

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ  
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)»



**Кафедра конструирования  
и производства радиоаппаратуры**

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой КИПР

\_\_\_\_\_ **В.Н. Татарин**

“ \_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2012 г.

## **Ручная и интерактивная трассировки проводников печатных плат в P-CAD**

Методические указания к лабораторной работе по дисциплине  
«Информационные технологии проектирования РЭС» для студентов очного и  
заочного обучения специальностей 211000.62 и 162107.65

Разработчик:

Доцент кафедры КИПР

\_\_\_\_\_ **Ю.П. Кобрин**

Томск 2012

---

**СОДЕРЖАНИЕ**

<b>1</b>	<b>Цель работы</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Порядок выполнения работы</b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Особенности конструкции элементов печатного монтажа (ПМ)</b> .....	<b>4</b>
3.1	Минимально необходимые размеры элементов ПМ .....	4
3.2	Диаметры монтажных и переходных отверстий .....	5
3.3	Выбор формы и размеров контактных площадок .....	6
3.4	Печатные проводники .....	7
3.5	Расчет расстояния между элементами печатного рисунка .....	9
3.6	Расчет электрических параметров проводников .....	12
3.7	Рекомендации по размещению элементов печатного рисунка .....	14
3.8	Разработка и оформление чертежей на печатные платы .....	19
3.9	Маркирование печатных плат .....	27
<b>4</b>	<b>Трассировка проводников печатных плат в ручном и интерактивном режиме</b> .....	<b>29</b>
4.1	Подготовка к трассировке .....	29
4.2	Оптимизация размещения путем перестановки секций и выводов .....	34
4.3	Выбор способа трассировки .....	39
4.4	Ручная трассировка соединений печатных плат .....	39
4.5	Интерактивная трассировка цепей печатных плат .....	43
4.6	Сглаживание проводников .....	45
4.7	Проверка печатной платы .....	47
<b>5</b>	<b>Контрольные вопросы</b> .....	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>Отчетность</b> .....	<b>50</b>
	<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b> .....	<b>50</b>

---

---

## 1 Цель работы

1. Знакомство с проектными процедурами трассировки проводников печатных плат (ПП) РЭС [1 -7].
2. Изучение методик ручной и интерактивной трассировок проводников печатных плат с помощью графического редактора **P-CAD PCB**.
3. Приобретение практических навыков разводки проводников печатных плат средствами системы **P-CAD 2006**.

## 2 Порядок выполнения работы

- 1) Проанализируйте основные рекомендации по трассировке проводников печатных плат (ПП) РЭС (разд. 3) [1 -7].
  - 2) Ознакомьтесь с правилами работы с графическим редактором **PCB Editor** [8 - 12], а также разд. 4.
  - 3) Загрузите в **PCB Editor** файл с размещенными в ходе выполнения предыдущего этапа проектирования ЭРЭ [12] и выполните последовательность действий по практической трассировке ПП учебного примера с помощью программы **PCB Editor** в ручном и интерактивном режимах (разд. 5).
  - 4) Выполните средствами **PCB Editor** трассировку проводников печатной платы своего проекта в диалоговом режиме.
  - 5) Ответьте на контрольные вопросы.
  - 6) Выполните и защитите отчет о выполненной работе.
  - 7) Ответьте письменно на контрольные вопросы (раздел 6).
  - 8) Составьте и защитите отчет о выполненной работе
-

### 3 Особенности конструкции элементов печатного монтажа (ПМ)

#### 3.1 Минимально необходимые размеры элементов ПМ

Минимально необходимые размеры элементов печатного монтажа и их взаимное расположение определяются в результате расчета исходя из технологических ограничений и заданных электрических параметров.

Однако из практики известно, что слишком малые размеры элементов и жесткие допуски значительно снижают процент выхода годных изделий, поэтому при конструировании печатных плат после определения параметров элементов в результате расчета необходимо определить их оптимальные размеры, зазоры между ними и допуски на изготовление.

К параметрам элементов печатной схемы, которые необходимо определить перед трассировкой, относятся:

- диаметры монтажных и переходных отверстий,
- форма и размеры контактных площадок;
- размеры печатных проводников;
- расстояния между элементами печатного рисунка.

Расчет или обоснование численных значений параметров указанных элементов проводятся исходя из технологических ограничений и электрических режимов работы (токов, напряжений и т. д.) проектируемого печатного узла.

Минимально допустимые геометрические размеры элементов ПП (табл. 3.1), обозначенные на рис. 3.1 зависят в первую очередь от класса точности ПП.

Таблица 3.1 - Влияние класса точности на параметры ПП

Минимально допустимые геометрические параметры печатных плат	Класс точности				
	1	2	3	4	5
Ширина проводника $t$ , мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
Расстояние между проводниками $S$ , мм	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
Ширина гарантийного пояса $b$ , мм	0,30	0,20	0,10	0,05	0,025
Относительная толщина платы $J$ , мм	0,40	0,40	0,33	0,25	0,20

**Ширина печатного проводника  $t$**  - поперечный размер проводника на любом участке в плоскости основания.

**Расстояние между проводниками  $S$**  - расстояние между краями соседних проводников на одном слое ПП.

**Ширина гарантийного пояса  $b$**  - расстояние между краем монтажного отверстия и краем контактной площадки (рис. 3.1).

