

В.Ф. Лескин, А.Н. Лысенко, Т.Л. Захарченко

Министерство образования и науки Украины  
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический  
институт»

# Методические указания по конструкторско- технологическому и электрическому расчету печатных плат

Киев 2010

## Содержание

1. ТЕХНОЛОГИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ.....	3
1.1. Односторонние платы.....	4
1.2. Двухсторонние печатные платы.....	4
1.3. Многослойные печатные платы.....	5
1.4. Точность печатных плат.....	6
1.5. Размеры печатных плат.....	7
1.6. Толщина печатных плат.....	8
1.7. Отверстия печатных плат.....	10
1.8. Параметры проводников и зазоров.....	12
1.9. Контактные площадки отверстий.....	13
1.10. Плоские контактные площадки .....	14
1.11. Экранные слои .....	15
1.12. Гальванические покрытия .....	15
1.13. Защитные покрытия .....	16
1.14. Маркировка .....	17
1.15. Установка элементов .....	18
1.16. Установка элементов со штыревыми выводами .....	20
1.17. Установка микросхем .....	21
1.18. Поверхностный монтаж .....	22
1.19. Монтаж микросхем на поверхность.....	24
1.20. Дискретные чип-элементы .....	25
2. ПРИМЕР КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ МОДУЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ШАГОВЫМ ДВИГАТЕЛЕМ.....	27
3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПП МОДУЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ШАГОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ.....	31

## 1. ТЕХНОЛОГИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

За относительно короткую историю развития технологии печатных плат (ПП) предложено, разобрано и опробовано большое количество способов их изготовления, но практическое применение нашли те, которые основаны на химических процессах травления (субтрактивный метод) или осаждения (аддитивный метод). Большинство современных технологий считают оба приема (комбинированный метод), в частности травление медной фольги и наращивание меди на диэлектрических поверхностях (металлизацию), например, в отверстиях. Наращивание (осаждением или другими гальваническими приемами) служит также для увеличения толщины (сечения) проводников на ПП или для получения различных гальванических (металлических) покрытий, обеспечивающих защиту медных поверхностей и улучшающих качество пайки компонентов.

Таким образом, современное производство печатных плат основано на гальванических процессах в сочетании с механической обработкой и рядом других дополнительных приемов и технологий. Хотя в отдельных отраслях находят применение узкоспециализированные процессы производства ПП, например многослойных керамических плат, или устаревшая технология массового производства ПП для телевизоров, в которой травильная маска наносится нитроокраской через трафарет.

Ниже рассмотрим о наиболее известных и широко применяемых в производстве вариантах конструкций печатных плат и соответствующих технологических процессах. При этом ставится задача не дать студенту всех тонкостей конструирования и технологии изготовления ПП, а дать в основном только те сведения, которые необходимы для проектирования печатного узла методами разнообразных САПР.

Печатные платы по конструкции классифицируют на три класса: односторонние (ОПП), двухсторонние (двухслойные, или ДПП) и многослойные (МПП).

### 1.1. Односторонние платы

Эти платы используются исключительно для одностороннего монтажа элементов в гладкие (не металлизированные) отверстия. Установка элементов на поверхность практикуется только в любительских и макетных конструкциях. Элементы устанавливаются со стороны первого (в данном случае, отсутствующего) слоя, а весь электрический монтаж осуществляется на втором, последнем, слое.

Напомним, что общепринято считать первым (верхним) слоем тот, на котором расположены элементы. При двухстороннем размещении элементов за верхний принимается слой, на котором находится соединитель или иные устройства внешней коммутации (монтажные контакты, колодки, платы соединительные и т.д.).

В односторонних ПП для трассировки пересекающихся цепей используются перемычки, выполняемые из проволоки (обычно из медной, луженой одножильной). Перемычки представляют собой элементы конструкции, поэтому показываются на чертежах, записываются в спецификации и т.д. Номенклатура перемычек (по длине) должна быть минимальной.

Односторонние ПП обеспечивают самую высокую точность выполнения проводящего рисунка и совмещения его с отверстиями и при этом являются наиболее дешевым классом печатных плат. Монтажные и трассировочные возможности этих плат низкие. Надежность ПП и механическая прочность крепления элементов также невысока. Во избежание отслоения печатных проводников все элементы следует монтировать без зазоров между корпусом элемента и печатной платой.

Для повышения прочности крепления элементов возможно изготовление односторонних ПП с металлизацией отверстий, но стоимость у таких плат будет, как у двухсторонних, так что этот прием в большинстве случаев не оправдан.

Односторонние печатные платы, благодаря их дешевизне, используются преимущественно в бытовой аппаратуре и силовой электронике.

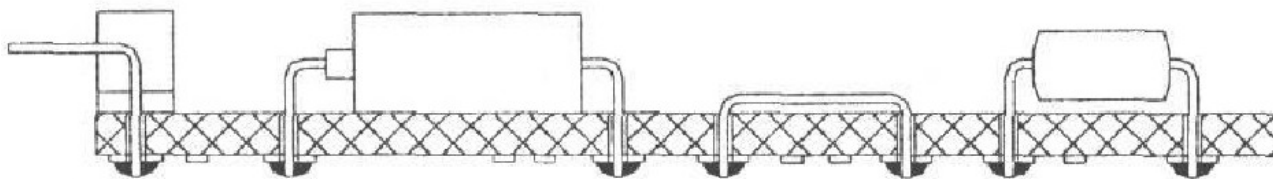


Рис. 1.1 — Односторонняя ПП

### 1.2. Двухсторонние печатные платы

Известны две разновидности двухсторонних ПП (ДПП): без металлизации(рис. 1.2) сквозных отверстий и с металлизацией (рис. 1.3).

*Платы без металлизации* по многим параметрам соответствуют односторонним платам. Но из-за наличия еще одного слоя (в данном случае первого) повышается трассировочная способность ПП и в определенной степени плотность компоновки элементов. Серьезная проблема таких плат обеспечение электрических переходов между слоями, для чего применяются заклепки, проволоочные перемычки или пайка выводов элементов с двух сторон ПП. Все это резко усложняет монтаж и в целом повышает стоимость устройства.

Платы такой разновидности обычно используются в любительских и макетных устройствах.

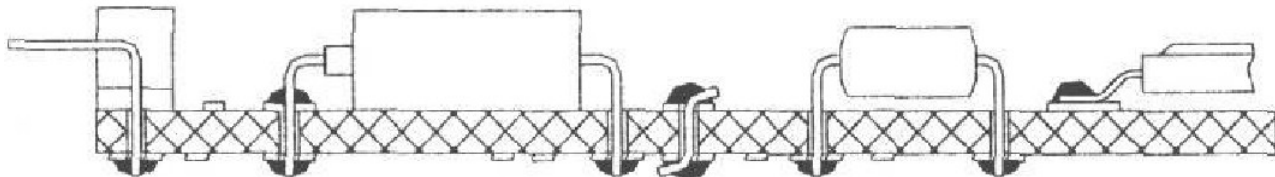


Рис. 1.2—ДПП без металлизации отверстий

*Платы с металлизацией* переходных отверстий также имеют высокую трассировочную способность, обеспечивают высокую плотность монтажа элементов и хорошую механическую прочность их крепления. Эти ПП допускают монтаж элементов на поверхность и являются наиболее распространенными в производстве радиоэлектронных устройств.

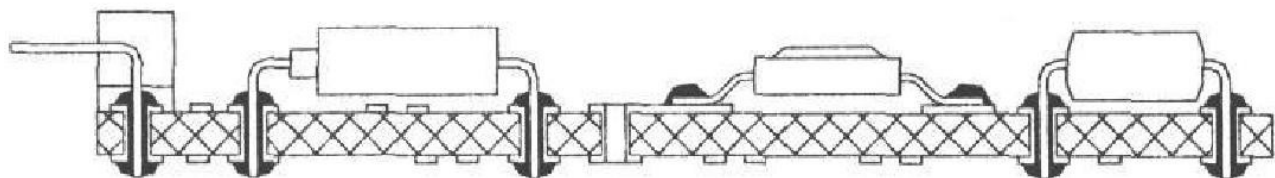


Рис. 1.3—ДПП с металлизацией отверстий

### 1.3. Многослойные печатные платы

Многослойные ПП (МПП) отличаются очень высокой трассировочной способностью и плотностью монтажа элементов. Они практически не имеют ограничений по устанавливаемым элементам (микросхемы любой степени интеграции, SMD и т. д.).

Вариантов изготовления МПП предложено много, но практическое применение нашли всего два.

*Четырехслойные ПП попарного прессования*(рис. 1.4) При изготовлении таких плат используется технология ДПП с металлизацией сквозных отверстий, они относительно простые в изготовлении и являются самыми дешевыми из многослойных плат. Платы имеют почти в два раза более высокую трассировочную способность в сравнении с аналогичными двухслойными платами, но их монтажная способность ниже, чем у аналогичных ДПП. Это вызвано тем, что на наружных слоях платы находятся контактные площадки отверстий для перехода на смежный и на противоположный слой МПП. Часто такие платы используются в варианте, когда два слоя отводятся для цепей Земля и Питание (в виде сетчатых слоев), а два других служат для трассировки функциональных цепей.

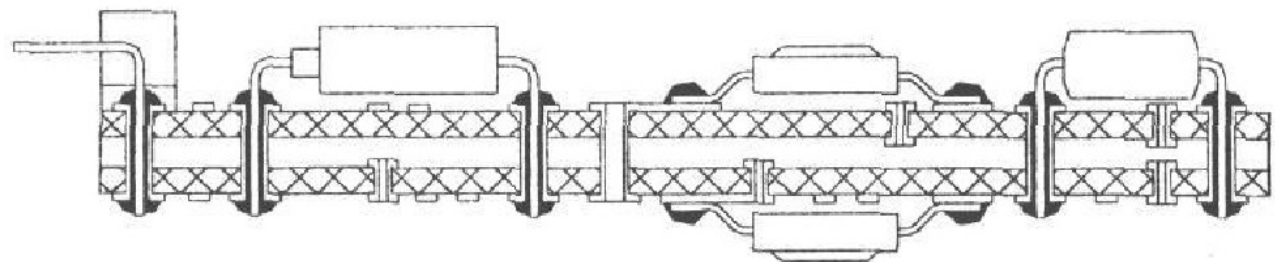


Рис. 1.4—Четырехслойная плата попарного прессования.

С внедрением других приемов изготовления МПП технология попарного прессования стала

применяться редко.

С внедрением других приемов изготовления МПП технология попарного прессования стала применяться редко.

*Многослойные ПП с металлизацией сквозных отверстий (рис. 1.5).* Имеется две разновидности этих МПП: с внутренними межслойными переходами и без таких переходов. Фактически это - один вариант изготовления, но наличие внутренних переходов, с точки зрения технологии, можно рассматривать, как дополнительную разновидность.

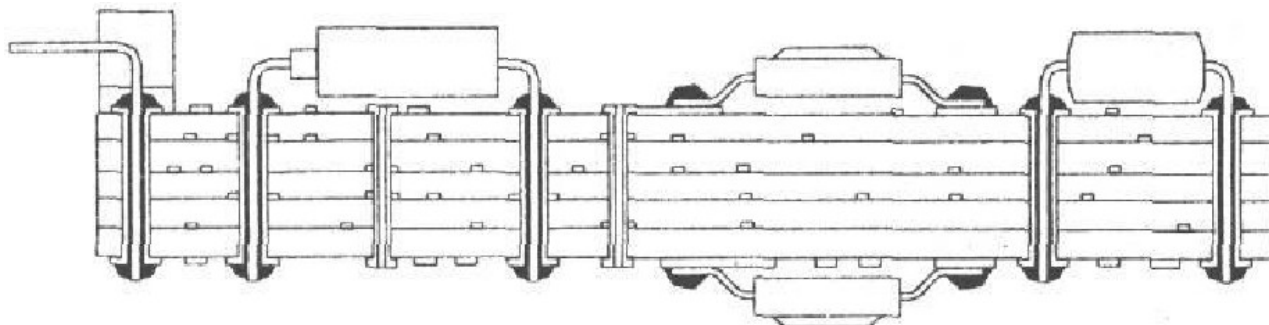


Рис. 1.5— МПП с металлизацией сквозных отверстий

Данные платы обладают теоретически неограниченной трассировочной способностью и позволяют монтировать любые элементы с одной или двух сторон.

Стоимость МПП высока и зависит от количества слоев и размеров, причем при наличии межслойных переходов она почти в два раза выше, чем без них. Такие платы применяются в устройствах высокого быстродействия с микросхемами высокой степени интеграции.

Прежде чем приступить к конструированию конкретной печатной платы, необходимо решить ряд конструкторских и технологических вопросов, от которых во многом зависит, какие исходные данные должны вводиться в программу проектирования печатной платы. Часть параметров регламентирована ГОСТами и определяется уровнем производства, при этом большинство параметров ПП устанавливается или рассчитывается для каждого конкретного проекта. Однако некоторые проектировщики предпочитают при разработке печатных плат пользоваться определенным набором усредненных параметров, что заметно упрощает разработку, но не всегда обеспечивает высокие компоновочные характеристики устройства.

#### 1.4. Точность печатных плат

Точность изготовления ПП зависит от комплекса технологических параметров и с практической точки зрения определяет основные параметры элементов ПП (табл. 1.1).

Таблица 1.1— Параметры элементов ПП

Условное обозначение	Номинальное значение основных размеров для класса точности				
	1	2	3	4	5
bпр	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
S	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
bпо	0,3	0,2	0,1	0,05	0,03
Кдт	0,4	0,4	0,33	0,25	0,2

*Примечание: t - ширина печатного проводника, мм; S - расстояние между краями соседних элементов проводящего рисунка, мм; b - гарантированный пояс, мм; f - отношение номинального значения диаметра наименьшего из металлизированных отверстий к толщине печатной платы.*

В первую очередь это относится к минимальной ширине проводников, минимальному зазору между элементами проводящего рисунка (это все то, что на плате выполнено из металла) и к ряду других параметров. ГОСТ 23751-86 предусматривает пять классов точности ПП (см. табл. 1.1), и в конструкторской документации на ПП должно содержаться указание на соответствующий класс, который обусловлен только уровнем технологического оснащения производства. Поэтому выбор класса точности всегда связан с конкретным производством. Попытка решить эту задачу в обратном порядке может привести к тому, что ваш проект не будет реализован.

Изготовление печатных плат **пятого класса** требует применения уникального высокоточного

оборудования, специальных (как правило, дорогих) материалов, безупрочной фотопленки и даже создания в производственных помещениях «чистой зоны» с термостатированием. Таким требованиям отвечает далеко не каждое производство. Но ПП небольшого размера могут выполняться по пятому классу на оборудовании, обеспечивающем производство плат четвертого класса. Комплексно решить все эти проблемы удастся только на реальном производстве.

