же в плате металлизуются электрохимическим методом. Таким образом, при изготовлении двухсторонних печатных плат используются два ранее известных метода — фотохимический и электрохимический, поэтому этот метод получил название комбинированного метода.

В свою очередь комбинированный метод изготовления печатных плат имеет две разновидности:

- 1) позитивный вариант,
- 2) негативный вариант.

Самое широкое распространение в промышленности получили печатные платы из одностороннего фольгированного гетинакса или стеклотекстолита.

Это объясняется прежде всего относительной простотой технологического процесса их производства, высокой степенью его механизации, и, следовательно, малой трудоемкостью и достаточно высокой надежностью плат в эксплуатации.

Платы, изготавливаемые из одностороннего фольгированного гетинакса, находят наиболее широкое применение в конструкциях бытовой радиоэлектронной аппаратуры.

## **§ 2. 6. Сеточно-химический способ изготовления печатных плат**

Данный способ широко используется при массовом производстве печатных плат из одностороннего фольгированного диэлектрика, чаще гетинакса. Как правило, изготовление плат осуществляется на универсальных механизированных линиях, состоящих из отдельных автоматов и полуавтоматов, последовательно выполняющих операции технологического процесса.

Весь процесс изготовления плат складывается из следующих основных технологических операций:

1. Раскрой материала и изготовление заготовок плат.
2. Нанесение рисунка схемы кислотостойкой краской.
3. Травление схемы.
4. Удаление защитного слоя краски.
5. Крацовка.
6. Нанесение защитной эпоксидной маски.
7. Горячее лужение мест пайки.
8. Штамповка.
9. Маркировка.

С целью максимальной механизации и автоматизации процесса все печатные платы изготавливаются (проходят обработку на линии) на одногабаритных технологических заготовках.

В этом случае на технологической заготовке komponуется 2—3, а иногда и более плат, т. е. используется метод групповой обработки.

Резка материала на технологические заготовки (полосы) производится на дисковых ножницах (рис. 2.6).

Этот метод позволяет, в отличие от резки на дисковой пиле, повысить производительность до 4,5 м/мин, полностью исключить засорение атмосферы помещения гетинаксовой или стеклотекстолитовой пылью и сократить расход материала.

Из полос материала на кривошипном прессе штампуются технологические заготовки плат. Заготовки имеют технологический припуск  $2 \div 6$  мм по контуру. В заготовках одновременно вырубается технологические базовые отверстия, которые в большинстве случаев в готовых печатных блоках служат крепежными.

Заготовки плат поступают на автомат сеткографической печати. На рис. 2.7 изображен автомат сеткографической печати, который кислотостойкой краской наносит рисунок схемы.

Сеткографический станок-автомат имеет два загрузочных бункера, в которые закладывается по 300 заготовок плат. Заготовки по одной штуке забираются движущимся двусторонним вакуумным столом, который подает их в рабочую позицию нанесения рисунка, т. е. под сетку-трафарет. Как только заготовка встала в рабочую позицию, автоматически осуществляется движение ракеля, который продавливает краску сквозь сетку-трафарет. После этого стол поворачивается, забирая плату из-под сетки-трафарета, вакуум снимается и плата с нанесенным рисунком по склиту спадает в сушило.

Такой же цикл выполняется на другой стороне стола. Платы поочередно забираются из левого и правого бункеров и соответственно сбрасываются после нанесения рисунка в левое и правое терморадационное сушило.

Время одного цикла — 8 сек, ритм выхода платы — 4 сек. Производительность автомата — 900 оттисков в час.

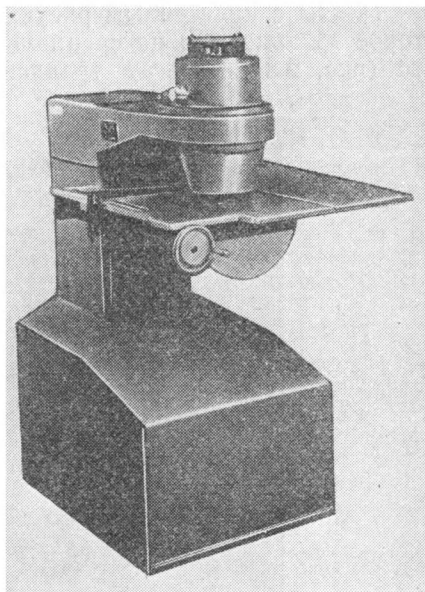


Рис. 2.6. Дисковые ножницы для резки материала на заготовки



Автомат регулируется на различные размеры плат (заготовок) от  $190 \times 50$  мм до  $400 \times 200$  мм. Обслуживается автомат одним наладчиком, в условиях массового производства два автомата обслуживает один наладчик.

Габариты агрегата (автомат и два сушила)  $9500 \times 2000 \times 1700$  мм. Привод станка электропневмогидравлический.

Платы с нанесенным рисунком подвергаются травлению, которое выполняется на специальном полуавтоматическом агрегате (рис. 2.8). Агрегат травления конструктивно представляет

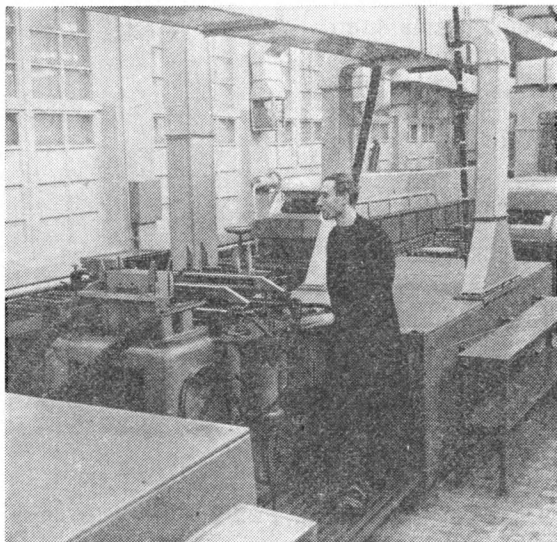


Рис. 2.7. Автомат сеткографической печати

собой поточную линию, через которую на жгутовом транспортере проходят платы. В процессе движения производится их обработка. Травление осуществляется раствором хлорного железа с плотностью  $1,35 \div 1,40$ .

На агрегате выполняются следующие операции:

- а) вытравливание фольги в местах, не защищенных краской;
- б) удаление остатков травящего раствора с плат методом обдува струей воздуха;
- в) промывка плат водой двусторонним дождеванием;
- г) сушка плат струей горячего ( $60 \div 70^\circ \text{C}$ ) воздуха.

Для интенсификации процесса травления раствор хлорного железа, подаваемый насосом в распылительные форсунки, подогревается до  $35 \div 45^\circ \text{C}$  паром в специальных баках. Все основные узлы агрегата выполнены из титановых сплавов или немагнитных материалов (винипласт, оргстекло, резина и др.), стойких в водном растворе хлорного железа.

Скорость движения транспортера может регулироваться в диапазоне  $0,8 \div 0,5$  м/мин специальным ступенчатым редуктором. Она определяется травящей способностью раствора хлорного железа. Полезная ширина транспортера 450 мм. Габариты обрабатываемых плат от  $50 \times 150$  мм до  $450 \times 450$  мм. Производительность агрегата  $13,5 \div 21,5$  м<sup>2</sup>/ч. Обслуживается агрегат одним рабочим. Габариты агрегата  $8300 \times 1040 \times 1620$  мм, рабочий уровень транспортера (позиция загрузки) на высоте 1260 мм.

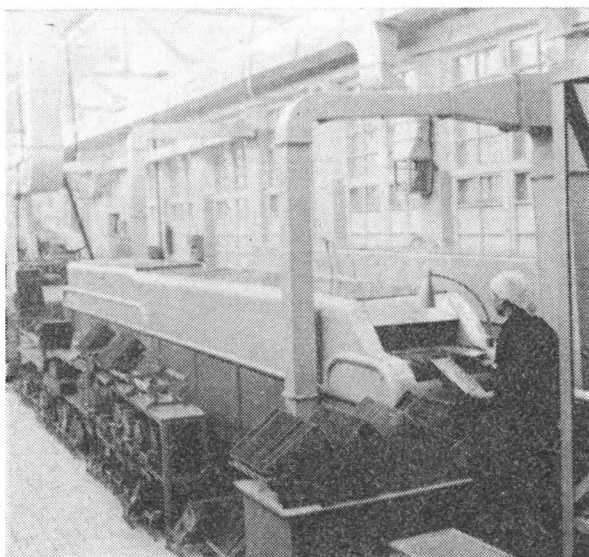


Рис. 2.8. Агрегат травления рисунка печатной платы

Следующая операция — удаление кислотостойкой защитной краски.

Удалять краску можно различными органическими растворителями: ацетоном, растворителем № 646, уайт-спиритом, дихлорэтаном, трихлорэтиленом, четыреххлористым углеродом и др. Однако все процессы с перечисленными растворителями связаны с определенной вредностью для организма человека, пожаро- и взрывоопасностью. Поэтому при массовом механизированном или автоматизированном производстве не целесообразно и не безопасно использовать органические растворители.

В промышленности разработан и применяется способ удаления краски гидropульпой, по принципу гидropескоструйной обработки. Специальный полуавтоматический агрегат, изображенный на рис. 2.9, производит удаление краски струей водно-песчаной пульпы, поступающей из сопел специальной гидropушки, под давлением 1,5 атм. Платы загружаются в приемный механизм и

с помощью группы подающих вертикально расположенных резиновых валиков транспортируются через камеры агрегата. В гидрорескоструйной камере удаляется краска, затем платы последовательно попадают в камеру промывки и сушки. Такой способ удаления краски полностью исключает все неприятности указанных химических способов. Кроме этого, одновременно с краской с печатных проводников удаляется окисная пленка.

На данной установке можно обрабатывать платы размером от  $200 \times 50$  мм до  $500 \times 250$  мм. В установке предусмотрены три

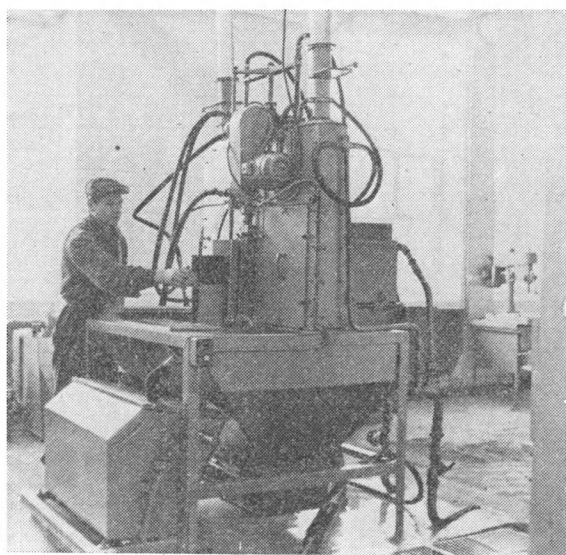


Рис. 2.9. Агрегат для удаления краски гидропulpой

скорости подачи заготовок 2,1; 1,56 и 1,12 м/мин, обеспечивающие среднюю производительность 120 погонных метров в час или  $18 \text{ м}^2/\text{ч}$ . Установка обслуживается одним рабочим.

После удаления краски платы проходят операцию крацовки с целью удаления всех загрязнений и окислов с поверхности печатных проводников, а также придания плате товарного вида и подготовки ее к нанесению эпоксидной маски.

Операция крацовки выполняется на специальных полуавтоматических станках, изображенных на рис. 2.10. В станке установлены три крацовочные латунные щетки, на выходе станка стоят четыре электронагревателя для сушки плат. Каждая щетка приводится в движение своим электродвигателем. Высота установки щеток от поверхности плат регулируется винтовой передачей.

Щетка вместе с валом быстросъемная. Платы в станок подаются приводными резиновыми и металлическими роликами (рольганг с принудительным приводом). Максимальный диаметр крацовочных щеток — 125 мм. Диаметр подающих роликов — 50 мм. Скорость передвижения плат — 6,1 м/мин, максимальная ширина обрабатываемой платы — 400 мм. Габариты станка 2000×1000 мм. Обслуживается станок одним рабочим.

Следующая операция технологического процесса — нанесение термостойкой защитной эпоксидной маски. Эпоксидная маска обеспечивает защиту печатных проводников

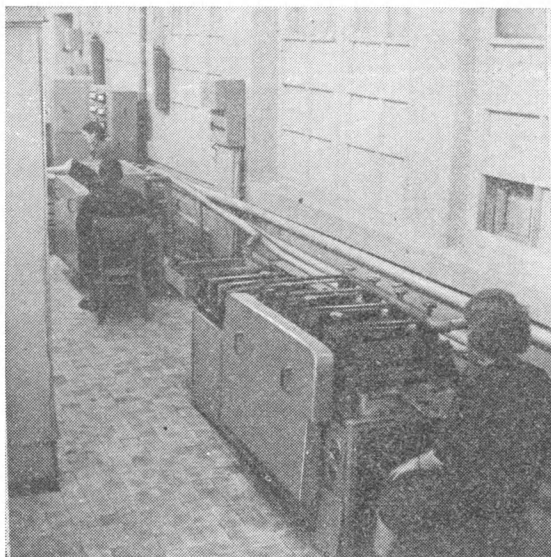


Рис. 2.10. Станок крацовки поверхности печатных плат

платы от облуживания и термоудара в процессе групповой пайки, защищает проводники от коррозии и улучшает электроизоляционные свойства печатной платы. Эпоксидная маска наносится методом сеткографии (трафаретной печати), так же как наносится рисунок схемы. Обычно это делается на ручных станках. В массовом производстве может выполняться на сеткографическом автомате.

Технологическим недостатком эпоксидной композиции является ее малый срок жизни. При работе на автомате каждые 15 мин приходится тщательно промывать сетку-трафарет от остатков густеющей (полимеризующейся) смолы. Для этой цели в автомате предусмотрен пневматический подъем рамки с сеткой над столом на 300 мм.

После нанесения эпоксидной маски и полимеризации платы поступают на автоматический агрегат горячего лужения, который представлен на рис. 2.11.

На этом агрегате платы проходят операции лужения, промывки и сушки. Печатные платы стопкой (рисунком вниз) загружаются в автоматический бункер, из которого специальным толкателем по одной подаются под валки привода. Передвигаясь в торец одна за другой по направляющим, платы проходят последовательно над двумя волнами припоя (сплав типа Розе, температура плавления  $+96^{\circ}\text{C}$ ). Сплав Розе защищает покрытия

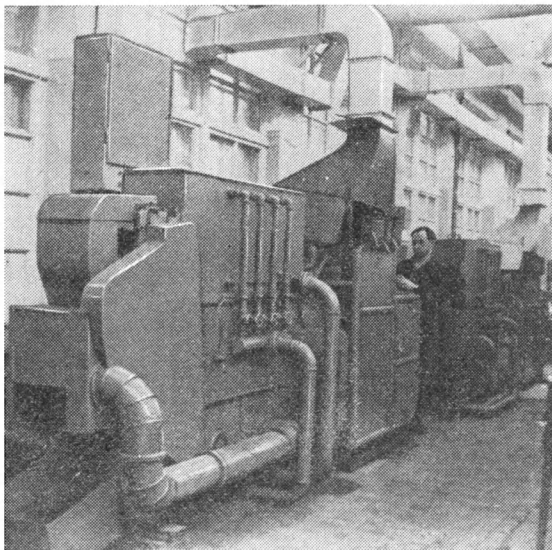


Рис. 2.11. Автоматический агрегат горячего лужения печатных плат

проводников печатной платы от окисления во время ее хранения до момента последующей обработки.

Излишки припоя снимаются ракелем из термостойкой резины и возвращаются в ванну с припоем. Из жестких направляющих (по прохождении ракеля) платы падают на жгутовый транспортер, двигаясь по которому последовательно проходят операции промывки горячей водой ( $60\div 70^{\circ}\text{C}$ ) и сушки горячим воздухом ( $80\div 90^{\circ}\text{C}$ ).

Скорость движения плат в агрегате  $0,7\div 2$  м/мин, температура припоя  $145\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Максимальная ширина обрабатываемых плат — 250 мм. Производительность установки от 4 до 16 м<sup>2</sup>/ч зависит от размеров обрабатываемых плат. Габариты установки 3600×850×1700 мм. Агрегат обслуживается одним рабочим.

Следующей операцией обработки платы является операция вскрытия монтажных отверстий. Эта операция осуществляется

методом штамповки на кривошипных прессах, одновременно вырубается 100 и более отверстий.

Во избежание сколов и образования ореолов вокруг отверстий удельное давление прижимной платы штампа должно быть не менее  $200 \text{ кг/см}^2$ . После вырубки отверстий на платы наносится маркировка (монтажные обозначения) методом сеткографии белой краской на эпоксидной основе.

Описанная технология и оборудование для производства печатных плат из одностороннего фольгированного гетинакса широко применяется уже многие годы на многих заводах страны.

## **§ 2. 7. Комбинированный метод изготовления печатных плат**

При изготовлении двусторонних печатных плат в радиотехнической и других отраслях отечественной промышленности нашел широкое применение комбинированный метод. В промышленности достаточно распространены оба варианта этого метода; *негативный* и *позитивный*, каждый из которых имеет как свои достоинства, так и недостатки.

При негативном методе экспонирование рисунка схемы производится с фотонегатива (откуда и произошло название). После экспонирования выполняется травление рисунка, а затем сверление отверстий платы. Металлизация отверстий ведется в специальных контактирующих приспособлениях.

При позитивном методе экспонирование рисунка схемы производится с фотопозитива. После экспонирования производится сверление и металлизация отверстий. Затем рисунок схемы и металлический слой в отверстиях защищаются слоем гальванического серебра или другого металла, стойкого к травителю для меди, после чего производится травление незащищенной меди.

Негативный вариант изготовления печатных плат все больше уступает место позитивному, основные преимущества которого заключаются в следующем:

- а) исключается возможность срыва контактных площадок при сверлении отверстий;
- б) не требуется применение специальных контактирующих приспособлений при металлизации отверстий;
- в) снижается вредное действие химических растворов на изоляционное основание и на прочность сцепления фольги с основанием платы.

Технологическая схема процесса изготовления печатных плат комбинированным позитивным методом состоит из следующих операций:

- 1) обезжиривание поверхности заготовки платы;
- 2) нанесение светочувствительной эмульсии (фоторезиста);
- 3) экспонирование рисунка схемы (фотопечать);

- 4) проявление рисунка;
- 5) задубливание фоторезиста;
- 6) нанесение защитной пленки лака;
- 7) сверление отверстий в плате;
- 8) электрохимическая металлизация отверстий;
- 9) гальваническое наращивание защитного металла;
- 10) удаление защитного слоя фоторезиста;
- 11) травление рисунка схемы;
- 12) осветление защитного слоя металла.

Из приведенной схемы процесса видно, что при позитивном варианте комбинированного метода функции защитного слоя в процессе травления выполняет гальваническое покрытие, тогда как при негативном варианте эту функцию выполняет слой задубленного фоторезиста.

Технологический процесс изготовления печатных плат комбинированным методом достаточно разработан и в значительной мере оснащен специальным инструментом и необходимым оборудованием.

Для более четкого представления о процессе рассмотрим как выполняются отдельные основные операции.

Подготовка поверхности заготовок механическим способом обычно выполняется вручную зачисткой венской извешью в смеси с маршалитом. Процесс зачистки ведется с помощью хлопчатобумажного тампона.

Химический способ заключается в обезжиривании поверхности в растворе тринатрийфосфата и кальцинированной соды.

Нанесение фоторезиста осуществляется методом окунания или полива заготовки с последующим центрифугированием на стандартных центрифугах типа ЦОМ или ФУВ-66.

Разработан метод медленного вытягивания заготовки из раствора фоторезиста с последующей сушкой в сушильном шкафу. Для этого в отечественной промышленности создана специальная установка, приведенная на рис. 2.12.

Чаще всего применяют фоторезист на основе поливинилового спирта состава:

ПВС-1 . . . . .	70÷90 г/л
Аммоний двуххромовокислый . .	10÷15 г/л
Поверхностно-активные вещества ОП-10 или ОП-7 . . .	5 г/л
Спирт этиловый (ректификат)	30÷50 мл/л

К недостаткам приведенного фоторезиста следует отнести: малую разрешающую способность (20÷40 линий на мм), нестабильность светочувствительности и малую кислотостойкость, которые колеблются в широких пределах и часто становятся причиной брака плат. Качество приготавливаемой фотоэмульсии зависит, главным образом, от качества поставляемого поливинилового спирта ПВС-1.

За рубежом наиболее широко распространен сухой пленочный фоторезист марки «Ристон», фирмы «Дюпон» — США. Этот фоторезист имеет высокую разрешающую способность.

Экспонирование рисунка схемы (фотопечать) производится групповым методом в специальных вакуумных рамах с двусторонней засветкой. Наиболее распространенная конструкция рамы приведена на рис. 2.13.

Копировальная рама может быть выполнена с лампами ПРК-7 и лампами П1Н-20, которые выбираются в зависимости от условий производства. Лампы ПРК-7 образуют световой по-

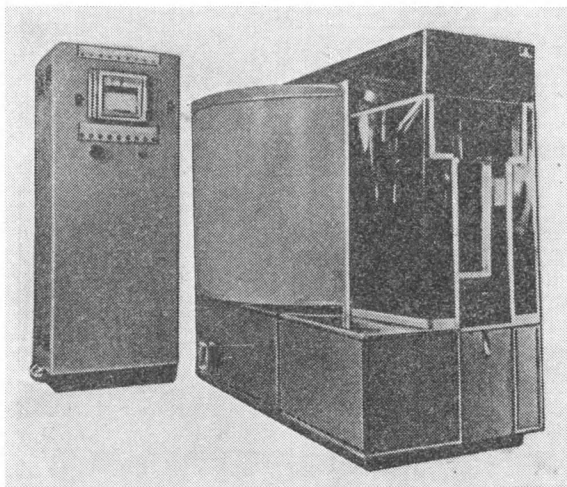


Рис. 2.12. Установка для нанесения фоторезиста методом медленного вытягивания заготовки печатной платы из раствора с последующей сушкой

ток, насыщенный ультрафиолетовыми лучами, что позволяет сократить число ламп и время экспонирования. Одновременно повышается химическая стойкость фоторезистивного слоя за счет лучшего его задубливания. Однако лампы ПРК-7 имеют тот недостаток, что входят в рабочий режим примерно через 5 мин после включения, поэтому целесообразно применять их в непрерывном режиме без выключения.

Лампы П1Н-20 допускают возможность включения и выключения их с помощью реле времени, что упрощает обслуживание установки. Световой поток от ламп П1Н-20 меньше, чем от ламп ПРК-7 и время экспонирования поэтому больше (20÷40 мин).

Для экспонирования рисунка схемы стали использовать рамы новой конструкции с подвижным источником света, например установка типа «Сканер» западногерманской фирмы «Видерхольд». Подобные установки созданы и в отечественной промыш-



ленности. Характерной особенностью этих установок является то, что в них применяют мощные лампы со специально подобранной длиной световой волны, в которой наиболее чувствителен фоторезист.

Время экспонирования в установках подобного типа сокращается до 4—5 мин за счет подбора рациональных источников света и эффективного распределения светового потока на площа-

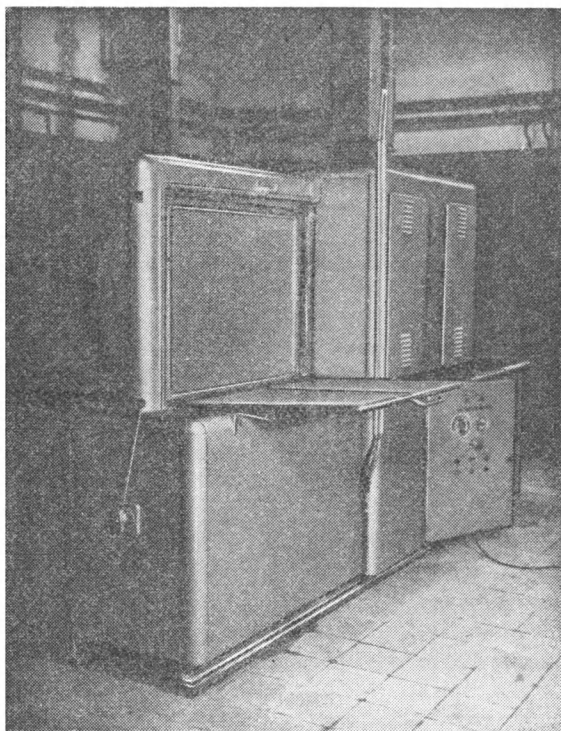


Рис. 2.13. Установка для экспонирования рисунка печатной платы групповым методом

ди экспонируемых плат. На рис. 2.14 показана установка для экспонирования с подвижным источником света.

Проявляется изображение рисунка схемы вручную с помощью хлопчатобумажного тампона в кювете или под струей теплой воды. Установкой для проявления является лабораторный стол с рядом ванн или кюветов.

Фоторезистивный слой проявляется в теплой воде при температуре 40—45°. Контролируется проявление окрашиванием эмульсии в растворе метилвиолета. Дубление проявленного слоя производится в растворе хромового ангидрида.

Установка состоит из четырех ванн, двух навесных вспомогательных кюветов, сушильного шкафа с циркуляцией воздуха. Две ванны установки используются под химические растворы, две другие являются промывочными и имеют душевые устройства со смесителями горячей и холодной воды.

После того как проявлен рисунок на плате, последнюю передают на операцию сверления, предварительно нанеся на нее защитную пленку лака для предохранения проводников печатной платы от химически активных растворов при химической металлизации отверстий в плате.

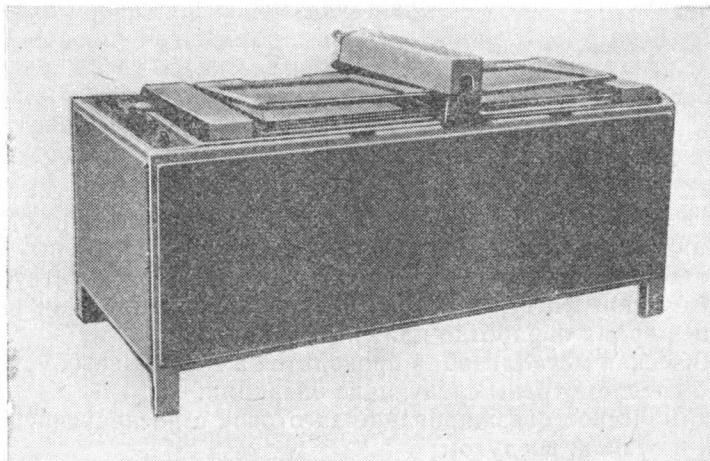


Рис. 2.14. Установка для экспонирования рисунка печатной платы с подвижным источником света

Сверление отверстий, подлежащих металлизации, весьма ответственная технологическая операция, так как от качества обработки отверстий зависит качество выполнения всех дальнейших химических и гальванических операций, а главное, и качество готовой платы. Для сверления и зенкования отверстий применяются координатно-сверлильные, одно- и многошпиндельные станки с пантографом или программным управлением.

За рубежом нашли достаточно широкое распространение многошпиндельные станки с программным управлением, например, фирмы «Шмоль», «Дигиталь систем» и др.

В отечественной промышленности все больше применяется одношпиндельный станок с программным управлением типа КП-7511.

После сверления выполняется операция металлизации отверстий. Качество печатных плат во многом зависит от качества металлизации отверстий. Вначале проводится сенсibilизация и активация поверхности отверстий, подлежащих металлизации, а затем химическая металлизация.

Чаще всего для химической металлизации используются ванны составов:

медь сернокислая . . . . .	80 или 20 г/л
натрий едкий . . . . .	60 или 20 г/л
глицерин . . . . .	50 или 35 г/л
формалин 30÷40%-ный . . . . .	30 мл/л
аммиак 25%-ный . . . . .	10 мл/л

Время выдержки в ванне первого состава  $10 \div 12$  мин, в ванне второго состава  $18 \div 25$  мин при комнатной температуре.

В последнее время стали применять растворы, содержащие сегнетовую соль, следующего состава:

сернокислая медь . . . . .	25 г/л
натрий едкий . . . . .	15 г/л
сегнетовая соль . . . . .	75 г/л
формалин . . . . .	20 мл/л
натрий углекислый . . . . .	10 г/л
никель хлористый . . . . .	6 г/л

Применение этого раствора позволяет экономить расход сернокислой меди, а также сократить время процесса. Если учесть, что раствор химического меднения разрушающе действует на защитный слой фотоэмульсии, то становится ясным, как важно сократить время обработки плат на этой операции.

Химическая металлизация проводится в специальных установках, где предусмотрены следующие операции:

а) химическое обезжиривание заготовок с последующей промывкой и сушкой воздухом;

б) сенсибилизация заготовок в растворе двуххлористого олова с последующей промывкой и сушкой теплым воздухом;

в) активация заготовок в растворе хлористого палладия с последующей промывкой в ванне и сушкой теплым воздухом.

Заготовки плат загружают в ванны в специальных кассетах. В каждой кассете монтируется одновременно несколько заготовок.

Все ванны оборудованы приводом для качания кассет. Перенос кассет из ванны в ванну осуществляется вручную или с помощью автоматического оператора.

После химической металлизации выполняется операция гальванической металлизации. Эта операция, как правило, выполняется на специальных автоматических линиях.

В качестве электролитического раствора чаще всего используются борфтористоводородные электролиты состава:

медь борфтористоводородная кислота борфтористоводородная свободная . . . . .	200—250 г/л
кислота борная свободная . . . . .	7—20 г/л
медь углекислая . . . . .	15—30 г/л
кислота кремнефтористоводородная (удельный вес — 1,45)	150—200 г/л
	275—420 г/л

Процесс металлизации ведется при комнатной температуре, плотность тока  $3 \div 6 \text{ а/дм}^2$ .

Обычно режим металлизации выбирается таким, чтобы обеспечить толщину слоя осажденной меди в отверстиях  $25 \div 40 \text{ мк}$ .

После того как выполнена операция меднения, необходимо весь рисунок печатной схемы защитить от травления.

Для защиты рисунка схемы от травления чаще всего применяют гальванические покрытия серебром, палладием или оловом-никелем.