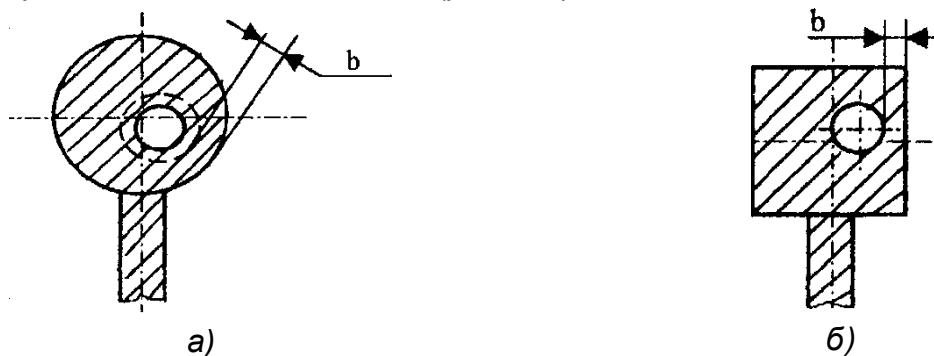


Рисунок 3.1 - Гарантийный пояс: а - металлизированное отверстие; б - неметаллизированное отверстие

**Относительная толщина ПП J** - отношение минимального диаметра металлизированного отверстия к толщине платы. Толщина платы определяется толщиной материала основания с учетом толщины фольги.

Предельные отклонения размеров ширины печатных элементов  $\Delta t$  (проводников, контактных площадок, концевых печатных контактов, экранов) для узких мест не должны превышать значений, указанных в *табл. 3.2*.

**Таблица 3.2 - Предельные отклонения ширины печатных элементов**

Наличие металлического покрытия	Предельные отклонения ширины печатных элементов $\Delta t$ , мм, для класса точности				
	1	2	3	4	5
Без покрытия	$\pm 0,15$	$\pm 0,10$	$\pm 0,05$	$\pm 0,03$	0 -0,03
С покрытием	+0,25 -0,20	+0,15 -0,10	$\pm 0,10$	+0,05	$\pm 0,03$

### 3.2 Диаметры монтажных и переходных отверстий

При автоматизированном проектировании ПП диаметры монтажных и переходных отверстий рассчитываются на этапе создания посадочных мест [14], однако в процессе конструирования ПП с помощью **P-CAD PCB** они могут быть уточнены.

Диаметр отверстий в печатной плате должен быть больше диаметра вставляемого в него вывода, что обеспечит возможность свободной установки ЭРЭ. При диаметре вывода до 0,8 мм диаметр неметаллизированного отверстия делают на 0,2 мм больше диаметра вывода; при диаметре вывода более 0,8 мм - на 0,3 мм больше.

Диаметр металлизированного отверстия зависит от диаметра вставляемого в него вывода и от толщины платы. Связано это с тем, что при гальваническом осаждении металла на стенках отверстия малого диаметра, сделанного в толстой плате, толщина слоя металла получится неравномерной, а при большом отношении длины к диаметру некоторые места могут остаться непокрытыми. Диаметр металлизированного отверстия должен составлять не менее половины толщины платы.

Для многослойных и сложных плат классов 2 и 3 устанавливают допуск на межцентровое расстояние, равный  $\pm 0,1$  мм. Для плат класса 1 допуск на межцентровое расстояние берут  $\pm 0,2$  мм и  $s = 0,6..0,7$  мм.

У плат, предназначенных для автоматизированной сборки, расстояние между центрами отверстий выполняют с допуском  $\pm 0,05$  мм, а номинальный диаметр отверстия берут на 0,4 мм больше диаметра вывода; допуск на диаметр отверстия берут по Н13.

Для неметаллизированных отверстий и торцов плат шероховатость поверхности делают такой, чтобы параметр шероховатости  $R_z \leq 0$ . У металлизированных отверстий и торцов шероховатость должна быть лучше  $R_z \leq 40$ .

Для переходных отверстий необходимо проводить поверочные расчеты на возможность протекания через них заданного в ЧТЗ тока. Допустимые значения токовой нагрузки приведены в *табл. 3.6*, которые следует уменьшить на 20-25 %, так как металлизированные отверстия можно получить только при аддитивной или полуаддитивной технологиям и с учетом ухудшенной теплоотдачи, по сравнению с проводниками, расположенными на поверхности ПП. Толщина осажденной меди в отверстиях составляет 20-25 мкм.

Металлизированные отверстия не выполняют на гетинаксе, фольгированном фторопласте (ФФ-4) и фольгированном армированном фторопласте (ФАФ-4).

Гетинакс имеет температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), отличающийся от меди примерно в 10 раз (стеклотекстолит - всего в 3 раза), поэтому возможно отслаивание осажденной металлизации. С фторопластом осажденная медь имеет плохую адгезию и, соответственно, надежность металлизированных отверстий в ФФ-4 и ФАФ-4 низка.

### 3.3 Выбор формы и размеров контактных площадок

Для припайки к печатному проводнику объемного проводника или вывода навесного ЭРЭ, на проводнике делают контактную площадку (КП) в виде участка с увеличенной шириной.

Выбор формы и размеров контактных площадок подробно рассмотрено на этапе создания посадочных мест [14], однако в процессе конструирования ПП с помощью *P-CAD PCB* их параметры могут быть уточнены.

Площадь КП (без учета отверстия) должна быть не менее  $2,5 \text{ мм}^2$  для печатных плат 1-го и 2-го классов точности, а для 3-го и 4-го – не менее  $1,6 \text{ мм}^2$ .