Печатные платы **четвертого класса** выпускаются на высокоточном оборудовании, но требования к материалам, оборудованию и производственным помещениям ниже, чем для пятого класса.

Печатные платы **третьего класса** - наиболее распространенные, поскольку, с одной стороны, обеспечивают достаточно высокую плотность трассировки и монтажа, а с другой - для их производства достаточно рядового, хотя и специализированного, оборудования.

Разработка печатных плат 2-го и 1-го классов в новых проектах не рекомендуется.

Часто схемотехническое проектирование, а следовательно и техническое проектирование выполняется на импортной элементной базе. За рубежом принята другая классификация ПП по уровню точности (табл. 1.2). Здесь регламентируются не только конструктивные параметры, но и шаг трассировки, что фактически связывает уровень производства с параметрами печатных плат и степенью интеграции элементной базы.

Таблица 1.2— Зарубежная классификация ПП по уровню точности

Уровень	Ширина проводника и зазор, мм	Шаг проектирования, мм		Шаг выводов, мм	
		наружные слои	внутренние слои	планарные	матричные
0	0,2	1,25	0,63	0,63	2,5
1	0,15	0,63	0,63	0,5	1,25
2	0,1	0,63	1	0,5	1
3	0,08	0,5	1	0,5	1
4	0,05	0,5	0,5	0,25	0,5
5	0,05	0,25	0,25	0,25	0,5

### 1.5. Размеры печатных плат

Максимальные размеры ПП имеют много ограничений. Это и габариты фотошаблонов, и возможности сверлильных станков. Например, сверлильный станок фирмы Vero способен одновременно обрабатывать три ПП с размерами 610x495 мм.

Для всех ПП ограничением могут стать гальванические ванны. Для многослойных ПП определяющим является прессовое оборудование. Все подобные вопросы должны уточняться с конкретным производством. Известны МПП с размерами 600x600 мм, но и это не предел. Размеры печатных плат, выпускаемых отечественными производителями, достигают 545x450 мм.

Для каждого конкретного устройства габариты печатных плат зависят от его конструкции, которая диктует также и форму платы, точки крепления, зоны запрета на установку элементов и на прокладку печатных проводников и т.д. Поэтому резонно считать нормальным прием проектирования, когда в черновом варианте определяется площадь печатной платы, на которой можно физически разместить требуемые элементы, а затем komponуется устройство в целом. Вначале разрабатывается корпус устройства, выбираются элементы и места крепления, места размещения соединителей и т.д., и только после этого, конструируется печатная плата уже с известными размерами. Цикл длительный и трудоемкий, но он обеспечивает высокие конструктивные показатели изделия.

В других случаях конструктор и разработчик, стремясь сократить сроки проектирования и сделать устройство более дешевым, принимают габариты платы интуитивно или прибегают к какому-либо из ранее примененных типоразмеров. Заметное уменьшение трудоемкости и стоимости изделия достигается за счет типовых плат. Кроме того, появляется возможность широко пользоваться готовыми покупными несущими элементами конструкции и другими типовыми деталями. В какой-то степени это ограничивает разработчика аппаратуры и не всегда позволяет добиваться оптимальной компоновки. Однако существенное сокращение сроков разработки и снижение стоимости производства за счет введения типовых деталей привлекают внимание многих проектировщиков к стандартным и типовым конструкциям, среди которых популярны размеры, регламентированные международными стандартами.

Большую номенклатуру размеров ПП содержит ГОСТ 26.765.12-86 (табл. 1.3). Строгой системы размеров в данном стандарте нет. Кроме того, платы построены с применением различных соединителей (по количеству контактов, размерам и конструкции).

Таблица 1.3— Стандартные размеры  
ПП

Н, высота(мм)	L, длина(мм)
140	280
160	220
	280
170	75
	110
	150
	200
	220
	240
	280
	320
240	150
	160
280	150
300	160
	150
360	200
	280
390	240
	280

Следует отметить, что большинство многовыводных соединителей имеют шаг контактов равен 2,54 мм или 2,5 мм. В настоящее время выпущены новые соединители с более мелким шагом контактом (1,25 мм, 2 мм и др.). По конструкции новые соединители сильно отличаются от привычных конструкций. Они не требуют пайки, не имеют цельного каркаса и привычных ловителей.

#### **1.6. Толщина печатных плат**

Толщина одно- и двухслойных ПП напрямую зависит от используемого материала, который выбирается конструктором из соображений механической прочности и жесткости. Если исходным материалом является фольгированный диэлектрик (стеклотекстолит и т.д.), то толщина печатной платы определяется именно им.

При производстве ПП применяются отечественные и импортные материалы различных производителей, среди которых наиболее известны фирмы Izola (Германия), MC Electronic (Австрия), Молдовизолит (Молдова) и Московский завод изоляционных материалов («Мосизолит»).

Марки и номенклатура некоторых отечественных материалов представлены в табл. 1.4, а импортных — в табл. 1.5.

Таблица 1.4— Марки и параметры отечественных материалов ПП

Марка	Диэлектрик и назначение	Толщина, мм	
		материала	фольги
СФ-1Н-35Г	Стеклотекстолит	0,5..3,0	0,035
СФ-2Н-35Г			0,035
СФ-1Н-50Г			0,050
СФ-2Н-50Г			0,050
СФ-1-35Г	Стеклотекстолит	0,5..3,0	0,035
СФ-2-35Г			0,035
СФ-1-50Г			0,050
СФ-2-50Г			0,050
ФС-1,ФС-2	Стеклотекстолит	0,5..3,0	0,018 0,035 0,05
СТНФ-1-18	Стеклотекстолит для ДПП и МПП	0,1..1,0 1,5 2 2,5 3	0,018
СТНФ-2-18			0,018
СТНФ-1-35			0,035
СТНФ-2-35			0,035
СТФ-1-18			0,018
СТФ-2-18			0,018
СТФ-1-35			0,035
СТФ-2-35			0,035
СТПА-5-1 СТПА-5-2	Стеклотекстолит для полуаддитивной технологии	0,15..2,0	0,050
ФТС-1-18А ФТС-2-18А	Стеклотекстолит травящийся для МПП	0,09..0,5	0,018
ФТС-1-35(А,Б) ФТС-2-35(А,Б)		0,1..0,5	0,035
СТАП-1-5	Стеклотекстолит для МПП и ДПП	0,08..2,0	0,050
СТАП-2-5			0,050
СТАП-2-18			0,018
СТАП-2-35			0,035

Таблица 1.5—Марки и параметры импортных материалов ПП

Марка	Производитель	Толщина	
		подложки	фольги
Стеклотекстолит фольгированный. Тип FR-4, марка DURAVR-E-CU 104	Фирма IZOLA	0,86	0,018-0,035
		0,51	
		0,46	
		0,25	
		0,2	
		0,15	
		0,125	
Стеклоткань прокладочная. Тип FR-4, марка DURAVR- E-104-ML PREPREG 1080 05 AT 01		0,063	

Завод «Молдовизолит» (г. Тирасполь) предлагает стеклотекстолит МИ1222 (аналог иностранного FR4) толщиной от 0,8 до 3,2 мм, и гетинакс МИ1112 толщиной 1,0 и 1,5 мм.

Для изготовления ПП использую материалы различного уровня качества.

Слоистые материалы обозначаются индексами FR и G. Материалы с индексом FR-1 обладают наибольшей горючестью, FR-5 – наименьшей. Материалы с индексом G10 и G-11 обладают особыми



характеристиками. Материалы ПП приведены в табл. 1.6.

Таблица 1.6— Материалы ПП категории FR и G

Категория	Компоненты, комментарии
FR-1	Бумага, фенольная композиция: прессование и штамповка при комнатной температуре, высокий коэффициент гигроскопичности
FR-2	Бумага, фенольная композиция: применимый для односторонних печатных плат бытовой техники, невысокий коэффициент гигроскопичности
FR-3	Бумага, эпоксидная композиция: разработки с хорошими механическими и электрическими характеристиками
FR-4	Стеклоткань, эпоксидная композиция: прекрасные механические и электрические свойства
FR-5	Стеклоткань, эпоксидная композиция: высокая прочность при повышенных температурах, отсутствие воспламенения
G10	Стеклоткань, эпоксидная композиция: высокие изоляционные свойства, наиболее высокая прочность стеклоткани, низкий коэффициент гигроскопичности
G11	Стеклоткань, эпоксидная композиция: высокая прочность на изгиб при повышенных температурах, высокая сопротивляемость растворителям

Не используйте печатную плату категории FR-1. Есть много примеров использования печатных плат FR-1, на которых имеются повреждения от теплового воздействия мощных компонентов. Печатные платы этой категории более похожи на картон.

FR-4 часто используется при изготовлении промышленного оборудования, в то время, как FR-2 используется в производстве бытовой техники. Эти две категории стандартизованы в промышленности, а печатные платы FR-2 и FR-4 часто подходят для большинства приложений. Но иногда неидеальность характеристик этих категорий заставляет использовать другие материалы. Например, для очень высокочастотных приложений в качестве материала печатных плат используются фторопласт и даже керамика. Однако, чем экзотичнее материал печатной платы, тем выше может быть цена.

При выборе материала печатной платы обращайтесь особое внимание на его гигроскопичность, поскольку этот параметр может оказать сильный негативный эффект на желаемые характеристики платы - поверхностное сопротивление, утечки, высоковольтные изоляционные свойства (пробой и искрения) и механическая прочность. Также обращайтесь внимание на рабочую температуру. Участки с высокой температурой могут встречаться в неожиданных местах, например, рядом с большими цифровыми интегральными схемами, переключения которых происходят на высокой частоте. Если такие участки расположены непосредственно под аналоговыми компонентами, повышение температуры может сказаться на изменении характеристик аналоговой схемы.

После того как материал печатной платы выбран, необходимо определить толщину фольги печатной платы. Этот параметр в первую очередь выбирается исходя из максимальной величины протекающего тока. По возможности нужно избегать применения очень тонкой фольги.

### 1.7. Отверстия печатных плат

Одними из главных элементов конструкции ПП являются отверстия. Большинство конструктивных и технологических параметров ПП связано именно с размерами этих отверстий, которые могут быть металлизированными и гладкими, а по назначению - монтажными, в которые устанавливаются и запаиваются выводы элементов, и переходными (межслойными), обеспечивающими только электрические соединения между слоями платы. Металлизированные монтажные отверстия исполняют одновременно роль переходных отверстий. Кроме того, на ПП обычно присутствует некоторое количество не металлизированных конструктивных отверстий, служащих для фиксации компонентов, крепления печатных плат к несущим элементам конструкций и для других целей. Эти отверстия чаще всего бывают гладкими, без контактных площадок и металлизации. Однако нередко, а в импортной технике — как правило, крепежные отверстия с целью удешевления производства выполняются одновременно с монтажными (по той же технологии), и поэтому у них есть внутренняя металлизация, но отсутствуют контактные площадки.

С конструктивной точки зрения, металлизация крепежных отверстий не влияет на качественные параметры печатной платы, и, более того, в некоторых случаях эти отверстия служат дополнительным

соединением слоя (или цепей) Земля с элементами несущих конструкций.

Металлизированные отверстия обычно снабжены контактными площадками на наружных слоях, а многослойные платы еще и на тех слоях, на которых к этим отверстиям подводятся печатные проводники.

Контактные площадки и металлизация отверстий выполняются исключительно из меди. Все металлизированные поверхности могут иметь дополнительное гальваническое покрытие, часто выполняющее в технологическом процессе функцию маски, защищающей участки медной фольги при травлении, что обеспечивает формирование элементов проводящего рисунка. При конструировании ПП, в частности при расчете размеров металлизированных отверстий, необходимо учитывать дополнительную толщину гальванического покрытия.

Основные варианты конструкции отверстий ПП показаны на рис. 1.6.

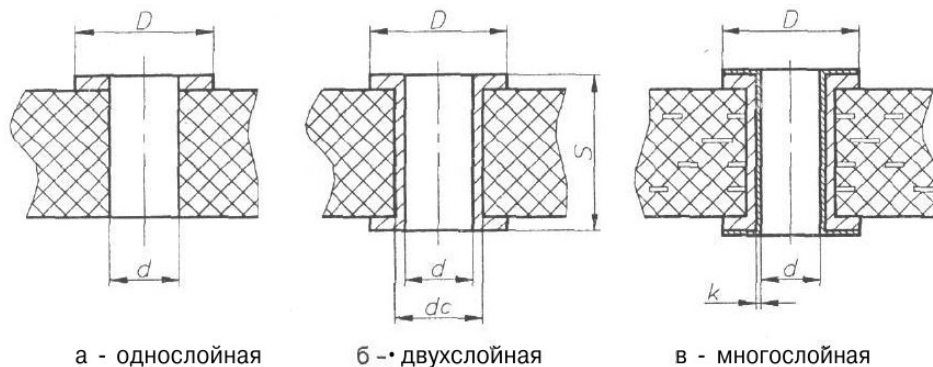


Рис. 1.6— Варианты конструкций отверстий ПП

Главный параметр отверстия - его диаметр ( $d$ ), который у не металлизированных отверстий совпадает с диаметром сверления ( $d_c$ ). Для металлизированных отверстий диаметр отверстия отличается от диаметра сверления на двойную толщину металлизации, а в случае применения гальванического покрытия еще и на двойную толщину этого покрытия. В конструкторской документации, как правило, указывается диаметр отверстия в готовой плате (контролируемый размер), а диаметр сверления обычно отсутствует, хотя он имеет важное значение для многослойных печатных плат. Минимальный диаметр металлизированных отверстий определяется соотношением Кдт (диаметр отверстия к толщине платы), которое оговорено ГОСТ 23751-86 и зависит от класса точности. Эти данные содержатся в табл. 1.7.

Таблица 1.7— Зависимость Кдт от класса точности

Кдт		Класс точности			
		1 и 2	3	4	5
		0,4	0,33	0,25	0,2
Толщина платы	1,5	0,6	0,5	0,4	0,3
	2,0	0,8	0,7	0,5	0,4

В той же таблице приведены минимальные значения диаметров металлизированных отверстий для наиболее «ходовых» по толщине плат. Соотношение Кдт следует учитывать в процессе проектировании любых плат, но заметное влияние оно оказывает на выбор отверстий, когда толщина плат превосходит 3 мм, а это, как правило, многослойные платы с количеством слоев 12 и больше. Поэтому размеры отверстий, приведенные в таблице, годятся практически только для металлизированных межслойных переходов многослойных плат.