Нанесение защитного покрытия производят либо в тех же гальванических автоматах, в которых ведут меднение, либо в отдельно стоящей гальванической ванне.

Серебрение выполняется при плотности тока  $0,3 \text{ а/дм}^2$ , время серебрения  $20 \div 25 \text{ мин}$ . Толщина покрытия должна получиться  $10 \div 12 \text{ мк}$ , что достаточно для надежной защиты схемы в процессе травления.

В последнее время для защиты рисунка схемы используют покрытие гальваническим сплавом ПОС-61. Это покрытие позволяет исключить из технологического процесса вредную операцию серебрения, которая обычно выполняется с использованием железо-синеродистых или цианистых электролитов. Помимо того что серебро — дефицитный металл, гальваническое серебро сильно пассивируется при травлении, что в значительной мере затрудняет последующую пайку. Для обеспечения процесса пайки помимо операции осветления приходится прибегать к горячему лужению схемы по слою серебра легкоплавкими припоями типа ПОСВ-50, ПОСК-36 или сплавом Розе.

После нанесения защитного слоя на печатную схему слой светочувствительной эмульсии, выполнив свои функции, становится не нужным.

Эмульсия раздубливается и удаляется. Операция раздубливания происходит в горячей ванне при температуре  $60 \div 70^\circ \text{C}$  в течение  $4 \div 5 \text{ мин}$ . Для раздубливания используются ванны следующих составов:

кислота щавелевая . . . . .	150—200 г/л
натрий хлористый . . . . .	50—100 г/л
натрий едкий . . . . .	300 г/л

После удаления эмульсии платы поступают на операцию травления рисунка схемы.

Если операция травления выполняется на агрегате, подобном изображенному на рис. 2.8, то каждую плату приходится пропускать в агрегате два раза для травления вначале одной, а затем другой стороны. Все большее применение находят агрегаты двустороннего травления.

В агрегатах подобного типа применена конструкция звездочного транспортера, построенного по типу рольганга. Такая конструкция позволяет расположить форсунки для подачи травяще-

го раствора не только сверху, но и снизу платы. Производительность подобных агрегатов достигает  $30 \text{ м}^2/\text{ч}$ .

Для травления обычно используют растворы различного состава, чаще всего это раствор хлорного железа с удельным весом  $1,36 \div 1,40 \text{ г/мл}$ , температура травления  $25 \div 50^\circ \text{C}$ , время травления, как правило, не превышает  $10\text{—}15 \text{ мин}$ .

Однако хлорное железо имеет большой коэффициент подтравливания. При плотных печатных схемах с узкими печатными проводниками ( $0,5 \text{ мм}$ ) применяют другие травящие растворы, имеющие более низкий коэффициент подтравливания, так например:

а) персульфат аммония . . . . .	300 г/л
железо сернокислое окисное . .	1 г/л
хлористый натрий . . . . .	0,1 г/л
б) персульфат аммония . . . . .	300 г/л
кислота серная . . . . .	30 мл/л
ртуть хлорная . . . . .	1 мл/л

Процесс травления в этих растворах ведется при температуре в первом случае  $50 \div 60^\circ \text{C}$ , во втором —  $35 \div 40^\circ \text{C}$ . Время травления  $5 \div 10 \text{ мин}$ .

После тщательной промывки от остатков травящего раствора и сушки выполняется операция осветления серебра ( $5\text{—}10 \text{ мин}$ ).

Для этой цели используется химическая ванна следующего состава:

аммоний роданистый . . . . .	100—150 г/л
гипосульфит . . . . .	400 г
калий железосинеродистый .	34 г

После промывки в горячей воде и сушки платы проходят механическую доработку; затем обработку по контуру и вскрытие отверстий, не подлежащих металлизации. На платы методом сеткографии наносят маркировку. Печатные проводники покрываются слоем консервирующего лака. Обычно для этих целей применяют канифольевый лак состава:

канифоль . . . . .	300 г
ацетон . . . . .	500 мл
растворитель 646 . . . . .	500 мл

Готовые платы проходят 100%-ный визуальный контроль. Электрические параметры проверяют выборочно. Климатические испытания, порядок их проведения и требования выполняют в соответствии с частными техническими условиями.

Для хранения и транспортировки платы упаковывают в полиэтиленовые и полихлорвиниловые мешки, а затем картонные коробки или специальную тару.

## ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

### § 3. 1. Особенности МПП Методы их изготовления

Новое качественное развитие современной радиоэлектроники основано на широком применении микросхем различной сложности в качестве основных компонентов электронных систем. Сложность и большая функциональная плотность современной аппаратуры требует огромного числа коммутационных соединений.

Многослойный печатный монтаж позволяет практически реализовать сложную коммутацию большого числа компонентов схемы в новейших конструкциях аппаратуры, выполненной в микроминиатюрном исполнении.

Многослойные печатные платы (МПП), имея ряд особенностей, сохраняют все основные свойства обычного печатного монтажа:

- а) возможность массового механизированного производства;
- б) точную повторяемость рисунка схемы от платы к плате;
- в) относительную простоту выполнения монтажных соединений компонентов схемы и возможность их замены;
- г) возможность механизации сборочно-монтажных и регулировочных операций при изготовлении аппаратуры;
- д) дальнейшее сокращение веса и габаритов аппаратуры и т. д.

К отличительным особенностям МПП следует отнести:

- а) более высокую удельную плотность рисунка печатных проводников и выводных точек (контактных площадок);
- б) более высокую стабильность всех параметров печатной схемы при изменении внешних условий за счет размещения всех проводников внутри однородного материала.

Как уже отмечалось, многослойные печатные платы отличаются относительно сложной технологией и высокой трудоемкостью изготовления; основным недостатком их является невозможность внесения изменений и устранения дефектов в готовой плате.

Многослойная печатная плата — это сложное изделие, которое обуславливает ряд новых требований к материалам, технологическим процессам, технологическому оборудованию, производственным помещениям, организации производства и подготовке специальных кадров.

Многослойный печатный монтаж нашел применение для коммутации разнообразных компонентов: стандартных дискретных элементов, различных модульных блоков и функционально за-

конечных плоских схем в запаянных корпусах или залитых компаундом, интегральных схем в цилиндрических или плоских корпусах.

Одна многослойная печатная плата может объединить большое число сложных компонентов радиоэлектронной системы, обеспечивая значительную экономию места и веса и в то же время эффективно уменьшая количество внешних выводов по сравнению с тем, что потребовалось бы в случае применения традиционных принципов монтажа.

Важная особенность многослойного печатного монтажа в решении многих проблем, связанных с взаимными помехами. Осуществляется она введением в конструкцию плат экранирующих слоев. Многослойные печатные платы позволяют совмещать цепи постоянного и переменного токов в одной конструкции платы, при этом экранированием исключается их взаимное влияние.

Как и любое новое направление в технике, в поисках простейшего решения многослойный печатный монтаж в начале своего развития получил много различных конструктивно-технологических направлений.

Разновидности методов изготовления МПП определяются способом получения межслойных соединений.

В отечественной промышленности существует два конструктивно-технологических направления в технологии изготовления МПП:

1) изготовление МПП с применением химико-гальванических процессов для получения межслойных соединений в плате в процессе ее изготовления;

2) изготовление МПП без межслойных соединений и получение их последующей пайкой или сваркой.

Изготовление МПП с применением химико-гальванических процессов имеет три разновидности:

1) металлизация сквозных отверстий;

2) попарное прессование;

3) послойное наращивание.

Изготовление МПП без межслойных соединений в плате имеет две разновидности:

1) открытые контактные площадки;

2) выступающие выводы.

Перечень основных технологических операций изготовления МПП по принятым пяти разновидностям приведен в табл. 3.1.

Некоторые сравнительные характеристики МПП, изготовленных различными методами, представлены в табл. 3.2.

По литературным данным около 80% всех МПП за рубежом изготавливается методом сквозной металлизации отверстий.

Анализ развития техники и технологии производства МПП в отечественной промышленности и опыта зарубежных фирм показывает, что метод металлизации сквозных отверстий наиболее перспективный.

Таблица 3.1

ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ  
ИЗГОТОВЛЕНИЯ МПП ПО ПРИНЯТЫМ ПЯТИ РАЗНОВИДНОСТЯМ

Наименование операций	Металлизация сквозных от- верстий	Попарное прессование	Послойное наращивание	Выступающие выводы	Открытые контактные площадки
Нарезка заготовок	×	×	×	×	×
Пробивка базовых отверстий	×	×	×	×	×
Перфорация	—	—	×	×	×
Прессование 1-го слоя	—	—	×	×	—
Осаждение меди на диэлект- рик	—	—	×	—	—
Подготовка поверхности	×	×	×	×	×
Нанесение светочувствитель- ного слоя	×	×	×	×	×
Экспонирование	×	×	×	×	×
Проявление и дубление	×	×	×	×	×
Термическое дубление	×	×	×	×	×
Травление рисунка	×	—	×	×	×
Прессование 2-го слоя	—	—	×	—	—
Нанесение лака	—	×	—	—	—
Сверление	×	×	—	—	—
Химическая металлизация	×	×	×	—	—
Гальваническое наращива- ние	×	×	×	—	—
Получение рисунка и трав- ление	—	—	×	—	—
Подготовка слоев к прессо- ванию	×	×	×	×	×
Прессование	×	×	×	×	—
Отгибка выводов	—	—	—	×	—
Нанесение защитного слоя металла	×	×	×	—	×
Прессование 4-го слоя	—	—	×	—	—
Подтравливание диэлектрика	×	—	—	—	—
Ультразвуковая промывка	×	—	—	—	—
Нанесение защитной краски	×	—	—	—	—
Освещение защитного слоя	×	—	—	—	—
Прессование 5-го слоя	—	—	×	—	—
Обрезка по контуру	×	×	×	×	×
Контроль	×	×	×	×	×
Нанесение флюса	×	×	—	—	—

На рис. 3.1 представлена принципиальная схема изготовления МПП методом металлизации сквозных отверстий, принятая в отечественной промышленности. Как видно из приведенной схемы, построенный по ней производственный процесс позволяет при необходимости изготавливать МПП всех пяти конструктивно-технологических разновидностей, а также одно- и двусторонние печатные платы без освоения новых операций и установки дополнительного оборудования. Это главное преимущество выбранной схемы процесса.



НЕКОТОРЫЕ СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МПП, ИЗГОТОВЛЕННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

Сравнительные показатели	Метод металлизации сквозных отверстий	Метод попарного прессования	Метод открытых контактных площадок	Метод послойного наращивания	Метод выступающих выводов
Надежность соединений	Хорошая	Малая	Отличная	Отличная	Отличная
Число слоев	20 макс.	4 макс.	8 макс.	5 макс.	15 макс.
Стойкость к внешним воздействиям	Без покрытия — средняя	Удовлетворительная	Удовлетворительная	Хорошая	Хорошая
Число производственных операций	Среднее	Среднее	Малое	Большое	Малое
Межслойное соединение	Электроосаждение	Электроосаждение	Проволочная перемычка	Электроосаждение	Пайка или сварка выводов
Плотность монтажа	Высокая	Средняя	Низкая	Высокая	Средняя
Изменяемость конструкции	Трудная	Трудная	Простая	Трудная	Трудная
Визуальный контроль	Трудный	Средний	Простой	Простой	Простой
Ремонтная способность	Плохая	Плохая	Плохая	Плохая	Средняя
Длительность цикла изготовления	Средняя	Средняя	Малая	Большая	Средняя
Стоимость	Низкая	Низкая	Низкая	Высокая	Высокая
Возможность механизации последующих операций сборки	Имеется	Имеется	Не имеется	Имеется	Не имеется
Вид устанавливаемых выводов микросхем	Штырьковые, планарные	Штырьковые, планарные	Планарные	Планарные	Планарные

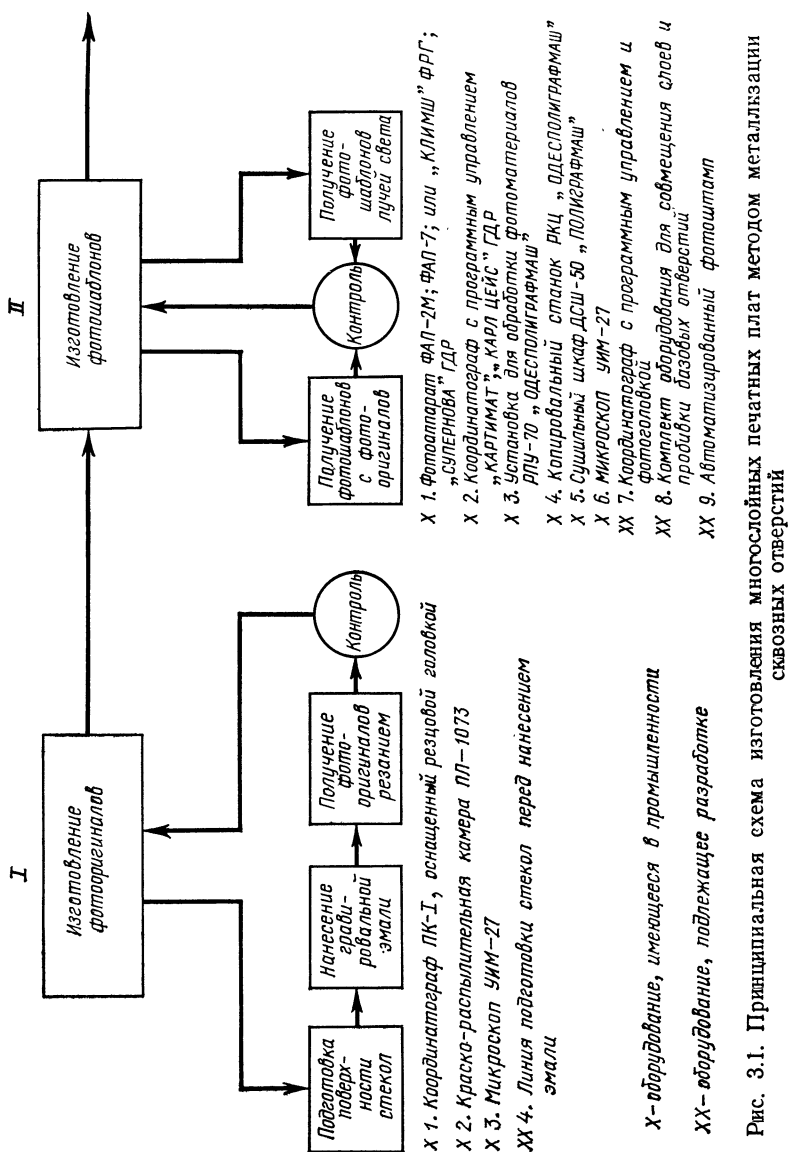


Рис. 3.1. Принципиальная схема изготовления многослойных печатных плат методом металлизации сквозных отверстий

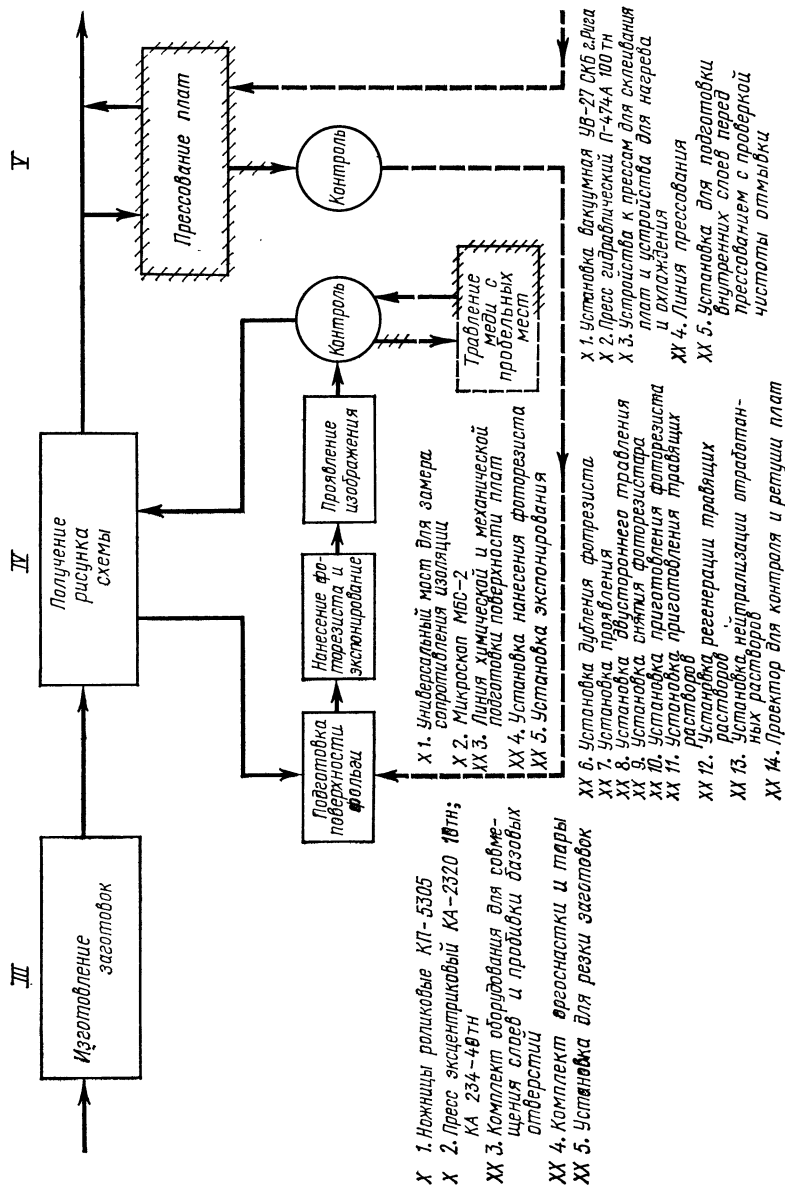
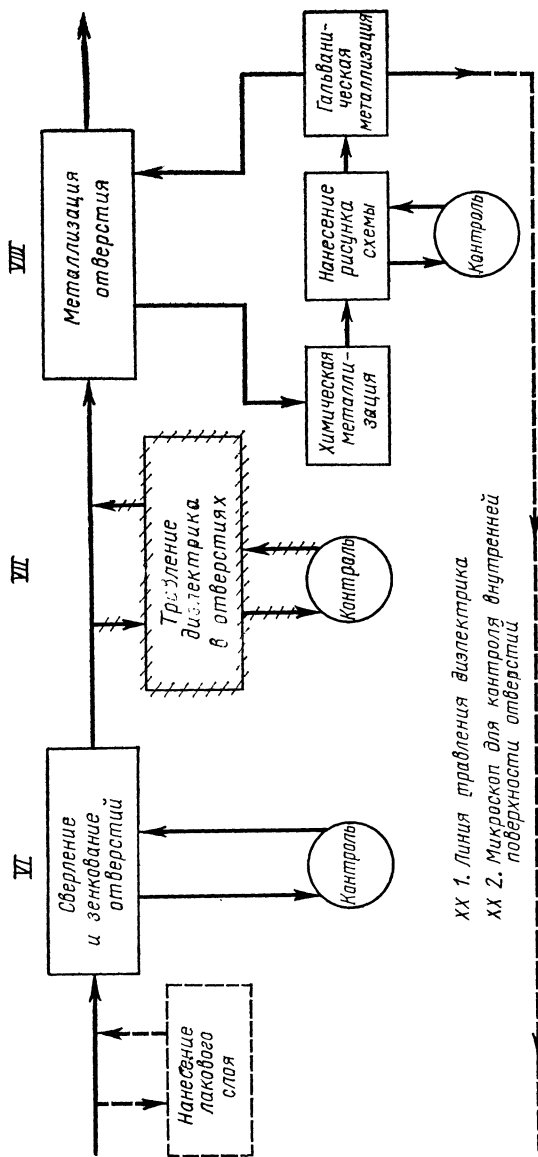


Рис. 3.1. Продолжение



- Х 1. Сверлильный станок с проектором и щупом КП-5107  
 Х 2. Сверлильный станок с программным управлением КП-7511  
 ХХ 3. Четырехшпиндельный сверлильный станок с программным управлением  
 ХХ 4. Установка зачистки отверстий от заусениц  
 ХХ 1. Автомат нанесения рисунка ОА-300.  
 ХХ 2. Линия химической металлизации  
 ХХ 3. Линия гальванического меднения (металлизации)  
 ХХ 4. Линия защитного гальванического покрытия  
 ХХ 5. Оборудование: см. раздел IX, п.п. 3, 4, 5, 6, 7, 10, 14

Рис. 3.1. Продолжение

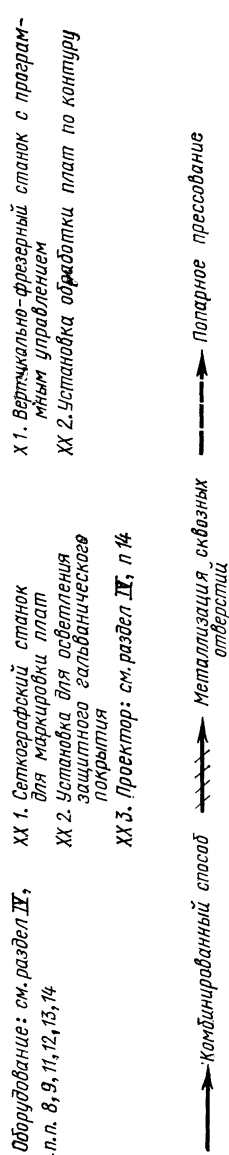
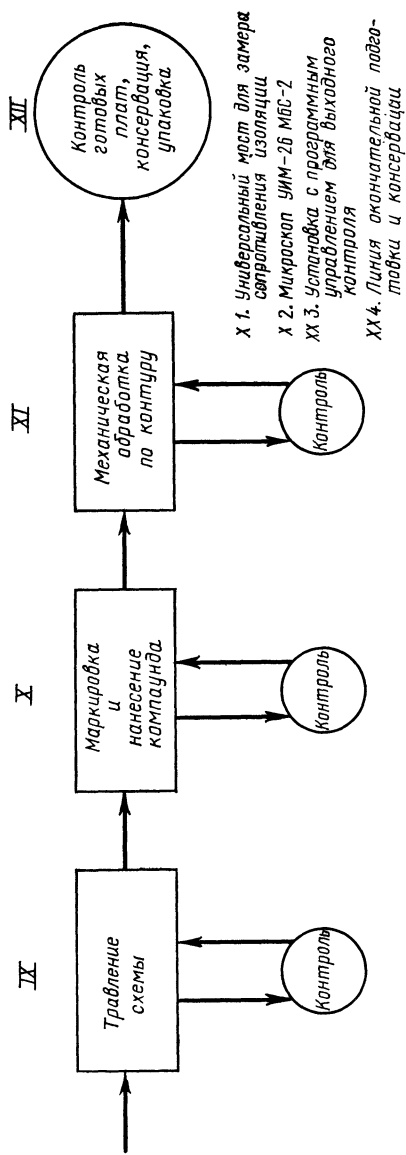


Рис. 3.1. Продолжение

При выборе метода изготовления МПП прежде всего следует оценить производственные возможности, наличие оборудования, имеющегося опыта и специалистов, а также стоимость изготовления. Особенно необходимо учесть технологические требования, предъявляемые к МПП и изложенные в конструкторской документации.

В следующих параграфах рассмотрим некоторые наиболее распространенные методы изготовления МПП.

### § 3. 2. Технология изготовления МПП методом металлизации сквозных отверстий

При выполнении технологического процесса изготовления многослойных печатных плат требуется более высокая точность исполнения каждого слоя с более жесткими допусками на размеры, соответственно необходимо оборудование повышенной точности, необходимо выполнить достаточно сложную новую операцию — прессование и тщательней провести операцию металлизации отверстий. Поэтому изготовить многослойную плату сложно.

Метод изготовления МПП металлизацией сквозных отверстий заключается в склеивании (прессовании) одновременно всех печатных слоев платы с помощью стеклоткани, пропитанной лаком (смолой). Межслойные соединения выполняются в виде металлизированных отверстий, соединяющих наружные и внутренние слои платы.

Рисунок схемы внутренних слоев МПП выполняется на заготовках из одностороннего или двухстороннего фольгированного диэлектрика фотохимическим методом.

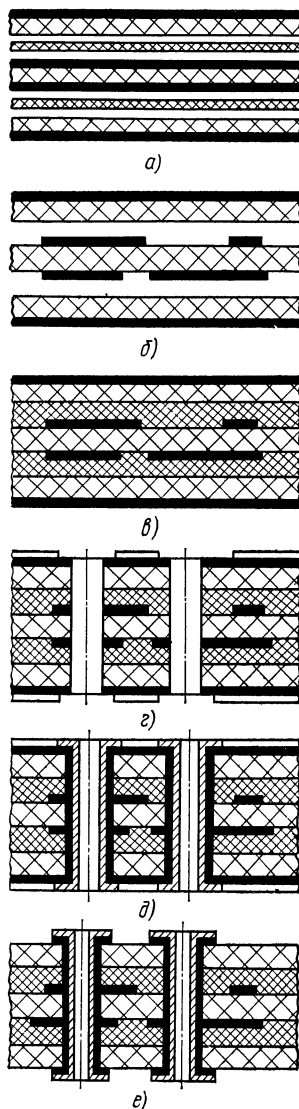


Рис. 3.2. Схема процесса изготовления МПП с получением рисунка фотохимическим методом на внутренних слоях платы:

а — изготовление заготовок фольгированного материала и стеклоткани; б — получение рисунка схемы внутренних слоев МПП; в — прессование многослойной печатной платы; г — получение рисунка схемы наружных слоев МПП, сверление отверстий; д — металлизация отверстий, нанесение защитного покрытия; е — травление меди с пробельных мест

На рис. 3.2 схематически показан процесс изготовления МПП с получением рисунка фотохимическим методом на внутренних слоях.

Рисунок наружных слоев выполняется комбинированным позитивным методом после прессования МПП.

В склеенной МПП после нанесения рисунка схемы на наружные слои (до операции травления) сверлят сквозные отверстия. Эти отверстия располагаются в узлах координатной сетки, по которой выполнен рисунок схемы. Точность выполнения отверстий по координатам должна быть обеспечена в пределах  $\pm 0,05$  мм. Это необходимо для обеспечения совмещения отверстий с контактными площадками на каждом слое. Диаметр отверстий, как уже говорилось об этом раньше, должен быть не менее  $1/3$  толщины платы, только в этом случае могут быть гарантированы условия для качественной металлизации.

Операция металлизации отверстий — одна из основных в процессе изготовления МПП данным методом. От качества металлизации существенно зависит качество самой платы. Через металлизацию в отверстиях электрически соединяются все слои МПП. Для того чтобы соединение слоев было надежней, перед металлизацией выполняют операцию подтравливания диэлектрика. Для этой цели используют 80%-ный раствор серной кислоты, а затем плавиковую кислоту.

В результате подтравливания диэлектрика площадь контакта на внутренних слоях увеличивается, что и гарантирует более надежное соединение слоев.

Процесс металлизации отверстий аналогичен тому, который применяется при изготовлении печатных плат комбинированным методом.

Однако на операции гальванической металлизации стремятся использовать электролиты с повышенной рассеивающей способностью.

Для металлизации МПП в последнее время разработан электролит следующего состава:  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  — 200 г/л;  $\text{H}_2\text{SO}_4$  — 100 г/л;  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  — 40 г/л;  $(\text{NH}_4)_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6$  — 20 г/л.

Электролит приведенного состава позволяет получать осадок хорошего качества при плотности тока до  $3 \text{ а/дм}^2$  и  $t = 18 \div 22^\circ \text{С}$ . При температуре  $40 \div 50^\circ \text{С}$  допустимая плотность тока до  $5 \text{ а/дм}^2$ .

Таблица 3.3

Плотность тока, $\text{а/дм}^2$		0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0
Рассеивающая способность электролита, %	стандартный	15,1	11,7	—	9,8	—	6,1
	новый	23,5	26,4	19,7	18,9	18,2	—

Сравнительная оценка рассеивающей способности в процентах по Харингу стандартного сернокислого электролита приведенного состава дана в табл. 3.3.

После осаждения меди схему защищают слоем гальванического серебра или ПОС-61. Затем удаляют защитный слой фоторезиста и производят операцию травления наружных слоев МПП.

Изготовленные платы проходят операцию механической обработки по контуру и маркировку.

Готовые платы проходят 100 %-ный контроль по электрическим параметрам на специальных стендах-автоматах с программным управлением.

После контроля платы консервируются, упаковываются в специальную тару и направляются на сборку.

На платы, изготовленные методом сквозной металлизации отверстий, могут устанавливаться навесные элементы с осевыми и планарными выводами.

### **§ 3. 3. Технология изготовления МПП методом попарного прессования**

Метод попарного прессования заключается в том, что на двух заготовках двухстороннего фольгированного диэлектрика выполняется рисунок схемы внутренних слоев МПП негативным комбинированным методом. На каждой заготовке, между рисунком схемы внутреннего слоя и сплошным слоем фольги наружного слоя, выполняются межслойные соединения в виде металлизированных отверстий, после чего полученные заготовки склеиваются (спрессовываются) с помощью стеклоткани, пропитанной лаком. Рисунок схемы на наружных сторонах платы и межслойные соединения между ними в виде металлизированных отверстий выполняются позитивным комбинированным методом.

Этот метод позволяет изготавливать МПП с количеством слоев не более четырех; обладает простотой изготовления и может быть легко внедрен в производство, однако надежность многослойных соединений зависит от качества исходного фольгированного диэлектрика, при прессовании возможно разрушение гальванических пистонов. Схема изготовления МПП методом попарного прессования представлена на рис. 3.3.