Позиционные допуски расположения осей отверстий  $T_d$  и контактных площадок  $T_D$  по ГОСТ 23751-86 выбираются по табл. 3.3 – 3.4 соответственно.

Таблица 3.3 - Значения позиционного допуска расположения осей отверстий

Размер ПП по большей стороне, мм	Значения позиционного допуска расположения осей отверстий $T_d$ , мм, для класса точности				
	1	2	3	4	5
До 180 включительно	0,20	0,15	0,08	0,05	0,05
Св. 180 до 360 включ.	0,25	0,20	0,10	0,08	0,08
Св. 360	0,30	0,25	0,15	0,10	0,10

Таблица 3.4 - Значения позиционного допуска расположения центров КП

Вид изделия	Размер печатной платы по большей стороне, мм	Значения позиционного допуска расположения центров контактных площадок $T_D$ , мм для класса точности				
		1	2	3	4	5
ОПП; ДПП; ГПК; МПП (наружный слой)	До 180 включ.	0,35	0,25	0,15	0,10	0,05
	Св. 180 до 360 включ.	0,40	0,30	0,20	0,15	0,08
	Св. 360	0,45	0,35	0,25	0,20	0,15
МПП (внутренний слой)	До 180 включ.	0,40	0,30	0,20	0,15	0,10
	Св. 180 до 360 включ.	0,45	0,35	0,25	0,20	0,15
	Св. 360	0,50	0,40	0,30	0,25	0,20

От точности позиционирования зависит возможность автоматизированной установки ЭРЭ на ПП и совмещения установленных на плату электрорадиоэлементов (светодиодов, переменных резисторов и т.п.) с отверстиями в экранах, передней и задней панелях и других конструктивных элементах.

Поэтому, например, у ПП, предназначенных для автоматической установки навесных элементов,  $T_d$ , независимо от класса точности ПП, устанавливается для монтажных отверстий по 4-му классу точности, а для переходных - по 3-му.

### 3.4 Печатные проводники

Расчет минимальной ширины проводника  $t_{\min}$  должен производиться так же, как и для диаметра КП, с учетом подтравы проводящего слоя. Для субтрактивных технологий

$$t_{\min} = t_{\min} + 1,5 \cdot H_{np}, \quad (3.1)$$

где  $t_{\min}$  - минимальная ширина проводника, определяемая классом точности или полученная при проведении энергетических расчетов.

Для комбинированного позитивного метода и полуаддитивной технологии при фотохимическом способе нанесения защитной маски

$$t_{\min} = t_{\min} + 1,5 \cdot H_{np} + 0,03. \quad (3.2)$$

Для сеткографического способа нанесения защитной маски

$$t_{\min} = t_{\min} + 1,5 \cdot H_{np} + 0,08. \quad (3.3)$$

Плотность тока и потери кроме ширины проводника  $t$  зависят и от толщины проводящего слоя  $H_{np}$ , которая определяется толщиной фольги и, при использовании полуаддитивных технологий, толщиной гальванически наращенной меди.

Толщина фольги, в зависимости от марки применяемого материала (табл. 3.5), регламентирована для отечественных фольгированных диэлектриков значениями 5, 20, 35 и 50 мкм, для импортных - 12, 18 и 35 мкм. Если потери несущественны для работы электрической схемы, то предпочтение отдается минимальной толщине. Проводники толщиной более 50 мкм делать не рекомендуется, так как с увеличением толщины происходит ухудшение сцепления проводника с материалом основания ПП.

Таблица 3.5 - Назначение материалов оснований ПП

Наименование	Марка	Тип платы	Назначение
Гетинакс фольгированный ГОСТ 10316-78	ГФ-1- ГФ-2-	ОПП, ДПП	Для ПП, работающих в диапазоне частот до 1 МГц и в негерметичных РЭС. Толщина фольги 35 и 50 мкм
Стеклотекстолит фольгированный ГОСТ 10316-78	СФ-1- СФ-2-	ОПП, ДПП	Для ПП, работающих в диапазоне частот до 1 МГц. Толщина фольги 35 и 50 мкм
Стеклотекстолит нагревостойкий ГОСТ 10316-78	СФ-1Н- СФ-2Н-	ОПП, ДПП	Для термостойких ПП, работающих в диапазоне частот до 1 МГц. Нагревостойкость: плюс 180°С в течение 100 часов
Стеклотекстолит гальваностойкий ГОСТ 10316-78	СФ-1-35Г- СФ-2-35Г- СФ-1-50Г- СФ-2-50Г-	ОПП, ДПП	Для ПП изготавливаемых сеточным и офсетным способами и работающих в диапазоне частот до 1 МГц
Стеклотекстолит повышенной нагревостойкости ТУ 16-503.091-71	СФПН-1-50 СФПН-2-50	ОПП, ДПП	Для термостойких ПП, работающих в диапазоне частот до 1 МГц. Нагревостойкость: плюс 200 °С в течение 50 часов
Материал для полуаддитивной технологии (слофадит) ТУ 6-19.136-79	СТПА-5-1, СТПА-5-2	ОПП, ДПП	Для печатных плат, работающих в диапазоне частот до 1 МГц