Размеры монтажных отверстий определяются размерами (диаметром, сечением) выводов элементов, монтируемых в эти отверстия. Если вывод не круглый в сечении, то параметры отверстия в печатной плате диктуются максимальным размером вывода в сечении (например, диагональю).

В любых металлизированных отверстиях следует предусматривать гарантированный зазор (не менее 0,1 мм) для заполнения металлизированного отверстия расплавленным припоем.

У печатных плат с гладкими отверстиями (однослойных и двухслойных без металлизации) диаметр рассчитывается только из условий собираемости.

В многовыводных компонентах, например в микросхемах со штыревыми выводами, разница между диаметром отверстия и размером вывода не должна быть меньше суммы допусков на точность

положения выводов и отверстий на печатной плате (для всех типов плат).

Максимальный размер отверстия ограничен особенностями пайки выводов в данное отверстие. В случае гладких отверстий, в которые припой не попадает, а пайка осуществляется только на поверхности контактной площадки в виде выпуклого мениска, нельзя, чтобы разница в размерах превышала 0,3 мм. Если отверстия металлизированные, то разница более 0,5 мм недопустима, иначе припой при некоторых режимах пайки может вытекать из этого отверстия.

Диаметры отверстий печатных плат (гладких и металлизированных) следует выбирать из ряда по ГОСТ 10317-79, который включает диаметры от 0,4 до 3,0 мм через 0,1 мм, кроме диаметров 1,9 и 2,9 мм. Из этого ряда для практической работы можно составить и использовать собственный ряд с приращением размеров через 0,2 и 0,3 мм.

Диаметры переходных отверстий выполняют аналогично монтажным, но во всех случаях стараются сделать эти отверстия с минимальными размерами, допустимыми для конкретной толщины печатной платы. Часто минимальный диаметр отверстия определяется диаметром сверла или возможностями оборудования. В данном случае вступают в силу технологические ограничения. При хорошем оснащении производства могут быть выполнены отверстия с диаметрами 0,3 или 0,4 мм.

### 1.8. Параметры проводников и зазоров

Основные параметры (размеры и допустимые отклонения) проводников и зазоров между элементами проводящего рисунка оговорены в ГОСТ 23751-86 и непосредственно зависят от принятого класса точности ПП.

Минимальная ширина проводников и величина зазоров являются определяющими факторами, влияющими на трассировочную способность печатной платы. Однако это относится только к слаботочным цепям, для которых сечение печатных проводников, исчисляемое значением порядка 0,005 мм<sup>2</sup>, не станет ограничением. Но на ПП часто присутствуют цепи, несущие достаточно большие токовые нагрузки. Их следует конструировать не с минимальными значениями печатных проводников, а с учетом конкретной токовой нагрузки из условий исключения опасного перегрева этих проводников. Кроме того, не исключено, что смежные проводники будут находиться под высоким потенциалом, поэтому зазоры между ними должны выдерживать максимальное возможное напряжение между такими проводниками.

ГОСТ 23751-86 устанавливает допустимую токовую нагрузку на элементы проводящего рисунка, выполненные из медной фольги. Это значение лежит в интервале 100...250 А/мм<sup>2</sup>. Обычно нижний предел принимается для внутренних проводников многослойных печатных плат, а верхний - для наружных слоев. Считается, что теплообмен проводников на наружных слоях лучше, и они способны пропускать большие токовые нагрузки без опасного перегрева.

Конкретные размеры печатных проводников в зависимости от токовой нагрузки.

В слаботочной и низковольтной аппаратуре (а это большинство устройств, построенных с применением цифровых и аналоговых микросхем) ширина печатных проводников и зазоры выбираются минимальными для принятого класса точности, которые приведены в табл. 1.8.

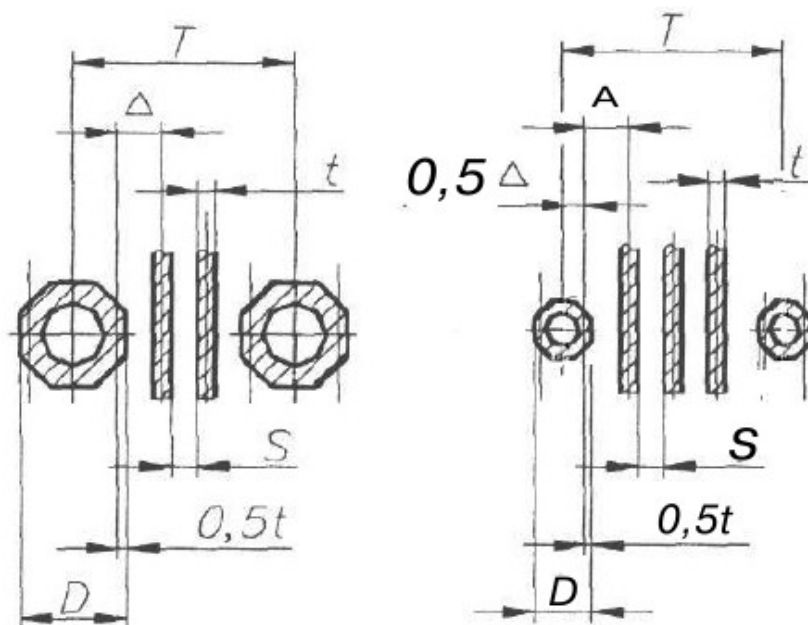
Таблица 1.8— Ширина печатных проводников и зазоры между ними

Класс точности	Ширина проводника, мм			Минимальный зазор, мм
	номинальное значение	минимальное значение		
		без порывтия	с покрытием	
1	0,75	0,6	0,55	0,75
2	0,45	0,35	0,35	0,45
3	0,25	0,2	0,15	0,25
4	0,15	0,12	0,1	0,15
5	0,1	0,07	0,07	0,1

Размеры (ширина) печатных проводников, зазоры между ними и величина допусков на такие элементы влияют на шаг трассировки. Формально на печатной плате возможен любой шаг трассировки, но чтобы получить максимальную трассировочную способность, необходимо этот шаг согласовать с шагом металлизированных отверстий. На рис. 1.7 изображен фрагмент печатной платы с нанесенной сеткой трассировки (с координатной сеткой), на котором видно, что почти все параметры проводников, зазоров и контактных площадок связаны между собой и с шагом металлизированных отверстий.

Обычно шаг трассировки выбирается кратным шагу отверстий. Точнее, шаг между отверстиями должен быть равен целому числу шагов трассировки проводников. Именно поэтому на печатной плате

иметь группы отверстий с различными шагами нежелательно, но в настоящее время одновременное использование элементов с разными шагами стало правилом, а не исключением. Чаще всего на одной плате одновременно komponуются элементы с метрическим и дюймовым шагами выводов. В подобной ситуации можно ориентироваться на шаг большинства элементов. В затруднительных случаях лучше взять за основу шаг отверстий у элементов, размещаемых в центральной части печатной платы. Именно в этой области платы необходимо обеспечить наибольшую трассировочную способность, поскольку трассировка там самая плотная.



$$T = D \cdot \pi$$

$$A = t + S$$

$$D = \Delta (n - 2) - 3t$$

$$D = Ak + t$$

Рис. 1.7— Фрагмент печатной платы с сеткой трассировки

В метрической системе наиболее распространенным является шаг выводов 2,5 мм (имеются в виду штыревые выводы). Согласно ГОСТ 29137-91, это основной шаг при формовке выводов навесных элементов. Для шага металлизированных отверстий, равного 2,5 мм, можно принять шаг трассировки 2,5; 1,25; 0,625; 0,5 и 0,3125, а для дюймового шага (2,54 мм) – 2,54; 1,27; 0,635 и 0,3175. В табл. 1.9 приведены минимальные расчетные (теоретические) значения шагов трассировки и соответствующие им рекомендуемые шаги трассировки, в которых учитывается кратность шага металлизированных отверстий.

Таблица 1.9— Рекомендуемые шаги координатной сетки

Класс точности	1	2	3	4	5
Проводники без покрытия	0,75±0,15	0,45±0,1	0,25±0,05	0,15±0,03	0,1-0,03
Проводники с покрытием	0,75 +0,25/-0,2	0,45 +0,15/-0,1	0,25±0,1	0,15±0,05	0,1±0,03
Минимальный зазор	0,75	0,45	0,25	0,15±0,03	0,1-0,03
Расчетный шаг трассировки	1,65	1	0,55	0,35	0,23
Рекомендуемый шаг трассировки	2,5 2,54	1,25 1,27	0,625 0,635	0,5	0,3125 0,31175

### 1.9. Контактные площадки отверстий

Контактные площадки ПП подразделяются на два самостоятельных вида:

- контактные площадки металлизированных и не металлизированных монтажных и переходных отверстий;
- контактные площадки для установки элементов на поверхность (плоские контактные

площадки).

В контактных площадках не металлизированных отверстий важно обеспечить механическую прочность крепления элементов, поскольку нагрузка воспринимается этими площадками, и механическая прочность крепления зависит от прочности сцепления металлической фольги площадки с диэлектриком подложки. Поэтому при конструировании устройств на однослойных ПП необходимо предусматривать мероприятия по снижению нагрузки на контактные площадки и увеличивать прочность сцепления КП с подложкой. В частности, это достигается увеличением размеров контактных площадок. Рекомендуется контактные площадки для не металлизированных отверстий выполнять площадью (без площади отверстия) не менее 1,6 мм<sup>2</sup> для плат 3-го класса точности.

В случае двухслойных ПП, где пайка выводов элементов производится в металлизированные отверстия (припой заполняет все отверстие и еще образует выступающие мениски), вопрос прочности крепления элементов менее актуален. Поэтому такие платы могут иметь контактные площадки минимального размера.

У металлизированных отверстий площадки должны быть с двух сторон печатной платы. Для ПП 3-5-го классов точности для переходных отверстий (по согласованию с изготовителем) допускается на внутренних слоях площадки не делать.

Контактные площадки металлизированных отверстий в большинстве случаев выполняются круглой формы, но они могут иметь и другую форму (восьмигранные, квадратные и др.). Это делается из технологических соображений (увеличение площади площадки) или для обозначения первого вывода элемента. В некоторых случаях контактные площадки удлиняют в сторону подходящего проводника. Такие площадки, неофициально называемые «слезками», преимущественно используются для переходных отверстий, где нужна контактная площадка с минимальным диаметром.

Площадки, к которым подключаются широкие проводники, или расположенные в сплошном либо сетчатом экране, часто выполняются с тепловым барьером. Обычно это типовая контактная площадка металлизированного отверстия, от которой отходит несколько коротких узких проводников (перемычек), подключенных к широкому проводнику или экранному полю. На рис. 1.8 показаны варианты таких площадок.

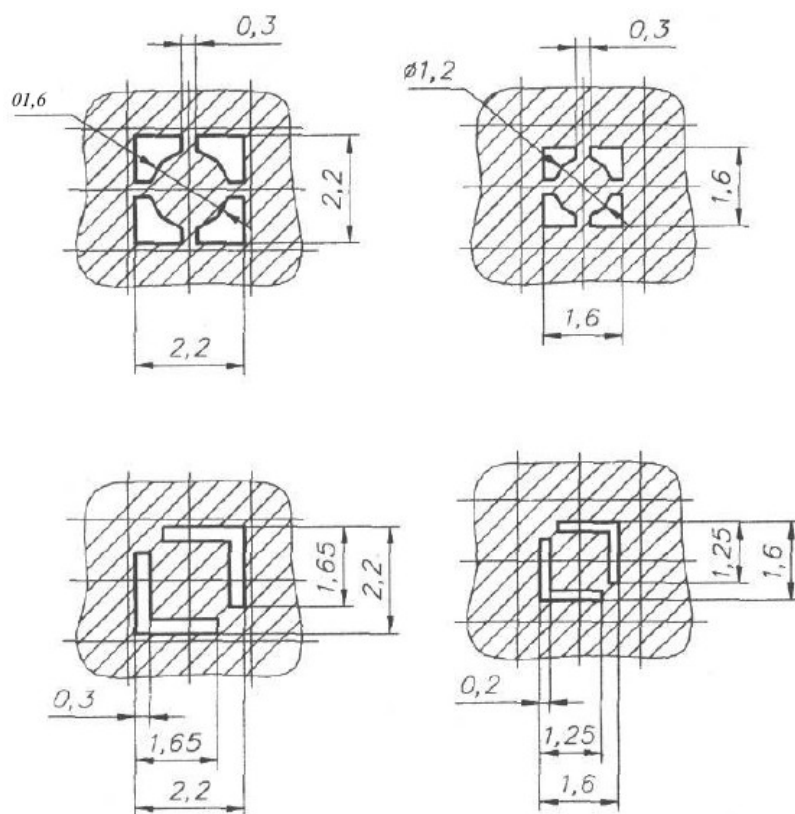


Рис. 1.8— Площадки для широких проводников

#### 1.10. Плоские контактные площадки

Под плоскими подразумеваются контактные площадки без монтажных отверстий. Такие площадки, исходя из их главного назначения, часто называют контактными площадками для

поверхностного монтажа (сокращенно КППМ, или - еще короче - КПМ). Контактные площадки служат преимущественно для монтажа элементов на поверхность, но они также исполняют роль контактных элементов в соединителях непосредственного сочленения. На КПМ монтируются микросхемы с пленарными или иной формы выводами, не требующими для монтажа металлизированных отверстий, и различные безвыводные компоненты поверхностного монтажа - так называемые чип-элементы.

Фактически КПМ - это те же проводники, только иной формы и размеров, так что на них распространяются все нормы, требования и ограничения, относящиеся к печатным проводникам и зазорам. Размеры КПМ зависят от конструктивных размеров монтируемых на них элементов (от размеров выводов элементов) и от некоторых технологических норм, связанных с пайкой. Другими словами, эти размеры непосредственно связаны с технологией поверхностного монтажа.

### **1.11. Экранные слои**

Экранные слои, как правило, вводятся в состав многослойных печатных плат, в которых они выполняют сразу несколько функций. В простейшем случае один или несколько слоев выступают в качестве земляного слоя, к которому подключаются соответствующие выводы элементов. В других случаях в плате делается два (и более) экранных слоя, которые играют роль слоев «земля» и «питание», причем различные слои питания могут нести различные напряжения.

Иногда слой питания разделяется на части, то есть имеет вид широких параллельных шин, каждая из которых подключена к отдельному источнику питания.

Другая важная функция экранного слоя - электромагнитная защита различных цепей. При этом экранирующие свойства слоев «земли» и «питания», как правило, равноценны.

И еще одно специфическое использование экранных слоев - построение печатных плат с полосковыми линиями связи. В данном случае при строгом обеспечении геометрических размеров всех элементов такой платы функциональный проводник, проложенный параллельно экранному слою, обладает некоторым характеристическим (волновым) сопротивлением. Подобные линии связи являются аналогами коаксиальных кабелей и поэтому могут работать в устройствах повышенного быстродействия.