### **§ 3. 4. Технология изготовления МПП методом открытых контактных площадок**

Освоение производства многослойных печатных плат проще всего начинать с метода открытых контактных площадок. Принципиально этот метод почти полностью построен на технологических операциях, освоенных в фотохимическом способе изготовления печатных плат



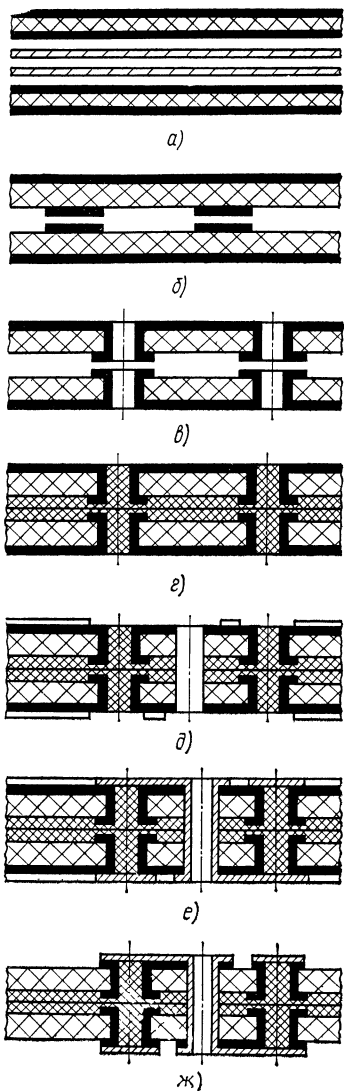


Рис. 3.3. Схема изготовления многослойной печатной платы методом попарного прессования:

а — изготовление заготовок фольгированного диэлектрика и стеклоткани; б — получение рисунка схемы внутренних слоев МПП; в — выполнение межслойных соединений между внутренними и наружными слоями МПП; г — прессование многослойной печатной платы; д — получение рисунка схемы наружных слоев МПП и сверление отверстий; е — металлизация отверстий и нанесение защитного покрытия; ж — травление меди с пробыльных мест

Новой операцией, как и для любого другого метода изготовления МПП, является склеивание слоев или прессование МПП.

При выборе метода открытых контактных площадок следует помнить, что печатная плата, изготовленная этим методом, будет менее компактна по рисунку схемы, чем плата изготовленная, например, методом металлизации сквозных отверстий. Этот недостаток свойствен рассматриваемому методу, так как межслойные соединения выполняются навесными проводниками.

Технологическая схема изготовления МПП методом открытых контактных площадок состоит из следующих основных этапов:

- 1) изготовление печатной схемы каждого слоя фотохимическим методом на тонком одностороннем фольгированном диэлектрике;
- 2) перфорация слоев и изоляционных прокладок;
- 3) подготовка поверхности слоев (обезжиривание) для склеивания;
- 4) сборка пакета МПП для прессования;
- 5) прессование МПП;
- 6) лужение контактных площадок;
- 7) обработка МПП по контуру и вскрытие крепежных и других отверстий;
- 8) контроль.

При изготовлении МПП методом открытых контактных площадок для изготовления отдельных слоев платы обычно применяют тонкий односторонний фольгированный диэлектрик толщиной  $0,1 \div 0,2$  мм и такие же прокладки.

Промежуточные схемные слои изготавливаются обычными методами печатного монтажа.

При прессовании многослойных печатных плат методом открытых контактных площадок требуются некоторые дополнительные меры для предотвращения затекания смолы на контактные площадки. Более надежный способ защиты контактных площадок — применение специальной резиновой прокладки. Она представляет собой прокладку с отпрессованными выступами, диаметр которых немного меньше диаметра перфорированных отверстий (не более чем на 0,075 мм), а высота незначительно больше (приблизительно на 0,125 мм) глубины соответствующего соединительного отверстия в собранной плате. Прокладка должна иметь отверстия для прохода направляющих штырей.

Перфорированные отверстия в склеивающих изоляционных слоях должны быть пробиты так, чтобы их диаметр приблизительно на 0,25 мм превышал диаметр контактной площадки, а диаметры отверстий в схемных слоях должны быть на 0,25 мм меньше, чем диаметры контактных площадок, над которыми они будут расположены. Цель этих требований заключается в том, чтобы по возможности исключить растекание смолы (которая будет ограничена выступами резиновой прокладки) в направлении контактной площадки и закрепить контактную площадку механически в момент прессования.

Текучесть склеивающего материала, используемого для изготовления многослойных печатных плат этим методом, рекомендуется выдерживать в пределах между  $4 \div 10\%$ , чтобы предотвратить возможное затекание связующего на контактные площадки, в то же время, как и для других методов изготовления многослойных печатных плат, можно использовать материал с текучестью порядка 30%.

Процесс склеивания происходит следующим образом. Плиты должны быть установлены в пресс для предварительного нагрева до  $180^{\circ}\text{C}$ . После достижения этой температуры нижняя плита снимается с пресса и помещается на асбестовую подкладку или на горячую плиту. Затем на нее укладывается резиновая прокладка. Слой, который нормально является верхним слоем, должен быть установлен первым, на него кладется прокладочный слой из склеивающего материала, затем устанавливается второй схемный слой и так до тех пор, пока не будут установлены все слои.

Сверху набора укладывается алюминиевая фольга и бумага, затем с пресса снимается верхняя плита и устанавливается на всей сборке.

Проверив правильность положения штырей, сборку следует сразу же поместить в пресс. При использовании склеивающего материала с малой текучестью может быть сразу дано полное давление на 1—2 ч. С целью предотвращения коробления плат их рекомендуется после окончания полимеризации охладить в прессе до температуры не выше  $70^{\circ}\text{C}$  под полным давлением, после чего плата может быть удалена из пресса.

В случае использования материала с большей текучестью следует провести экспериментальное определение времени начала отверждения для того, чтобы предотвратить утечку связующего, которая может произойти, если дать давление очень рано. Подача давления за 1 мин до начала отверждения связующего является оптимальным для большинства материалов.

После извлечения из пресса платы должны быть проверены на соответствие следующим требованиям:

1) между контактами, соединенными посредством печатных проводников, должна быть целостность цепей;

2) сопротивление изоляции между разомкнутыми схемами должно быть не менее 50 мом при напряжении 500 в;

3) 80% площади каждой контактной площадки должно быть свободно от затекания связующего;

4) склеенная плата должна быть твердой и не должна иметь воздушных пузырьков или расслоений.

После этого плата может быть обработана по контуру, а в контактных площадках просверлены отверстия для прохода объемных перемычек. Диаметры этих отверстий должны быть на 0,05—0,12 мм больше диаметров перемычек. Проволочные перемычки вставляются в отверстия с обратной стороны платы, обрезаются и припаиваются к контактным площадкам.

Операция лужения контактных площадок, к сожалению, не всегда предусматривается технологическим процессом изготовления МПП. Это в значительной мере затрудняет и без того трудоемкие операции монтажа и пайки навесных элементов схемы при сборке блоков на МПП, изготовленных методом открытых контактных площадок. Кроме этого, лужение контактных площадок является дополнительным контролером отсутствия смолы на их поверхности после прессования.

### **§ 3. 5. Технология изготовления МПП методом послойного наращивания**

Процесс изготовления многослойных печатных плат методом послойного наращивания наиболее трудоемок и длителен из-за невозможности параллельного выполнения технологических операций изготовления слоев и, следовательно, не технологичен.

Метод послойного наращивания заключается в последовательном наклеивании диэлектрика и выполнении на его поверхности печатного монтажа наращиванием слоя меди и выполнения затем фотохимическим способом печатного рисунка слоя. Эта группа операций выполняется столько раз, сколько слоев в МПП.

Схема, на которой показаны основные этапы технологического процесса изготовления МПП, представлена на рис. 3.4.

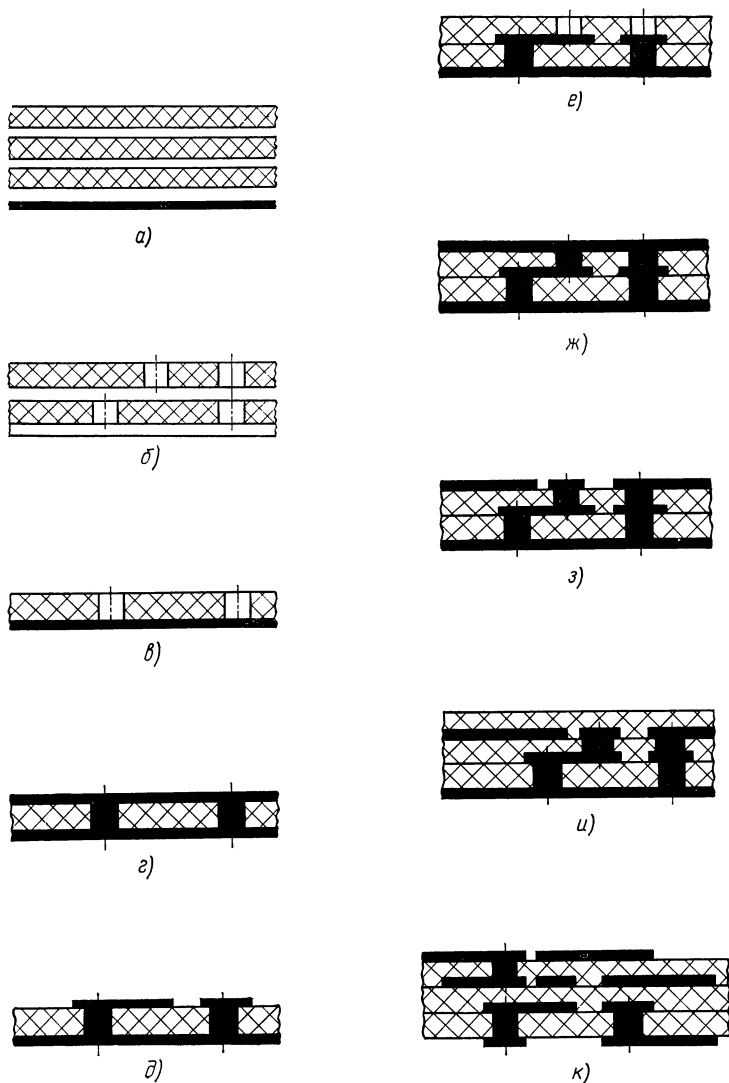


Рис. 3.4. Схема технологического процесса изготовления многослойной печатной платы методом послойного наращивания:

а — изготовление заготовок стеклоткани и нарезка заготовок фольги; б — перфорирование заготовок стеклоткани; в — наклеивание перфорированной стеклоткани на фольгу; г — наращивание контактных переходов и осаждение металла на поверхность стеклоткани; д — получение рисунка схемы второго слоя; е — наклеивание перфорированной стеклоткани; ж — выра- щивание контактных переходов и осаждение металла на поверхность стеклоткани; з — получение рисунка схемы третьего слоя; и — наклеивание сплошного слоя стеклоткани; к — получение рисунка схемы первого слоя

Изготовленные в соответствии с чертежом заготовки стеклоткани прессуют попарно на гидравлическом прессе. Время прессования 45—50 мин, давление 60—80 кг/см<sup>2</sup> и температура прессования 140—150° С.

В качестве материала для изоляционных слоев используется стеклоткань марки «Э» толщиной 0,06 мм, пропитанная лаком ЭИФ (ТУ ИЖ 51—65).

Листы стеклоткани в стадии поставки имеют неравномерную толщину с неравномерным распределением лака ЭИФ. Поэтому для обеспечения плотного прилегания прессуемых листов набирают пакет в последовательности: на нижнюю плиту приспособления укладывают лист триацетатной пленки, на нее 12—14 листов кабельной бумаги, затем прокладку из нержавеющей стали толщиной 1—1,5 мм, на нее — лист триацетатной пленки, затем склеиваемые листы стеклоткани, на них — лист триацетатной пленки и верхнюю плиту приспособления.

За один цикл можно спрессовать три — четыре набора (этажа) таких пакетов. Набор пакетов в перечисленной выше последовательности обеспечивает медленное прогревание прессуемых листов и хорошее качество склеивания.

Спрессованная стеклоткань толщиной 0,12—0,15 мм тщательно зачищается наждачной шкуркой М-180 с двух сторон, затем промывается теплой водой, сушится и обезжиривается спиртом. На подготовленную таким образом поверхность наносится клей БФ-4 или БФР-4, в который добавляется кварц молотый марки КП-1 (ГОСТ 9077—59) в количестве 45 г на 1 кг клея. Для того чтобы клей при дальнейшем прессовании не затекал в отверстия будущих контактных столбиков, стеклоткань, покрытую клеем, помещают в термостат на 30—40 мин при температуре 100—110° С. Затем в соответствии с чертежами на каждый слой платы по заранее подготовленному шаблону на приспособлении пробивают (перфорируют) базовые отверстия и отверстия под контактные переходы (столбики).

Приспособление для перфорации состоит из матрицы, сборной конструкции и направляющей плиты. Матрица состоит из верхней плиты, в которой по узлам координатной сетки с шагом 1,25 мм просверлены отверстия. Отверстия просверлены только в местах расположения выводов микросхем группами по 14 шт. Это дает возможность в любом слое иметь необходимое количество отверстий под контактные переходы для обеспечения межслойных соединений. Плита матрицы изготавливается из стали Ст20 толщиной 5 мм. Для получения твердости (HRC=55÷58) режущих кромок плиту цементируют, закаливают.

Пробивка отверстий в слоях платы выполняется вручную пуансоном сборной конструкции в следующем порядке: на плиту приспособления укладывается заготовка стеклоткани. Располагают ее так, чтобы в ней могли быть выполнены рабочие и базовые отверстия. Затем устанавливается направляющая так, чтобы штифты вошли в соответствующие отверстия этой направляю-

щей, после чего она прижимается гайками к плите, а заготовка стеклоткани оказывается зажатой между плитой и направляющей. Сначала в заготовке стеклоткани пробиваются три-четыре базовых отверстия диаметром 5 мм и в них вставляются фиксирующие шпильки, затем пробиваются отверстия диаметром 0,8 мм под контактные переходы и отверстия под выводные контакты.

При таком способе перфорации слоев обеспечивается последующее их совпадение при наложении слоев. После пробивки в отверстиях могут остаться отдельные волокна стеклоткани, поэтому заготовку нужно очистить сжатым воздухом или жесткой щеткой.

Подготовка к прессованию (склеиванию) стеклоткани с фольгой заключается в нарезке фольги\* в соответствии с чертежом и пробивке на приспособлении базовых отверстий. Прессуется фольга со стеклотканью по базовым отверстиям в прессформе на гидравлическом прессе. Время прессования 40—45 мин, температура 130—140°С и давление 50—55 кг/см<sup>2</sup>.

Перед прессованием фольги со стеклотканью набирается такой же пакет, как и при прессовании стеклоткани.

Гидравлический пресс оборудуется автоматическим устройством для регулирования температуры и устройством для поддержания необходимого постоянного давления в процессе прессования.

После прессования заготовка платы проверяется под микроскопом МБС-2, и в случае натеков клея на поверхность фольги в отверстиях перфорации они удаляются инструментом (медицинским зондом или специально заточенным скальпелем). Необходимо отметить, что зачистка отверстий — операция очень кропотливая, ведется под микроскопом и требует большой затраты времени. Кроме того, поскольку она производится вручную, качество зачистки не всегда бывает одинаковым и не исключаются случаи повреждения фольги под контактными переходами в отверстиях. Очень важно подобрать состав клея БФ-4 или БФР-4 таким образом, чтобы избежать натеков клея в процессе прессования. С этой целью рекомендуется клеящий состав готовить из расчета 45% молотого кварца к сухому остатку клея (поскольку вязкость клея может быть различной).

После зачистки излишков клея в отверстиях плата поступает на операцию наращивания контактных переходов (столбиков). Перед наращиванием контактных столбиков открытая сторона фольги изолируется лаком, стойким к электролиту меднения.

Контактные столбики наращиваются в обычной сернокислой гальванической ванне меднения состава: 180—200 г/л сернокислой меди, 50—70 г/л серной кислоты и 10 мл/л технического гидролизного спирта.

---

\* Фольга медная электролитическая оксидированная толщиной 0,035 мм (СТУ 62-190—65).

Контактирование фольги с катодной штангой осуществляется либо медной проволокой, либо установкой платы в специальное приспособление.

Меднение проводится при комнатной температуре и плотности тока  $1 \text{ а/дм}^2$ . Повышение плотности тока ускоряет процесс наращивания, но ухудшает качество высаживаемой меди, а следовательно, контактных переходов (столбиков). Высота столбиков должна соответствовать толщине диэлектрика.

Для получения печатной схемы слоя необходимо провести подготовку стеклоткани под металлизацию. Плата со стороны стеклоткани зачищается наждачной шкуркой, обезжиривается порошком «Новость» (50 г/л) и подвергается обработке (сенсibilизации) в растворе следующего состава: 30 г/л двуххлористого олова; 10 г/л соляной кислоты.

Обработка производится в течение 5—6 мин при непрерывном покачивании платы в ванне. После тщательной промывки в проточной и дистиллированной воде плату активируют в растворе, состоящем из 1 г/л хлористого палладия и 10 мл/л соляной кислоты.

Обработка плат в этих растворах обеспечивает равномерное высаживание меди, хорошее сцепление меди со стеклотканью, исключает образование ореолов вокруг контактных переходов.

Химическое меднение производится в растворе следующего состава, г/л: медь сернокислая — 10; едкий натр — 10; сегнетова соль — 50.

За 10—15 мин до начала меднения добавляется 10 мл/л формалина. Продолжительность меднения 10—15 мин при покачивании платы в ванне.

На тонкий слой химической меди наращивается слой гальванической меди требуемой толщины. Гальваническое меднение ведется при реверсировании тока с отношением периодов 10 : 1 и плотности тока  $D_k = 1,5 \div 2 \text{ а/дм}^2$ .

После промывки и сушки платы поступают на операцию нанесения рисунка, по слою меди платы поливают светочувствительной эмульсией следующего состава: спирт поливиниловый — 90 г/л, аммоний двуххромовокислый — 15—20 г/л, эмульгатор ОП-7 или ОП-10, г/л, спирт этиловый — 60 мл/л. Слой эмульсии сушится в центрифуге в течение 3—4 мин при температуре 50—60° С.

Платы поступают на операцию фотоэкспонирования.

Ответственным моментом является совмещение негатива печатной схемы с заготовкой платы, покрытой светочувствительным слоем, так как на заготовке платы под осажденным на нее металлическим слоем расположены контактные переходы, которые должны обеспечить межслойные соединения схемы. Поэтому необходимо обращать особое внимание на качество выполнения базовых отверстий и на их состояние в процессе работы как на плате, так и на негативе.

Негатив совмещается с заготовкой платы с помощью фиксирующих кнопок, изготовленных обычно из сплава Д-16. Рабочий диаметр кнопок выполняется по скользящей посадке. Фиксирующие кнопки при сборке негатива с заготовкой платы должны входить в базовые отверстия под небольшим усилием, но при этом не должны деформировать отверстий.

После экспонирования изображение схемы проявляется в воде при температуре 35—40°С и обрабатывается (задубливается) в 3%-ном растворе хромового ангидрида в течение 1—2 мин при температуре 18—20°С. Затем рисунок схемы подвергается термической обработке в термостате при температуре 40—50°С в течение 20—30 мин. В случае необходимости рисунок схемы ретушируется битумным лаком. Контроль качества изображения можно производить под микроскопом МБС-2.

Незащищенные участки вытравливаются на травильном агрегате в растворе хлорного железа при комнатной температуре.

Для получения следующего слоя платы по тем же базовым отверстиям напрессовывается следующий слой перфорированной стеклоткани.

Таким образом получается изоляционный слой между очередным слоем печатной платы с отверстиями для будущих контактных переходов.

Технология прессования, наращивания переходов и получения рисунка схемы следующего слоя аналогична вышеописанным технологическим операциям.

Трассировка одного слоя печатных проводников преимущественно горизонтальная, а второго — вертикальная по отношению к одной из сторон платы. Чередование вертикальной и горизонтальной трассировок в слоях платы дает возможность снизить паразитные наводки в проводниках.

Завершающим этапом изготовления многослойных печатных плат является получение первого слоя схемы, выполняемого на фольге, которая была приклеена к перфорированной стеклоткани с самого начала техпроцесса и сохранилась целиком для обеспечения электрического контакта при получении всех слоев многослойной печатной платы.

Для получения первого слоя платы фольгу тщательно очищают от защитного лака, обезжиривают венской известью, промывают порошком «Новость», обрабатывают в 3%-ном растворе соляной кислоты (декапируют), промывают в воде, сушат, затем поливают светочувствительной эмульсией и фотохимическим способом выполняют рисунок наружного слоя платы.

Приведенный технологический процесс позволяет получать МПП достаточно хорошего качества, однако в силу большой трудоемкости в последнее время почти не применяется.

Печатные платы, полученные методом послойного наращивания, наиболее приемлемы для монтажа полупроводниковых интегральных схем с планарными выводами.



### **§ 3. 6. Технология изготовления МПП методом выступающих выводов**

Метод выступающих выводов заключается в прессовании заготовок с нанесенным рисунком и перфорированными окнами, в которых располагаются выводы в виде полосок медной фольги, отгибаемых на наружную сторону готовой платы.

Для изготовления печатных слоев на фольгу напрессовывается слой стеклоткани с перфорированными окнами, размер которых зависит от габаритов устанавливаемых на них элементов, после чего на фольге выполняется рисунок печатного слоя.

Склеивание (прессование) всех слоев платы ведется одновременно. Выводы, выступающие из всех слоев платы, отгибаются на колодки, расположенные на наружной стороне платы.

Межслойные соединения в этом методе отсутствуют и выводы элементов подсоединяются непосредственно к выводам платы, расположенным на колодках. Метод позволяет получать плату с количеством слоев до 15, но достаточно трудоемок и применяется редко.

На платах могут устанавливаться навесные элементы с планарными выводами. Сборка платы не локализуется.

Схема технологического процесса изготовления МПП методом выступающих выводов представлена на рис. 3.5.

### **§ 3. 7. Специфичные технологические операции процесса изготовления МПП**

#### **Прессование МПП**

Важнейшими факторами, на которые необходимо обращать особое внимание при выполнении этой технологической операции, являются:

а) технологические режимы прессования (время, температура и давление);

б) точное совмещение и строгая фиксация слоев, исключающая их смещение в момент прессования;

в) подбор исходных материалов (склеивающих прокладок) требуемого качества;

г) качество подготовки склеиваемых поверхностей слоев и прокладок;

д) климатические и гигиенические условия на участке прессования.

Большинство МПП изготавливается из фольгированной стеклоткани, пропитанной термореактивной эпоксидной смолой, поэтому способы прессования, оборудование и оснащение для всех

применяемых методов изготовления МПП практически одинаковы.

Процесс прессования в общем виде выполняется следующим образом. Отдельные слои МПП, изготовленные из тонкого (0,1 мм) фольгированного стеклоэпоксидного пластика методом травления, накладывают друг на друга, чередуя со слоями склеивающих прокладок и прессуют (склеивают) в общую МПП. В качестве склеивающих прокладок для МПП используют стеклоткань, пропитанную эпоксидным связующим материалом, находящимся в стадии «В». Набранный пакет подвергают прессованию на гидравлическом прессе при удельном давлении от 14 до 70 кг/см<sup>2</sup>, температуре 160÷180°С и времени выдержки 40÷60 мин.

При прессовании МПП, как уже говорилось ранее, применяется специальная технологическая оснастка, которая должна обеспечить фиксацию совмещенных слоев МПП и температурный режим склеивания.

Для этой цели используются установленные на пресс специальные плиты, оборудованные системой обогрева и охлаждения. Обычно плиты изготавливают из стали, они должны быть достаточно массивными (толстыми), чтобы обеспечить равномерное распределение температуры по всей поверхности. Поверхность плиты не должна иметь дефектов в виде раковин, выбоин и выступов. Желательно иметь шлифованную хромированную поверхность. Обогрев плит проводят электрическим или паровым методом, а охлаждение — водя-

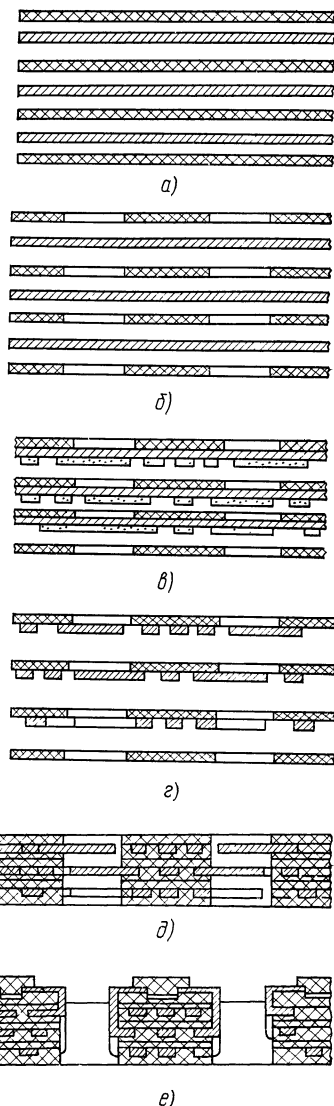


Рис. 3.5. Схема технологического процесса изготовления многослойной печатной платы методом выступающих выводов:

а — нарезка заготовок диэлектрика и медной фольги; б — перфорирование диэлектрика; в —

склеивание заготовок перфорированного диэлектрика с медной фольгой и нанесение рисунка схемы на фольгу; г — травление меди с пробельных мест; д — прессование многослойной печатной платы; е — отгибка выводов на приклеенные колодки

ным. Температурный режим процесса обеспечивается автоматически от пульта управления.

Набор пакета МПП производится в специальном, съемном с пресса, приспособлении, состоящем из верхней и нижней плит.

Основанием приспособления служит нижняя плита, изготавливаемая из нержавеющей стали или дюралю толщиной 12÷16 мм. Поверхность плиты должна быть шлифованная. По углам плиты по прессовой посадке устанавливаются направляющие штыри диаметром 4,5÷6 мм, имеющие конус 2°.

Верхняя плита имеет по углам отверстия, в которые по скользящей посадке входят штыри нижней плиты при совмещении плит.

Помимо направляющих штырей на нижней плите устанавливаются фиксирующие штыри диаметром 0,8—2,4 мм для фиксации на них набранного пакета МПП по базовым отверстиям, имеющимся в каждом слое и каждой склеивающей прокладке.

Описанное приспособление с установленным на него пакетом МПП подается в рабочую зону пресса.

Так как приспособление с установленным пакетом достаточно тяжелое, то рабочее место прессовщика обычно оборудуется подъемным столом, который позволяет поднять приспособление при его установке и съеме на уровень плиты пресса.

Для повышения производительности на гидравлическом прессе устанавливают многоярусно несколько нагревательных плит, чтобы можно было прессовать одновременно несколько пакетов МПП, обычно это 2÷3 яруса.

Качество склеивания слоев МПП зависит от многих причин, но в основном оно определяется адгезией между слоями, которая в свою очередь зависит от качества исходного материала и подготовки поверхности под склеивание.

Для подготовки слоев к склеиванию их очищают от окислов, обезжиривают, удаляют влагу. Удаление абсорбированной влаги осуществляется высушиванием слоев МПП в вакууме при температуре 120°С в течение 30 мин.

Если слои или прокладки будут недостаточно обезвожены, то при нагреве МПП в момент склеивания (прессования) или при пайке могут возникнуть дефекты — расслоения в виде пузырей.

Операции набора пакета МПП и прессования производят в обеспыленном помещении при температуре 20÷25°С и относительной влажности 50÷60%.

Все операции изготовления МПП на участке прессования выполняются в перчатках. Воздух, находящийся между слоями, должен быть удален при склеивании. Под действием давления пузырьки воздуха проходят через размягченную смолу, вплоть до ее отверждения. Частично эти пузырьки выходят через края платы наружу, частично задерживаются у краев. Поэтому по контуру платы должен быть предусмотрен технологический припуск, который удаляется после склеивания.

На практике обычно для прессования МПП используют стандартные гидравлические прессы мощностью 100 или 150 т.

Недостатком этих прессов является невысокая стабильность заданного давления, а также малая производительность из-за малой полезной площади пресса.

Для повышения производительности и качества прессования МПП передовые зарубежные фирмы применяют специальные многоярусные прессы с большой площадью прессования (1 м<sup>2</sup> и более).

Такие прессы оснащаются установками программного управления и аналоговыми программно-задающими устройствами с записью отработанных режимов прессования (например, «Аку-термол» — США). Наряду с этим, зарубежные фирмы совершенствуют конструкции нагревателей и охладителей плит, а также системы регулирования и поддержания температуры и давления.

Технология прессования гибких МПП аналогична технологии прессования жестких МПП, однако режимы прессования и некоторые другие моменты процесса значительно отличаются.

Гибкие МПП могут склеиваться на том же оборудовании с соответствующей доработкой оснастки.

Температура склеивания гибких МПП изменяется от 180°С для полиэфирной пленки, покрытой полиэтиленом, до 310°С для полиамидной пленки, покрытой сополимером фторопласта с пропиленом.

Давление при прессовании порядка 20 кГ/см<sup>2</sup> для обоих материалов.

Отдельные слои МПП могут иметь большие участки невытравленной фольги (экраны). Платы в этих местах имеют тенденцию к расслаиванию, особенно при изгибающих нагрузках. Это объясняется тем, что наружная поверхность медной фольги, как правило, не обрабатывается (оксидируется) для улучшения свойств адгезии.

Этот недостаток может быть устранен либо за счет использования фольгированных материалов, у которых наружная поверхность медной фольги имеет соответствующую обработку, либо дополнительной обработкой поверхности фольги с помощью специального химического раствора, предназначенного для этой цели.

Часто требуется свертывать гибкие МПП или печатные кабели для уплотнения монтажа или для возможности использования их в конструкциях выдвижных блоков. Это может быть выполнено навивкой плат на технологическую оправку, диаметр которой должен быть не менее чем в 5 раз больше толщины платы. В этом состоянии платы нагреваются до 150°С (для полиэфир-полиэтиленовых) или до 230°С (для фторопласт-полиамидных пленок) и после последующего охлаждения до комнатной температуры они будут сохранять приданную им форму.

После операции прессования на наружные слои МПП, полностью покрытые медной фольгой, наносят рисунок схемы наружных слоев. Обычно фотоспособом наносят позитивный рисунок схемы. При использовании сухого фоторезиста или метода сеткографии рисунок схемы можно наносить после сверления отверстий в МПП.

Отверстия в МПП необходимы для соединения — коммутации всех слоев МПП.

Отверстия должны быть просверлены в точно заданных местах — узлах координатной сетки. Для точного выполнения этой операции сверление отверстий в многослойной печатной плате обычно производят на сверлильных станках с оптическим (проекционным) приспособлением, со зупом-пантографом или с автоматическим цифровым управлением.