Наименование	Марка	Тип платы	Назначение
Лавсан фольгированный	ЛФ-1-35 ЛФ-1-50	ГПП	Для гибких ПП, работающих в диапазоне частот до 1 МГц
Стеклотекстолит фольгированный травящийся одно- и двухсторонний ТУ 16-503.154-75	ФТС-1-18-А,Б ФТС-1-18-А,Б ФТС-2-18-А, Б ФТС-2-18-А,Б	МПП, ГПП	Для многослойных ПП, изготовленных методом металлизации сквозных отверстий и работающих в диапазоне частот до 1 МГц
Гибкий фольгированный диэлектрик ТУ 61 У0.029.409	ФДЛ-1	ГПП, ГПК	Для печатных плат, работающих в диапазоне частот до 1 МГц
Диэлектрик фольгированный никелем одно- и двухсторонний ТУ ИЖ 68-71	ФДН-1 ФДН-2	ОПП, ДПП	Для ПП с креплением элементов сваркой и работающих в диапазоне частот до 1 МГц
Диэлектрик фольгированный тонкий одно- и двухсторонний гибкий ТУ ИЖ 51-66	ФДМ-1А ФДМ-1Б ФДМ-2А ФДМ-2Б	МПП ГПП	Для печатных плат, работающих в диапазоне частот до 1 МГц
Диэлектрик фольгированный тонкий для микроэлектроники ТУ ИЖ 54-67	ФДМЭ-1А ФДМЭ-1Б ФДМЭ-2А ФДМЭ-2Б	МПП ГПП	Для печатных плат, работающих в диапазоне частот до 1 МГц
Полиамид фольгированный	ПФ-1-35 ПФ-2-35	RAN	Для гибких печатных плат, работающих в диапазоне частот до 1 МГц
Фольгированный арилокс ТУ 6/2-71	ФА-4	ОПП, ДПП, МПП	Для печатных плат, работающих в диапазоне частот до 10 ГГц
Фольгированный армированный фторопласт-4	ФАФ-4	ОПП, ДПП, МПП	Для печатных плат, работающих в диапазоне частот до 10 ГГц, и при повышенных требованиях к механическим характеристикам
Фольгированный фторопласт-4 ТУ 6-05-1414-71	ФФ-4	ОПП, ДПП, МПП	Для печатных плат, работающих в диапазоне частот до 10 ГГц. Не гигроскопичен, но менее механически прочен, чем ФАФ-4
Фольгированный микапол МРТУ 16-503.097-69	ФМ-2В ФМ-2Б ФМ-2А	МПП	Для печатных плат, работающих в диапазоне частот до 1 ГГц
Стеклоткань прокладочная ТУ 16-503.097-69	СП-2 СП-1	МПП, ОПП, ДПП	Для изоляции элементов от проводников и печатных плат, работающих в диапазоне частот до 1 ГГц
Стеклоткань травящаяся прокладочная ТУ 16-503.035-75	СП-0,25 СП-3	МПП	Для печатных плат, работающих в диапазоне частот до 1 МГц

Допустимую токовую нагрузку на элементы проводящего рисунка ПП (в зависимости от допустимого перегрева проводника относительно температуры окружающей среды) выбирают по *табл. 3.6.*



Таблица 3.6 - Допустимая плотность тока для медных проводников

Характеристика медного слоя	Допустимая токовая нагрузка, А/мм <sup>2</sup>
Медная фольга	От 100 до 250
Гальваническая медь	От 60 до 100

На графике (рис. 3.2) приведена нагрузочная способность по току одиночных медных проводников постоянной ширины  $S_{пр}$ , мм, расположенных на расстоянии большем, чем ширина проводников.

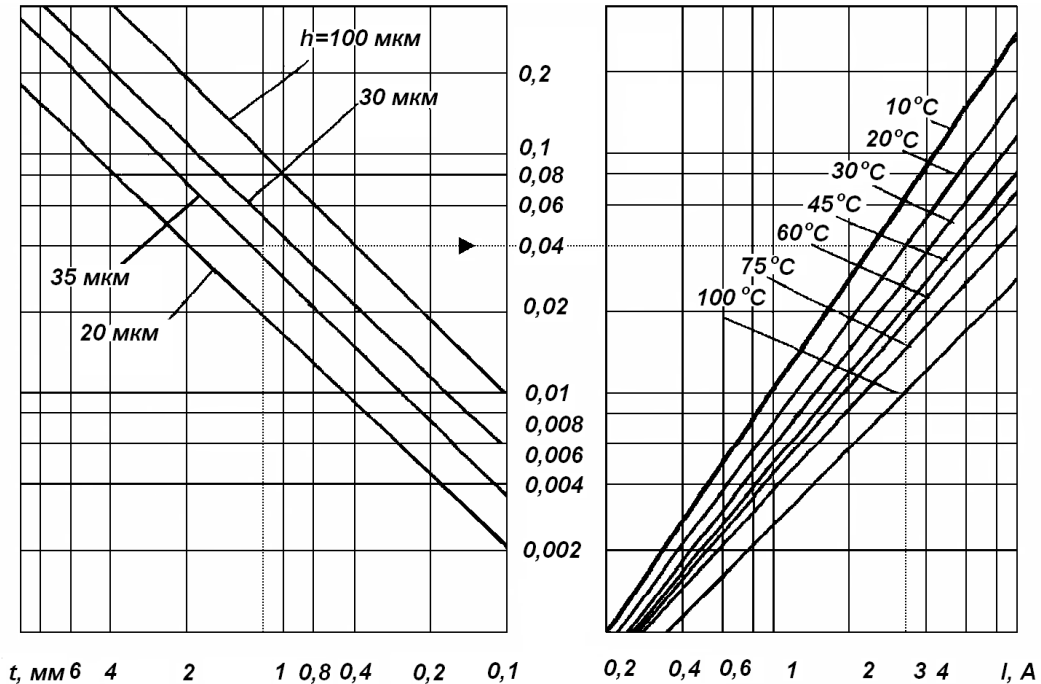


Рисунок 3.2 - Нагрузочная способность по току для печатных проводников

Изображенный график используют при выборе токовой нагрузочной способности проводников для ПП, критичных к рассеиваемой мощности с их поверхности, и проводников, допускающих прохождение тока большой плотности. Например, для проводника толщиной 35 мкм, шириной 1 мм при нагреве на 20 °С нагрузочная способность по току будет составлять примерно 3 А.