В двухслойных печатных платах нет возможности создать полноценные слои Земли и Питания. Но на этих платах нередко все свободное пространство на одном или обоих слоях заполняется сплошным экраном, заменяющим земляное поле. Экраны могут иметь произвольную форму и выполнять функцию проводников для трассировки функциональных цепей.

Если к экранному слою не предъявляются специальные требования, то его можно построить из печатных проводников, по ширине оптимально проходящих в зазоре между двумя металлизированными отверстиями. Например, при проектировании печатных плат 4-го класса точности можно принять ширину проводников для построения экранного слоя равной 0,8 мм, если шаг сетки составляет 1,25 мм.

### **1.12. Гальванические покрытия**

Гальванические покрытия металлизированных поверхностей ПП служат для разных целей. Это может быть чисто технологическое покрытие, являющееся маской при травлении медной фольги. В таком случае на всех металлизированных поверхностях делается одинаковое покрытие, указанное в конструкторской документации, например, из сплава олова и висмута. Наличие такого покрытия на процессе проектирования ПП не отражается. Но сам факт нанесения покрытия абсолютно на все металлизированные поверхности является признаком отсталой технологии. С экономической точки зрения неразумно гальванически покрывать проводники (и другие элементы проводящего рисунка), по условиям монтажа и эксплуатации в этом не нуждающиеся. Рациональнее покрывать локально только места пайки и контактные площадки, предназначенные для холодного контакта.

Нередко для ПП используется гальваническое покрытие одновременно двумя металлами, в результате чего образуются соответствующие сплавы. Наибольшее распространение получили покрытия на основе олова и свинца например О-С(66)12 опл. Кроме того, применяется покрытие сплавами олова и висмута или никеля, например О-Ви(99,8)9 или НЗ.О-Ви(99,8)6 а также никелевое покрытие НЗ или Н5.

Выбор варианта гальванического покрытия связан с производством. Назначая в документации какой-либо вид покрытия, конструктор тем самым предопределяет технологию печатной платы.

Кроме контактных площадок, предназначенных для пайки, на ПП могут находиться площадки (поверхности), обеспечивающие холодный контакт. В первую очередь это относится к соединителям непосредственного контакта (например, СНП 15-96). По такому же принципу построены некоторые соединители, служащие в компьютерах для подключения плат расширения (слотов), модулей памяти и т.д. Во всех этих случаях печатная плата, а точнее контактные площадки, размещенные по краю печатной платы, выполняют функцию вилки соединителя. Требования к таким площадкам: стабильное низкое переходное сопротивление и высокая износостойчивость. В качестве покрытий для этих

контактных площадок используется многослойное покрытие, верхний слой которого – золото или палладий, например  $\text{Ni}_3\text{ZnO}_{2,25-3,00}$  или  $\text{Cr}_3\text{Pd}_{0,25-1,00}$ . Кроме того, иногда используется химическое золочение – Хим. Зл-0,2.

Серебро для покрытия печатных плат употребляется редко, поскольку этот металл на воздухе образует сульфиды, значительно снижающие со временем переходное сопротивление. К тому же серебро в условиях повышенной влажности имеет склонность к «миграции». Это неуправляемый процесс роста кристаллов металла (дендритов) на поверхности и внутри диэлектрика под действием электрического потенциала. В результате постепенно уменьшается переходное сопротивление и возникает опасность замыкания близко расположенных проводников. Американские и японские стандарты вообще не предусматривают применение серебра в печатных платах. В отечественных разработках серебро какое-то время использовалось достаточно широко. В настоящее время оно применяется в основном вместо золочения для покрытия ламелей соединителей непосредственного сочленения, что диктуется экономическими соображениями.

Толщина покрытий благородными металлами составляет от 0,5 до 2 мкм. Такие покрытия, нанесенные локально, незначительно увеличивают стоимость печатной платы, но обеспечивают на должном уровне качество и надежность холодного контакта.

На практике драгоценным металлом целесообразно покрывать поверхности, соответствующие по размерам контактным площадкам более высокого класса точности. Так, если диаметр отверстия равен 1,0 мм, а диаметр его контактной площадки — 1,6 мм, то площадь гальванического покрытия может составлять в диаметре 1,3 мм.

В новейших технологиях в качестве маскирующего слоя для локального покрытия используется защитный слой, который формируется на печатной плате. Здесь площадь металлизации определяется размерами окон в защитной маске.

### **1.13. Защитные покрытия**

В большинстве случаев печатные платы со смонтированными на них элементами остаются весьма уязвимыми по отношению к окружающей среде (имеется в виду пыль, грязь, влага, микрофлора и многое другое). Кроме того, печатные проводники на наружных слоях оказываются просто без электрической изоляции, что может стать причиной всяческих отказов в работе аппаратуры. Все эти проблемы решаются при помощи защитного изоляционного покрытия. В простейшем случае плата после монтажа всех элементов и промывки целиком покрывается лаком (одним или несколькими слоями). Лак наносится методами окунания, полива или распыления, и под ним оказываются не только все проводники, но и элементы, что не всегда желательно. Некоторые элементы просто не допускают лакировки, например соединители, различные лепестки, контакты и ряд микросхем.

При окунании лак попадает во все щели и зазоры, в которых он после полимеризации образует сгустки, причиняющие (из-за усадок) механические повреждения, так что необходимо в процессе конструирования предусматривать зазоры, обеспечивающие удаление остатков жидкого лака (в производстве для этого применяется центрифугирование). При любых способах лакировки лак проникает по капиллярам во внутренние полости соединителей и выводит их из строя. Из-за сложностей технологического порядка от лакировки отказываются и защищают печатные платы защитными масками.

В отличие от лакировки, защитная маска не обеспечивает полной защиты всей платы, но снижение общей стоимости производства является главным аргументом в пользу последнего варианта, тем более, что при использовании защитной маски решается ряд других задач.

Одним из эффективных приемов групповой пайки считается пайка волной, при которой монтажная сторона платы с предварительно установленными всеми элементами пропускается над волной расплавленного припоя. Волна омывает печатные проводники и выводы элементов, при этом выполняется групповая пайка всех элементов, причем припой покрывает все остальные открытые металлические поверхности на плате, а не только места пайки.

Этот процесс, при всей его простоте, не обеспечивает стабильного качества пайки на платах с минимальными зазорами между элементами проводящего рисунка. Всегда существует опасность образования перемычек в узких зазорах, поэтому пайка волной (без применения защитных масок) допустима только на платах 1-го и 2-го классов точности. К тому же тратить огромное количество припоя на покрытие проводников, для которых это совершенно излишне, – большое расточительство.

Защитная маска на поверхности ПП оставляет окна только в местах пайки. Она защищает поверхность ПП от грязи и случайных замыканий, а также является технологической маской при нанесении гальванического покрытия.

Для металлизированных отверстий в маске имеются окна в форме контактных площадок. Если плата выполняется по высокому классу точности (5-му или 4-му), то маску делают больше контактной площадки на 0,1 мм на сторону. В платах, класс точности которых ниже, контактные площадки

больше, и размеры окон в маске выполняются по размерам контактных площадок.

Защитная маска для элементов, монтируемых на поверхность, должна быть в любом случае больше контактной площадки: для рассыпных элементов - на 0,1 мм на сторону, а для микросхем с шагом 0,625 мм и менее - всего на 0,05 мм. В принципе допустимо, чтобы плотные группы контактных площадок имели общую маску, точнее, единое окно для группы плоских контактных площадок, но по возможности этого следует избегать, поскольку наличие даже узкой полоски защитной маски между смежными контактными площадками при пайке снижает вероятность их замыкания. Если пайка производится волной припоя, то такое объединение вообще недопустимо. Подробнее технология поверхностного монтажа описана ниже.

При проектировании защитной маски следует предусматривать в ней освобождения (окна) везде, где имеются какие бы то ни было отверстия с диаметром более 0,6 мм. Это делается для того, чтобы пленка маски «не повисала» в пустоте над отверстием.

В качестве материала защитных масок используются различные диэлектрические покрытия на основе эпоксидных смол, сухого пленочного резиста (СПФ-защита), холодные эмали, оксидные пленки и др. Для изготовления защитных покрытий применяются материалы фирм DuPont (Франция), MacDerm (Великобритания) и др.

#### **1.14. Маркировка**

Маркировка, наносимая на ПП, является таким же элементом конструкции, как и все то, что входит в проект. Назначение и техника исполнения (технология) маркировки зависит от многих факторов, диктуемых каждым конкретным случаем. Параметры маркировки должны удовлетворять требованиям ГОСТ 2.314-68, они указываются в конструкторской документации и входят в состав технологического проекта в виде данных на машинных носителях (магнитный носитель, дискета).

По назначению маркировка может быть основной и дополнительной (вспомогательной); первая наносится на печатную плату в обязательном порядке.

Основная маркировка содержит обозначение ПП или ее условный шифр, дату изготовления и порядковый номер версии фотошаблона (проекта). К основной маркировке можно отнести некоторые знаки и символы, изготавливаемые на фотошаблоне за пределами контура платы (на технологических полях), причем эти маркировки выполняются на каждом слое и чаще всего вводятся в проект производителем печатных плат.

Дополнительная маркировка включает в себя порядковый или заводской номер платы (или партии), позиционные обозначения элементов, графические изображения мест установки (монтажа) элементов, нумерацию или условное обозначение первых выводов, знаки «плюс» для полярных элементов и другую информацию - по усмотрению разработчика.

Вся маркировка или ее часть может быть реализована по технологии печатных проводников (чаще всего травлением).

С помощью травления часто ставят знаки «плюс» для полярных элементов и обозначения первых выводов на элементах, допускающих маркировку, выполняемых любым способом, необходимо выбирать шрифт, близкий по начертанию к стандартному (ГОСТ 26.020-80). На практике это может быть один из шрифтов, установленных при начальной конфигурации программы (в шаблоне) в диалоговом окне **Text Style** (стиль текста), например Kudriasov, Peterburg или Times New Roman.

Размер (высота) шрифта задается конструктором и зависит от технологии маркировки. Высота надписей, их неоднозначную установку при монтаже.

Для любых маркировок которые получают травлением, должна быть не менее 2,5 мм, иначе шрифт нельзя будет прочесть.

Пример маркировки элементов на ПП показан на рис. 1.9.



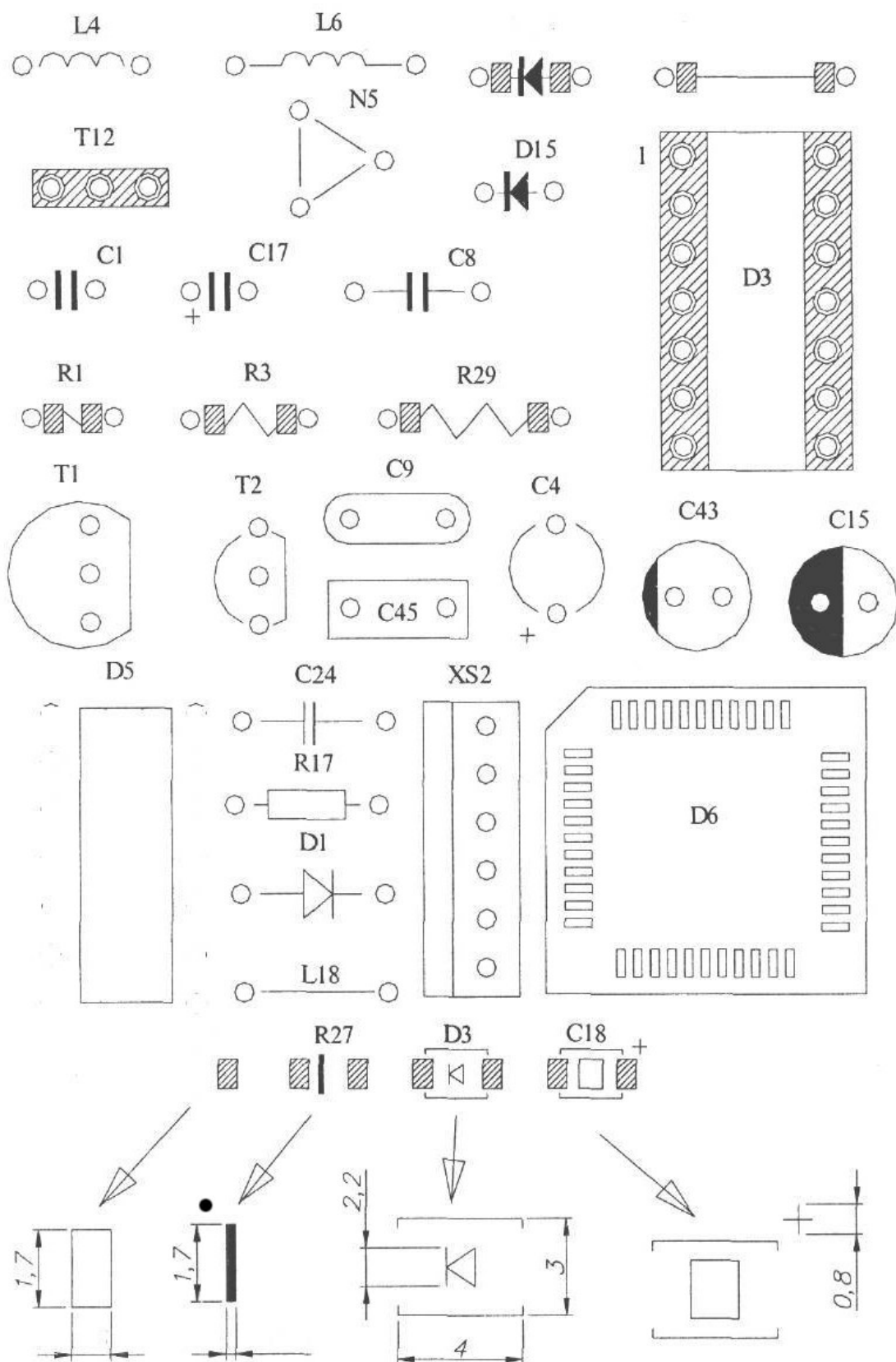


Рис. 1.9— Пример маркировки элементов на ПП

### 1.15. Установка элементов

Исторически получилось, что длительное время многие радиокомпоненты разрабатывались без

учета специфики монтажа их на печатные платы, и уж тем более, без учета требований автоматизированного монтажа. Поэтому большинство, используемых в настоящее время компонентов, требуют обязательной технологической подготовки их перед монтажом и, при этом, нередко они допускают только ручной монтаж. На практике для таких элементов приходится разрабатывать способы их монтажа на печатные платы, или, в лучшем случае, можно сослаться на нормативные документы, в частности на ГОСТ 4.010.030-81 и ГОСТ 29137—91.