Сверлильный станок с автоматическим управлением обладает, как правило, наибольшей точностью и высокой производительностью. Перемещение стола с платой по осям  $X$  и  $Y$  и вертикальное перемещение сверла производится автоматически от системы цифрового управления. Такие станки часто бывают многошпиндельными, благодаря чему одновременно сверлится большое количество отверстий. Цифровое управление обеспечивает точное перемещение стола с максимальной погрешностью  $0,03 \div 0,05$  мм. Погрешность расположения отверстий составляет  $0,05 \div 0,08$  мм. Производительность станка на каждый его шпиндель в 2—3 раза выше, чем у станков с ручным управлением.

Сверление отверстий в стеклотекстолитовой плате необходимо производить специальными сверлами. Для этой цели применяют твердосплавные сверла.

Слоистые пластики на основе стекловолокна обладают значительными абразивными свойствами. Поэтому при механической обработке отверстий в печатных платах происходит интенсивный износ режущего инструмента.

Правильный выбор режимов сверления (количество оборотов и подача сверла) гарантирует получение отверстий с гладкими стенками, без сколов и ореолов на входе и выходе сверла.

Режимы обработки зависят от диаметра отверстий. Обычно чем меньше диаметр отверстий, тем больше оборотов и меньшую подачу должно иметь сверло.

При слишком малой скорости вращения сверла или слишком большой подаче печатные проводники и контактные площадки изгибаются и отслаиваются. Хорошо заточенные твердосплавные сверла на больших оборотах не срывают контактных площадок и не образуют трещин в изоляционном основании слоев. Внутренние расслоения приводят к появлению пустот и неоднородностей при химико-гальваническом нанесении покрытий на стенки отверстий.

При выборе режимов необходимо учитывать, что эпоксидная смола легче размягчается от температуры, чем другие терморезактивные смолы, поэтому во время сверления отверстий может произойти заволакивание смолой среза фольги в отверстиях, что ухудшает или вообще нарушает соединение фольги с гальванической медью в отверстиях.

Специальные станки для сверления отверстий в печатных платах должны удовлетворять следующим требованиям:

- а) число оборотов шпинделя 5000—35 000 *об/мин*;
- б) подача шпинделя механическая 0,02—0,05 *мм/об*;
- в) способ регулирования числа оборотов и подачи шпинделя — бесступенчатый;
- г) неперпендикулярность оси шпинделя к базовой плоскости стола не более 0,01 *мм*;
- д) вертикальный рабочий ход шпинделя 10 *мм*;
- е) точность регулировки рабочего хода шпинделя  $\pm 0,5$  *мм*;
- ж) биение сверла, закрепленного в цанге не более 0,02 *мм*;
- з) накопленная погрешность между любыми отверстиями на плате  $\pm 0,025$  *мм*;
- и) вокруг обрабатываемого отверстия должен осуществляться прижим, усилие прижима 12—20 *кГ/см<sup>2</sup>*;
- к) для направления сверла и улучшения условий прижима вокруг обрабатываемого отверстия целесообразно в прижимное устройство встроить специальную твердосплавную направляющую втулку, диаметр направляющей части которой должен превышать диаметр сверла на 0,03—0,05 *мм*;
- л) точность и жесткость основных узлов должна соответствовать нормам на металлорежущие станки повышенной точности.

В качестве инструмента для сверления отверстий в печатных платах следует применять специальные твердосплавные сверла. Номинальный диаметр сверл следует выбирать согласно зависимости:

$$d = d_0 + 0,7 (\Delta_1 + \Delta_2),$$

где  $d$  — диаметр сверла, *мм*;  $d_0$  — номинальный диаметр обрабатываемого отверстия, *мм*;  $\Delta_1$  — допуск на диаметр обрабатываемого отверстия, *мм*;  $\Delta_2$  — величина уменьшения диаметра обрабатываемого отверстия после охлаждения слоистых пластиков, *мм*.

Наилучшим способом очистки от смолы участка вокруг отверстия является химическое травление. При этом можно не только удалить остатки смолы, но и добиться того, чтобы край контактной площадки рельефно выступал над краем изоляционной подложки, т. е. подтравить диэлектрик в отверстиях. Поверхность для осаждения меди на стенки отверстия увеличивается, гальваническая медь надежней покрывает стенки отверстия и имеет большую площадь контакта с контактными площадками слоев. Межслойные соединения получаются более надежными.

В качестве раствора для подтравливания диэлектрика применяют смесь серной кислоты, растворяющей эпоксидную смолу, и плавиковой кислоты, растворяющей стекловолокно, которое обнажается на поверхности в результате травления смолы. Отношение кислот 4:1.

Для сверления МПП в отечественной промышленности разработаны специальные сверлильные станки с числом оборотов шпинделя до 40 000 об/мин.

На рис. 3.6 показан станок с ручным управлением, оборудованный оптическим устройством и съемным щупом для полуавтоматического сверления.

#### Технические характеристики станка

Тип станка . . . . .	КП-5107
Максимальный размер обрабатываемых плат . . . . .	500×500 мм
Максимальная толщина пакета обрабатываемых плат . . . . .	4 мм
Число оборотов шпинделя (для ступени) . . . . .	15 000 и 30 000 об/мин
Производительность . . . . .	20÷30 отв/мин

На рис. 3.7 показан одношпиндельный сверлильный автомат с цифровым программным управлением. Тип автомата — КП-7511.

Программа сверления задается с помощью перфоленты.

Характеристики автомата следующие:

- 1) размеры обрабатываемых плат до 220×350 мм, толщиной 0,2÷4,5 мм;
- 2) максимальный диаметр сверления 2,5 мм;
- 3) максимальный диаметр зенкования 3,0 мм;
- 4) максимальная зона обработки 220×330 мм;
- 5) характеристика шпинделей:

Автомат	Количество	Ход, мм	Об/мин	Подача, мм/об
Сверлильный . . . . .	1	6	0—30 000	0—0,22
Зенковальный . . . . .	1	6	8 000	0—0,22

- 6) регулирование скорости и подачи — бесступенчатое;

- 7) скорость координатных перемещений стола:

Шаг, мм . . . . .	0,5	1,0	1,25	1,5	2,0	2,5	3,0
Скорость, мм/мин . . . . .	320	640	800	960	1280	1600	1920

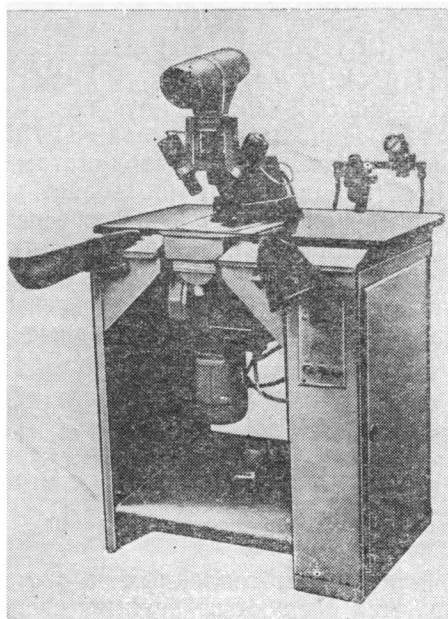


Рис. 3.6. Станок с ручным управлением, оборудованный оптическим устройством и съемным щупом для полуавтоматического сверления

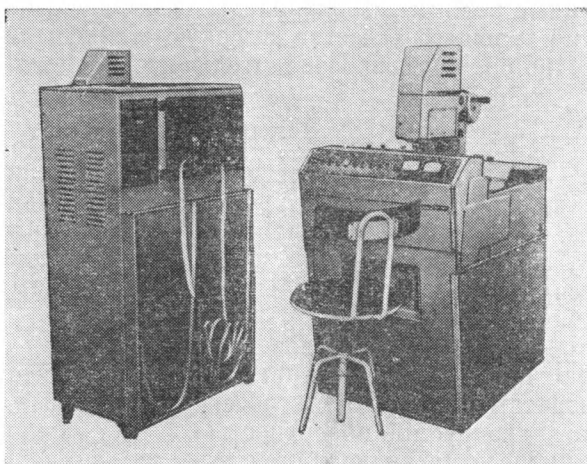


Рис. 3.7. Одношпиндельный сверлильный автомат с цифровым программным управлением



- 8) габариты и вес станка и ЦПУ:  
 станок  $1000 \times 640 \times 1450$  мм, 500 кг;  
 ЦПУ  $650 \times 470 \times 1270$  мм, 70 кг;

- 9) производительность  $2000 \div 2500$  отв/ч.

Отличительной особенностью автомата КП-7511 является коррекция шага перемещения стола по координатам. Введение такого устройства в конструкцию станка позволяет, учитывая усадку материала МПП после их изготовления, обеспечивать точность координат обрабатываемых отверстий с максимальной погрешностью 0,05 мм.

Для сверления МПП разработаны и освоены промышленностью специальные спиральные твердосплавные сверла следующих характеристик:

Диаметр сверла . . . . .	0,4—2,0 мм
Материал . . . . .	твердый сплав ВК6М
Стойкость режущей части (по СТЭФ-1 мм) . . . . .	5000 отверстий (до переточки)
Число допустимых переточек	10

Для сверления МПП, изготовленных из отечественных материалов, рекомендуются следующие режимы сверления: скорость резания  $v = 40 \div 50$  м/мин; подача  $S = 0,02 \div 0,05$  мм/об.

Число оборотов шпинделя станка при выборе режима сверления определяется по формуле

$$n = \frac{1000v}{\pi d}, \text{ об/мин},$$

где  $v$  — скорость резания, м/мин;  $d$  — диаметр сверла, мм.

Приведенные режимы сверления МПП обеспечивают получение отверстий хорошего качества, высокую стойкость инструмента и достаточно большую производительность процесса.

### Металлизация отверстий

Металлизация сквозных отверстий при изготовлении МПП — один из важнейших этапов всего процесса изготовления. Качество металлизации во многих случаях определяет качество и надежность МПП и собранного на ней блока. Металлизация отверстий в печатных платах и, особенно, в многослойных — технически сложная задача.

Нужно одновременно высадить слой меди на диэлектрик (внутреннюю поверхность отверстия) и металлическую медь (торцы контактных площадок) и обеспечить хорошее сцепление осадка с металлизированной поверхностью.

Обычно процесс металлизации состоит из двух основных моментов:

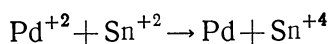
- 1) химическая металлизация;
- 2) гальваническая металлизация.

Перед химической металлизацией поверхность отверстий должна быть подготовлена специальной химической обработкой. Для этой цели выполняют следующие операции: обезжиривание — промывка, сенсибилизация — промывка, активация — промывка и сушка.

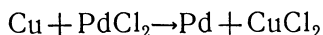
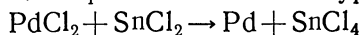
После обезжиривания сенсибилизация плат проводится в растворе двухвалентного олова.

Двухвалентные ионы олова из раствора переходят на поверхность медных контактных площадок и подложки из стеклоэпоксида. При осаждении можно использовать и другие сенсибилизаторы, например титан и четыреххлористый кремний.

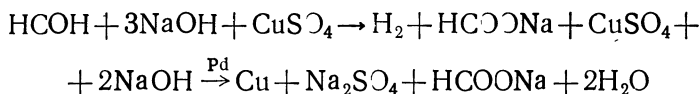
Вторая стадия заключается в погружении плат в раствор хлористого палладия. В результате реакции окисления — восстановления осаждается тонкий слой палладия. При этом палладий восстанавливается до металла ионами олова, которые становятся четырехвалентными:



Полностью реакция протекает согласно уравнениям:



Наконец, палладий катализирует процесс восстановления меди из раствора серноокислой меди в смеси едкого натра и формальдегида:



Активность всех растворов нужно поддерживать на приблизительно постоянном уровне, периодически проводя анализы и пополняя содержание ванны свежими растворами по мере их истощения. На последней стадии высвобождается газообразный водород, пузырьки которого могут быть захвачены стеклянными волокнами, выступающими из стенок отверстия, или другими неоднородностями поверхности. Пузырьки мешают осаждению меди и могут способствовать образованию раковин в слое покрытия, поэтому плату в процессе металлизации следует покачивать.

На медь, осажденную химическим путем, наносится слой электролитической меди, получаемый обычным способом из пиррофосфатного электролита. Как правило, общая толщина медного покрытия равна 35÷40 мкм, т. е. примерно такая же, как толщина медной фольги. При изготовлении плат для некоторых устройств, требующих уменьшенного диаметра контактных площадок и работающих при пониженных плотностях тока, толщина покрытия делается равной 25 мкм.

Некоторые зарубежные фирмы при изготовлении МПП выполняют металлизацию отверстий только химическим путем. На-

пример, в США запатентован процесс химической металлизации СС — 4 и NT — 1.

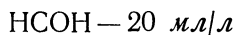
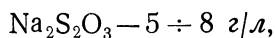
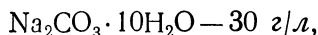
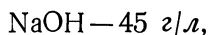
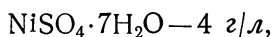
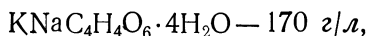
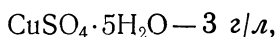
Метод химического осаждения, по мнению зарубежных специалистов, является оптимальным методом металлизации сквозных отверстий медью в многослойных печатных платах. Методом химического осаждения можно получить осажденный медный пистон с равномерной толщиной стенок до 100 мкм, в результате чего отпадает необходимость применения электролитического осаждения. Этот метод позволяет производить меднение отверстий диаметром менее  $\frac{1}{3}$  толщины платы.

Однако скорость осаждения меди химическим путем, прочность сцепления с основанием и плотность осадка часто не удовлетворяют предъявляемым требованиям, поэтому в этом направлении постоянно ведутся поиски новых решений.

В настоящее время известен стабилизатор растворов химического меднения, позволяющий повысить качество металлизации печатных плат. Полученная из стабилизированных растворов медь практически не содержит продуктов разложения. Введением в концентрированный раствор меднения добавки сернистого никеля удалось увеличить прочность сцепления химической меди с диэлектриком, существенно уплотнить структуру меди.

При осаждении металлов химическим восстановлением для достижения более равномерной толщины их слоя и обеспечения меньшего осаждения шлама рекомендуется перемешивать рабочие растворы и фильтровать их; фильтрация рабочих растворов, кроме того, повышает их устойчивость.

Для улучшения качества осадка химической меди и стабилизации всего процесса проводятся опыты металлизации плат в движущемся потоке раствора, так например, химическое осаждение меди проводится из следующего стабилизированного раствора, состава:



$\text{pH} = 12 - 12,5$ ;  $t = 20 - 25^\circ \text{C}$ , продолжительность обработки 4 ч.

Раствор фильтруется и возвращается в ванну. Однако, если не предусмотреть свободного выхода водорода, то возможно образование газовой подушки, что приводит к ухудшению контакта раствора с платой. Объем рабочего раствора 5 л. Скорость протекания его 30 л/ч. Рабочий раствор корректируется через

каждые 4 ч всеми компонентами в количестве, составляющем половину от исходного их содержания. Стабилизатор добавлялся в виде разбавленного раствора; использовать концентрированный раствор нельзя, так как при избытке стабилизатора процесс прекращается и для возобновления его необходимо повышать восстановительный потенциал раствора, что снижает устойчивость последнего.

Как видно из данных, приведенных в табл. 3.4, химическое меднение в протекающем растворе с фильтрацией обеспечивает значительное повышение прочности сцепления, особенно на пластах из гетинакса.

Таблица 3.4

ПРОЧНОСТЬ СЦЕПЛЕНИЯ ХИМИЧЕСКОЙ МЕДИ С ДИЭЛЕКТРИКОМ,  $\text{кг/см}^2$

Материал	Гетинакс		СТЭФ	
состояние раствора	средняя скорость осаждения, $\text{мкм/ч}$	прочность сцепления, $\text{кг/см}^2$	прочность сцепления, $\text{кг/см}^2$	средняя скорость осаждения, $\text{мкм/ч}$

Химическое меднение в потоке

Свежий	4	18—19,6	15—15,2	5,5
После первой корректировки	2	16—22	11	1,8
После второй корректировки	3	18—19	13—19	2,7
Старый раствор без корректировки	2,2	17—26	16—18	2

Химическое меднение в неподвижном растворе

Свежий	3,8	10,5—11,5	7,5—9,5	5
--------	-----	-----------	---------	---

Интересно отметить, что прочность сцепления химически осажденной меди с диэлектриком значительно повышается при проведении процесса в перемешиваемом растворе и в случае непрерывной его фильтрации. Если же рабочие растворы не перемешивать и не фильтровать, то качество осаждаемой меди снижается: она становится шероховатой и прочность ее сцепления с основанием уменьшается.

Установлено также, что скорость процесса меднения в потоке уменьшается со временем и становится близкой к величине  $2 \text{ мкм/ч}$  (часто вследствие неправильной эксплуатации растворов химического меднения: горячих деталей и т. д.) происходит самопроизвольное разложение даже стабилизированных растворов. Было опробовано объемное разложение стабилизированного раствора (с добавкой  $4 \text{ г/л}$  сернистого никеля) введением в него избыточного количества формалина. Раствор отфильтровывали от осадка меди и вводили в него  $5\text{—}8 \text{ мг/л}$  тиосульфата натрия,

рецептурное количество солей металлов, половинный объем указанного в рецептуре формалина, затем проверяли и при необходимости корректировали величину  $pH$ . При повторном осаждении химической меди из этого раствора осадки по своим физико-химическим свойствам практически не отличались от меди, полученной из свежеприготовленного раствора.

Возможность повторного использования раствора сегнетовой соли дает большой экономический эффект.

При химическом меднении из разбавленного тартратного раствора было обнаружено, что с возрастанием скорости потока процесс меднения протекает быстрее. Так, при скорости потока 6, 18, 30 л/ч скорость меднения равна соответственно 1, 1,3; 2,4 мкм/ч. Такая зависимость указывает на наличие диффузионных ограничений в разбавленных растворах химического меднения.

Исследование структуры осадков меди под микроскопом показало, что осадки, полученные при меднении в потоке имеют более плотную структуру. Можно предположить, что увеличение прочности сцепления меди с основанием при меднении в потоке обусловлено более энергичным удалением водорода, закрывающего поверхность диэлектрика, и снижением степени катодного торможения процесса.

Существенным недостатком технологии меднения печатных плат является образование разделительного слоя палладия на границе фольга — химическая медь. Применение совмещенных растворов для активации поверхности платы, способствующих устранению этого слоя, ограничено, к сожалению, их недостаточной стабильностью.

Одним из способов, позволяющим устранить разделительный слой на наиболее опасном участке плат, т. е. на границе фольга — химическая медь, является процесс химического меднения под током.

Платы, предварительно подготовленные по стандартной методике (обезжиривание — промывка, сенсibilизация — промывка, активация — промывка и сушка), потоком загружают в электролит, представляющий собой стабилизированный тиосульфатом натрия раствор химического меднения. В раствор входит указанное в рецептуре количество формалина. Катодная плотность тока на плату не должна превышать 0,1—0,2 а/дм<sup>2</sup> (в расчете на меняющуюся поверхность).

Аноды — медные, температура комнатная. Загрузка плат в раствор под током позволяет избежать химического осаждения меди на фольге. В начальный период происходит в основном гальваническое осаждение меди, а затем — химико-гальваническое. Это обеспечивает хорошее сцепление на кромке контактной площадки; при этом улучшается структура медного слоя.

Наложение тока на плату при меднении, как показали опыты, не влияет на прочность сцепления на границе «диэлектрик — хи-

мическая медь» (на внутренней поверхности переходного отверстия).

Предварительное оксидирование кромок контактных площадок плат, выполненное по схеме: обезжиривание, оксидирование, сенсibilизация и активизация — также обуславливает прочность сцепления химически осажденной меди с фольгой при химико-гальваническом меднении.

При химико-гальванической металлизации многослойных печатных плат требуются специальные выводы для контактирования внутренних слоев.

В качестве активирующих растворов для активации и сенсibilизации обычно используют следующие составы:

для сенсibilизации:  $\text{SnCl}_2$  — 10 г/л;  $\text{HCl}$  — 40 г/л;

для активации:  $\text{PdCl}_2$  — 0,5 г/л;  $\text{HCl}$  — 1÷2 мл/л.

В последнее время ряд авторов рекомендуют совмещенный раствор состава:  $\text{PdCl}_2$  — 1,0 г/л;  $\text{HCl}$  — 300 мл/л;  $\text{SnCl}_2$  — 50 г/л и  $\text{H}_2\text{O}$  — 600 мл/л.

Другой путь борьбы с разделительным слоем палладия, который образуется на поверхности контактных площадок в процессе подготовки плат к химическому меднению, — предварительное оксидирование меди.

Оптимальный состав раствора:  $\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$  — 15 г/л;  $\text{NaOH}$  — 50 г/л.

Режим оксидирования: температура 40°С, продолжительность обработки 15 мин.

Подготовка платы перед химическим оксидированием включает следующие операции: обезжиривание венской известью, промывку, химическое обезжиривание составом  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  — 10 г/л и порошка «Новость» 5 г/л при температуре 25°С, в течение 2 мин, затем промывку, декапирование в 10%-ном растворе  $\text{HCl}$  и оксидирование.

На поверхности фольги образуется черная оксидная пленка, хорошо сцепленная с основанием. Пленка не должна сниматься при протирании тампоном. При обработке в растворе сенсibilизации оксидная пленка из черной превращается в ярко-красную. Это может свидетельствовать об изменении валентного состояния ионов меди в оксидной пленке (переход  $\text{Cu}^{+2}$  в  $\text{Cu}^{+1}$  вследствие восстановления ионами двухвалентного олова).

Дальнейшее восстановление происходит под действием формальдегида уже в рабочем растворе меднения.

Предварительное оксидирование поверхности фольги обеспечивает прочность сцепления осадка с фольгой более 50 кг/см<sup>2</sup> и одновременно плотную структуру.

Оксидирование фольги в щелочном растворе персульфата ведет к разрушению поливиниловой эмульсии. Поэтому целесообразным может оказаться использование кислого пассивирующего раствора, например  $\text{K}_2\text{C}_2\text{O}_7$  — 100 и  $\text{H}_2\text{SO}_4$  — 20 мл/л.

В последнее время изыскан еще один способ металлизации отверстий. В основе его лежит облагораживание поверхности, подвергаемой затем активации (обработке в растворе хлористого палладия), что приводит к значительному снижению контактной разности потенциалов системы «медь — палладий».

Из наиболее доступных и отработанных способов облагораживания поверхности является серебрение. После этой операции палладий на торцах выделяется значительно меньше.

В целях дальнейшего улучшения качества меднения сквозных отверстий в печатных платах разрабатываются диэлектрики для основания печатных плат, в которые вводят катализатор процесса меднения.

Стеклоткань пропитывается эпоксиднофенольным лаком, в который предварительно вводится спиртовой раствор, содержащий  $\text{SnCl}_2$  и  $\text{PdCl}_2$ .

Как показали опыты, оптимальное количество хлористого палладия, необходимое для обеспечения химического меднения поверхности, должно составлять 0,3 части на 300 мл лака. Введение катализатора позволит исключить пять операций: сенсибилизацию, промывку, активацию, промывку и сушку плат.

Все процессы, связанные с металлизацией отверстий в платах, в производственных условиях выполняются на специальных химико-гальванических автоматах.

С целью стабилизации режимов и соответственно повышения качества металлизации химико-гальванические автоматы оборудуются системой программного управления.

§ 4. 1. Расчет и проектирование

Полосковые линии передачи представляют собой дальнейшее развитие принципов двухпроводной и коаксиальной линий.

Применение полосковых линий передачи позволяет решить проблему миниатюризации СВЧ устройств и, как следствие, комплексной миниатюризации радиоэлектронной аппаратуры.

К преимуществам полосковой линии передачи относятся меньшие вес и габариты, значительно меньший расход цветных металлов, а также меньшая трудоемкость их изготовления.

Полосковые линии находят применение в высокочастотных трактах, работающих в диапазоне  $500 \text{ Мгц} \div 20 \text{ Ггц}$ .

Рабочая полоса частот полосковых линий значительно больше, чем у стандартных прямоугольных волноводов.

Размеры сечения волновода должны быть такими, чтобы обеспечить существование волны низшего типа (рис. 4.1).

Если  $\lambda$  — рабочая длина волны, то должны соблюдаться соотношения:

$$\lambda < (\lambda_{кр})_{\text{низшей волны}};$$

$$\lambda > (\lambda_{кр})_{\text{ближайшей высшей волны}}.$$

$$\left. \begin{array}{l} \lambda_{\max} < (\lambda_{кр})_{H_{10}} = 2a \\ \lambda_{\min} > (\lambda_{кр})_{H_{01}} = 2a \\ \lambda_{\min} > (\lambda_{кр})_{H_{20}} = a \end{array} \right\} \text{Используя эти условия для волновода сечением } 10 \times 23 \text{ мм, получаем:}$$

$$4,6 > \lambda > 2,3 \text{ см.}$$

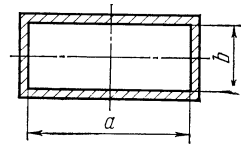


Рис. 4.1. Сечение волновода

Из изложенного следует, что существует естественный предел миниатюризации СВЧ — устройств на волноводных линиях передачи, обусловленный конечными размерами сечения волновода для данной длины волны.

Согласно рис. 4.2 существуют три типа полосковых линий передач. Они эквивалентны соответственно воздушной симметричной двухпроводной линии (а), однопроводной линии (б) и коаксиальному кабелю (в). Конструктивные разновидности этих трех систем показаны на рис. 4.3. Первый тип называется симметричной полосковой линией (а), второй — несимметричной полосковой линией («микрострип», б), вариант, показанный на рис. 4.3, в, изображен плоской полоской — «сэндвичем», трехпластинчатой (симметричной полосковой) линией или экранированной параллельно-пластинчатой линией.



На рис. 4.3, *г* показан случай, когда диэлектрик находится в области слабого поля, так как большая часть энергии распространяется в воздушных зазорах между полоской и экраном (приблизительно 90% всей мощности). Таким образом, эта форма позволяет получить более высокое значение  $Q$ -фактора, чем другие три типа линий. Линия, показанная на рис. 4.3, *г*, называется высокодобротной линией. Некоторые авторы называют ее высокодобротной полосковой линией, хотя это название не совсем удачно, так как термин «полосковая линия» имеет более общее значение и охватывает целый ряд полосковых линий передачи.

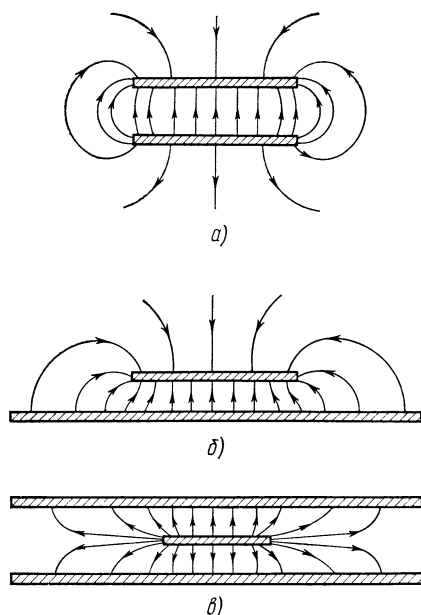


Рис. 4.2. Три типа полосковых линий передачи

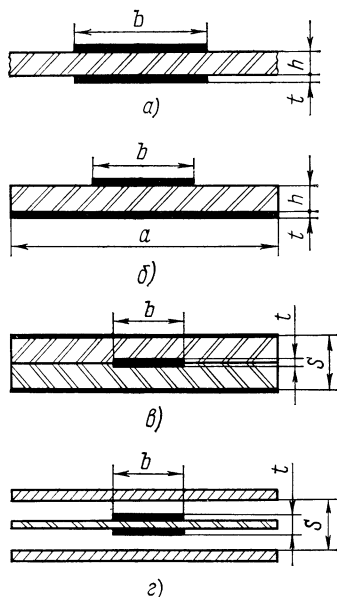


Рис. 4.3. Конструктивные разновидности трех типов линий передачи

Общая характеристика различных разновидностей полосковых линий дана в табл. 4.1.

Для волнового сопротивления ряда полосковых линий передачи с воздушным диэлектриком выведены аналитические выражения. Однако в большинстве случаев результаты представляются графически. Их можно применять к любой из линий, показанных на рис. 4.2 и 4.3, а также к высокодобротной симметричной полосковой линии (рис. 4.3, *г*) при условии, что  $t \ll S$  и что диэлектрическая постоянная изоляционной прокладки незначительно отличается от диэлектрической постоянной свободного пространства. Графики симметричной полосковой линии применимы к линии, заполненной диэлектриком (рис. 4.3, *в*) при условии,

Таблица 4.1

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗЛИЧНЫХ ПОЛОСКОВЫХ ЛИНИЙ

Характеристика	Симметричная полосковая линия	Несимметричная полосковая линия	Трехпластинчатая полосковая линия	Высокооборотная полосковая линия
Легкость изготовления	2*	1	3	4
Размеры и вес	1	1	2	3
Легкость испытания	2	1	4	3
Легкость анализа	3	3	1	2
Потери от рассеяния	2	2	3	1
Потери от излучения	2	2	1	1
Ограничения, вызыва- емые конфигурацией	Затруднено питание от несимметричной линии передачи	Поворот фазы на 180° невозможен, но легко суживающаяся пластинка (заземленная) дает пе- реход в симметричную линию передачи	Затруднены последовательные соединения в плоскости <i>E</i> . Поворот фазы на 180° невозможен. Неоднородности должны быть в принципе сим- метричными	
Область применения	Широкополосные гибридные узлы, включая устройства для поворота фазы на 180°	Широкополосные уз- лы с низким <i>Q</i> -фактором	Широкополосные узлы и фильтры со средней добротностью (напри- мер, фильтры верхних и нижних частот)	Широкополосные и уз- кополосные узлы, филь- тры, обычно включающие высокооборотные резо- наторы
Используется в насто- ящее время	Незначительно	Широко	Значительно	Широко

\* Цифры обозначают порядковое место по качеству.

что  $a \gg b$ ; в этом случае значение волнового сопротивления, найденное по кривым, должно быть умножено на  $\left(\frac{\epsilon_0}{\epsilon_g}\right)^{1/2}$ .