Допустимую токовую нагрузку следует уменьшать на 15 % для проводников, расположенных на расстоянии, равном или меньшем их ширины, и для проводников, выполненных по полуаддитивным технологиям. Исходя из нагрузочной способности по току, обычно выбирают 2-3 типоразмера ширины проводников на проектируемой печатной плате.

### 3.5 Расчет расстояния между элементами печатного рисунка

Минимальное расстояние между элементами печатного рисунка  $S_{min}$  определяется исходя из технологических возможностей производства ПП (разрешающая способность), условий сборки ПУ (автоматизированная или ручная) и электрических параметров (пробивного напряжения и сопротивления изоляции). Технологические ограничения  $S_{min}$  задаются классом точности (см. табл. 3.1), а электрические - указанием в ЧТЗ пробивного напряжения, допустимых токов утечки и т.д.

Цель расчетов - определить расстояние между центрами рассматриваемых токопроводящих элементов  $L_0$ .

Расстояние  $L_0$  между серединой проводника и центром контактной площадки определяется по формуле

$$L_0 = S_{\min} + 0,5 \cdot D_{\max} + 0,5 \cdot t_{\max} + T_l, \quad (3.4)$$

где  $T_l$  - позиционный допуск расположения печатного проводника относительно соседнего элемента проводящего рисунка (табл. 3.7);  $D_{\max}$  - диаметр КП с учетом допуска при изготовлении  $D_{\max} = D_{\min} + (0,02..0,06)$ ;  $t_{\max}$  - ширина печатного проводника с учетом допуска при изготовлении:  $t_{\max} = t_{\min} + (0,02..0,06)$ ;

Таблица 3.7 - Значения позиционного допуска расположения печатного проводника

Вид изделия	Размер печатной штаты по большей стороне, мм	Значения позиционного допуска расположения $T_l$ , мм, для класса точности				
		1	2	3	4	5
ОПП, ДГШ; ПТК; МПП (наружный слой)	До 180 включ.	L 0,35	0,25	0,15	0,10	0,05
	Св. 180 до 360 включ.	0,40	0,30	0,20	0,15	0,08
	Св. 360	0,45	0,35	0,25	0,20	0,15
М1 111 (внутренний слой)	До 180 включ.	0,40	0,30	0,20	0,15	0,10
	Св. 180 до 360 включ.	0,45	0,35	0,25	0,20	0,15
	Св 360	0,50	0,40	0,30	0,25	0,20

Расстояние  $L_0$  между центрами двух контактных площадок определяется как

$$L_0 = S_{\min} + D_{\max} + 2 \cdot T_l. \quad (3.5)$$

Расстояние  $L_0$  между центрами двух проводников равно

$$L_0 = D_{\max} + 2 \cdot T_l. \quad (3.6)$$

Минимально допустимое расстояние между печатными проводниками  $S_{\min}$  из расчета обеспечения электрической прочности изоляции, определяется расположением проводников в одном (табл. 3.8) или разных слоях (табл. 3.9). Нанесение на ПП диэлектрических покрытий (табл. 3.10) позволяет повысить устойчивость ПП к климатическим воздействиям, а также уменьшить расстояние между проводниками (в 1,5-2 раза) вследствие увеличения пробивного напряжения. При этом пробивное напряжение между проводниками не будет зависеть от влажности и атмосферного давления.

Таблица 3.8 - Допустимое рабочее напряжение между элементами проводящего рисунка, расположенными в одном слое

Расстояние между элементами проводящего рисунка, мм	Рабочее напряжение, В, для материалов							
	Воздействующие факторы							
	Нормальные условия		Относительная влажность 98 % при температуре 40 °С		Давление, мм рт. ст.			
	ГФ	СФ	ГФ	СФ	400		5	
				ГФ	СФ	ГФ	СФ	
От 0,15 до 0,20 вкл.		25	-	15	-	20	-	10
Св. 0,20 до 0,30 вкл.	30	50	20	30	25	40	20	30
Св. 0,30 до 0,40 вкл.	100	150	50	100	80	110	30	50
Св. 0,40 до 0,70 вкл.	150	300	100	200	110	160	50	80

Расстояние между элементами проводящего рисунка, мм	Рабочее напряжение, В, для материалов							
	Воздействующие факторы							
	Нормальные условия		Относительная влажность 98 % при температуре 40 °С		Давление, мм рт. ст.			
	ГФ	СФ	ГФ	СФ	400		5	
	ГФ	СФ	ГФ	СФ	ГФ	СФ	ГФ	СФ
Св. 0,70 до 1,20 вкл.	300	400	230	300	160	200	80	100
Св. 1,20 до 2,00 вкл.	400	600	300	360	200	300	100	130
Св. 2,00 до 3,50 вкл.	500	830	360	430	250	430	110	160
Св. 3,50 до 5,00 вкл.	660	1160	500	600	350	560	150	210
Св. 5,00 до 7,50 вкл.	1160	1500	660	830	500	660	200	250
Св. 7,5 до 10, 0 вкл.	1300	2000	830	1160	560	1000	230	300
Св.10,0 до 15,0 вкл.	1800	2300	1160	1600	660	1160	300	330

**Примечание.** Цепи с напряжением более 250 В в МПП применять не рекомендуется; цепи с напряжением более величин, указанных в табл. 3.8, также применять в ПП не рекомендуется.