При разработке варианта монтажа элементов на ПП конструктор должен комплексно учитывать ряд специфических требований:

- расстояние от корпуса элемента до места гибки вывода;
- расстояние до места пайки;
- допустимое время нагрева до температуры расплавленного припоя;
- ограничения по промывке и лакировке;
- необходимость дополнительного крепления.

Перечисленные параметры задаются в технических условиях на элементы. Когда они не оговорены, конструктор может руководствоваться требованиями ГОСТ 29137—91, в которых указано минимальное расстояние до места гибки.

Согласно ГОСТ 29137—91:

- для микросхем и полупроводниковых приборов (транзисторы, диоды и т. д.) - это расстояние от корпуса до центра изгиба вывода (размер А на рис. 1.10).
- для остальных элементов — это расстояние от корпуса элемента до оси вывода изогнутого под углом  $90^\circ$  (размер В на рис. 1.10).

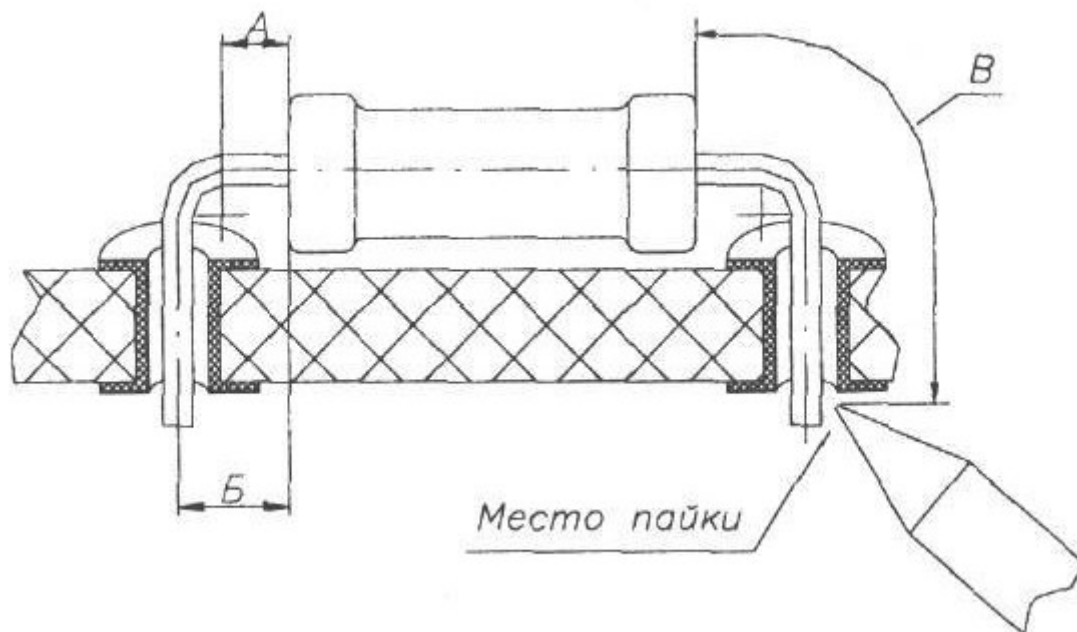


Рис. 1.10— Монтаж резистора

Согласно ГОСТ 29137-91 расстояние до места гибки для всех элементов определяется как расстояние от корпуса до центра окружности изгиба вывода (см. размер А на рис. 1.10).

ГОСТ 29137-91 оговаривает минимальное расстояние до места гибки, если оно не оговорено в ТУ на элемент:

- для резисторов и конденсаторов 0,5 мм;
- для микросхем и аналогичных приборов 1,0 мм;
- для полупроводниковых приборов 2,0 мм;
- для дросселей 3,5 мм.

За радиус гибки принимается внутренний радиус изгиба (радиус оправки, на которой изгибается вывод). Если в технических условиях этот размер не оговорен, то ГОСТ 29137-91 рекомендует для выводов с диаметром (толщиной) до 0,5 мм принимать радиус равным R0,5 мм, для выводов более 0,5 и до 1,1 мм принимать радиус гибки R1,0 мм.

Из условий унификации технологического оборудования, для выводов любого размера, следует назначать один из указанных выше значений (R0,5 или R1,0).

### 1.16. Установка элементов со штыревыми выводами

Элементы со штыревыми (радиальными) выводами, благодаря тому, что их выводы расположены под корпусом, допускают компоновку их на ПП с минимальными конструктивными зазорами (0,5... 1,0 мм), что обеспечивает высокую объемную плотность монтажа. Но с точки зрения технологии установки элементов (монтажа на печатные платы), эти элементы более трудоемкие при монтаже, чем элементы с осевыми выводами. Монтаж их трудно автоматизируется, если это вообще удастся сделать. Среди компонентов со штыревыми выводами имеется такие, конструкция которых разработана с учетом требований монтажа на печатные платы. (например, конденсаторы К10-17иК10-23).

Но имеются и другие, например, конденсаторы К50-6 и им подобные, которые внешне, вроде предназначены для печатного монтажа, но на практике, без специальных мер, оказываются совершенно непригодными для этого. Дело в том, что при установке таких элементов вплотную к печатной плате, из-за отсутствия зазора между элементом и платой, возникают проблемы с пайкой и промывкой платы после монтажа (см. вариант А на рис. 1.11).

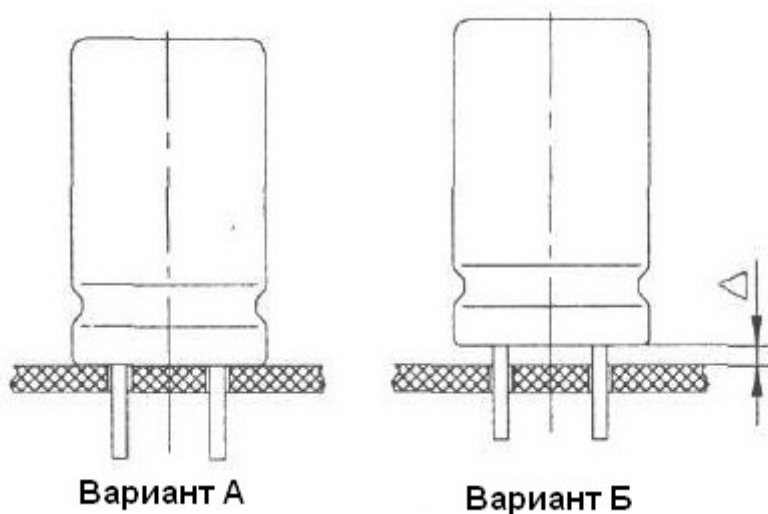


Рис. 1.11—Варианты установки конденсатора

В частности замкнутый объем под такими элементами создает при пайке избыточное давление горячих паров, которые выдавливают из отверстия расплавленный припой. В результате качество пайки резко ухудшается, и это может стать причиной отказов аппаратуры, а о качественной промывке в данном случае вообще говорить не приходится.

Вариант А имеет еще один существенный недостаток. В этом варианте обычно не выдерживается допустимое расстояние от места пайки до корпуса. Чтобы решить все проблемы, необходимо подобные элементы устанавливать с зазором (см. вариант Б на рис. 1.11). Но этот вариант с технологической точки зрения оказывается очень трудоемким, так, как выдержать требуемый зазор между элементом и платой сложно, а иногда, при плотном монтаже и невозможно. Если элемент все же установить с зазором, то он оказывается очень неустойчивым и наклоняется при самом незначительном внешнем усилии. Серьезных механических испытаний такой элемент не выдерживает. Выход из положения, - применение различных по конструкции подставок и прокладок, но это усложняет монтаж и удорожает изделие в целом. Никакой автоматизации установка этих элементов с подставками не поддается. Кстати, без подставок, - то же.

Все сказанное следует учитывать при выборе элементной базы и закладываемых в конструкцию вариантов монтажа.

Выбирая элементы и способ их компоновки, следует отчетливо представлять, как эти элементы будут зафиксированы (закреплены) пред пайкой. Многие элементы, монтируемые в отверстия, при ручном монтаже фиксируются отгибкой выводов, что исключает выпадение (или смещение) элементов, пока они не будут припаяны.

Одним из эффективных приемов временного закрепления элементов, как с осевыми, так и со штыревыми выводами является формовка выводов в форме зига. Это наиболее простой и дешевый способ обеспечить установку элементов с зазором над платой и временно закрепить их до пайки. Причем, некоторые отечественные (конденсатор К10-176) и многие зарубежные производители компонентов поставляют элементы с заранее отформованными соответствующим образом выводами

(рис. 1.12).

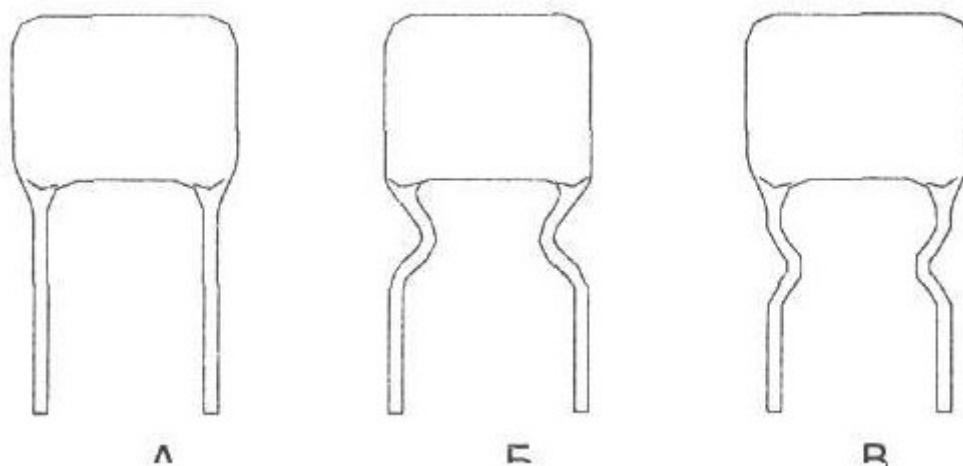


Рис. 1.12— Формировка выводов для обеспечения зазора между компонентом и платой. А - выводы без формовки; Б - выводы отформованы при изготовлении (в состоянии поставки); В - выводы отформованы потребителем

### 1.17. Установка микросхем

Способы установки интегральных микросхем диктуются конструкцией корпуса, точнее, формой и расположением выводов.

Отечественные и некоторые импортные микросхемы с планарными выводами поставляются с неформованными выводами, поэтому разработчику аппаратуры и конструктору приходится разрабатывать варианты формовки и установки этих микросхем.

В последнее время импортные микросхемы с планарными выводами поставляются с отформованными выводами, например, с формовкой типа L или J. В этом случае конструктору следует только правильно разработать посадочное место или воспользоваться рекомендациями разработчика корпуса микросхемы. Подробнее об установке данных микросхем будет рассказано далее.

Другая группа корпусов микросхем имеет выводы в виде штырей, размещенных на дне корпуса (обычно керамического). Примерами таких микросхем могут служить - процессоры, Pentium и аналогичные. Эти микросхемы могут запаиваться в печатные платы, при этом посадочное место на ПП повторяет расположение выводов в корпусе. Но, кроме этого, такие микросхемы допускают установку их через переходные платы (переходные или монтажные колодки), что позволяет без проблем производить их замену, в то время как эти же микросхемы, запаянные в ПП, при ремонте или настройке заменяются с большими трудностями. Обычно переходная плата распаивается на штатное посадочное место микросхемы. Таким образом, ПП без доработок и изменений позволяет использовать оба варианта установки данной микросхемы, но при конструировании таких плат следует учитывать, что переходные платы могут иметь размеры, несколько большие, чем монтажные размеры микросхемы.

Многие фирмы поставляют одни и те же микросхемы в различных корпусах по выбору заказчика, который может (и должен) взвесить все положительные и отрицательные стороны каждого корпуса, в основном связанные с технологией монтажа. Прежде чем решиться выбрать тот или иной корпус микросхемы, следует уточнить технологические возможности предприятия, на котором будет производиться сборка разрабатываемого устройства. В первую очередь это связано с технологией пайки (волна, пайка в печи, ручная и т.д.). При выборе типа корпуса микросхемы следует учитывать и условия эксплуатации устройства. В частности, не следует забывать о прогибе ПП, который возникает при короблении платы, а так же при различных механических нагрузках (вибрации, линейное ускорение, удары), которые так же приводят к прогибу печатной платы. Во всех случаях, независимо от причины прогиба, микросхемы со штыревыми и шариковыми выводами могут выйти из строя.

Для микросхем низкой и средней степени интеграции широко применяются пластмассовые корпуса типа DIP (Double Inline Packaging). Эти микросхемы монтируются в сквозные металлизированные отверстия. Разработка посадочных мест для таких микросхем обычно не вызывает трудностей. Необходимо только правильно назначить диаметр металлизированного отверстия.

### **1.18. Поверхностный монтаж**

Специалисты по радиоэлектронике считают, что дальнейшее развитие техники печатного монтажа связано с широким внедрением поверхностного монтажа.

В настоящее время выпускается обширная элементная база, отработаны технологии, изготавливается и поставляется необходимое оборудование. Все это в целом позволяет широко использовать данную технологию, достигая высокой плотности монтажа, при сохранении низкой стоимости. Но, приступая к разработке аппаратуры с использованием элементов поверхностного монтажа, не следует забывать и о присущих этому методу недостатках. Один из таких недостатков, связан с разными температурными коэффициентами расширения компонентов и печатной платы, которая выполняется на традиционном стеклотекстолите. Различие этих коэффициентов приводит к разнице в линейном расширении элемента и ПП, а это становится причиной внутренних напряжений и, как следствие, к микроразрывам печатных проводников, и отказу аппаратуры.

С развитием радиоэлектронной техники температурное расширение не исчезло (и даже не изменилось), но применение новых материалов заметно снизило чувствительность ПП к перепадам температур (термоудару). И все же, не следует забывать об этой проблеме и о возможных последствиях.

Отличительная особенность технологии монтажа на поверхность, - использование безвыводных элементов (элементы без традиционных проволочных или ленточных выводов). Выводы у этих элементов заменены металлизированными поверхностями. В тех случаях, где выводы у элементов присутствуют, они формируются так, что эти элементы допускают монтаж на поверхность.

Размеры элементов, монтируемых на поверхность на один, два порядка меньше соответствующих аналогов в традиционном исполнении. Из этого вытекает вторая особенность процесса поверхностного монтажа - отказ от ручных методов монтажа и ориентация на автоматизированные и полуавтоматизированные способы установки элементов и использование групповых методов пайки. Ручные приемы пайки для большинства этих элементов либо вообще недоступны, например, для микросхем с шариковыми выводами, либо крайне трудоемки. Практически, ручные приемы монтажа элементов на поверхность возможны только в ограниченных объемах, в основном для проведения макетных и ремонтных работ.