На рис. 4.4 представлен график волнового сопротивления симметричной линии с воздушным зазором.

На рис. 4.5 приведен график, определяющий волновое сопротивление несимметричной полосковой линии с воздушным зазором.

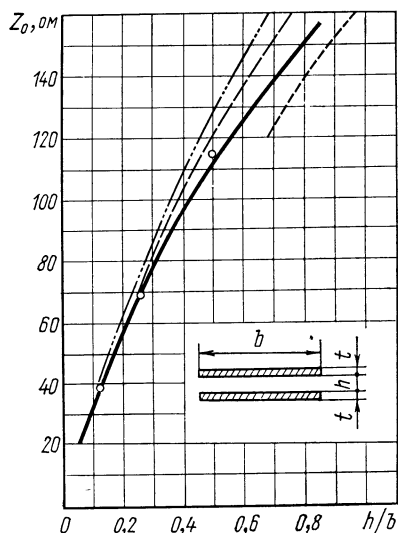


Рис. 4.4. График волнового сопротивления симметричной линии с воздушным зазором

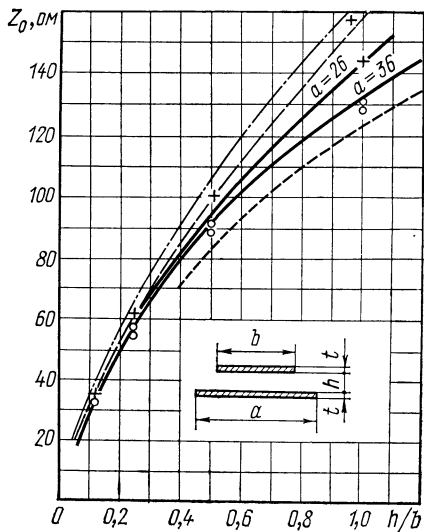


Рис. 4.5. График для определения волнового сопротивления несимметричной полосковой линии с воздушным зазором

Волновое сопротивление линии может быть вычислено также по следующей формуле:

$$Z_0 = \frac{\sqrt{\mu\epsilon}}{3c} \cdot 10^4,$$

где  $Z_0$  — волновое сопротивление, ом;  $\mu\epsilon$  — относительные диэлектрическая и магнитная проницаемость среды;  $c$  — погонная емкость линии, пф/м.

Погонная емкость определяется экспериментально одним из известных методов\*.

Размеры полосковых линий выбирают, как указывалось ранее, такими, чтобы паразитные типы волн не могли в них распро-

\* Дж. М. Дьюкс. Печатные схемы. Их конструирование и применение. Изд-во «Иностранная литература», 1963.

страняться. Возбуждение паразитных колебаний зависит по крайней мере от трех физических параметров: расстояния между заземленными пластинами, поперечных неоднородностей и ширины центрального проводника.

Расстояние между заземленными пластинами должно быть меньше  $\lambda_e/2$ , где  $\lambda_e$  — длина волны в диэлектрике. Если это условие не выполняется, сигнал распространяется вдоль заземленной пластины, а не вдоль центрального проводника. Если ширина центрального проводника будет более половины длины волны, то в линии возникнут высшие типы волн, которые образуют узел напряжения в середине проводника и максимум на его краях. Эти типы волн имеют тенденцию распространяться в диэлектрике и необязательно следуют за центральным проводником.

Нежелательные виды колебаний, возникающие в поперечных неоднородностях линии (эти неоднородности есть всегда при переходе от коаксиальной линии к полосковой) в местах установки диодов в линию или вследствие погрешностей изготовления, можно свести до минимума установкой короткозамыкающих винтов между заземленными пластинами. Расстояние между этими короткозамыкающими элементами должно быть меньше  $\lambda_e/2$ .

Короткозамыкающие элементы следует также использовать вблизи резонансных устройств, в которых возможно излучение (например, в фильтрах).

Для уменьшения излучения с торцов расстояние между заземленными пластинами должно быть меньше  $\lambda_e/4$ , а все элементы схемы должны отстоять от краев полосковой линии не менее чем на  $\lambda_e/4$ .

Предотвращает паразитное излучение также электропроводный материал, оставленный невытравленным по краю платы устройства на полосковой линии, и экранирующий материал на периферии устройства.

Центральный проводник должен быть расположен на одинаковом расстоянии от заземленных пластин и параллельно им. Это существенно для линий с малыми потерями, где даже небольшое излучение ТЕМ-волны может заметно снизить добротность системы.

Для цепей с высокой добротностью жестким является допуск на наклон центрального проводника относительно заземленных пластин.

На рис. 4.6 представлен график зависимости волнового сопротивления симметричной полосковой линии от геометрических размеров ее сечения. Это семейство кривых может быть применено для практического случая, когда полосковый проводник имеет конечную толщину. Эти кривые основаны на аналитических решениях, для двух граничных условий:  $b \gg S$  и  $b \ll S$  при  $a \gg b$ .

В случае использования этих кривых применительно к симметричной полосковой линии с низкой добротностью (рис. 4.3, в),

значение волнового сопротивления линии, найденное по графику, должно быть умножено на  $(\epsilon_0/\epsilon_g)^{1/2}$ .

На рис. 4.7—4.8 графически представлены длины волн в несимметричных полосковых линиях (рис. 4.7), в высокодобротной симметричной полосковой линии при различных клеящих материалах и различной ширине полосы (рис. 4.8), длина волны в высокодобротной трехпластинчатой линии на слоистом материале из эпоксидной смолы и стекловолокна (рис. 4.9).

Добротность полосковой линии передачи в большой степени зависит от типа этой линии. Так, линии передачи, показанные на

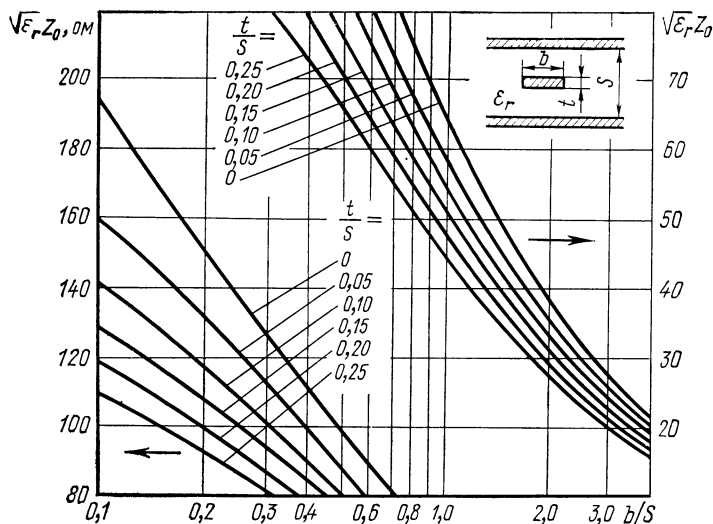


Рис. 4.6. График зависимости волнового сопротивления симметричной полосковой линии от геометрических размеров ее сечения

рис. 4.3, а—в, обеспечивают добротность порядка нескольких сот в сантиметровом диапазоне (3000 МГц). В отличие от них линия, показанная на рис. 4.3, г, может быть выполнена таким образом, что ее добротность при той же частоте составит несколько тысяч. Учитывая этот и ряд других факторов, схемы с фильтрами почти всегда изготавливают в виде высокодобротных трехпластинчатых линий.

Серьезным затруднением при работе с полосковыми линиями передачи является побочное распространение волн, которое не связано с преобладающим типом волн. Еще большие трудности вызывает возможность (при определенных неблагоприятных условиях) прямого излучения. В случае симметричной полосковой линии распространение побочных волн обычно зависит от граничных условий и перехода в несимметричные волны типа ТЕМ между двумя заземленными пластинами или, если боковые сто-

роны закрыты, в волны типа  $H_{оп}$ . Эти волны возникают либо из-за небольшого продольного перекоса полоскового проводника, либо из-за асимметричной неоднородности и вызывают излуче-

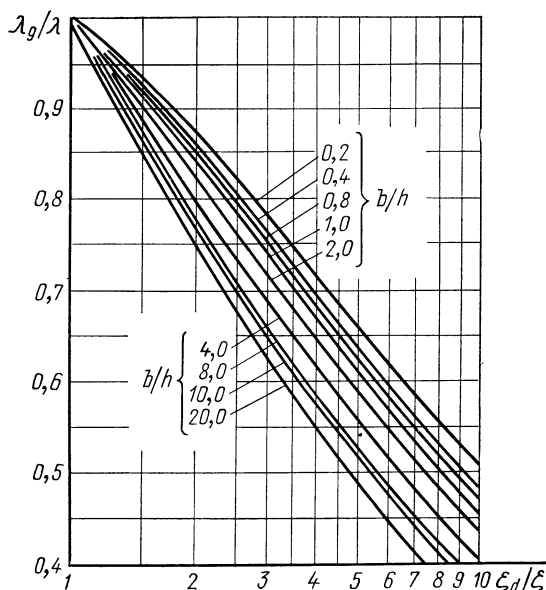


Рис. 4.7. Графики длины волны в несимметричных и симметричных полосковых линиях

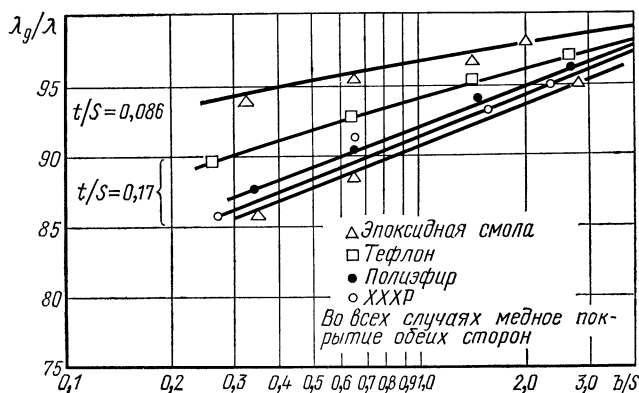


Рис. 4.8. Графики длины волны в высокочастотной симметричной полосковой линии при различных клеящих материалах и различной ширине полосы

ние с боковых сторон линий до тех пор, пока цепь не будет полностью закрыта. Затруднения, связанные с волнами этих типов, можно устранить замыканием двух заземленных плоскостей накоротко в области неоднородности при помощи решетки, образо-

ванной соответствующим образом расположенными металлическими остриями.

В случае несимметричной полосковой линии наблюдается несколько иная картина. Для линии с воздушной прослойкой, у которой  $h < \frac{1}{2}\lambda$  и  $b < \frac{1}{2}\lambda$ , граничные условия не допускают никакого другого решения, кроме того, при котором преобладающим типом волн является ТЕМ. Аналогичное заключение справедливо и для случая, изображенного на рис. 4.3, б, при условии, что ширина диэлектрика не превышает около  $\frac{1}{2}\lambda$  в диэлектрике, хотя фактически в этом случае волна должна обладать небольшими составляющими как  $E$ , так и  $H$ , направленными по ходу распространения. Если же ширина прокладки равна нескольким длинам волн, то может происходить распространение целой серии волн, по своим свойствам почти идентичным волнам преобладающего типа, но с другим распределением поля в отдельных участках на любой стороне полоскового проводника. Существует и другая возможность возникновения побочного распространения типов волн, которые можно поддерживать независимо от преобладающего типа.

Наличие неоднородностей у краев листа или в любом другом месте приводит к тому, что излучение этого типа волн становится довольно сильным. Определенные виды неоднородностей в системе полоскового проводника, такие, например, как индуктивный шунтирующий штырь, будут давать непосредственное излучение без промежуточного перехода.

Диэлектрическим материалам для печатных полосковых линий, применяемых в качестве оснований для печатных полосковых линий, необходимо уделять особое внимание: во-первых, диэлектрические свойства материала основания  $\operatorname{tg} \delta$  и  $\epsilon$  характеризуют качество изделия: во-вторых, стабильность диэлектрических свойств в течение продолжительного отрезка времени при внешних воздействиях определяет стабильность рабочих параметров радиоаппаратуры. В общем случае параметры диэлектриков должны соответствовать следующим значениям:

- 1) тангенс угла диэлектрических потерь  $\operatorname{tg} \delta$  для печатных полосковых линий с твердым диэлектриком — не более  $8 \cdot 10^{-4}$ ;
- 2) тангенс угла диэлектрических потерь для линий с воздушной средой  $\operatorname{tg} \delta \leq 3 \cdot 10^{-2}$ ;
- 3) диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  для печатных полосковых линий, применяемых в устройствах, работающих в диапазоне 3000 Мгц и выше,  $\epsilon \leq 3$  и  $\epsilon \geq 3$  для линий, работающих в дециметровом и метровом диапазоне\*;
- 4) электрическая прочность диэлектриков для уровня мощности до 5 вт существенной роли не играет и не лимитируется.

---

\* Величина  $\epsilon$  в первом случае определяется допустимыми потерями в диэлектрике, а во втором — возможностью сокращения габаритных размеров печатных плат.

Конструктивно-технологические требования к диэлектрикам предполагают, что:

а) механические свойства диэлектриков допускают легкую механическую обработку (штамповку, вырубку, сверление и т. д.);

б) заготовки печатных плат должны иметь однородную структуру, обеспечивающую максимальную идентичность параметров  $\operatorname{tg} \delta$  и  $\epsilon$  по всему телу заготовки;

в) полностью исключены механические дефекты заготовок (неоднородность структуры, газовые пузыри, посторонние включения, царапины, сколы, надрезы и т. д.);

г) геометрические размеры заготовок (толщина) выдержаны в пределах 1—5% от номинала, так как изменение толщины приводит к прямо пропорциональному изменению волнового сопротивления;

д) диэлектрики печатных плат должны обеспечивать качественную химическую металлизацию или фольгирование медью;

е) старение диэлектриков под воздействием климатических факторов (ухудшение  $\operatorname{tg} \delta$  и  $\epsilon$ ) должно быть минимальным.

Следует иметь в виду, что изменение  $\epsilon$  на 5—10% приводит к сдвигу частотной характеристики на 2,5—5%.

Основываясь на изложенном, для печатных плат можно рекомендовать следующие диэлектрики: полистирол, ПТ, САМ, продукт 10, фторопласт-4, стеклофторопласт ФАФ-4 — для симметричных и несимметричных линий с твердым диэлектриком, фольгированные стеклотекстолиты и стеклофторопласт — для симметричных линий с воздушной средой. При выборе диэлектриков необходимо учитывать условия эксплуатации радиоаппаратуры, так как полистирол, ПТ, САМ и продукт 10 обладают малой теплостойкостью и значительной хрупкостью, а фторопласт-4 — значительной хладотекучестью. В табл. 4.2 приведены основные характеристики высокочастотных диэлектрических материалов, применяемых для изготовления печатных полосковых линий.

Элементы печатных схем СВЧ и полосковых линий необходимо выполнять из металлов с малым удельным сопротивлением, обеспечивающим минимальные потери. К таким материалам относятся: медь, серебро, алюминиевые сплавы, латунь и т. д. Основания (заземленные пластины) печатных полосковых линий выполняют преимущественно из алюминиевых сплавов и латуни, а проводящие полосы — из меди, серебра или меди, покрытой тонким слоем серебра (около 10 мкм).

При проектировании аппаратуры следует учитывать разность коэффициентов линейного расширения диэлектрика платы и металла проводящей печатной полосы. Это требование вызвано тем, что при значительной разности коэффициентов линейного расширения диэлектрика и полосы возможно возникновение микротрещин и микроотслоений материала полосы. Поэтому, если известно, что аппаратура будет эксплуатироваться в широ-



Таблица 4.2

Материал	Марка или ТУ	Тангенс угла диэлектрических потерь *	Диэлектрическая проницаемость *	Интервал рабочих температур, °С	Электрическая прочность, кВ/мм	Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·см	Удельное поверхностное электрическое сопротивление, Ом/см²	Коэффициент линейного расширения, 1/град	Темперостойкость по Мартенсу, °С	Твердость по Бринеллю, кг/мм²	Удельный вес, г/см³	Временное сопротивление растяжению, кг/см²	Временное сопротивление изгибу, кг/см²	Водопоглощение за 24 ч, %
Фольгированный фторопласт-4	ВТУ П-295—62	2,5·10 <sup>-4</sup>	2,0—2,1	(-100) ÷ ÷ (+200)	40	2·10 <sup>16</sup>	2·10 <sup>15</sup>	(8 ÷ 25) × × 10 <sup>-5</sup> **	—	3—4	2,1 ÷ ÷ 2,3 без фольги	140 ÷ ÷ 200	120 ÷ ÷ 140	0
Стеклофторопласт	ФАФ-4, ТУ П-129—65	(0,6 ÷ ÷ 0,8) 10 <sup>-3</sup>	2,5—2,7	(-60) ÷ ÷ (+250)	—	—	—	—	—	—	—	600	—	—
Полистирол	А, ГОСТ 9440—60	5·10 <sup>-4</sup>	2,6	(-60) ÷ ÷ (+60)	20— 50	1·10 <sup>16</sup>	1·10 <sup>16</sup>	(6 ÷ 10) × × 10 <sup>-5</sup> **	80	20	1,05	300 ÷ ÷ 500	800 ÷ ÷ 850	0,00 ÷ ÷ 0,03
САМ	МРТУ-6 М-821—61	6·10 <sup>-4</sup>	2,6	(-60) ÷ ÷ (+80)	—	1·10 <sup>16</sup>	—	—	100	—	1,056	—	700	—
ПТ	ЭРО.023.010. ТУ	(7 ÷ 9) × × 10 <sup>-4</sup> ***	2,48	(-60) ÷ ÷ (+70)	50	—	10+17	—	80 ÷ 85	20— 30	1,07	—	—	0,00 ÷ ÷ 0,05
ПТ	ЭРО.023.011 ТУ	(9 ÷ 15) × × 10 <sup>-4</sup>	5,0—10,0	(-60) ÷ ÷ (+75)	30	2·10 <sup>15</sup>	—	(3,8 ÷ 5,3) × × 10 <sup>-5</sup>	80 ÷ 85	24 ÷ ÷ 30	1,5 ÷ ÷ 1,75	270 ÷ ÷ 360	540 ÷ ÷ 600	—
Продукт 10	ВТУ МХП	(4 ÷ 5) × × 10 <sup>-4</sup>	2,6—2,8	(-60) ÷ ÷ (+85)	28	1·10 <sup>17</sup>	1·10 <sup>14</sup> 1·10 <sup>-15</sup>	(10 ÷ 12) × × 10 <sup>-5</sup>	100	16	1,0 ÷ ÷ 1,1	—	800	0,00 ÷ ÷ 0,5

\* При частоте 1 МГц.

\*\* При температуре 20° С.

\*\*\* При частоте 1000 МГц.

ком интервале температур, необходимо предусматривать меры технологической или конструктивной компенсации, в частности, печатные полоски рекомендуется выполнять без резких изгибов и переходов.

Технологическая компенсация тепловой деформации заключается в подборе материалов с минимальной разницей коэффициентов линейного расширения.

В табл. 4.3 приведены основные параметры металлов, рекомендуемых для использования в печатных полосковых конструкциях.

Таблица 4.3

Наименование материалов	Удельный вес, г/см <sup>3</sup>	Удельная проводимость, ом·см <sup>-1</sup>	Коэффициент линейного расширения, 1/град	Технологические характеристики
Медь	8,94	$5,8 \cdot 10^{-5}$	$(16,2 \div 16,7) \cdot 10^{-6}$	Наносится электрохимическим способом. Хорошо травится. Не обладает коррозионной стойкостью
Серебро	10,5	$6,1 \cdot 10^5$	$19,7 \cdot 10^{-6}$	Наносится электрохимическим способом и вжиганием. Травится, обладает коррозионной стойкостью
Латунь	8,7	$(4,0 \div 1,67) \times 10^5$	$(17,8 \div 19,8) 10^{-6}$	Применяется для оснований и экранов
Алюминиевые сплавы	2,7	$(3,57 \div 1,3) \times 10^5$	$(22,0 \div 27,0) 10^{-6}$	То же

Практически в большинстве конструкций применяют медные полосковые линии, покрытые электролитическим серебром, при толщине покрытия около 10 мкм или медные полосковые линии, защищенные лаками. Серебрение проводящих полосок целесообразно применять при фотоэлектрохимическом способе изготовления печатных плат, а лакировку — при фотохимическом способе на фольгированном материале ФАФ-4.

При изготовлении печатных плат необходимо учитывать допустимые механические нагрузки на печатные проводники и уделять особое внимание вопросу адгезии печатных проводников с диэлектриком.

Теоретически эквивалентная диэлектрическая проницаемость воздушной среды в симметричных линиях равна 1. Эквивалентная диэлектрическая проницаемость симметричных линий с твердым диэлектриком равна диэлектрической проницаемости среды. Несимметричные линии имеют  $\epsilon_{\text{экв}} < \epsilon_g$  (материала платы) за счет электромагнитного поля в воздушной среде под печатной полоской.

Величина  $\epsilon_{\text{ЭКВ}}$  может быть рассчитана по формуле

$$\epsilon_{\text{ЭКВ}} = 1 + (1 + \epsilon_g) \frac{1,837 + \frac{\pi b}{h} - \ln \left( 1 + \frac{\delta}{2} \right)}{K^2 \left[ 1 + \frac{\pi b}{h} + \ln \left( 1 + \frac{\pi b}{h} \right) \right]}, \quad (4.1)$$

где 
$$\delta = -2 + 2\beta^3 + 2\beta(\beta^2 - 1)^{1/2} \quad (4.2)$$

при 
$$\beta = 1 + \frac{t}{h}. \quad (4.3)$$

Длину волны в печатных полосковых линиях находят из равенства

$$\lambda_{\epsilon} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{\text{ЭКВ}}}}; \quad (4.4)$$

где  $\lambda_0$  — расчетная длина волны в свободном пространстве.

Техника печатных схем, применяемая при изготовлении плосковых линий, накладывает специфические технологические ограничения на конструкцию. Основное ограничение — это технологически допустимая ширина печатной полоски. В большинстве случаев технология допускает ширину полоски не менее 0,3 мм и стремится к получению еще меньших величин. Следует учитывать, что размеры печатных полосок и печатных плат зависят от электрических требований, выражаемых формулой:

$$b, h, s \leq \frac{\lambda_{\epsilon \text{ min}}}{2}. \quad (4.5)$$

Геометрические размеры несимметричных полосковых линий рассчитывают методом аппроксимации при определенных величинах  $Z_0$  и  $\epsilon_{\text{ЭКВ}}$  и конструктивно выбранном значении  $h$ . При  $b > h$  используют формулу

$$Z_0, [\text{ом}] = \left( \frac{1,26 \cdot 10^6}{\epsilon_g} \right) \frac{h}{b \left\{ 1 + \frac{0,637h}{b} \left[ \ln \left( 1 + \frac{1,57b}{h} \right) + 1 \right] \right\}}, \quad (4.6)$$

где  $Z_0$  — заданное волновое сопротивление полосковой линии, а при  $b \leq h$  формулу

$$Z_0, [\text{ом}] = 1,59 \cdot 10^{-1} \left( \frac{1,26 \cdot 10^{-6}}{\epsilon_g} \right)^{1/2} \ln \frac{8h}{b}. \quad (4.7)$$

Полная ширина несимметричной линии  $a$  для одиночной полоски определяется заданным ослаблением поля и в большинстве случаев соответствует соотношению  $a \geq 5b$ , с учетом, что величина  $a$  должна удовлетворять следующим условиям: при  $h \leq 2 \text{ мм}$   $a \geq 8h$ , при  $h \geq 6 \text{ мм}$   $a \geq 4h$ .

Рабочий расчет симметричной линии при заданных и конструктивно-определенных значениях  $Z_0$ ,  $h$  и  $S$  должен основываться на условии, что  $\frac{t}{S} \leq 0,25$ , тогда при  $\frac{b}{S-t} \geq 0,35$

$$Z_0, [\text{ом}] = \frac{94,75}{\sqrt{\epsilon_{\text{ЭКВ}}} \left( \frac{\frac{b}{S}}{1 - \frac{t}{S}} + \frac{C'f}{8,85 \cdot \epsilon_{\text{ЭКВ}} \cdot 10^{-2}} \right)}, \quad (4.8)$$

где краевая емкость  $C'f$  определяется соотношением

$$C'f = 2,85 \cdot \epsilon_{\text{ЭКВ}} \cdot 10^{-2} \left\{ \frac{2}{1 - \frac{t}{S}} \ln \left( 1 + \frac{1}{t - \frac{t}{S}} \right) - \left( \frac{1}{1 - \frac{t}{S}} - 1 \right) \cdot \ln \left[ \frac{r_1}{\left( 1 - \frac{t}{S} \right)^2} - 1 \right] \right\}, \quad (4.9)$$

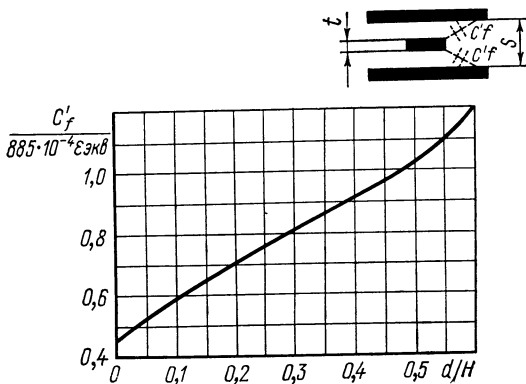


Рис. 4.9. График к расчету симметричной линии передачи

при этом значение отношения  $\frac{C'f}{8,85 \cdot \epsilon_{\text{ЭКВ}} \cdot 10^{-2}}$  может быть определено по графику, приведенному на рис. 4.9.

При  $\frac{b}{S-t} \geq 0,35$

$$Z_0, [\text{ом}] = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{ЭКВ}}}} \ln \frac{2,55h}{d_0}, \quad (4.10)$$

где  $d_0$  — диаметр круглого проводника, эквивалентного площади поперечного сечения полоски, определяемый по графику, показанному на рис. 4.10.

Полная ширина полосковой линии  $d$ , так же как и в предыдущем случае (при определении величины  $d$  в несимметричной линии), определяется из требуемых условий ослабления электро-

магнитного поля, и, как правило, соответствует соотношению  $d \geq 5b$ .

Геометрические размеры полосковых линий можно определить по графикам, приведенным на рис. 4.11 и 4.12.

Проверочный расчет, подтверждающий правильность выбранных конструктивных размеров полосковых линий, ведут с помощью формулы

$$Z, [\text{ом}] = \frac{\sqrt{1,26 \cdot 10^{-6} \epsilon_{\text{ЭКВ}}}}{3C \cdot 10^{-4}}. \quad (4.11)$$

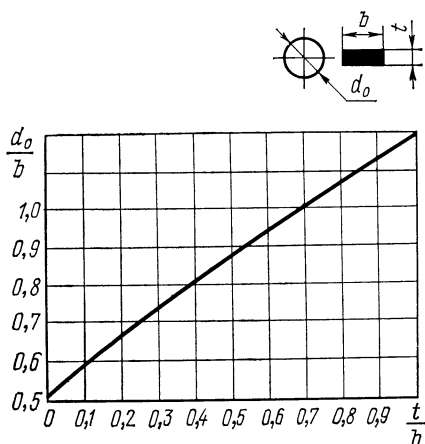


Рис. 4.10. График к расчету диаметра круглого проводника, эквивалентного площади поперечного сечения полоски

Величину затухания электромагнитного поля в поперечном сечении печатной полосковой линии подсчитывают из выражения

$$d_3 = \frac{27}{S} (\text{дБ/ед. длины}). \quad (4.12)$$

Суммарные потери в печатных полосковых линиях складываются из потерь в диэлектрике  $P_d$ , в металлических проводниках  $P_m$  и потерь на излучение  $P_{\text{и}}$

$$P = P_d + P_m + P_{\text{и}} (\text{дБ/ед. длины}). \quad (4.13)$$

Для волн типа ТЕМ потери в диэлектрике составляют:

$$P_d = \frac{27,3 \sqrt{\epsilon_{\text{ЭКВ}} \text{tg } \delta}}{\lambda_0} (\text{дБ/ед. длины}) \quad (4.14)$$

или

$$P_d = 9,1 \cdot 10^{-2} f \text{tg } \delta \cdot \sqrt{\epsilon_{\text{ЭКВ}}} (\text{дБ/ед. длины}), \quad (4.15)$$

где  $f$  — в мегагерцах.

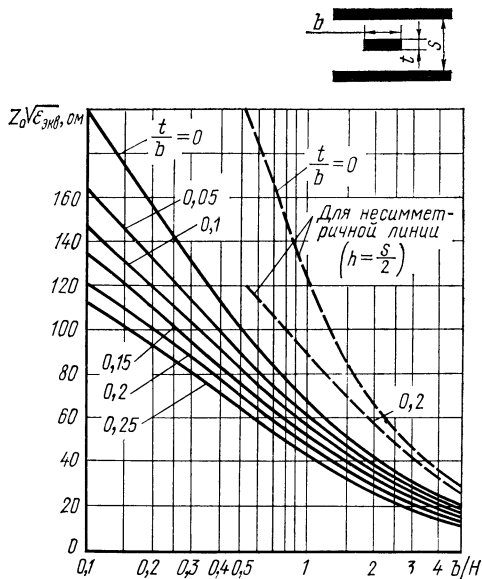


Рис. 4.11. Графики для определения геометрических размеров несимметричных полосковых линий

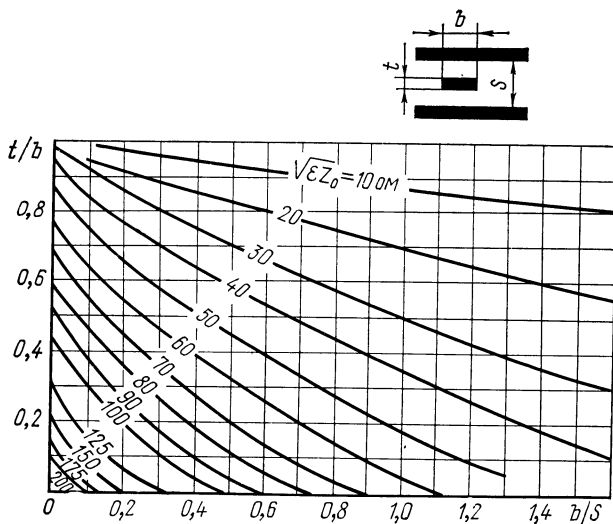


Рис. 4.12. Графики для определения геометрических размеров симметричных полосковых линий

Потери в диэлектрике и металлических проводниках играют основную роль в потерях в согласованных полосковых печатных линиях, а потери на излучение обычно не превышают 5% от суммы потерь.