Таблица 3.9 - Допустимое рабочее напряжение между элементами проводящего рисунка, расположенными в соседних слоях

Расстояние между элементами проводящего рисунка, мм	Рабочее напряжение, В, для материалов	
	Гетинакс фольгированный (ГФ)	Стеклотекстолит фольгированный (СФ)
От 0,10 до 0,20 вкл.	-	25
Св. 0,20 до 0,30 вкл.		50
Св. 0,30 до 0,40 вкл.	75	100
Св. 0,40 до 0,50 вкл.	150	200
Св. 0,50 до 0,75 вкл.	250	350
Св. 0,75 до 1,50 вкл.	350	500
Св. 1,50 до 2,50 вкл.	500	850

Таблица 3.10 - Электрофизические параметры лаков для покрытия печатных плат

Параметр	Лак		
	ФЛ-583 (фенольный)	Э-4100 (эпоксидный)	УР-231 (уретановый)
Относительная диэлектрическая проницаемость, отн. ед	-	4	3,46
Электрическая прочность, МВ/м, не менее	75	-	75
Удельное объемное сопротивление, Ом·см	-	$1 \cdot 10^{15}$	$7,3 \cdot 10^{15}$
Тангенс угла потерь (при $f = 1000$ Гц), отн. ед	-	0,02	0,02
Технологическая толщина покрытия, мкм:			
двухслойное <sup>1</sup>	-	35-40	35-40
трехслойное <sup>2</sup>	-	30- 55	30-55

<sup>1</sup> Нанесение методами окунания или облива.

<sup>2</sup> Нанесение распылением, окунанием с последующим центрифугированием, кистью.

Лак ФЛ-593 применяется и для увеличения влагостойкости, Э-4100 - при эксплуатации в жестких климатических воздействиях. Кроме указанных в *табл. 3.10* для защиты ПП могут применяться лаки ЭП-730 и ЭП-9114.

### 3.6 Расчет электрических параметров проводников

После топологической прокладки проводников возможно вычисление таких электрических параметров проводящего рисунка, как сопротивление проводников, их индуктивность, емкость.

Сопротивления печатных проводников  $R$  можно рассчитать по известной формуле (3.7):

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (3.7)$$

в которой  $l$  – длина проводника (м), а  $S$  – площадь его поперечного сечения ( $\text{мм}^2$ ),  $\rho$  – удельное сопротивление материала проводника ( $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ).

При этом следует учитывать, что слой меди, полученный электролитическим осаждением, имеет менее плотную структуру, чем проводник, полученный травлением фольги. Поэтому для проводников, изготовленных химическим способом, нужно в формулу подставлять  $\rho = 0,0175$  ( $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ). Для проводников, полученных электрохимическим способом, следует принимать  $\rho = 0,0235$  ( $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ). При комбинированном способе удельное сопротивление проводника определяется как участками из фольги, так и участками, полученными электрохимическим способом, и  $\rho \approx 0,02$  ( $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ ).

Между двумя параллельно расположенными проводниками могут появиться гальванические связи за счет утечек по изоляции, а также емкостные.

Численные значения емкостей для линий связи, определяющих нормальную работу прибора (например, допустимое значение между входом и выходом усилителя должно составлять не более 0,001 пФ) можно определить по *табл. 3.11*.

Таблица 3.11 - Взаимные емкости печатных проводников

Ширина проводника, мм	Зазор между проводниками, мм	Взаимная емкость <sup>3</sup> $\text{С} \cdot 10^{10}$ , Ф/м		
		для двусторонних ПП		для внутренних слоев многослойных ПП при $\varepsilon_{\text{эфф}}=6,0$
		без покрытия при $\varepsilon_{\text{эфф}} = 3,5$	с покрытием при $\varepsilon_{\text{эфф}} = 5,0$	
0,3	0,3	0,53	0,75	0,90
0,3	0,4	0,47	0,68	0,81
0,3	0,5	0,44	0,63	0,75
0,3	0,6	0,42	0,60	0,72
0,3	1,0	0,33	0,48	0,57
0,3	1,5	0,32	0,45	0,54
0,6	0,2	0,70	1,00	1,20
0,6	0,3	0,67	0,95	1,14
0,6	0,4	0,60	0,85	1,02
0,6	0,5	0,56	0,80	0,96
0,6	0,6	0,53	0,75	0,90
0,6	1,0	0,46	0,65	0,78
0,6	1,5	0,39	0,55	0,66

<sup>3</sup> Печатные проводники расположены на одном слое ПП

**Примечание.**  $\varepsilon_{эфф}$  - эффективное значение относительной диэлектрической проницаемости диэлектрика (материала ПП или материала ПП и покрытия).

Значения емкостей между проводниками ограничивает и максимальную длину печатных проводников для цифровых микросхем (табл. 3.12).