При проектировании печатных плат, пайка которых будет производиться групповым методом, следует учитывать особенности выбранного метода пайки. Поэтому, еще на ранних стадиях конструкторской работы необходимо четко представлять, как будет собираться (и паяться) данное устройство, и это учитывать в проекте.

Методы пайки условно можно разделить на два направления: пайка волной и пайка в печи. Каждое из этих направлений имеет свои достоинства и недостатки, но главное, как говорилось, способ пайки влияет на конструктивные параметры печатной платы.

Если ориентироваться на пайку в печи, то следует использовать компоненты способные выдерживать кратковременный нагрев до температуры 280 °С в течение 30 с. Кроме этого, в месте пайки должно находиться строго дозированное количество припоя, что обеспечивается разными технологическими приемами, некоторые из которых основаны на использовании паяльной пасты. Эта паста наносится на требуемое место с помощью специальных установок, или более простым способом, при помощи паяльной маски (трафарета).

Пайка в печи, при использовании строго дозированного количества припоя требует принятия особых конструктивных мер при разработке контактных площадок. В частности, контактные площадки для этих элементов нельзя совмещать с переходными отверстиями, и более того, переходное отверстие, соединяемое с данной контактной площадкой, должно соединяться тонким печатным проводником длиной не менее 0,5 мм (рис. 1.13).

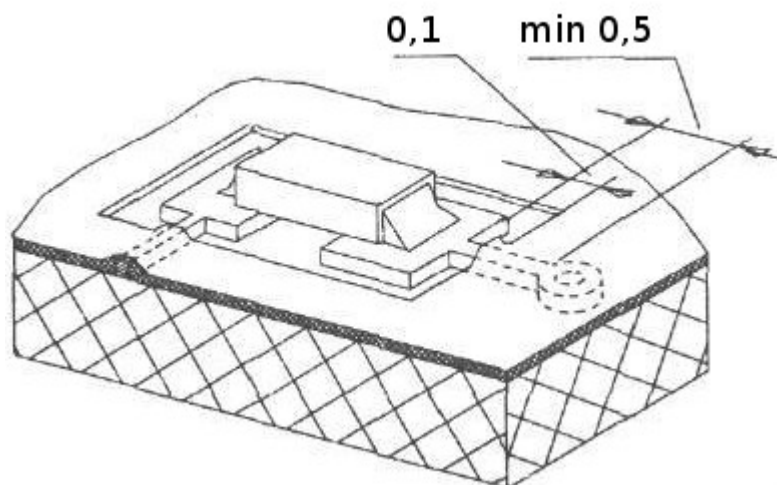


Рис. 1.13— Отделение отверстий от планарных КП паяльной маской

Если же к контактной площадке должен подходить широкий проводник (шина или экранирующий слой), то непосредственно перед контактной площадкой он должен быть сужен до размера минимального по ширине проводника (рис. 1.14).

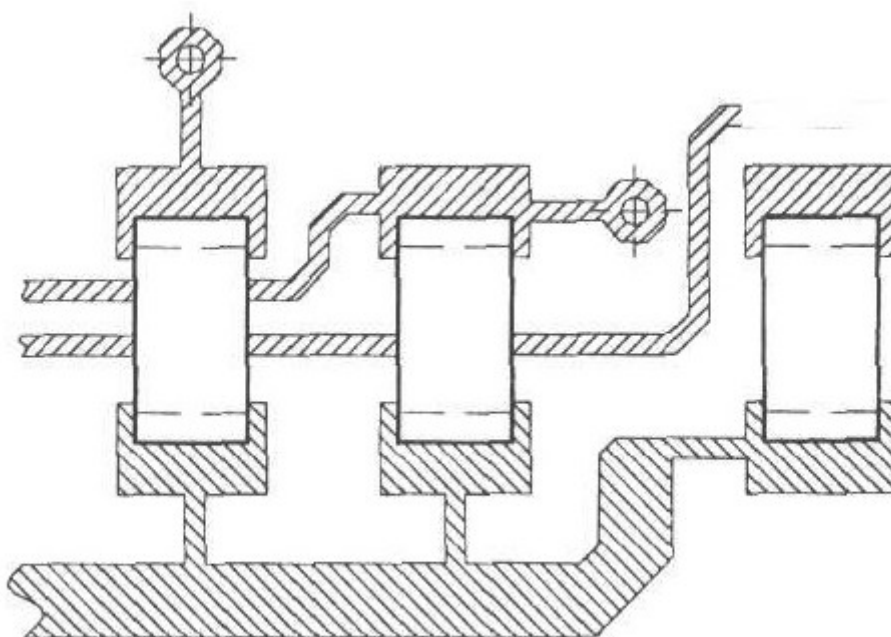


Рис. 1.14— Сужение проводника при подведении его к КП

Эти требования связаны с особенностями пайки, которая осуществляется в автоматическом режиме за очень короткий промежуток времени (не более 30 с), поэтому должны быть предусмотрены все меры, чтобы исключить отток тепла непосредственно от контактной площадки. Кроме этого, пайка осуществляется с использованием строго дозированного количества припоя (паяльной пасты), поэтому нельзя допустить растекания припоя из зоны пайки, именно для этого переходные отверстия должны быть отделены от контактных площадок и обязательно скрыты паяльной маской, как это показано на рис. 1.13.

Кроме этого, пайка волной микросхем с планарными выводами при шаге 0,65 мм и менее, может привести к образованию паразитных перемычек между соседними выводами. Поэтому, для элементов с таким шагом выводов целесообразно применять другие методы пайки. А если отказаться от пайки волной не представляется возможным, то в конструкции печатной платы необходимо

расположить микросхему так, чтобы ряды выводов в установке пайки волной были направлены вдоль направления движения платы. Кроме этого необходимо предусмотреть в конце ряда контактных площадок специальные увеличенные контактные площадки - ловушки для припоя (рис. 1.15).

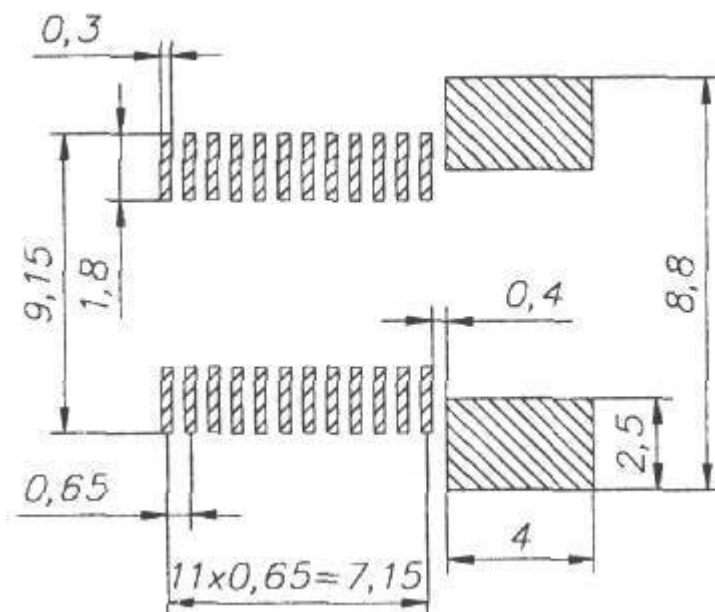


Рис. 1.15— Посадочное место для микросхемы с ловушками для припоя

Любые групповые методы пайки проводятся за очень короткое время, в течение которого, припой должен расплавиться и успеть смочить поверхности пайки. Чтобы обеспечить качество и надежность паяного соединения необходимо принимать особые меры по сохранению (обеспечению) паяемости печатной платы и компонентов. Это связано с тем, что некоторые традиционно используемые для контактных площадок гальванические покрытия на основе олова, свинца и висмута теряют даже при непродолжительном хранении во влажной среде способность к смачиванию припоем. Вызвано это образованием так называемых интерметаллических соединений. Борьба с этим злом - сложно и малоэффективно, поэтому, чтобы избежать этих трудностей производители предпочитают отправлять на монтаж печатные платы, не допуская их длительного хранения, но это - не лучшее решение проблемы. Для обеспечения стабильной пайки, целесообразно применять химически нейтральное покрытие золотом. (Хим. Зл.05). Тонкий слой золота обеспечивает надежную пайку, а за счет того, что покрываются только контактные площадки и слой золота очень тонкий, то количество (расход) драгоценного металла - невелик и суммарная стоимость изделия увеличивается незначительно. Но, главное, дополнительные затраты на покрытие золотом окупаются повышением качества и надежностью изделий. Напомним, что выводы микросхем всегда имели (и имеют) золотое покрытие.

### 1.19. Монтаж микросхем на поверхность

Габариты контактных площадок микросхем с планарными выводами определяются размерами отформованной части вывода, которая непосредственно ложится на контактную площадку. Для многих отечественных микросхем размеры контактных площадок и посадочных мест под эти микросхемы, а так же формовка выводов приведены в ГОСТ 29137-91. При невозможности сослаться на один из указанных стандартов, формовка выводов должна быть показана в сборочном чертеже устройства. Основное внимание при этом должно быть уделено определению ширины контактной площадки и зазора между смежными КП, которые всецело зависят от шага выводов и их ширины. При определении ширины КП необходимо учитывать не только номинальные значения ширины вывода и самой контактной площадки, но и различные конструктивные и технологические допуски. Все эти требования очень противоречивы, и поэтому решение чаще всего сводится к поиску компромисса.

Для микросхем с шагом выводов не менее 0,625 мм можно руководствоваться несложными правилами. Контактная площадка должна быть шире, чем ширина вывода на 0,2 мм, а длина, - на 0,3...0,4 мм больше, чем место прилегания вывода к контактной площадке. Но при назначении ширины контактной площадки обязательно следует учесть соответствующий допуск и проверить, не

будет ли зазор между смежными площадками меньше допустимого зазора между элементами проводящего рисунка. Для микросхем с шагом выводов 0,625 мм и менее этот зазор является определяющим. Чтобы обеспечить минимальный зазор, ширину контактной площадки можно уменьшить, даже сделать меньше ширины вывода. В этом случае, при монтаже, вывод микросхемы может незначительно выходить за пределы КП (рис. 1.16).

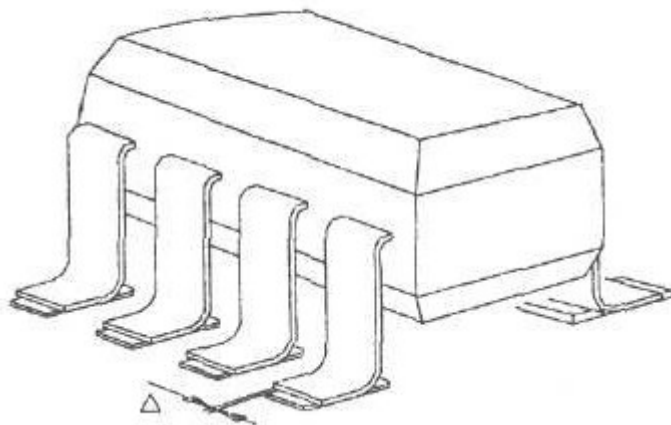


Рис. 1.16— Установка микросхемы на посадочное место

Импортные микросхемы часто поставляются с отформованными выводами, поэтому размеры контактных площадок не выбираются, а рассчитываются, используя приведенные выше правила.

Одно из направлений повышения плотности компоновки электронных устройств, применение микросхем в корпусах с L- и J-выводами, монтаж которых в большинстве случаев требует специализированного монтажного оборудования. На рис. 1.17 показана микросхема с L-выводами и соответствующие контактные площадки. Отличие данной формовки от обычной в том, что для L-вывода характерно значительное сокращение длины припаиваемого вывода, до размера равного или близкого ширине самого вывода. Поэтому контактная площадка в этом случае выполняется близкой к квадрату, с минимальными размерами, определяемыми фактически шагом выводов микросхемы.

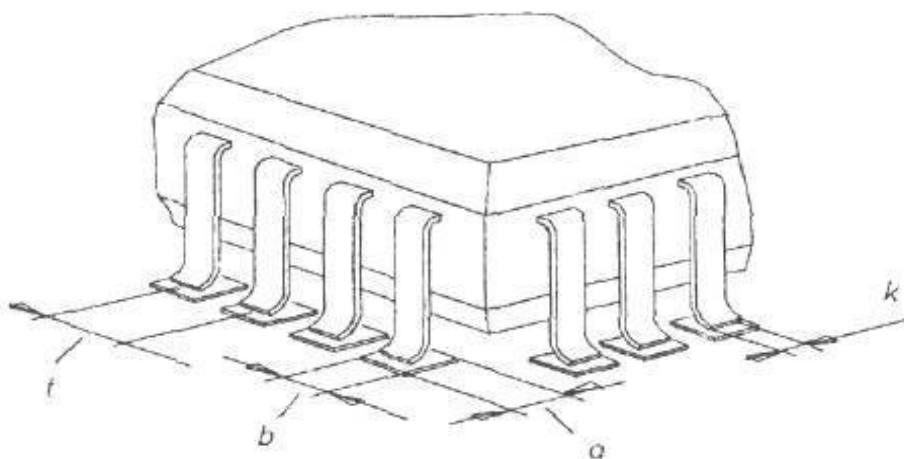


Рис. 1.17— Установка микросхемы с L-выводами

Разрабатывая контактные площадки микросхем, надо учитывать, что они обычно располагаются в узлах сетки проектирования платы, поэтому расстояние между смежными рядами площадок одного элемента (микросхемы) должно быть кратно шагу сетки.

В стандарте IPC-SM-782A приведены конструктивные размеры отечественных и импортных микросхем в различных корпусах и рекомендуемые посадочные места под них.

### 1.20. Дискретные чип-элементы

Элементная база для поверхностного монтажа включает обширную номенклатуру дискретных (рассыпных) элементов самого разного назначения, которые производятся различными



производителями по несогласованным стандартам, что вносит массу трудностей для конструкторов. Например, одинаковые элементы разных производителей могут иметь различные размеры при одинаковой маркировке, поэтому, на практике, каждый элемент требует индивидуального решения вопроса о его монтаже (размеры и расположение контактных площадок). Кажется, единственное, что безоговорочно принято всеми сторонниками поверхностного монтажа, это - применение только прямоугольных контактных площадок без переходных отверстий.

Размеры контактных площадок для установки (пайки) чип-элементов зависят от конструктивных размеров каждого из них. При разработке КПМ следует учитывать не только размеры элемента, но и наличие капли припоя, которая образуется в месте пайки (рис. 1.18). Причем, капля припоя при правильной пайке должна иметь вогнутую форму гантели.