Потери в металлических проводниках при условии

$$\frac{b}{s-t} \geq 0,35$$

определяют по формуле

$$P_{\text{м}} = \sqrt{\frac{G_{\eta}}{G}} \cdot \frac{2,02 \cdot 10^{-6} \varepsilon_{\text{экв}} Z_0 \sqrt{f}}{S} \left[ \frac{f}{1 - \frac{t}{S}} + \frac{\frac{2b}{S}}{\left(1 - \frac{t}{S}\right)^2} + \frac{0,159 \left(1 + \frac{t}{S}\right)}{\left(1 - \frac{t}{S}\right)^2} \ln \frac{\left(\frac{1}{1 + \frac{t}{S}} + 1\right)}{\left(\frac{1}{1 - \frac{t}{S}} - 1\right)} \right] (\text{дБ/ед. длины}), \quad (4.16)$$

где  $f$  — в мегагерцах.

Однако при проектировании и изготовлении полосковых линий необходимо учитывать, что приведенные формулы и методика расчета не позволяют обеспечивать достаточную практическую точность их параметров. Это объясняется тем, что расчетные соотношения не учитывают дефектов, связанных с технологическим разбросом параметров печатных проводников, наличием

связующего материала между печатным проводником и диэлектриком, разбросом параметров самих диэлектриков и, что является в большинстве случаев наиболее существенным, не могут учесть изменение параметров диэлектриков под воздействием влаги в процессе изготовления и эксплуатации.

В связи с приведенными соображениями при изготовлении полосковых линий передачи приходится прибегать к методу макетной аппроксимации, т. е. изготавливать первичный макет по расчетной формуле, испытывать его на соответствие заданным параметрам, а затем соответствующей коррекцией геометрических раз-

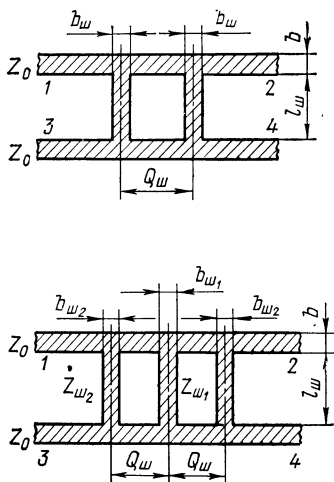


Рис. 4.13. Примеры шлейфовых ответвителей

меров печатных элементов добиваться получения такого образца, отклонение параметров которого от расчетных величин было бы минимальным. Удовлетворительных результатов удается добиться, как правило, после изготовления двух-трех макетов.

Для получения различных величин связи в полосковых линиях широкое применение находят направленные ответвители трех типов: шлейфовых, с сосредоточенной емкостной связью и с электромагнитной связью.

Выбор конкретного типа ответвителя определяется заданными электрическими параметрами схемы, так как каждый из трех названных типов ответвителей характеризуется специфическими особенностями.

Шлейфовые ответвители (рис. 4.13) обеспечивают связь от  $-3$  до  $-8$  дБ для трех шлейфов и от  $-5$  до  $-12$  дБ для двух шлейфов.

Следует иметь в виду, что технологические трудности изготовления печатных шлейфов (проводников) малой ширины, менее  $0,3$  мм, затрудняют получение связи менее  $-8$  дБ.

Расчет шлейфовых ответвлений основывается на заданных значениях волнового сопротивления основной линии  $Z_0$  и величине связи  $K$ . Волновое сопротивление шлейфов для двухшлейфовых ответвителей рассчитывают по уравнению

$$Z_{ш} = \frac{20 \lg Z_0 - K_{г\sigma}}{20}, \quad (4.17)$$

а волновое сопротивление шлейфов для трехшлейфовых ответвителей определяют по формулам

$$Z_{ш1} = \frac{20 \lg Z_0 - K_{г\sigma}}{20}, \quad (4.18)$$

$$Z_{ш2} = -2Z_{ш1}. \quad (4.19)$$

Геометрические размеры шлейфов — длина  $l_{ш}$  и расстояние между шлейфами  $Q_{ш}$  — находят из выражения

$$l_{ш} = Q_{ш} = \frac{\lambda_0}{4 \sqrt{\epsilon_{э\kappa\text{в}}}}. \quad (4.20)$$

Ширину шлейфов  $b_{ш}$  определяют аналогично ширине полосковой линии по формулам (5, 8, 9, 10, 11, 12).

Направленность двух- и трехшлейфовых ответвителей определяют по соответствующим формулам

$$T, [\text{дБ}] = 20 \lg \left[ \sin \frac{\pi}{2} \left( \frac{f_0}{f} - 1 \right) \right], \quad (4.21)$$

$$T, [\text{дБ}] = 20 \lg \left[ \sin^2 \frac{\pi}{2} \left( \frac{f_0}{f} - 1 \right) \right]. \quad (4.22)$$



Характеристики направленности и связи направленных шлейфовых ответвителей приведены на рис. 4.14, а, б.

Направленные ответвители с сосредоточенной емкостной связью (рис. 4.15) обеспечивают величину связи от  $-5$  до

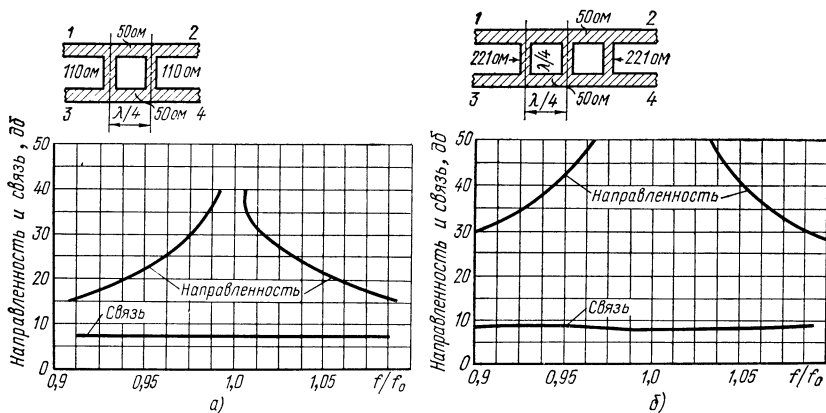


Рис. 4.14. Пример характеристики направленности и связи направленных шлейфовых ответвителей:

а, б — две разновидности

$-30$  дБ; но при этом направленность их получается несколько худшей (порядка 10 дБ).

Конструкция ответвителей с сосредоточенной емкостной связью близка двухшлейфовым ответвителям, но при этом их шлейфы разомкнуты со стороны первичной линии.

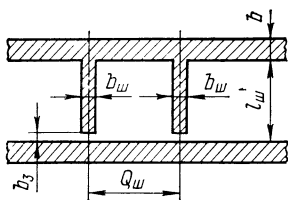


Рис. 4.15. Направленные ответвители с сосредоточенной емкостной связью

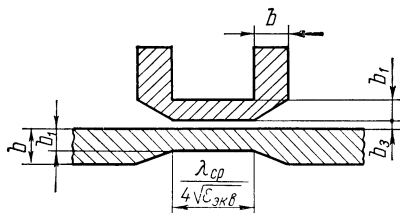


Рис. 4.16. Направленные ответвители с электромагнитной связью

Геометрические размеры ответвителей с сосредоточенной емкостной связью: длина шлейфов  $l_{\text{ш}}$  и расстояние между шлейфами  $Q_{\text{ш}}$  — рассчитывают по формуле (20), а величину зазора  $b_{\text{з}}$  и ширину шлейфа  $b_{\text{ш}}$  подбирают методом макетной аппроксимации по заданным величинам  $T$  и  $K$ , найденным из выражения (21).

Направленные ответвители с электромагнитной связью (рис. 4.16) могут обеспечить величину связи от  $-8$  до  $-30$  дБ. Расчет направленных ответвителей с электромагнитной связью сводится в основном к расчету длины участка связи  $l_{св}$ , которую

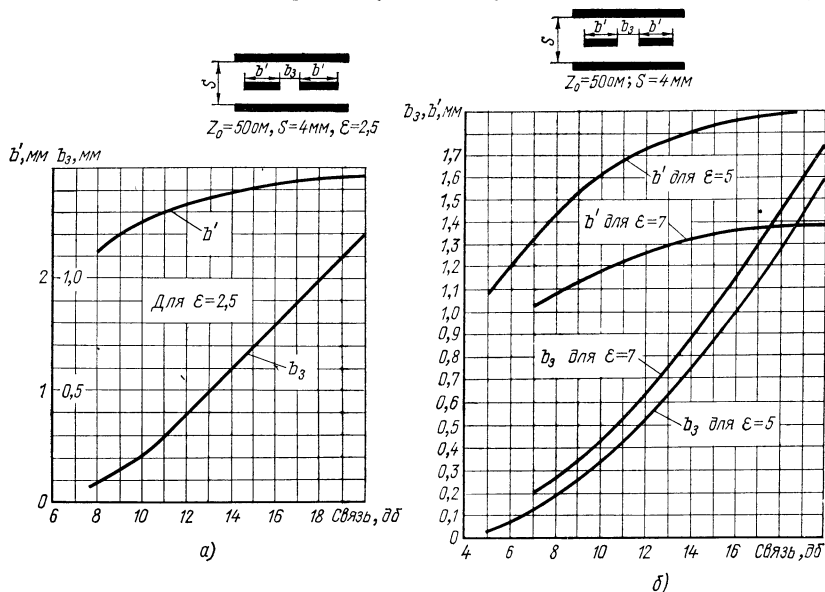


Рис. 4.17. Графики для определения ширины полоски:  
а, б — две разновидности

выбирают, используя равенство

$$l_{св} = \frac{\lambda_0}{4 \sqrt{\epsilon_{ЭКВ}}} . \quad (4.23)$$

Следует учитывать, что для увеличения связи длину участка можно увеличивать на целое число полуволн. В этом случае формула (23) примет вид

$$l_{св} = \frac{\lambda_0}{4 \sqrt{\epsilon_{ЭКВ}}} + n \frac{\lambda_0}{2 \sqrt{\epsilon_{ЭКВ}}} , \quad (4.24)$$

где  $n$  — целое число.

Ширина полосков участка связи и основной симметричной линии находится при этом в следующей зависимости: если  $K \leq -15$  дБ, то  $l_{св} = b$ , если же  $K > -15$  дБ, то ширина полоски  $b$  определяется по графикам рис. 4.17, а, б.

Дальнейшим развитием направленных ответвителей являются мостовые схемы, используемые в качестве балансовых смесителей, схем автоматической подстройки частоты и т. д. Наиболее широко применяют схемы в виде гибридных колец, приведенных на рис. 4.18, а, б, в.

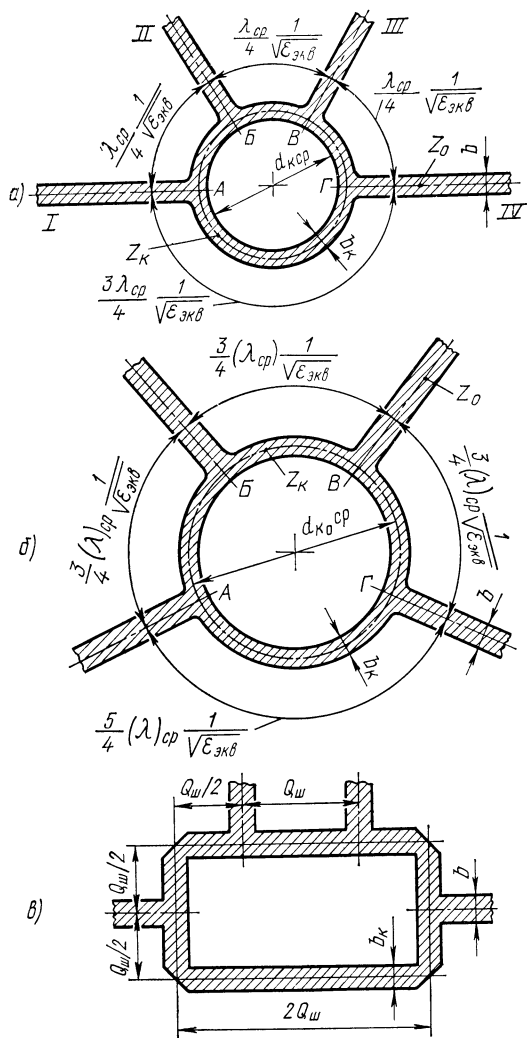


Рис. 4.18. Пример мостовых схем, используемых в качестве балансовых смесителей, схем автоматической подстройки частоты и др.:  
 а, б — в виде гибридных колец; в — в виде прямоугольников

Кольцевые схемы рассчитывают на основе следующей основной формулы:

$$N \cdot [\partial\delta] = 10 \lg \frac{P_1}{P_3}, \quad (4.25)$$

где  $N$  — развязка (изоляция) между плечами I—III при подаче СВЧ сигнала в плечо I, а  $P_1$  и  $P_3$  — мощности сигнала, распределенные соответственно между этими же плечами.

При этом необходимо учитывать, что разветвление мощности сигнала происходит между плечами II—IV гибридного кольца при подаче сигнала в плечо I или III.

Волновое сопротивление гибридных колец вычисляют по равенству

$$Z_k = Z_0 \sqrt{2}. \quad (4.26)$$

Конструктивный расчет гибридного кольца сводится к определению их геометрических размеров на основе заданных значений  $Z_0$  — основного тракта и  $\lambda_0$ .

Длину средней окружности гибридных колец вычисляют из выражения

$$l_k = \frac{3\lambda_0}{2\sqrt{\epsilon_{\text{ЭКВ}}}}, \quad (4.27)$$

на основе которого рассчитывают средний диаметр кольца  $D_{\text{к ср}}$  при заранее найденной по формулам (6—8) ширине кольца.

Расстояние между плечами I и II, II и III, III и IV определяют по формуле

$$l_{\text{кI}} = l_{\text{кII}} = l_{\text{кIII}} = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon_{\text{ЭКВ}}}}, \quad (4.28)$$

а расстояние между плечами I и IV по формуле

$$l_{\text{кIV}} = \frac{3}{4} \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon_{\text{ЭКВ}}}}. \quad (4.29)$$

При необходимости получения заданных параметров в области частот, близких к 10 000 МГц, геометрические размеры гибридных колец могут быть увеличены расстоянием между плечами на целое число полуволн  $\frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon_{\text{ЭКВ}}}}$ . Пример такого кольца

приведен на рис. 4.19, б.

Прямоугольные мостовые схемы (рис. 4.19, в) рассчитывают по формулам (6—8 и 23), за исключением величин, определяющих ширину прямоугольника

$$Q_{\text{ш}} = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon_{\text{ЭКВ}}}} \quad (4.30)$$

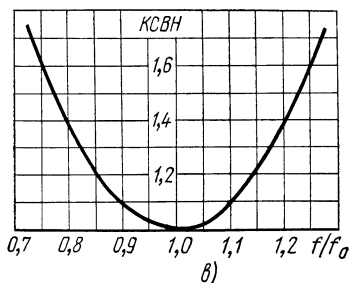
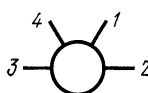
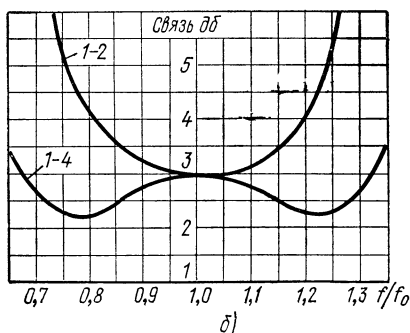
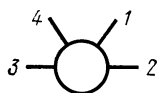
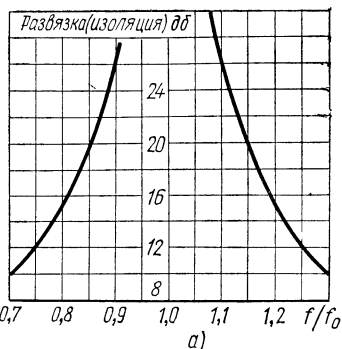
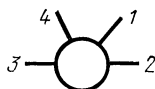


Рис. 4.19. График расчетных характеристик развязки гибридных колец:  
а, б, в — разные виды

и величины волнового сопротивления

$$Z_{\text{ш}} = Z_0 \sqrt{2}. \quad (4.31)$$

Для облегчения практических расчетов СВЧ полосковых схем на рис. 4.19, а, б, в приведены расчетные характеристики развязки гибридных колец.

Важным приложением техники полосковых схем СВЧ являются полосковые фильтры. Полосковые фильтры обеспечивают наибольший выигрыш в габаритах конструкций по сравнению с объемными изделиями, причем их параметры не хуже, чем у объемных элементов.

Полосковые фильтры с заданной полосой пропускания не менее 1% могут вполне успешно конкурировать с фильтрами, выполненными средствами волноводной техники (для диапазонов, близких 10 000 Мгц) или с фильтрами с сосредоточенными параметрами (для диапазонов, близких 100 Мгц).

Проектирование полосковых фильтров с емкостной связью, изображенных на рис. 4.20, базируется на известных принципах расчета фильтров с сосредоточенными параметрами. Основой расчета служат заданные значения средней частоты  $f_0$ , полосы пропускания  $\Delta f$  и числа звеньев  $n$ .

Конструктивный расчет элементов фильтров с емкостной связью сводится к расчету длины звеньев  $l_{\text{зв}}$  и зазоров между ними  $l_3$ .

Прежде чем приступить к определению ширины зазоров между звеньями фильтров, необходимо подсчитать нормиро-

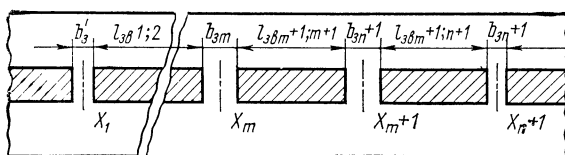


Рис. 4.20. Полосковые фильтры с емкостной связью

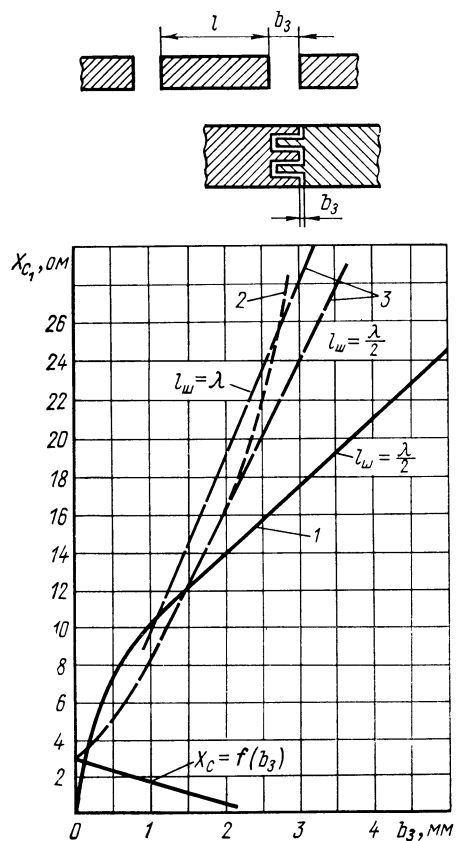


Рис. 4.21. Графики определения ширины зазоров между звеньями в полосковых фильтрах с емкостной связью

ванные реактивные сопротивления емкостных неоднородностей по формуле

$$\chi [ом] = \chi_{n+1} \approx \sqrt{\frac{4f_0}{\pi \Delta f} \sin \frac{\pi}{2n}}, \quad (4.32)$$

где  $\chi$  и  $\chi_{n+1}$  — нормированные реактивные сопротивления крайних зазоров;

$$\chi_m [ом] = 0,9 \frac{f_0}{\Delta f} \sqrt{\cos \frac{\pi}{n} - \cos \frac{2\pi(m-1)}{n}}, \quad (4.33)$$

где  $\chi_m$  — нормированное сопротивление любого звена;  $m = 2, 3, 4, \dots, n$ .

На основании формул (32) и (33) определяют ширину зазоров между звеньями по опытным графикам, приведенным на рис. 4.21.

Длину любого звена для фильтров с емкостной связью можно рассчитать по формуле

$$l_{зв} = \frac{\lambda_0}{2 \sqrt{\epsilon_{эКВ}}} \left[ K - \frac{1}{2\pi} \left( \operatorname{arctg} \frac{2}{\chi_1} + \operatorname{arctg} \frac{2}{\chi_m} \right) \right], \quad (4.34)$$

где  $\lambda_0$  — длина волны в воздухе;  $K$  — целое положительное число.

В некоторых случаях конструктивное выполнение фильтров с емкостной связью претерпевает существенные изменения. Как

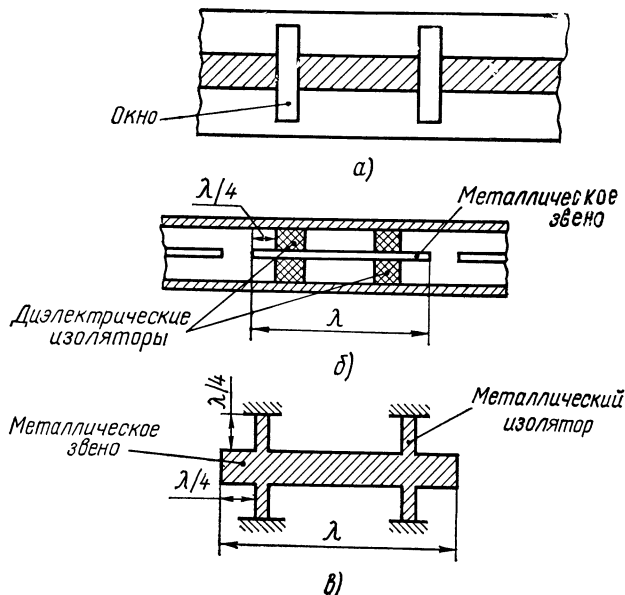


Рис. 4.22. Пример конструкции фильтра с емкостной связью:

а, б, в — разновидности

правило, это вызывается возрастанием потерь на резонансных частотах в зазорах связи при уменьшении полосы пропускания. В этих случаях для повышения добротности приходится либо удалять диэлектрик в зазорах между печатными звеньями, либо частично отказываться от печатных конструкций и выполнять элементы фильтров из металлических полосок на диэлектрических или металлических (четвертьволновых) изоляторах. Конструкции таких фильтров приведены на рис. 4.22, а, б, в.

Конструирование полосковых фильтров с четвертьволновыми связями, представленное на рис. 4.23, основывается на выборе

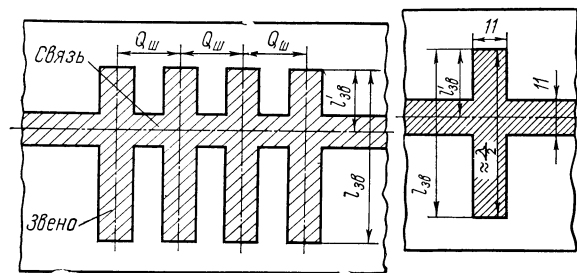


Рис. 4.23. Конструкция полоскового фильтра с четвертьволновыми связями

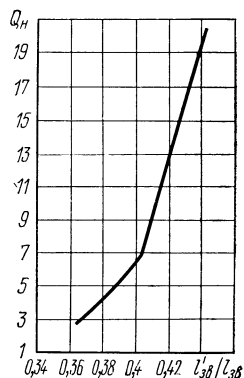


Рис. 4.24. График по выбору оптимального отношения части длины звена фильтра к полной длине звена

оптимального отношения части длины звена фильтра  $l_{зв}$ , определяющей величину связи между звеньями в зависимости от заданного значения добротности  $Q_n$  (рис. 4.24), к полной длине звена, рассчитанной по формуле

$$l_{зв} = \frac{\lambda_0 (2n - 1)}{2 \sqrt{\epsilon_{эКВ}}}.$$

Расстояние между звеньями фильтра можно найти по формуле (20).

На основании приведенных формул и графиков можно сделать вывод, что передаваемая мощность вдоль несимметричного полоскового волновода с воздушным заполнением возрастает при увеличении ширины полоски и постоянном расстоянии между полосками, убывает при уменьшении расстояния между полосками при постоянстве ширины полоски.

Потери энергии в проводящих полосках с учетом краевых полей остаются постоянными при увеличении ширины полоски и постоянном расстоянии между ними. Это объясняется тем, что при увеличении ширины верхней полоски электромагнитное поле



между полосками становится однороднее, а краевой эффект ослабевает. Уменьшение влияния краевых полей компенсирует возрастание потерь в верхней полоске, а общие потери остаются постоянными.

При постоянной ширине полоски и уменьшении расстояния между полосками общие потери энергии убывают. В этом случае электромагнитное поле становится однороднее, краевые поля ослабевают, потери в верхней полоске остаются постоянными и общие потери уменьшаются.

При постоянной ширине полоски и уменьшении расстояния между полосками затухание в линии возрастает. Общие потери в этом случае уменьшаются, уменьшается и мощность, передаваемая по линии, но она убывает быстрее, чем убывают потери.

При постоянстве расстояния между полосками и увеличении ширины полоски затухание в линии уменьшается. Это происходит потому, что общие потери мощности в линии остаются постоянными, а передаваемая мощность по линии с возрастанием ширины полоски растет.

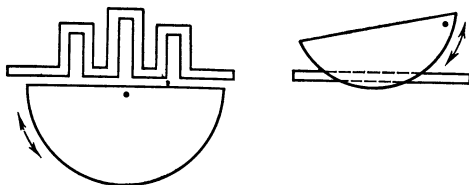


Рис. 4.25. Атенюатор

Атенюаторы, называемые иначе ослабителями, служат для ослабления и регулировки уровня мощности в СВЧ полосковых трактах (рис. 4.25).

Атенюаторы могут быть с фиксированным или регулируемым ослаблением (постоянным и переменным). Степень уменьшения мощности аттенюатором характеризуется величиной ослабления (затухания), которая определяется отношением мощности на выходе к мощности на входе аттенюатора и выражается в децибеллах:

$$A, [\text{дБ}] = 10 \lg \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}.$$

Поглощающие материалы представляют собой пластинки толщиной  $0,1 \div 0,2$  мм, имеющие поверхностное сопротивление порядка 100 ом.

Фиксированные аттенюаторы могут быть получены заменой центрального проводника на определенной длине тонкой лентой из сплавов высокого сопротивления, например, нихрома. Волновое сопротивление линии при этом почти не меняется, а затухание значительно возрастает.

Переменные аттенюаторы для полосковых линий выполняют аналогично постоянным аттенюаторам.

Поглощающая пластина делается подвижной и перемещается относительно центрального проводника полоскового волновода.

Для увеличения ослабления в симметричной полосковой линии и сохранения миниатюрных размеров аттенюатора полосковая линия может быть представлена в виде змеевика, в частности в дециметровом диапазоне.

В несимметричных линиях, если требуемый коэффициент ослабления небольшой, поглотитель можно располагать над центральным проводником, так как вырез сложной формы в диэлектрике изготовить довольно трудно.

Если же коэффициент ослабления должен быть большим, выбор должен быть сделан в пользу полосковой линии с воздушным

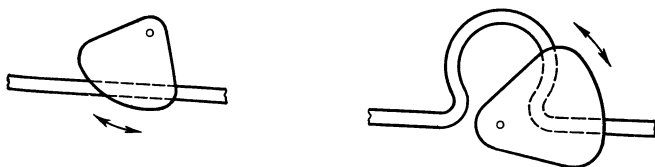


Рис. 4.26. Переменный аттенюатор

диэлектриком. В этом случае поглощающий материал вводится между металлическими полосками линии, что обеспечивает значительную величину затухания.

В полосковых схемах на СВЧ необходимо иметь элементы, электрическую длину которых можно было бы плавно менять. При этом их геометрическая длина должна оставаться неизменной. Такими элементами являются фазовращатели.

Работа большинства фазовращателей основана на том, что длина волны в диэлектрике меньше, чем в свободном пространстве.

Конструктивно регулируемый фазовращатель на полосковой линии может быть выполнен так же, как и переменный аттенюатор, изображенный на рис. 4.26. Только вместо поглощающей пластины используется диэлектрик с малыми потерями, который плавно двигается между центральным проводником и заземленной пластиной полосковой линии в соответствующий вырез ее диэлектрика.

Длина подвижной диэлектрической пластины  $l$  определяется следующим образом: при условии, что фазовращатель изменяет электрическую длину линии на  $\lambda$ , т. е. меняет фазу на  $360^\circ$  на самой длинной волне рабочего диапазона:

$$l = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon - 1}},$$

где  $\epsilon$  — диэлектрическая постоянная.

Чтобы уменьшить отражения от подвижной пластины, ее делают с плавными скосами на концах и из того же диэлектрического материала, что и изоляция между центральным проводником и заземленной пластиной полосковой линии.

При настройке высокочастотных узлов, собранных на полосковых линиях, широко используют в качестве индикатора высокочастотной энергии детекторную головку, представляющую собой кристаллический детектор, согласованный с полосковой линией и имеющий устройство для вывода постоянной или низкочастотной составляющей продетектированного высокочастотного тока на измерительный прибор или осциллограф.

При измерениях в полосковых трактах можно также использовать стандартные коаксиальные и волноводные детекторные секции, подключая их к полосковой линии соответственно через коаксиально-полосковый или волноводно-полосковый переход.

## **§ 4. 2. Технология производства СВЧ печатных схем**

Так как при изготовлении полосковых печатных схем применяются в основном те же технологические операции, что и для схем печатного монтажа, в дальнейшем будут рассмотрены только технологические процессы, специфические для полосковых печатных плат.

Отличительные особенности технологических процессов изготовления печатных схем СВЧ по сравнению со стандартными процессами производства коммутационных печатных плат состоят в следующем:

1. Используются неполярные диэлектрики (органические и неорганические), обладающие физико-механическими и технологическими характеристиками, отличными от соответствующих свойств стандартных фольгированных материалов (на основе эпоксидных, фенолформальдегидных и других смол).