Таблица 3.12 - Допустимая длина участка взаимодействия печатных проводников для ТТЛ-схем среднего быстродействия

Количество параллельных проводников	Допустимая длина участка взаимодействия, мм				
	Ширина зазора между проводниками, мм				
	0,5	1,0	1,5	3,0	5,0
2	140	170	180	210	240
3	85	100	110	125	140
4	70	85	90	100	110
5	55	70	85	90	100

Емкость, а также гальванические связи между двумя параллельными проводниками, расположенными на одной стороне платы, можно уменьшить, если

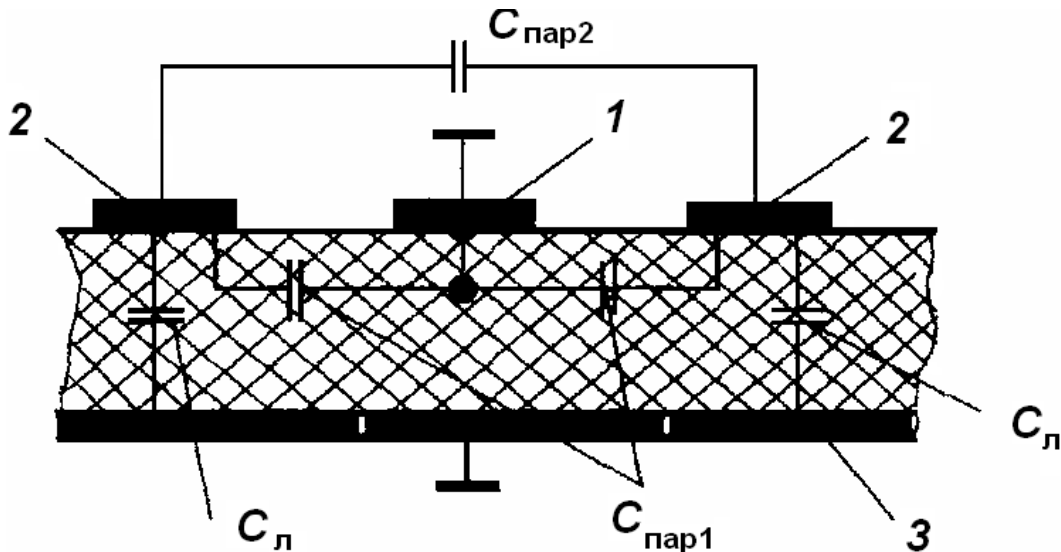


Рисунок 3.3 - Экранирование печатных проводников (2) шиной с нулевым потенциалом (1), экранирующей поверхностью (3):  $C_{л}$  - емкость линии;  $C_{ПАР1}$  - емкость между экранирующим и основным проводником;  $C_{ПАР2}$  - емкость между основными проводниками

разместить между ними заземленный экран, как показано на рис. 3.3.

Индуктивность печатных проводников можно определить по формуле (3.8) с учетом данных табл. 3.13:

$$L = L_{ног} \cdot l, \quad (3.8)$$

где  $L_{ног}$  - погонная индуктивность, мкГн/см;  $l$  - длина проводника, см.

Таблица 3.13 - Зависимость погонной индуктивности печатных проводников от их ширины

Ширина проводника $t$ , мм	0,2	0,3	0,5	1,0	2,0	4,0	6,0
Погонная индуктивность $L_{ног}$ , мкГн/см	0,0185	0,018	0,0165	0,0135	0,011	0,0095	0,009

### 3.7 Рекомендации по размещению элементов печатного рисунка

После размещения ЭРЭ приступают к трассировке, то есть к прокладке необходимых соединений (проводников) между контактными площадками.

Трассировка ПП обычно проходит в два этапа.

1. **Осуществляют предварительное соединение выводов всех ЭРЭ** (включая входные и выходные КП и КП для контроля качества ПП) в соответствии со схемой электрической принципиальной (как правило, с привлечением **P-CAD PCB**).

2. **Проводится доработка и оптимизация полученного печатного рисунка.** Коррекция первоначального варианта топологии необходима по нескольким причинам:

1) программы автоматической трассировки ПП не всегда могут на сто процентов осуществлять прокладку всех цепей (особенно при коэффициенте заполнения по площади большем 0,75);

2) ограничения, связанные с трудностью гибкого изменения для различных областей ПП применяемых стратегий трассировки, не позволяют немедленно получить оптимальный вариант конструкции;

3) после анализа электромагнитной совместимости, как правило, требуется корректировка печатного рисунка.

Тем не менее, многие проблемы второго этапа могут быть сняты, если заранее учесть специфику выполнения трассировки во всевозможных эпизодах при настройке редакторов печатных плат и программ автоматической трассировки.

При выполнении трассировки проводники располагаются на всей площади ПП, кроме зон, запрещенных для их прокладки. К таким зонам относятся:

- 1) зоны направляющих элементов;
- 2) зоны крепежных отверстий;
- 3) зоны полигонов.