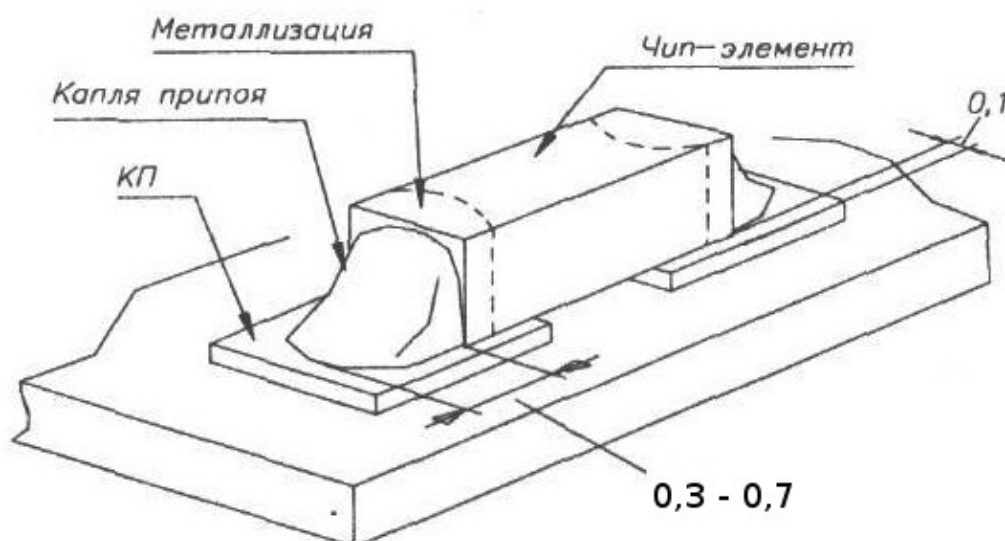


Рис. 1.18— Монтаж чип-элемента

Ширина контактной площадки для любого способа пайки обычно берется на 0,2 мм больше соответствующего размера элемента (по 0,1 мм на сторону). По длине контактная площадка должна выступать из-под элемента. Величина выступа зависит от способа пайки. Если пайка будет производиться волной, то эта величина должна быть не менее 0,7 мм. С другой стороны, увеличение этого размера более 1 мм - нецелесообразно: припой растекается, и капля с размером более 1 мм не образуется.

Для пайки в печи, выступ контактной площадки из-под элемента должно быть около 0,3 мм. Доза припоя, при таком методе пайки, ограничена по объему и в случае больших поверхностей, припой будет растекаться, не образуя капли.

Металлизированная поверхность чип-элемент должна ложиться на контактные площадки, частично перекрывая их. Величина этого перекрытия зависит от размеров металлизации на концах элемента, которая колеблется у разных элементов от 0,2 до 0,5 мм, и опять же зависит от способа пайки. При пайке в печи элемент по возможности должен всей металлизацией лежать на контактных площадках. При пайке волной размер перекрытия может быть сокращен и даже сведен до нуля (с учетом допусков на компонент и возможного смещения при монтаже).

В целом, контактные площадки рассыпных чип-элементов мало отличаются от контактных площадок микросхем. Эти контактные площадки крайне желательно располагать в узлах координатной сетки проектирования, т.е. межцентровые расстояния этих площадок должны быть согласованы с шагом проектирования печатной платы.

Выбирая конкретные размеры для контактных площадок можно ориентироваться на рекомендации фирмы Philips, являющейся лидером в этой области на Европейском континенте. За океаном законодателем выступает фирма Hewlett Packard, разработки последней явились основой американского стандарта IPC-SM-782. Но, как отмечалось, между этими законодателями нет единства.

Кроме двухвыводных элементов, монтируемых на поверхность, используются маломощные транзисторы, которые монтируются по технологии поверхностного монтажа, например, отечественный транзистор КТ368А9. Монтаж этих транзисторов ничем не отличается от монтажа микросхем с планарными выводами (см. рис. 1.19).

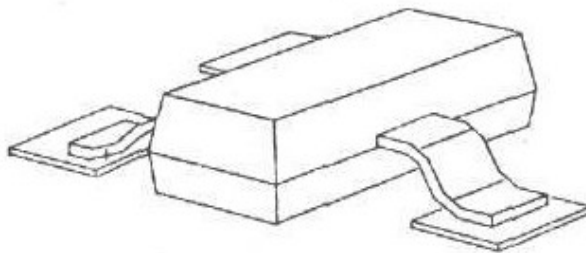


Рис. 1.19— Монтаж транзистора

Применение элементов поверхностного монтажа и микросхем с шагом выводов 0,5 мм и менее, требует использования печатных плат только высоких классов точности (4-й и 5-й), иначе преимущества поверхностного монтажа не будут реализованы. Это же требует использование металлизированных отверстий диаметром 0,4 мм и менее. Из чего следует, что толщина плат не должна превышать 1,5...2 мм, а многослойные платы должны иметь не более восьми-десяти слоев.

Другая проблема связана с маркировкой. Дело в том, что миниатюризация аппаратуры и значительное повышение плотности монтажа при использовании элементов, монтируемых на поверхность, приводит к тому, что на поверхности платы не остается свободного места для выполнения традиционной маркировки. К этому следует прибавить еще то, что автоматизированная пайка не допускает наличия маркировки на контактных площадках. И более того, чтобы исключить вообще возможность попадания маркировки на контактные площадки, она (маркировка) должна выполняться (в номинале) не ближе 0,5 мм от края защитной маски. Это еще более усугубляет проблему выполнения маркировки на таких печатных платах. В результате получается, что маркировку физически негде разместить.

В этих условиях разработчики склоняются к решению полностью отказаться от маркировки таких плат, сохраняя только минимальный объем основных маркировок (иногда условных). Напомним, что согласно ГОСТ 2.314-68 основная маркировка включает условный шифр изделия и заводской номер. Из дополнительной (вспомогательной) маркировки можно на печатной плате сохранить только знаки полярности (плюсики), хотя, при полном отсутствии всей остальной маркировки, в том числе, позиционных обозначений, необходимость в знаках полярности отпадает сама собой. Совершенно очевидно, что в таких случаях в состав сопроводительной (эксплуатационной и ремонтной) документации должны вводиться документы (рисунки или чертежи), несущие полную информацию о расположении и позиционных обозначениях всех элементов, в том числе и знаки полярности, нумерацию контактов и т.д. В подобном документе, формируемом программой, для каждого элемента можно указать координаты его положения.

В заключение - несколько общих правил, относящихся к компоновке элементов на печатной плате. Главное, это — соблюдение минимальных расстояний между элементами. Для дискретных элементов необходимо соблюдать:

- 1) расстояние между изолированным корпусом элемента и выводом другого элемента - 1 мм;
- 2) расстояние между изолированным корпусом элемента и выводом другого элемента - 0,5 мм.

Этот же зазор должен соблюдаться между изолированными корпусами;

3) расстояние между выводами и изолированным корпусом, находящимися под высоким потенциалом, должно быть увеличено. В данном случае речь идет о воздушном зазоре между элементами, но кроме этого должны быть выдержаны расстояния между печатными проводниками, находящимися под высоким потенциалом;

4) элементы, подбираемые при настройке, не рекомендуется запаивать непосредственно на печатную плату. Для таких элементов необходимо использовать монтажные лепестки или контакты. Это делается, чтобы исключить многократные перепайки на печатной плате. Металлизированные отверстия и диэлектрики очень чувствительны к воздействию высоких температур и их резким перепадам (термоудар). Технология поверхностного монтажа вообще исключает подбор.

## 2. Пример конструкторско-технологического расчета печатной платы модуля управления шаговым двигателем

Прежде чем приступить к конструкторско-технологическому расчету необходимо убедительно обосновать выбор типа, материала, формы, размера, метода изготовления печатной платы.

Согласно параметрам элементов на принципиальной схеме модуля управления шаговыми

двигателями, приведенной в приложении А, выбрать класс точности элементов печатного монтажа, их конструкторско-технологические характеристики.

При этом требуется поверочный расчет ДПП модуля управления шаговыми двигателями. По результатам расчета необходимо определить минимально допустимую ширину печатного проводника, падения напряжения на нем. Определить номинальные значения диаметров монтажных отверстий и контактных площадок для элементов со штыревыми выводами и размеров контактных площадок для SMD, а также минимальное расстояние между элементами проводящего рисунка.

На плате модуля управления шаговыми двигателями присутствует микроконтроллер с корпусом TQFP32 с плотно расположенными выводами, он то и определит класс точности. Шаг выводов — 0,8 мм, ширина КП по стандарту IPC-SM-782— 0,55 мм, погрешность позиционирования проводника — 0,03 мм. Таким образом минимальное возможное расстояние между проводниками будет 0,8 - (0,55+0,03\*2)=0,19 мм. Таким образом согласно табл. 1.1 Эту плату следует реализовать по четвертому классу точности и рекомендуемому шагу проектирования 0,5 мм.

И так исходные данные для конструкторско-технологического расчета это:

- схема электрическая принципиальная;
- типы корпусов компонентов;
- тип печатной платы(ДПП);
- технология производства печатной платы(комбинированный позитивный метод);
- шаг координатной сетки(0,5 мм);
- материал печатной платы(СТНФ-2-35-1,5);
- класс точности (4).

—Определим минимальную ширину печатного проводника по постоянному току для шин питания и земли

$$B_{minl} = \frac{I_{max}}{j_{доп} \cdot t_{np}}$$

где:  $I_{max}$  [А] – максимальный ток, протекающий в проводниках  
 $j_{доп}$  [А/мм<sup>2</sup>] – допустимая плотность тока, для ПП с  $h_f = 35$  мкм, изготовленной комбинированным позитивным методом,  $j_{доп} = 48$  А/мм<sup>2</sup>  
 $t_{np}$  [мм] – толщина проводника.

Так как плата изготавливается комбинированным позитивным методом, то толщина проводника( $t_{np}$ ) определяется следующим образом:

$$t_{np} = h_f + h_{эл} + h_{хм}$$

где:  $h_f$ [мм] – толщина фольги

$h_{эл}$ [мм] – толщина слоя гальванически осажденной меди

$h_{хм}$ [мм] – толщина слоя химически осажденной меди

Обычно  $h_{эл} = 0,05 - 0,06$  мм,  $h_{хм} = 0,005 - 0,008$

Примем, что на нашем предприятии  $h_{эл} = 0,055$  мм,  $h_{хм} = 0,0065$  мм

$$t_{np} = h_f + h_{эл} + h_{хм} = 0,035 + 0,055 + 0,0065 = 0,0965 \text{ мм}$$

В схеме есть две шины питания которые кардинально отличаются по мощности, кроме того есть обычные сигнальные проводники и мощные проводники. Поэтому нужно сделать аж 4 расчета для всех видов проводников. Сразу можно оговорится что расчетная ширина сигнальных проводников меньше ширины, что позволяет технология, она будет рассчитана в другом разделе.

**Шина Еп=5В:**

$I_{max}$  определяется как сумма токов потребления всех микросхем на шине. Токи потребления для всех ИМС приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1— Токи потребления микросхем

Микросхема	Ток потребления
ATmega168	200 мА
MAX481	10 мА

Таким образом  $I_{max} = 210$  мА

$$B_{minl} = \frac{I_{max}}{j_{доп} \cdot t_{np}} = \frac{207 \cdot 10^{-3}}{48 \cdot 0,0965} = 0,045 \text{ мм}$$

Определим минимальную ширину проводника с учетом допустимого падения напряжения на

нем

$$B_{min2} = \frac{\rho \cdot I_{max} \cdot l_{np}}{t_{np} \cdot U_{доп}}$$

где:  $\rho$ [Ом\*мм<sup>2</sup>/м] – удельное сопротивление проводника.  $\rho = 0,0175$  Ом\*мм<sup>2</sup>/м для проводника изготовленного комбинированным методом

$l_{np}$ [м] – длина самого длинного проводника на ПП

$t_{np}$ [мм] – толщина проводника

$I_{max}$ [А] – максимальный ток, протекающий в проводнике

$U_{доп}$ [В] – допустимое падение напряжений в проводнике

$U_{доп}$  обычно принимают равным 5% от напряжения питания. Таким образом если напряжение питания  $U_{сс}$  равно 5В, то  $U_{доп} = 0,05 \cdot U_{сс} = 0,25$  В. Примем  $l_{np} = 40$  см.

$$B_{min2} = \frac{\rho \cdot I_{max} \cdot l_{np}}{t_{np} \cdot U_{доп}} = \frac{0,0175 \cdot 207 \cdot 10^{-3} \cdot 0,4}{0,0965 \cdot 0,25} = 0,06 \text{ мм}$$

Теперь выберем минимальную ширину проводника по самому жесткому критерию:  $B_{min} = 0,045$  мм.

$B_{min1}$  и  $B_{min2}$  меньше минимально допустимой ширины, которую реализовать 4й класс точности, а значит минимальная ширина проводника шины питания 5В будет определяться технологическими возможностями оборудования и параметром  $b_{гр}^n$  четвертого класса точности.

**Шина  $E_p=40$ В:**

На этой шине две микросхемы, которые выдают потребляют и выдают токи до 2А каждая, соответственно. Через шину проходит 4А. Длина ширины до 40 см.

$$B_{min1} = \frac{I_{max}}{j_{доп} \cdot t_{np}} = \frac{4}{48 \cdot 0,0965} = 0,86 \text{ мм}$$

$$U_{доп} = U_{40} \cdot 0,05 = 40 \cdot 0,05 = 2$$

$$B_{min2} = \frac{\rho \cdot I_{max} \cdot l_{np}}{t_{np} \cdot U_{доп}} = \frac{0,0175 \cdot 4 \cdot 0,4}{0,0965 \cdot 2} = 0,15 \text{ мм}$$

Определяющим значением ширины проводника шины  $E_p=40$  В будет  $B_{min1}$ .

Особо мощные проводники:

Через каждый может проходить до 2А согласно документации на микросхемы. Напряжение тоже останется в 40В. Длина проводников равна 20 см.

$$B_{min1} = \frac{I_{max}}{j_{доп} \cdot t_{np}} = \frac{2}{48 \cdot 0,0965} = 0,43 \text{ мм}$$

$$U_{доп} = U_{40} \cdot 0,05 = 40 \cdot 0,05 = 2$$

$$B_{min2} = \frac{\rho \cdot I_{max} \cdot l_{np}}{t_{np} \cdot U_{доп}} = \frac{0,0175 \cdot 2 \cdot 0,2}{0,0965 \cdot 2} = 0,04 \text{ мм}$$

Определяющим значением ширины особо мощного проводника будет  $B_{min1}$ .