2. Полосковые печатные схемы имеют высокую точность и повторяемость геометрических размеров при размерах платы до  $500 \times 500$  мм и более.

3. Для токопроводящих участков схемы характерна высокая чистота поверхности, обусловленная малой глубиной проникновения в металл электромагнитной энергии СВЧ диапазона.

4. Необходима металлизация торцев, пазов и отверстий печатных плат в схемах с короткозамкнутыми резонансными шлейфами и в некоторых других.

К основным технологическим операциям и процессам, отличающимся от стандартных процессов изготовления печатных плат, следует отнести процессы изготовления прецизионных оригиналов большой площади, специальную обработку поверхности заготовок плат, операции электрохимической металлизации (меднения, серебрения, золочения) печатной схемы.

Стабильность геометрических и диэлектрических параметров является основным требованием к диэлектрическим материалам для оснований полосковых схем.

Для поддержания постоянной длины волны в линии нужны однородные (по диэлектрической проницаемости) материалы с малыми коэффициентами линейного расширения и малой величиной усадки в процессе изготовления и эксплуатации схемы, так как  $\lambda_e = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}}$ , т. е. электрическая длина передающей линии об-

ратно пропорциональна корню квадратному из величины относительной диэлектрической проницаемости материала. В качестве оснований полосковых линий передачи могут применяться органические (например, полиэтилен, фторопласт, полистирол), неорганические (ситаллы, керамики, ферриты) и композиционные (типа ПТ, СТ, СА-3,8, ПЭТ, ППТ и др.) диэлектрические материалы со слабо выраженной полярностью (низким значением тангенса угла диэлектрических потерь на СВЧ — порядка  $10^{-4}$ ).

В печатных полосковых устройствах применяются органические диэлектрики, имеющие низкое значение диэлектрической проницаемости ( $2 \div 2,5$ ), а также композиционные материалы, имеющие повышенное (регулируемое) значение проницаемости за счет введения в основной материал (органического происхождения) минеральных наполнителей (алунд, рутил и др.) с высокой собственной проницаемостью.

Для ненаполненных органических диэлектриков нестабильность проницаемости находится (для разных материалов) в пределах  $0,2 \div 3\%$ , для наполненных — до  $2 \div 5\%$ .

Коэффициент линейного расширения органических диэлектриков (для различных материалов) имеет предел  $(5 \div 25) \cdot 10^{-5} \text{ град}^{-1}$ . Теплостойкость органических листовых диэлектриков составляет  $60 \div 150^\circ \text{C}$ , что затрудняет (и даже нередко исключает) возможность применения технологических операций, разработанных для плат печатного монтажа.

#### **Изготовление оригиналов полосковых печатных плат**

Оптимальной геометрией полосковых схем является печатная плата большой площади, где за одну операцию печатаются все узлы СВЧ комплекса (антенны, фильтры, смесители, фазовращатели, коммутаторы и др.) и даже усилители промежуточной и низкой частоты.

Возможность многократной мультипликации узлов на плате большой площади позволяет свести к минимуму количество

разъемов и паяных соединений и повысить надежность всей системы.

Это обуславливает широкое применение полосковых печатных схем большого размера (до  $500 \times 500$  мм и более).

Требуемая точность геометрических размеров СВЧ-элементов определяется электрическими параметрами разрабатываемого устройства (полоса рабочих частот, выходные параметры и их точность, величина диэлектрической проницаемости и др.) и находится в пределах  $\pm 0,01 \div 0,20$  мм.

Изготовление печатных схем значительной площади с соблюдением высокой точности отдельных печатных СВЧ-элементов требует применения специальных методов изготовления рабочих фотошаблонов. Точность оригинала, выполненного в масштабе 1 : 1, должна быть в 3—4 раза выше точности соответствующего элемента, указанной в чертеже печатной платы.

Это требование обусловлено тем, что на всех последующих стадиях технологического процесса (получение рабочего фотошаблона, экспонирование, травление, серебрение и др.) происходит дополнительное искажение размеров из-за производственных и технологических погрешностей.

Вычерчивание (или вырезание) на координатографе рисунка печатной схемы в увеличенном масштабе не может обеспечить точность печатных элементов ( $\pm 0,05$  мм и выше) либо вследствие ограниченности масштаба увеличения, либо из-за нелинейных искажений изображения при уменьшении фоторепродукционным способом.

Как правило, в таких случаях оригиналы выполняются в масштабе 1 : 1 методом прорезания тонкого непрозрачного эмалевого покрытия, нанесенного на полированное стекло, на специальной координатной разметочной машине или на стандартном координатно-расточном станке с оптическим отсчетом координат (с помощью специальной оснастки и режущего инструмента).

В случае пониженных требований к точности оригинала ( $\pm 0,05$  мм и более) оригинал может быть изготовлен на обычном координатографе.

После прорезания всех линий, формирующих изображение будущей печатной схемы, производится удаление эмалевого покрытия с пробельных мест оригинала в соответствии с чертежом.

Рабочие фотошаблоны при данном методе изготовления оригиналов получают контактным копированием (на копировальной раме) на фотопластине или фотопленке в позитивном или негативном изображении (в зависимости от требований техпроцесса).

#### **Получение рисунка печатной схемы**

Технология получения рисунка печатных схем на фольгированных СВЧ-диэлектриках не отличается по существу от техно-

логии изготовления обычных плат, если не считать повышенные требования к точности и повторяемости размеров печатной схемы, а также отличия техпроцесса, вызванные пониженной теплоустойчивостью и химической стойкостью некоторых полимеров.

При использовании нефольгированных материалов (например, САМ, ПТ, СТ) необходимо осаждать токопроводящий слой электрохимически, предварительно подвергая поверхности, подлежащие металлизации, специальной механической обработке в целях создания определенной шероховатости (обычно  $\nabla 5 \div \nabla 8$ ). Шероховатость необходима для адгезии токопроводящего слоя к диэлектрическому основанию.

Основные преимущества и недостатки этих двух основных технологических процессов (на фольгированных и нефольгированных материалах) приведены в табл. 4.4 и 4.5.

Таблица 4.4

ПРЕИМУЩЕСТВА ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ  
ПОЛОСКОВЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Нефольгированные материалы	Фольгированные материалы
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Возможность одновременной металлизации торцов, отверстий, щелей, переходов и т. д.</li> <li>2. Возможность изготовления плат больших габаритов с небольшой величиной коробления</li> <li>3. Относительная простота производства плат любых габаритов, толщины, из различных материалов</li> <li>4. Возможность повышения требований к диэлектрическому материалу по толщине</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Равномерность толщины токопроводящего слоя по всей площади платы</li> <li>2. Относительно высокая прочность сцепления токопроводящего слоя с основанием платы</li> <li>3. Высокая пластичность и электропроводность токопроводящего слоя</li> <li>4. Возможность использовать фольгированный материал серийного производства.</li> </ol>

Таблица 4.5

НЕДОСТАТКИ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛОСКОВЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Нефольгированные материалы	Фольгированные материалы
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Необходимость создания шероховатости на поверхности диэлектрика (специальная обработка)</li> <li>2. Основание подвергается воздействию химических реагентов</li> <li>3. Неравномерный слой металлизации по толщине</li> <li>4. Зависимость электропроводности токопроводящего слоя от технологических факторов</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Невозможность одновременной металлизации торцов, пазов, отверстий</li> <li>2. Коробление платы за счет проявления внутренних напряжений при травлении фольги</li> <li>3. Ограниченный выбор диэлектриков по толщине (зависит от ассортимента материала)</li> </ol>

Нефольгированные материалы, подлежащие электрохимической металлизации, проходят механическую обработку в соответствии с чертежом.

Кроме высокой точности толщины заготовки большого размера (типичный допуск от  $\pm 0,2$  до  $-0,05$  мм), необходимо получить заданную шероховатость всех поверхностей, подлежащих металлизации.

Уменьшение шероховатости относительно принятой величины вызывает уменьшение адгезии токопроводящего слоя с основанием; увеличение шероховатости приводит к увеличению потерь в проводниках схемы.

После достижения толщины, заданной чертежом, заготовки подвергают дополнительной обработке с целью получения однородной поверхности с заданной величиной микронеровностей.

Обработка поверхности производится либо на зернильных установках с помощью металлических (или фарфоровых) шаров и абразивного порошка, либо на гидроструйных установках с помощью пульпы с абразивным материалом (песком или абразивным порошком нужной зернистости).

При зернении и гидроструйной обработке получают шероховатость, определяемую, в основном, зернистостью абразивного материала.

На потери в металле проводников полосковой линии определяющее влияние оказывает так называемый поверхностный эффект (или скин-эффект). Электромагнитная энергия, распространяющаяся в металле, затухает в направлении, перпендикулярном поверхности проводника, в экспоненциальной зависимости от глубины, поэтому энергия сосредоточена вблизи поверхности проводника, глубокие слои оказывают исчезающе малое влияние на электромагнитный процесс. Глубина, на которой амплитуда волны уменьшается в  $e$  раз ( $e=2,718$  — основание натурального логарифма), называется скин-слоем и определяется из граничных условий Леонтовича как

$$d = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}},$$

где  $d$  — глубина проникновения (скин-слой), м;  $\omega$  — круговая частота электромагнитного поля, 1/сек;  $\mu$  — магнитная проницаемость металла, гн/м;  $\sigma$  — удельная проводимость металла, (ом·см) $^{-1}$ .

Для меди, золота, серебра, алюминия, применяемых в качестве токопроводящих слоев полосковых линий, магнитная проницаемость равна магнитной постоянной вакуума:

$$\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ гн/м.}$$

Подставляя значение  $\mu = \mu_0$  и  $\omega = 2\pi f$ , получим

$$d, [\text{мм}] = \frac{15,9}{\sqrt{f \sigma}},$$

где  $f$  — частота, Гц.

Для наиболее употребительных металлов приведем следующие данные (табл. 4.6).

Т а б л и ц а 4.6

Металл	Удельная проводимость, $\sigma, (\text{ом}\cdot\text{см})^{-1}$	Толщина скин-слоя, $d, \text{мм}$ ( $f, \text{гц}$ )
Серебро	$6,1 \cdot 10$	$64,2 \cdot f^{-1/2}$
Медь	$5,8 \cdot 10^5$	$66,8 \cdot f^{-1/2}$
Алюминий	$3,5 \cdot 10^5$	$84,5 \cdot f^{-1/2}$

Таким образом, при частоте  $f = 10 \text{ Гц}$  ( $10^{10} \text{ гц}$ ) глубина проникновения (толщина скин-слоя) для серебра составляет  $0,642 \text{ мкм}$ .

На практике увеличение толщины проводников свыше  $d$  ( $5 \div 6$ ) не оказывает заметного влияния на уменьшение потерь в металле.

Из рассмотрения поверхностного эффекта становится ясным важное значение чистоты обработки поверхности токопроводящего слоя, так как толщина скин-слоя в СВЧ-диапазоне сравнима с величиной микронеровностей поверхности.

Повышенная шероховатость приводит к увеличению погонных потерь и электрической длины отрезков линий.

При металлизации диэлектрика методом напрессовки медной электролитической фольги наружная поверхность проводников имеет высокий класс чистоты ( $\nabla 9$ — $\nabla 10$ ). Поверхность же, обращенная к диэлектрику, в целях создания необходимой адгезии к диэлектрику обработана до чистоты  $\nabla 4$ — $\nabla 5$ . Это приводит к различию условий прохождения энергии с двух сторон печатного проводника.

При металлизации электрохимическим способом создание повышенной шероховатости подложки также диктуется требованиями существующего технологического процесса и приводит к повышенной шероховатости осаждаемого на подложку токопроводящего слоя.

В настоящее время разрабатываются различные способы осаждения меди на поверхность неполярных диэлектриков, обработанную до высокого класса чистоты ( $\nabla 8$ — $\nabla 10$ ).

При проектировании технологических процессов необходимо учитывать влияние всех технологических факторов и производственных погрешностей на выходные электрические параметры схемы. Так, например, величину волнового сопротивления линии определяют: ширина и толщина полоски, диэлектрическая проницаемость и толщина изоляционного основания.

Потери в полосковой линии определяются материалом, толщиной и шероховатостью проводников, а также тангенсом угла диэлектрических потерь и толщиной изоляционного основания.



Важным преимуществом полосковых линий передачи перед волноводными и коаксиальными является формирование пассивных цепей недорогим технологичным фотолитографским методом, широко применяемым в производстве обычных коммутационных печатных схем (односторонних, двусторонних и многослойных).

Такие методы нашли применение в пассивных устройствах типа антенных решеток и элементов связи в активных устройствах.

Полосковые линии передачи идеально подходят для использования в фазированных антенных решетках. Изготовление таких решеток, состоящих из большого числа антенных элементов, на волноводных или коаксиальных линиях часто оказывается слишком дорогим и приводит к громоздким конструкциям. В антенне, выполненной на полосковых линиях, большое число дипольных элементов можно получить одновременно травлением листа фольгированного диэлектрика.

Эволюция полосковой техники происходит в двух основных направлениях:

- 1) разработка функционально-законченных микроминиатюрных СВЧ-модулей на неорганических подложках диэлектрических и полупроводниковых;

- 2) разработка сложных СВЧ-комплексов на органических диэлектриках большой площади методом многократной мультипликации узлов и элементов.

Первое направление имеет целью создание надежных микроминиатюрных СВЧ-узлов как общего применения (полупроводниковые диодные переключатели, ферритовые циркуляторы и др.), так и частного, например фазовращатели, ограничители.

Оба направления требуют создания полосковых схем с геометрическими размерами высокого класса точности и разработки подложек (оснований), отвечающих исключительно высоким требованиям по величине однородности и повторяемости диэлектрических параметров на СВЧ.

Появление полосковых линий передачи позволило совершить качественный скачок в области миниатюризации отдельных функционально-законченных узлов и подготовить переход к комплексной миниатюризации станций и систем.

# КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

## § 5. 1. Общие положения

Технологический процесс изготовления печатных плат состоит из множества разнохарактерных операций, особенно для многослойных печатных плат. Почти каждая из основных операций процесса оказывает существенное влияние на качество печатной платы. Кроме того, большую роль играет подбор исходных материалов для изготовления печатных плат и ряд других факторов, органически связанных на многих ступенях производственного процесса.

Общие технические условия на печатные платы обуславливают определенные требования к выходным параметрам печатных плат в зависимости от их назначения. Завод-изготовитель, как правило, осуществляет контроль готовых плат в соответствии с требованиями общих технических условий, но в результате выходного контроля может обнаружиться большой процент брака, если не будет принято соответствующих мер на определенных этапах технологического процесса.

С развитием и усложнением конструкции печатных плат возрастает количество измерений и сложность их проведения, необходимость контроля материалов, технологического процесса и готовой платы, а также потребность в более эффективных методах и средствах контроля.

Основными мерами повышения качества печатных плат являются:

- а) организация входного контроля материалов, применяемых для основания печатных плат;
- б) организация межоперационного контроля печатных плат;
- в) организация выходного контроля печатных плат.

Так как выходной контроль обычных печатных плат не представляет особой сложности, а межоперационный контроль в большинстве случаев не целесообразен, то в дальнейшем будет рассмотрен контроль качества только применительно к многослойным печатным платам.

Рассмотрим некоторые виды и возможные причины дефектов многослойных печатных плат (табл. 5.1).

Из приведенных примеров видно, что важным условием предупреждения плохого качества печатных плат является тщательный контроль многих операций технологического процесса.

Используются всевозможные методы, начиная с визуального контроля и кончая электрическими методами обнаружения дефектов. Для повышения качества печатных плат их тщательно очищают на всех стадиях технического процесса.

Таблица 5.1

Вид дефекта	Возможные причины
Короткие замыкания между проводниками, контактными площадками и металлизированными отверстиями	Сдвиг внутренних слоев при их прессовании.
	Несовпадение отверстий с расположением контактных площадок внутренних слоев при сверлении.
	Слишком малое расстояние между сквозными металлизированными отверстиями и печатными проводниками.
Разрыв проводника	Попадание раствора, используемого при химическом осаждении меди, в промежутки между близко расположенными отверстиями или проводниками.
	Попадание посторонних включений на плату в процессе обработки
	Глубокие царапины на поверхности слоя до его обработки.
	Подтравливание проводников.
	Надрывы или царапины на проводниках.
Отсутствие контакта между печатными проводниками слоев в металлизированном отверстии	Разрушение проводников при склеивании слоев из-за внутренних механических напряжений в плате.
	Плохая подготовка поверхности отверстия к его химической и гальванической металлизации
	Нарушение режима химической металлизации отверстия.
Выход окружности отверстия за пределы контактной площадки	Слишком малая площадь контактирования слоя металлизации отверстия с проводниками.
	Отсутствие необходимой точности при сверлении отверстий.
Расслоение	Смещения координат расположения контактных площадок за счет усадки материала при использовании сверлильных станков с программным управлением или шаблонов
	Некачественный склеивающий материал.
Пониженное сопротивление изоляции	Не отработан режим прессования (склеивания) под определенный материал.
	Не выдержаны заданные режимы прессования.
	Недостаточная отмывка отдельных слоев платы перед прессованием.
	Плохое защитное изоляционное покрытие.
	Проникновение в межслойные соединения влаги, растворов и др.
	Плохое совмещение слоев в плате

Загрязнение плат остатками кристаллов травящегося металла, различными защитными технологическими составами при травлении рисунка печатной схемы, остатками примесей (шламов) в отверстиях при подтравливании диэлектрика, запыленность производственных помещений и др. исключает возможность получения годной печатной платы.

Тщательный и надежный контроль операций промывки, сушки и очистки печатных плат способствует получению необходимого качества и надежности выпускаемых плат.

Помимо этого большое внимание уделяется вопросам контроля рисунка схемы и размеров платы, процесса прессования и качества склеивания слоев платы, качества металлизации отверстий, целостности проводников и др.

В большинстве случаев ответственные операции переводятся на автоматические средства изготовления и контроля.

В процессах травления рисунка схемы печатной платы используется встроенный контроль для поддержания в травильной машине соответствующей концентрации и температуры травящего раствора.

Особое значение придается контролю процесса прессования, так как все возрастающая сложность многослойных печатных плат приводит к большим трудностям повторяемости процесса.

С этой целью используется оборудование с регулирующей и управляющей аппаратурой. Одна из американских фирм использует систему, предварительно программирующую циклы нагрева и давления в 10 прессах одновременно с помощью перфоленты, на которой указывается последовательность уровней давления, и аналогового программирующего устройства, получающего любые температурные кривые с точностью  $\pm 0,8^\circ \text{C}$ . Применение такой системы при массовом производстве многослойных печатных плат обеспечивает значительную экономию высоким качеством спрессованных плат.

Контроль качества склеивания слоев многослойной печатной платы является особо важным, так как малейшая непропрессовка внутренних слоев многослойной платы может привести ее в полную непригодность при последующих операциях, где будут применяться гальванические и химические процессы. С этой целью применяются специальные методы контроля, которые основаны на изменении электрического сопротивления смолы в зависимости от ее физического состояния. Измерение электрического сопротивления производится автоматически в цикле прессования и результаты производимых измерений сравниваются с эталонными.

В процессе изготовления платы ее размеры могут меняться под действием процессов травления, удаления фоторезиста, сушки и др.

Чтобы знать степень изменения размеров платы и определить допустимую ее величину, осуществляется контроль размеров плат быстродействующими измерительными средствами в виде

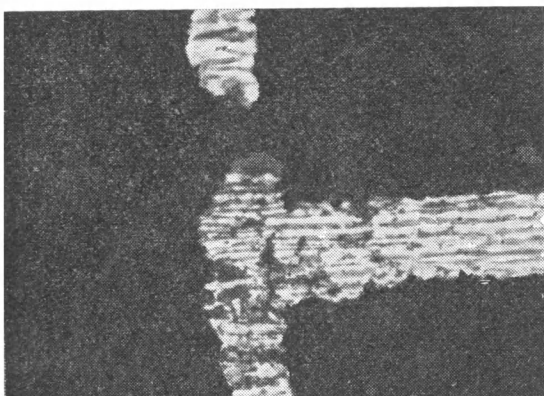
двухкоординатной измерительной машины со специальными измерительными приспособлениями.

Контроль токопроводящей цепи в многослойной плате, которая обладает электропроводностью (сопротивлением) печатных проводников с контактными площадками и межслойных соединений, которые в свою очередь состоят из участков металлизированных переходов и контактных площадок, является в настоящее время одной из самых сложных задач.

Дефекты контактных переходов проявляются в отсутствие контакта (частично или полностью) между металлизированным покрытием и контактной площадкой печатного проводника внутреннего слоя платы.

Характерные виды дефектов межслойных соединений приведены на рис. 5.1. На рис. 5.1, а виден разрыв металлизированного перехода, размер которого в среднем составляет 4 мкм. На

а)



б)

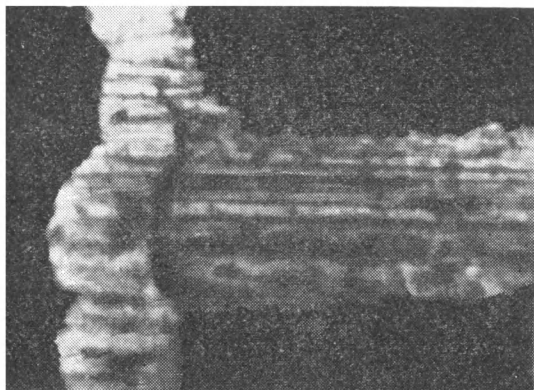


Рис. 5.1. Характерные виды дефектов межслойных соединений

рис. 5.1, б показан участок частичного отсутствия контакта между покрытием отверстия и контактной площадкой (размер трещин 3,5 мкм).

Такого рода дефекты возникают от нарушений процесса на операциях сверления, очистки и подготовки отверстий под металлизацию, прессования, сушки и пайки элементов.

Недоброкачественно выполненная операция сверления влечет за собой размягчение смолы, изгибание, отслаивание и перекос контактных площадок, образование трещин в подложках слоев, которые в дальнейшем приводят к появлению пустот и неоднородностей при нанесении покрытий на стенки отверстий.

Плохая очистка торцев контактных площадок от смолы после сверления вызывает полную или частичную изоляцию контактных площадок от металлизированного покрытия стенок отверстия.

Пассивация меди в процессе химического меднения, образование закисной пленки  $\text{Cu}_2\text{O}$  в результате продолжительного пребывания платы в воздухе может явиться причиной появления дефектов.

Плохая устойчивость растворов, применение активных химических реагентов для травления также существенным образом влияют на качество и надежность межслойных соединений.

Таким образом, отказы токопроводящих цепей могут быть обусловлены наличием макро- и микродефектов, возникших в ходе технологического процесса и в период эксплуатации плат.

## **§ 5. 2. Методы контроля токопроводящих цепей многослойных печатных плат**

Теоретическое и практическое значение имеет классификация методов контроля по признакам, характеризующим их внутреннее свойства и связь с контролируемым объектом.

Классификацию методов контроля многослойных печатных плат целесообразно провести по следующим основным признакам:

- а) физической сущности метода;
- б) виду связи с объектом;
- в) способу воздействия на объект;
- г) способу обработки результатов контроля;
- д) виду контроля \*;

---

\* Контроль МПП может осуществляться по следующим параметрам: сопротивлению изоляции, прочности изоляции, правильности и целостности цепей, качества и надежности межслойных соединений и др. в совокупности или раздельно.

- е) целевому назначению контроля \*;
- ж) виду контролируемого параметра;
- з) степени выявления дефектов;
- и) месту расположения в технологическом процессе.

По результату контроля методы контроля можно отнести к качественным и количественным.

В зависимости от объема контроля многослойных печатных плат, определяемого возможностями метода и экономическими соображениями, контроль может быть выборочным или стопроцентным.

К физическим методам контроля многослойных печатных плат можно отнести: оптический, рентгеновский, тепловой, электрофизический, электрический, радиотехнический, металлографический, радиационный.

По видам связи с многослойной печатной платой методы контроля можно разделить на контактные и безконтактные. По характеру воздействия на многослойную печатную плату к разрушающим или неразрушающим.

В зависимости от участия обслуживающего персонала в обработке результатов контроля методы можно представить как субъективные и объективные.

Если метод контроля позволяет лишь определить явные дефекты, то он представляет собой контроль работоспособности. Если метод, кроме того, может выявить скрытые дефекты, то он является диагностическим. Метод контроля, позволяющий предсказать на будущее состояние многослойной печатной платы или ее элементов, является прогнозирующим.

Интегральный и дифференциальный характер метода контроля имеет различную степень выявления дефектов и их локализацию.

Выходной контроль предназначен для контроля готовых плат, пооперационный — используется в ходе технологического процесса.

На рис. 52 приведена классификация методов контроля многослойных печатных плат.

### **Оптический метод контроля**

Оптический метод в основном используется для контроля рисунка и металлизированных переходов отдельных печатных слоев.

Достоинство этого метода в выявлении дефекта на ранних стадиях технологического процесса. Данный метод включает в себя два способа: визуальный и автокомпенсационный.

Визуальный способ прост, нагляден и имеет высокую разрешающую способность. Недостаток его в субъективности контроля и низкой его производительности. Средствами контроля визуального способа являются: лупа, бинокулярный микроскоп, проектор и стереомикроскоп.

Автокомпенсационный способ имеет сравнительно высокую производительность. При этом способе контроля пользуются бинокулярным оптическим компаратором. Принцип работы прибора заключается в совмещении двух изображений эталонной и контролируемой плат. Пройдя через поляризационные фильтры, совмещенное изображение вызывает на выходе эффект мерцания, если в изображениях есть различия. Сканирование позволяет просматривать последовательно поверхность плат размером до  $300 \times 300$  мм.

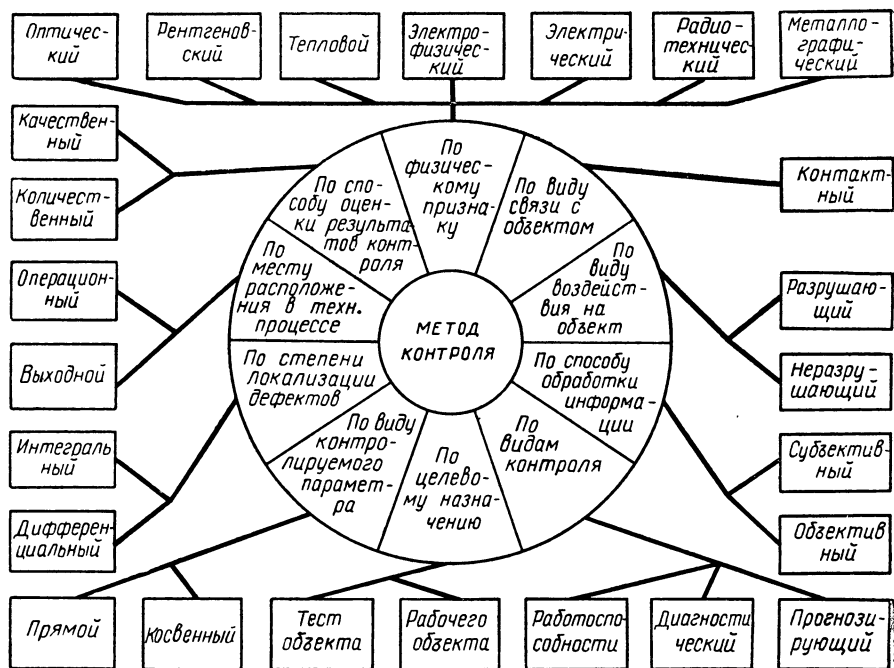


Рис. 5.2. Классификация методов контроля многослойных печатных плат

### Рентгеновский метод контроля

Рентгеновский метод применяется для контроля токопроводящих цепей многослойной печатной платы непосредственно после операции прессования, а также на выходном контроле.

Данный метод имеет несколько способов: теневой, рентгено-телевизионный, стереорентгенографии и томографии.

Теневой способ позволяет выявлять несовмещение слоев многослойной печатной платы после операции прессования и обладает достаточной разрешающей способностью.

В качестве средств контроля используется рентгеновский аппарат типа **РУТ-60**.



Рентгентелевизионный способ позволяет выявлять дефекты токопроводящих цепей многослойной печатной платы. Данный способ основан на использовании чувствительной к рентгеновским лучам передающей телевизионной трубки — рентгеновидикона. Пучок рентгеновских лучей, проходя через исследуемый объект (печатную плату), образует теневое изображение объекта в рентгеновских лучах и проектирует это изображение на мишень видикона. Видикон преобразует энергию рентгеновских лучей в электрические телевизионные сигналы, которые после усиления используются для получения изображения на экране кинескопа. Увеличение размеров изображения происходит чисто телевизионным путем за счет увеличения размера раstra при переходе от сканирования на мишени види-

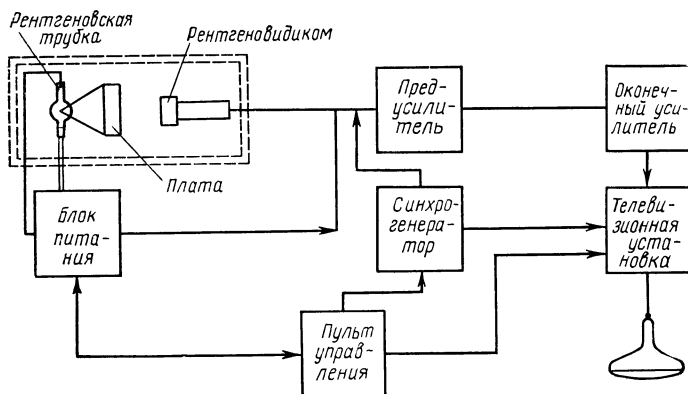


Рис. 5.3. Структурная схема рентгентелевизионной установки

кона к раstrу на экране кинескопа. На рис. 5.3 показана структурная схема рентгентелевизионной установки.

Данный способ позволяет выявить характер, вид и местонахождение дефектов. Однако он обладает недостаточной разрешающей способностью для сложных многослойных печатных плат и низкой производительностью контроля.

Способ стереорентгенографии применяется при выявлении разрывов печатных проводников после прессования и в готовой плате с помощью стереорентгеномикроскопа.

Данный способ не нашел широкого применения из-за низкой чувствительности и малой производительности.

Способ томографии заключается в проектировании предмета в рентгеновских лучах на чувствительную мишень при непрерывном движении источника рентгеновского излучения и мишени. На рис. 5.4 показана примерная схема принципа томографии.

Способ томографии применяется для послойного контроля токопроводящих цепей многослойных печатных плат и обладает

достаточно высокой универсальностью и возможностью контроля межслойных соединений.

Томография позволяет проверить тонкие слои толстого образца радиографически без механического разрушения. Томограф содержит точечный источник рентгеновских лучей и механизм, сообщающий вращательное движение плате и рентгеновской пленке (мишени).

Печатная плата и пленка синхронно вращаются вокруг параллельных осей, расположенных в одной плоскости с источником.

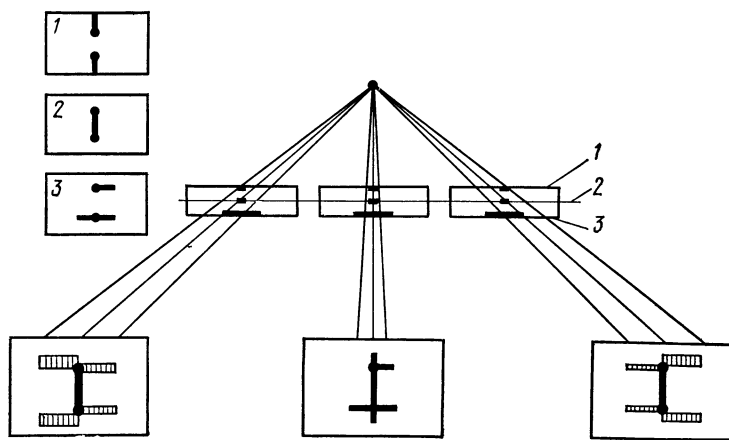


Рис. 5.4. Схема принципа томографии

Относительное расположение источника, платы и пленки таково, что все интересующие слои печатной платы проектируются с помощью рентгеновских лучей на плоскость пленки. Все точки в изображаемой плоскости имеют четкое изображение и остаются неподвижными относительно пленки при вращающейся системе. Точки других плоскостей описывают на пленке окружности и как бы размываются. Регулируя относительное положение контролируемого объекта и пленки, выборочно фокусируется изображение желаемой плоскости.

Многие специалисты находят, что с помощью томографии можно проводить неразрушающие испытания межслойных соединений многослойных печатных плат.

#### Тепловой метод контроля

Тепловой метод контроля токопроводящих цепей многослойных печатных плат основан на измерении градиента температуры в местах локализации дефекта при нагреве, который осуществляется за счет пропускания тока через контролируемую цепь. Электрический нагрев контролируемой цепи может быть стационарным и нестационарным.

Данный метод имеет два способа: инфракрасный и термоиндикаторный.

Инфракрасный способ основан на измерении теплового излучения нагреваемых электрическим током цепей печатной платы. С помощью инфракрасного метода можно обнаружить следующие дефекты печатного монтажа:

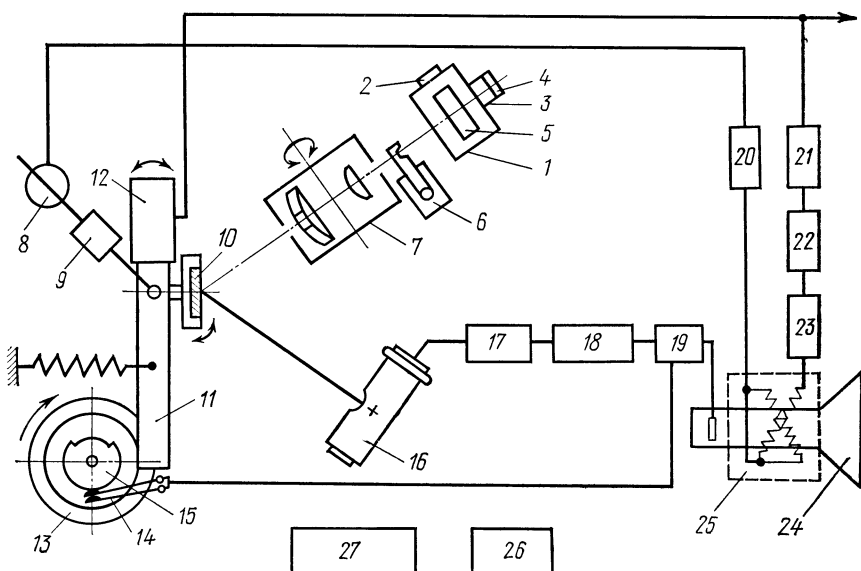


Рис. 5.5. Структурная схема прибора для обнаружения дефектов печатного монтажа инфракрасным способом:

1 — предметный столик для установки образца и его ориентации; 2, 3, 4 — ходовые винты для передвижения стола в трех направлениях; 5 — исследуемый образец; 6 — поворотные объекты; 7 — объектив; 8 — линейный потенциометр, используемый как датчик напряжения для электрической развертки луча электронно-лучевой трубки по кадру; 9 — редуктор, предназначенный для увеличения угла поворота движка потенциометра; 10 — зеркало; 11 — рамка; 12 — вибратор; 13 — электродвигатель с редуктором; 14 — контакты; 15 — кулачок, управляющий контактом; 16 — фоточувствительный элемент; 17 — электронный усилитель; 18 — ступенчатая регулировка полосы пропускания электронного усилителя; 19 — анодный сумматор; 20 — электронный усилитель в цепи кадровой развертки; 21 — избирательный усилитель в цепи строчной развертки; 22 — фазовращатель; 23 — электронный усилитель в цепи строчной развертки; 24 — электронно-лучевая трубка; 25 — отклоняющая система; 26 — блок питания электронной схемы; 27 — блок питания накала электронного усилителя

- а) пористость металлизированного проводника;
- б) обрывы проводников;
- в) короткое замыкание;
- г) утонение проводников;
- д) пониженное сопротивление изоляции.

В качестве измерительного устройства используется инфракрасный сканирующий микроскоп, который позволяет рассматривать тепловую картину объекта на экране электроннолучевой трубки. Блок-схема прибора представлена на рис. 5.5.

Прибор позволяет получить на экране изображение поверхности объекта в поле размером  $30 \times 30$  мм, выбрать интересующий участок этой поверхности и рассмотреть его с общим увеличением, равным 3, с разрешением на поверхности объекта не хуже 0,8 мм, по температуре  $0,5^\circ \text{C}$ .

Термоиндикаторный способ основан на использовании жидких кристаллов, к которым относятся некоторые холестерины, сохраняющие в состоянии между жидкой и твердой фазами свойства обеих фаз.

Их отличительным свойством является изменение окраски при изменении условий среды. Некоторые холестерины имеют две точки плавления и два резких температурных перепада. Это позволяет использовать их в качестве датчика температуры в дефектоскопии, где градиенты температуры могут являться признаком внутренних дефектов. Разная окраска указывает на возможность дефекта. Однако указанный способ не нашел широкого применения для контроля многослойных печатных плат.

### **Электрофизический метод контроля**

Данный метод используется для отбраковки многослойных печатных плат с малонадежными токопроводящими цепями.

Применение метода основано на пропускании тока большой величины через токопроводящие цепи платы. Мощность источника тока выбирается такой, что разогрев дефектного участка цепи вызывает его расплавление, а нагрев доброкачественного участка цепи не вызывает никаких последствий.

В качестве средств контроля используется генератор стабилизированных импульсов тока амплитудой до 30 а, длительностью 5 мсек и работающий на нагрузку  $0,6 \div 1,8$  ом.

Указанный метод обладает относительной простотой и легко может быть автоматизирован. Однако данный метод может сам вызвать дефект токопроводящей цепи платы, малоинформативен, поэтому не нашел широкого применения.

### **Электрический метод контроля**

Электрический метод контроля многослойных печатных плат нашел особенно широкое применение в устройствах выходного контроля готовых плат.

Данный метод обеспечивает гарантию качества полученных электроизоляционных зазоров между печатными проводниками, но интегральный характер метода не дает необходимой гарантии качества выполнения токопроводящих цепей платы. Контроль токопроводящих цепей этим методом по существу сводится к контролю целостности цепей многослойной печатной платы. В последнее время электрический метод стали использовать для контроля металлизированных переходов печатных плат.

Электрический метод контроля может быть контактным и бесконтактным.

Контактный способ контроля позволяет осуществить измерение сопротивления печатных проводников и металлизированных переходов в многослойной печатной плате посредством четырехзондовой схемы. Схема прибора работает на переменном токе и позволяет измерять сопротивление металлизированных отверстий в диапазоне от 50 до 500 *мком*. Для измерения столь небольших величин от источника тока частотой 50 *гц* через металлизацию пропускают ток 100 *ма*. Результирующее падение напряжения между верхним и нижним концентрическими кольцами металлизации отверстия передается через трансформатор с коэффициентом трансформации 1 : 100 на вольтметр с высоким импедансом.

Так как величина тока фиксирована, вольтметр градуируется в микроомах. Вследствие того что зонды и концентрические кольца металлизированных отверстий не могут обеспечить равномерного распределения плотности тока, абсолютная величина отсчетов может быть неточной, но с высокой воспроизводимостью результатов.

#### **Радиотехнический метод контроля**

Данный метод применяется исключительно для контроля волнового сопротивления токопроводящих цепей многослойных печатных плат с применением стандартных измерительных приборов для измерения емкости и индуктивности.

В последнее время в отдельных случаях начали применять радиотехнический метод для обнаружения шумов в некачественных межслойных соединениях при вибрации многослойной печатной платы.

#### **Радиационный метод контроля**

Данный метод используется для контроля толщины металлизированных переходов платы и основан на использовании обратного  $\beta$ -излучения. Для применения метода целесообразно иметь основные расчетные соотношения, выраженные через параметры, объективно оценивающие основные свойства материалов датчика и контролируемого объекта.

В качестве такого параметра удобно использовать коэффициент обратного рассеивания  $\eta$ . Зависимость  $\eta = f(Z)$ , где  $Z$  — атомный номер рассеивателя, приближенно описывается математически.

При контроле обычно используются кривые  $\eta = f(Z)$ , снятые в условиях эксперимента, близких к реальным, и результаты контроля можно считать достаточно близкими к истине.

Для измерения используется прибор, который состоит из зонда и вторичного электрического блока. Зонд в свою очередь состоит из источника излучения и счетчика Гейгера. В зависимости от измеряемой толщины металлического покрытия отверстия

## ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЛАТ

№ п/п	Методы контроля	Средства контроля	Назначение	Основные характеристики	
				преимущества	недостатки
I	Оптический 1. Визуальный 2. Автокомпенси- онный Рентгеновский	Луна, микроскоп, проектор, стереоскоп Компаратор	Контроль слоев эквальных отверстий платы Контроль печатных слоев платы	Доступность и просто- та Выявляет дефекты на ранних стадиях  Высокая производи- тельность Бесконтактный	Ограниченность при- менения Субъективный харак- тер оценки результатов  Не установлена разре- шающая способность Низкая производи- тельность Использование рентге- новской пленки Недостаточная разре- шающая способность
II	1. Теневой 2. Телевизионный	Рентгеновский ап- парат Рентгенотелевизион- ный микроскоп	Контроль совмеще- ния слоев платы Контроль размеров токопроводящих це- пей Контроль целост- ности токопроводя- щих цепей	Выявляет брак на ран- них стадиях Выявляет место и ха- рактер дефектов	Сложность констру- ции установок Малая разрешающая способность Малая разрешающая способность
III	3. Стереорентгено- графический 4. Томография  Тепловой	Стереорентгеномик- роскоп  Томограф	Послойный конт- роль участков токо- проводящих цепей	Выявляет брак на ран- них стадиях  Универсальность  Дифференциальность	Сложность интерпре- тации результатов конт- роля

Продолжение табл. 5.2

№ п/п	Методы контроля	Средства контроля	Назначение	Основные характеристики	
				преимущества	недостатки
IV	1. ИК-техники	Инфракрасный микроскоп	Контроль токопроводящих цепей	Выявляет брак металлизированного отверстия	Сложность эксплуатации
	2. Термоминиматорный	Жидкие кристаллы			
V	Электрофизический	Генератор тока	Контроль проводников и металлизированных переходов	»	Требует априорных данных о распределении теплового поля
	Электрический	Измеритель сопротивления			
VI	1. Контактный	Электронный луч	Контроль целостности токопроводящих цепей	Высокая производительность	Способствует возникновению и развитию дефектов
	2. Бесконтактный	Измеритель $L$ и $C$			
VII	Радиотехнический	Микроскоп	Контроль реактивных параметров контактных и металлизированных переходов	Гарантирует качество электроизоляционных промежуток	Низкая информативность контроля токопроводящих цепей
VIII	Металлографический	Радиометр	Контроль металлизированных переходов	Универсальность	Не выявляет характер дефектов
	Радационный			Контроль волнового сопротивления	Разрушающий и малоинформативный
				Оценка качества контактных переходов	Ограниченность применения
				Бесконтактный	

платы используется один из пяти сменных источников излучения. Точность измерения обычно не превышает 10% от измеряемой величины и зависит от качества эталона, времени отсчета и других параметров.

Основным недостатком указанного метода является его низкая производительность (30 сек на одно отверстие).

Анализ методов контроля многослойных плат сведен в табл. 5.2.

### **§ 5. 3. Выходной контроль готовых плат**

Имеющиеся средства выходного контроля многослойных печатных плат основаны на использовании электрических методов контроля.

Так как многослойная печатная плата содержит большое число цепей и металлизированных отверстий, ручные методы электрического контроля (целостности печатных проводников, величины электрического сопротивления изоляции и электрической прочности изоляции) весьма трудоемки и не гарантируют точность результатов контроля. При серийном выпуске многослойных печатных плат ручной их контроль просто непригоден.

Автоматизация выходного контроля многослойных печатных плат должна быть неотъемлемой частью механизированного комплекса оборудования, применяемого при производстве этих плат и составной частью системы машинного проектирования и изготовления МПП.

Рассмотрим более подробно один из отечественных стендов, предназначенный для этих целей.

Универсальный стенд с программным управлением используется для выходного контроля электрических параметров многослойных печатных плат и осуществляет контроль:

- а) целостности печатных проводников платы;
- б) величины электрического сопротивления изоляции между электрически разобщенными цепями;
- в) электрической прочности изоляции между электрически разобщенными цепями.

Контроль производится по принципу «годен — брак» по предельным значениям сопротивления, изоляции и сопротивления проводника.

Контроль электрической прочности изоляции осуществляют напряжением переменного тока.

Стенд имеет программное управление; программа контроля записывается на пятидорожечной перфоленте. Универсальный стенд снабжен устройством контактирования, которое обеспечивает присоединение к электрической части стенда многослойной печатной платы с параметрами: габаритный размер 150×140 мм; шаг координатной сетки 2,5 мм; диаметр выходных отверстий 0,6÷0,8 мм; число контролируемых точек 1500.



При несоответствии контролируемого параметра многослойной печатной платы заданному стенд прекращает дальнейшую проверку с указанием места неисправности на специальном табло. Помимо световой индикации стенд позволяет выдавать информацию на внешние разъемы для использования ее в случае записи на цифропечать.

Операция замены проверяемой платы и контрольной перфоленты производится вручную, а контроль электрических параметров платы автоматическим.

Время на проверку одной платы составляет не более 5—7 мин.

Контроль целостности печатных проводников платы производится стендом по всем точкам контролируемой цепи платы на наличие соединения с последней точкой данной цепи платы.

Контроль электрической прочности и сопротивления изоляции между электрически разобщенными цепями и изолированными выводами платы производится следующим порядком: из всей совокупности электрических цепей и изолированных выводов предварительно замкнутых на общую шину, выделяется одна (контролируемая в данный момент) цепь или изолированная точка платы, которая отключается от общей шины и подключается ко входу измерительного устройства стенда.

Структурная схема универсального стенда изображена на рис. 5.6.

Устройство контактирования обеспечивает одновременное подсоединение всех видов цепей проверяемой многослойной печатной платы к специальным контактным штырям, которые в свою очередь присоединены к коммутатору точек контроля.

Необходимое переходное сопротивление величиной в 0,1 ом между каждым выводом многослойной платы и контактным штырем обеспечивается давлением, создаваемым пружиной каждого контакта.

Коммутатор точек контроля по соответствующей схеме осуществляет вполне определенное и в необходимом объеме число комбинаций опроса контролируемых точек.

Программа контроля многослойной печатной платы, записанная на перфоленте, считывается с помощью фотоэлектрического входного устройства и поступает на вход блока управления.

При подаче на блок управления сигнала «Сброс» стенд приводится в исходное состояние. Сигнал «Пуск» вырабатывает команду «Старт», которая осуществляет включение транспорта.

Блок управления имеет три входа, по которым подаются с блока автоматического контроля и отбраковки сигналы «Цепь» или «КЗ цепи», «Пробой», «Изоляция».

Блок управления после дешифрации выдает команды управления на блок выходных усилителей, блок питания и блок индикации. Кроме того, блок управления имеет выходы для пере-

дачи и в другие блоки стенда всех команд, записанных на перфоленте, команд управления блоком автоматического контроля: «Цепь», «Пробой», «Изоляция», команд управления: «Автостоп», «Старт»; команд сигнализации: «Обрыв цепи», «КЗ цепи», «Пробой», «Изоляция занижена», «Проверка окончена», «Ошибка считывания». Блок управления имеет в своем составе логическое устройство, которое в зависимости от записанной в кадре команды может задерживать сигнал «Старт» на необходимое время.

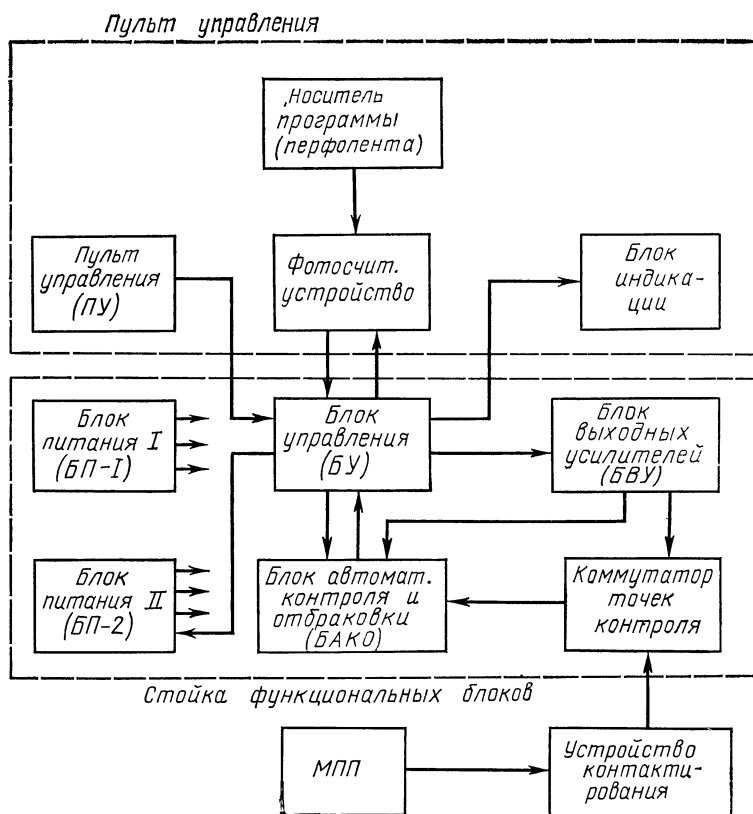


Рис. 5.6. Структурная схема универсального стенда с программным управлением для контроля многослойных печатных плат

С блока информации на цифропечать выводится информация о координатах контролируемых точек и сигналах брака.

Блок питания обеспечивает питанием все блоки стенда и имеет ряд стабилизированных источников с различными номиналами напряжений.

Пульт управления содержит блок, служащий для контроля номиналов напряжений блока питания и для получения и уста-

новки требуемого номинала испытательного напряжения при контроле платы на электрическую прочность.

Кроме того, в пульт управления входит блок органов управления стендом и задатчик команд.

Блок автоматического контроля и отбраковки имеет четыре входа, по которым поступают от блока управления сигналы на включение следующих измерительных схем:

- а) проверки целостности проводников;
- б) проверки на отсутствие КЗ;
- в) испытания на электрическую прочность;
- г) испытания на сопротивление изоляции.

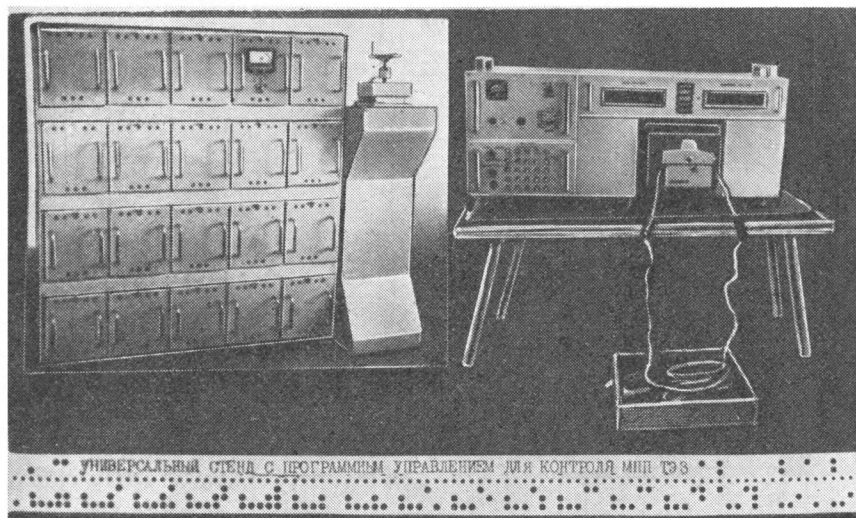


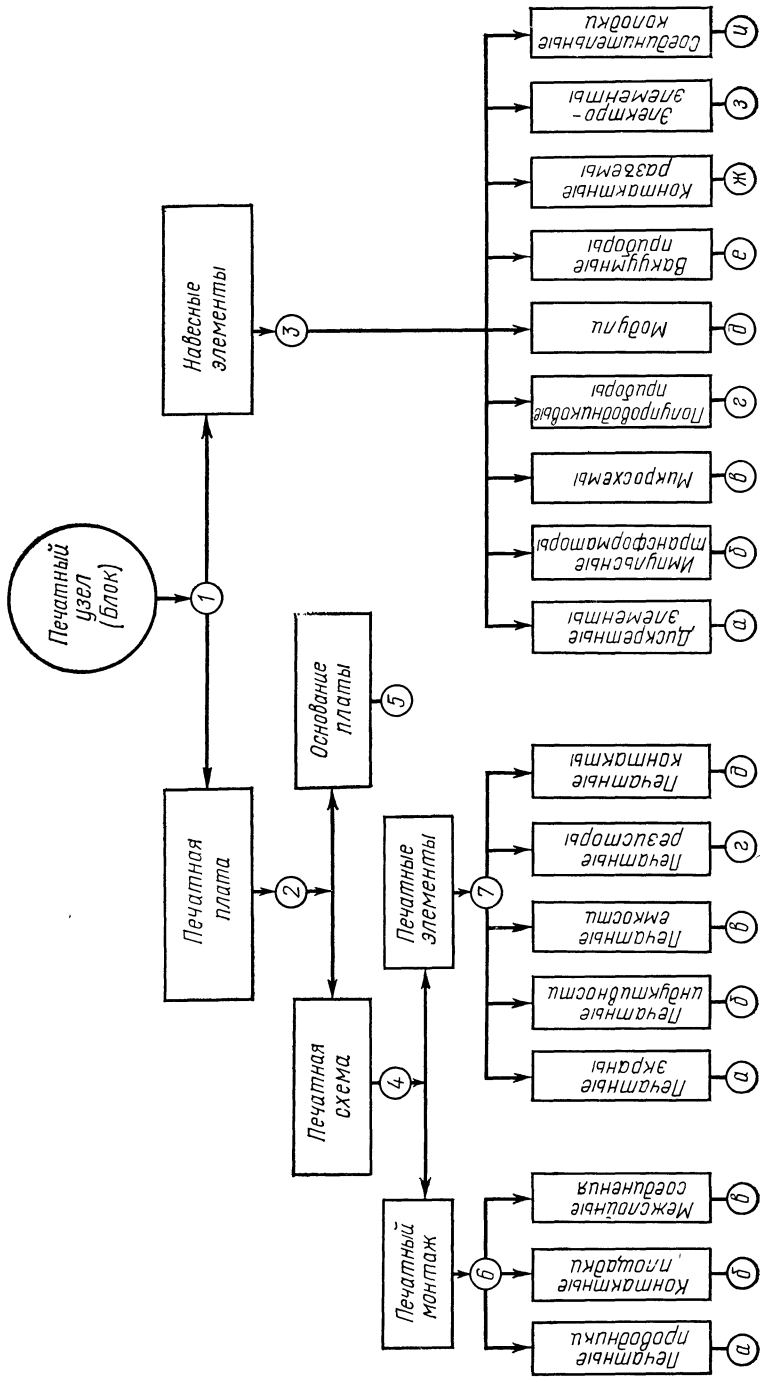
Рис. 5.7. Общий вид универсального стенда с программным управлением для контроля многослойных печатных плат

Данный блок имеет выходы, по которым в блок управления выдаются сигналы результата проверки любого параметра платы; если параметр соответствует заданному, то сигнал есть; если параметр не соответствует заданному, то сигнал отсутствует.

В заключение следует сказать, что универсальный стенд может контролировать платы различных размеров и рисунков схемы в пределах его разрешающей способности. Для других размеров плат необходимо лишь новое контактное устройство. На рис. 5.7 представлен общий вид стенда.

В практике используется также целый ряд специальных стендов выходного контроля ручного и полумеханизированного типа.

# СХЕМА ОСНОВНЫХ ТЕРМИНОВ ПЕЧАТНОГО МОНТАЖА



## ЛИТЕРАТУРА

1. Руководящий технический материал Министерства «Платы печатные многослойные. Технология». Редакция 1—69.
2. Нормаль Министерства «Платы печатные. Общие технические условия». Редакция 2—69.
3. Отраслевой стандарт «Платы печатные многослойные. Технология изготовления с учетом автоматизированного проектирования и изготовления». Редакция 1—71.
4. Руководящий технический материал Министерства «Платы печатные. Технология». Редакция 1—66.
5. Руководящий технический материал Министерства «Печатные полосковые линии». Редакция 1—70.
6. Д. ж. Дьюкс «Печатные схемы, их конструирование и применение». Перевод с английского. Изд-во «Иностранная литература». М., 1963.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Введение . . . . .	4
<b>Глава I. Конструктивно-технологические требования к печатному монтажу . . . . .</b>	<b>6</b>
§ 1.1. Общие технические требования к печатным платам . . .	6
§ 1.2. Основные принципы конструирования печатных плат . .	11
§ 1.3. Некоторые общие указания по конструированию токопроводящего рисунка печатной платы . . . . .	26
§ 1.4. Проектирование печатных плат с помощью магнитных матриц . . . . .	28
§ 1.5. Особенности конструирования многослойных печатных плат (МПП) . . . . .	31
§ 1.6. Конструирование печатных плат с помощью систем автоматизированного проектирования (машинное проектирование) . . . . .	51
<b>Глава II. Технология изготовления печатных плат . . . . .</b>	<b>90</b>
§ 2.1. Фольгированные диэлектрики, применяемые для изготовления печатных плат . . . . .	90
§ 2.2. Общие требования и нормы на изготовление фотооригиналов . . . . .	98
§ 2.3. Изготовление фотошаблонов с помощью ЭВМ . . . . .	103
§ 2.4. Требования к фотошаблонам. Контроль и хранение . . .	108
§ 2.5. Основные промышленные способы изготовления печатных плат . . . . .	109
§ 2.6. Сеточно-химический способ изготовления печатных плат	110
§ 2.7. Комбинированный метод изготовления печатных плат . .	117
<b>Глава III. Технология изготовления многослойных печатных плат . .</b>	<b>125</b>
§ 3.1. Особенности МПП. Методы их изготовления . . . . .	125
§ 3.2. Технология изготовления МПП методом металлизации сквозных отверстий . . . . .	133
§ 3.3. Технология изготовления МПП методом попарного пресования . . . . .	135
§ 3.4. Технология изготовления МПП методом открытых контактных площадок . . . . .	135

	<i>Стр.</i>
§ 3.5. Технология изготовления МПП методом послойного наращивания . . . . .	138
§ 3.6. Технология изготовления МПП методом выступающих выводов . . . . .	144
§ 3.7. Специфические технологические операции процесса изготовления МПП . . . . .	144
<b>Глава IV. Полосковые линии передачи.</b> . . . .	<b>159</b>
§ 4.1. Расчет и проектирование . . . . .	159
§ 4.2. Технология производства СВЧ печатных схем . . . . .	186
<b>Глава V. Контроль качества печатных плат</b> . . . . .	<b>193</b>
§ 5.1. Общие положения . . . . .	193
§ 5.2. Методы контроля токопроводящих цепей многослойных печатных плат . . . . .	197
§ 5.3. Выходной контроль готовых плат . . . . .	207

Алексей Терентьевич Жигалов,  
Евгений Павлович Котов,  
Кирилл Николаевич Шихаев  
Борис Алексеевич Хохлов,

КОНСТРУИРОВАНИЕ  
И ТЕХНОЛОГИЯ  
ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Научный редактор О. Д. Парфенов  
Редактор издательства Г. А. Сорокина  
Художественный редактор Н. В. Майкова  
Техн. редактор А. К. Нестерова  
Корректор Г. Н. Буханова



Т—06986 Сдано в набор 16/І—73 г. Подп. к печати  
26/VІІ—73 г. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Объем 13,5 п. л.  
Уч.-изд. л. 13,62 Изд. № ЭР—124. Тираж  
20 000 экз. Заказ 2308. Цена 48 коп.  
План выпуска литературы для вузов и техникумов  
издательства «Высшая школа» на 1973 г. Позиция 117.  
Москва, К-51, Неглинная ул., д. 29/14,  
Издательство «Высшая школа»

Московская типография № 8 «Союзполиграфпрома»  
при Государственном комитете Совета Министров СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,  
Хохловский пер., 7.

48 коп.

ИЗДАТЕЛЬСТВО МОСКВА  
1973 ГОД



ВЫСШАЯ ШКОЛА