—Определим номинальные диаметры монтажных отверстий

$$d = d_{\text{э}} + \Delta d_{\text{мо}} + r$$

где:  $d_{\text{э}}$ [мм] – диаметр вывода элемента

$\Delta d_{\text{мо}}$ [мм] – нижнее предельное отклонение от номинального диаметра МО и максимальным диаметром вывода элемента,  $\Delta d_{\text{мо}} = 0,1$  мм (для отверстий меньше 1мм),  $\Delta d_{\text{мо}} = 0,15$  мм (для отверстий больше 1мм) ГОСТ 23751-86.

$r$ [мм] – разница между минимальным диаметром МО и максимальным диаметром вывода элемента  $r = 0,1..0,2$  мм

- (1)  $d = d_{\text{э}} + \Delta d_{\text{мо}} + r = 1 + 0,1 + 0,2 = 1,3$  мм для элементов SW1, XS2, XS3, XS4
- (2)  $d = d_{\text{э}} + \Delta d_{\text{мо}} + r = 0,4 + 0,1 + 0,2 = 0,7$  мм для элемента XS1
- (3)  $d = d_{\text{э}} + \Delta d_{\text{мо}} + r = 2 + 0,15 + 0,2 = 2,35$  мм для элемента C8
- (4)  $d = d_{\text{э}} + \Delta d_{\text{мо}} + r = 0,65 + 0,1 + 0,2 = 0,95$  мм для элемента XP1

—Определим диаметр контактной площадки

$$D_{min} = D_{minl} + 1,5 h_{\phi} + 0,03$$

где:  $D_{minl}$  [мм] – минимальный эффективный диаметр КП

$h_{\phi}$  [мм] – толщина фольги,  $h_{\phi} = 35 \text{ мкм}$  (что бы учесть подтравливание, нужно бы взять  $35 \text{ мкм} \cdot 1,5$ )

$$D_{minl} = 2 \left( b_{no} + \frac{d_{max}}{2} + \delta_o + \delta_{КП} \right)$$

где:  $d_{max}$  [мм] – максимальный диаметр просверленного в ПП отверстия

$b_{no}$  [мм] – ширина пояса КП,  $b_{no} = 0,05 \text{ мм}$  (из табл. 1.1)

$\delta_o$  [мм] – погрешность расположения центра отверстия относительно узла координатной сетки,  $\delta_o = 0,05 \text{ мм}$  (ГОСТ 23751-86)

$\delta_{КП}$  [мм] – погрешность расположения центра КП относительно узла координатной сетки,  $\delta_{КП} = 0,1$  (ГОСТ 23751-86), но это слишком много поэтому возьмем  $\delta_{КП} = 0,05$

$$d_{max} = d + \delta d + (0,1 \dots 0,15) \quad \text{– максимальный диаметр просверленного отверстия в печатной}$$

плате.

где:  $d$  – номинальный диаметр МО

$\Delta d$  – допуск на диаметр отверстия (ГОСТ 23751-86),  $\Delta d = -0,1 \text{ мм}$ , следовательно при вычислении  $d_{max}$   $\Delta d = 0$

- (1)  $d_{max} = d + \delta d + (0,1 \dots 0,15) = 1,3 + 0 + 0,1 = 1,4 \text{ мм}$
- (2)  $d_{max} = d + \delta d + (0,1 \dots 0,15) = 0,7 + 0 + 0,1 = 0,8 \text{ мм}$
- (3)  $d_{max} = d + \delta d + (0,1 \dots 0,15) = 2,35 + 0,05 + 0,1 = 2,5 \text{ мм}$
- (4)  $d_{max} = d + \delta d + (0,1 \dots 0,15) = 0,95 + 0 + 0,1 = 1,05 \text{ мм}$

- (1)  $D_{minl} = 2 \left( b_{no} + \frac{d_{max}}{2} + \delta_o + \delta_{КП} \right) = 2 \left( 0,05 + \frac{1,4}{2} + 0,05 + 0,05 \right) = 1,7 \text{ мм}$
- (2)  $D_{minl} = 2 \left( b_{no} + \frac{d_{max}}{2} + \delta_o + \delta_{КП} \right) = 2 \left( 0,05 + \frac{0,8}{2} + 0,05 + 0,05 \right) = 1,1 \text{ мм}$
- (3)  $D_{minl} = 2 \left( b_{no} + \frac{d_{max}}{2} + \delta_o + \delta_{КП} \right) = 2 \left( 0,05 + \frac{2,5}{2} + 0,05 + 0,05 \right) = 2,8 \text{ мм}$
- (4)  $D_{minl} = 2 \left( b_{no} + \frac{d_{max}}{2} + \delta_o + \delta_{КП} \right) = 2 \left( 0,05 + \frac{1,05}{2} + 0,05 + 0,05 \right) = 1,35 \text{ мм}$

- (1)  $D_{min} = D_{minl} + 1,5 h_{\phi} + 0,03 = 1,7 + 1,5 \cdot 0,035 + 0,03 = 1,78 \text{ мм}$
- (2)  $D_{min} = D_{minl} + 1,5 h_{\phi} + 0,03 = 1,1 + 1,5 \cdot 0,035 + 0,03 = 1,18 \text{ мм}$
- (3)  $D_{min} = D_{minl} + 1,5 h_{\phi} + 0,03 = 2,8 + 1,5 \cdot 0,035 + 0,03 = 2,88 \text{ мм}$
- (4)  $D_{min} = D_{minl} + 1,5 h_{\phi} + 0,03 = 1,35 + 1,5 \cdot 0,035 + 0,03 = 1,43 \text{ мм}$

Определим максимальный диаметр контактной площадки

- (1)  $D_{max} = D_{min} + 0,02 = 1,78 + 0,02 = 1,8 \text{ мм}$
- (2)  $D_{max} = D_{min} + 0,02 = 1,18 + 0,02 = 1,2 \text{ мм}$
- (3)  $D_{max} = D_{min} + 0,02 = 2,88 + 0,02 = 2,9 \text{ мм}$
- (4)  $D_{max} = D_{min} + 0,02 = 1,43 + 0,02 = 1,45 \text{ мм}$

—Определим размеры контактных площадок для поверхностного монтажа

Для микросхем с шагом выводов не менее 0,625 мм можно руководствоваться несложными правилами. Контактная площадка должна быть шире, чем ширина вывода на 0,2 мм, а длина, - на 0,3...0,4 мм больше, чем место прилегания вывода к контактной площадке. Но при назначении ширины контактной площадки обязательно следует учесть соответствующий допуск и проверить, не будет ли зазор между смежными площадками меньше допустимого зазора между элементами проводящего рисунка. Для микросхем с шагом выводов 0,625 мм и менее этот зазор является определяющим.

Но если размеры контактных площадок приводит производитель в документации, то лучше использовать их. Или же воспользоваться стандартом IPC-SM-782.

Вот такие контактные площадки для SMD в схеме:

Таблица 2.2— Размеры контактных площадок для SMD

Корпус	Размеры контактной площадки
TQFP32A	0,55 X 1,5 мм
SO8	0,6 X 2 мм
SOT223	1 X 2,4 мм
Chip 0805	1,4 X 1,5 мм
Chip 2512	1,6 X 3,6 мм
SMBL	2,2 X 2,8 мм
SO20	0,6 X 2,2 мм
XT9S	2 X 5,5 мм

—Определим минимальную ширину проводников для сигнальных проводников и шины  $E_p = 5B$

$$B_{min} = b_{cp}^2 + 1,5 h_{\phi} + 0,03$$

где:  $b_{cp}^2$  [мм]– минимальная ширина проводника, для нашего класса точности – 0,15 мм

$$B_{min} = b_{cp}^2 + 1,5 h_{\phi} + 0,03 = 0,15 + 1,5 \cdot 0,035 + 0,03 = 0,23 \text{ мм}$$

Максимальная ширина проводника:

$$B_{max} = B_{min} + 0,02 = 0,23 + 0,02 = 0,25 \text{ мм}$$

—Определим минимальное расстояние между краями двух соседних проводников

$$S_{min2} = nL_0 - (B_{max} + 2 \delta_{cn}) = 0,5 - (0,25 + 2 \cdot 0,03) = 0,19 \text{ мм}$$

—Определим минимальное расстояние между двумя контактными площадками

$$S_{min3} = L'_0 - (D_{max} + 2 \delta_{KII})$$

где:  $L'_0$  [мм]– расстояние между центрами двух соседних контактных площадок (из параметров корпуса)

$D_{max}$  [мм]– ширина контактной площадки

Выберем компонент с самым плотным расположением выводов

$$S_{min3} = L'_0 - (D_{max} + 2 \delta_{KII}) = 0,8 - (0,55 + 2 \cdot 0,05) = 0,15$$

Расстояние между пирами позволяет реализовать 4й класс точности, третий же класс точности не позволит использовать компоненты в корпусе QFP.

В результате мы определили, что минимальное расстояние между элементами печатного монтажа будет как минимум 0,17 мм. А расстояние между элементами печатного монтажа при проектировании будет  $0,15 \text{ мм} + 0,05 \text{ мм} + 0,03 \text{ мм} = 0,23 \text{ мм}$ , где 0,05мм – погрешность позиционирования печатного проводника и 0,03 мм– контактной площадки. Ширина проводников – 0,25 мм.

Переходные отверстия будут имеют диаметр 0,6 мм, а КП переходных отверстий – 0,8 мм.

### 3. Электрический расчет ПП модуля управления шаговыми двигателями

По результатам электрического расчета ПП необходимо определить падение напряжения на самом длинном проводнике, мощность потерь платы, величину паразитной поверхностной емкости между двумя проводниками, взаимную индуктивность двух параллельных проводников.

Электрический расчет преимущественно выполняется для цепей питания и земли. При этом необходимо оценить наиболее важные электрические свойства печатной платы.

— определим падение напряжения на самом длинном проводнике

Самый длинный проводник— шина земли, его длина ( $l_{пр}$ ) 626 мм. Формула для расчета падения напряжения:

$$\Delta U_{\text{пр}} = \frac{I_{\text{max}} \cdot \rho \cdot l_{\text{пр}}}{t_{\text{пр}} \cdot b_{\text{пр}}}$$

где:  $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$  для медного проводника;  
 $I_{\text{max}}[\text{А}]$  — ток, протекающий через шину;  
 $l_{\text{пр}}[\text{м}]$  — длина проводника;  
 $t_{\text{пр}}[\text{мм}]$  — толщина проводника;  
 $b_{\text{пр}}[\text{мм}]$  — ширина проводника;

$$\Delta U_{\text{пр}} = \frac{I_{\text{max}} \cdot \rho \cdot l_{\text{пр}}}{t_{\text{пр}} \cdot b_{\text{пр}}} = \frac{4,21 \cdot 0,0175 \cdot 0,626}{0,0965 \cdot 0,86} = 0,58 \text{ В}$$

Падение напряжения на шине земли в пределах нормы.

— определим мощность потерь ПП (Вт)

$$P_{\text{В}} = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{max}} \cdot U_{\text{п}}^2 \cdot \text{tg}(\phi) \cdot C$$

где:  $f_{\text{max}}[\text{Гц}]$  — рабочая частота, примем  $f_{\text{max}} = 1 \text{ Гц}$ , для расчета по постоянному току;  
 $U_{\text{п}}[\text{В}]$  — напряжение питания, возьмем наибольшее напряжение из двух (40 В);  
 $\text{tg}(\phi)$  — тангенс угла диэлектрических потерь, для стеклотекстолита  $\text{tg}(\phi) = 0,002$ ;  
 $C[\text{мкФ}]$  — емкость печатной платы;

$$C = \frac{0,009 \cdot \epsilon \cdot S}{h_{\text{пл}}} [\text{пФ}]$$

где:  $\epsilon = 4,5$  диэлектрическая проницаемость стеклотекстолита;  
 $S[\text{мм}^2]$  — суммарная площадь проводников на печатной плате;  
 $h_{\text{пл}}[\text{мм}]$  — толщина печатной платы (1,5 мм);

$$C = \frac{0,009 \cdot \epsilon \cdot S}{h_{\text{пл}}} = \frac{0,009 \cdot 4,5 \cdot 1533}{1,5} = 41,39 \text{ пФ}$$

$$P_{\text{В}} = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{max}} \cdot U_{\text{п}}^2 \cdot \text{tg}(\phi) \cdot C = 2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 40^2 \cdot 0,002 \cdot 41,39 \cdot 10^{-6} = 0,83 \text{ мВт}$$

Потери мощности незначительные.

— определим емкость двух параллельно идущих проводников

$$C_{\text{пар}} = \frac{0,12 \cdot \epsilon \cdot l_{\text{пар}}}{\lg\left(\frac{2 \cdot s}{t_{\text{пр}} + b_{\text{пр}}}\right)} [\text{пФ}]$$

где:  $l_{\text{пар}}[\text{мм}]$  — длина перекрытия двух параллельно идущих проводников;  
 $s[\text{мм}]$  — расстояние между двумя параллельными проводниками;  
 $t_{\text{пр}}[\text{мм}]$  — толщина проводника;  
 $b_{\text{пр}}[\text{мм}]$  — ширина проводника;

$$C_{\text{пар}} = \frac{0,12 \cdot \epsilon \cdot l_{\text{пар}}}{\lg\left(\frac{2 \cdot s}{t_{\text{пр}} + b_{\text{пр}}}\right)} = \frac{0,12 \cdot 4,5 \cdot 59}{\lg\left(\frac{2 \cdot 0,25}{0,0965 + 0,25}\right)} = 200 \text{ пФ}$$

Для данных проводников эта емкость не критична.

— определим взаимную индуктивность двух параллельных печатных проводников

$$M = 0,02 \left( l_{\text{пар}} \cdot \lg\left(\frac{\sqrt{l_{\text{пар}}^2 + L_0^2} + l_{\text{пар}}}{L_0}\right) - \sqrt{l_{\text{пар}}^2 + L_0^2} + L_0 \right)$$

где:  $l_{\text{пар}}[\text{см}]$  — длина двух параллельно идущих проводников;  
 $L_0[\text{см}]$  — расстояние между осевыми линиями двух параллельных проводников;

$$M = 0,02 \left( 5,9 \cdot \lg\left(\frac{\sqrt{5,9^2 + 0,05^2} + 5,9}{0,05}\right) - \sqrt{5,9^2 + 0,05^2} + 0,05 \right) = 0,16 \text{ мкГн}$$

Взаимная индуктивность в пределах нормы.

Разработанная печатная плата модуля управления шаговыми двигателями приведена в

приложении Б.

Таким образом, топология разработанной печатной платы соответствует заданным требованиям, так как значения наиболее важных параметров не превышают допустимых значений для данного типа печатной платы.