Размер зоны направляющих элементов (*рис. 3.4*) обычно составляет 4..8 мм и зависит от вида и материала самих элементов направляющих, расположенных в блоке кассетной конструкции. Расположение проводников в этих зонах возможно в исключительных случаях и только при применении направляющих из ди-

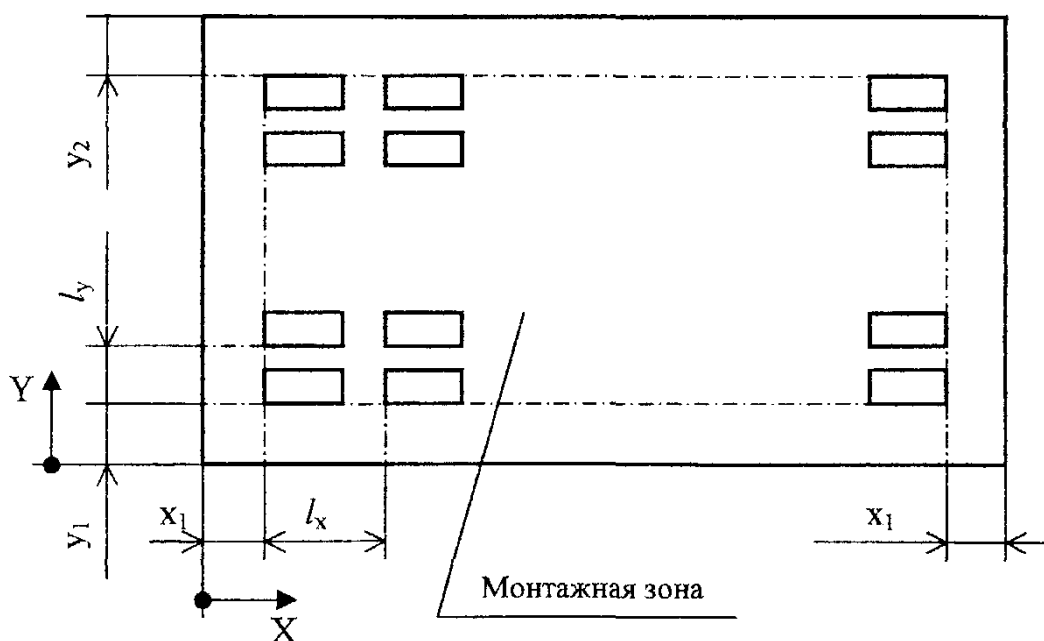


Рисунок 3.4 - Расположение компоновочных зон на ПП

электрического материала (ЭРЭ, монтажные и крепежные отверстия в зонах направляющих элементов не располагаются).

Типовые размеры зон крепежных элементов приведены в *табл. 3.14*. В случае применения диэлектрических изолирующих шайб размер этих зон может быть уменьшен до минимально возможного (1 мм от края крепежного отверстия).

При используемых напряжениях от 20 до 250 В зоны крепежных элементов должны выбираться с учетом обеспечения минимального промежутка размером 3 мм при отсутствии изоляционных покрытий.

Таблица 3.14 - Номинальные значения диаметров крепежных отверстий

Диаметр крепежного изделия, мм	Диаметр крепежного отверстия, мм			Диаметр резервной зоны, мм	Диаметр крепежного изделия, мм	Диаметр крепежного отверстия, мм			Диаметр резервной зоны, мм
	1-й ряд	2-й ряд	3-й ряд			1-й ряд	2-й ряд	3-й ряд	
2,0	2,2	2,4	2,6	7,0	4,0	4,3	4,5	4,8	13,0
2,5	2,7	2,9	3,1	9,0	5,0	5,3	5,5	5,8	17,0
3,0	3,2	3,4	3,7	11,0	6,0	6,4	6,6	6,8	19,0

К **полигонам** относятся участки поверхности ПП (расположенные с одной или двух сторон платы), где по каким-либо соображениям запрещено прокладывать проводники.

Кроме полигонов при настройке программ трассировки выделяют **регионы** - участки поверхности ПП, где установлены определенные правила в расположении проводников, в отличие от других мест. К ним, например, могут быть отнесены ранее разработанные топологические рисунки отдельных каскадов и функциональных узлов и внедряемые в разрабатываемую конструкцию ПП.

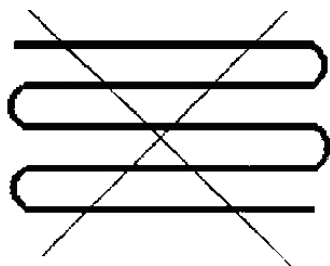
Обычно придерживаются следующей очередности в прокладке цепей:

- 1) цепи питания;
- 2) земли;
- 3) сигнальные цепи;
- 4) остальные цепи.

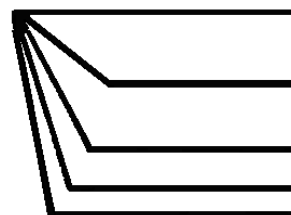
При наличии **входных высокочастотных цепей** их прокладывают в первую очередь и делают *максимально короткими*.

Для уменьшения паразитных связей в ДПП шины питания и заземления необходимо располагать со стороны установки ЭРЭ, а сигнальные цепи - с обратной стороны ПП.

Заземляющие цепи должны быть разделены для цифровой части схемы, аналоговой части и устройств питания, и их топологическое построение не должно быть последовательным (*рис. 3.5*).



Неправильно



Правильно

Рисунок 3.5 - Пример расположения земляных проводников

### Печатные проводники на печатной плате располагают:

- равномерно по площади платы;
- во взаимно перпендикулярных направлениях в разных слоях ПП (параллельно линиям координатной сетки);
- параллельно направлению движения при пайке волной припоя;
- угол между направлением движения и осью проводника не должен превышать  $30^\circ$ ;
- печатный проводник, проходящий между двумя КП, следует располагать так, чтобы его ось была перпендикулярна линии, соединяющей центры отверстий (рис. 3.6);
- для рационального формирования токопроводящего рисунка целесообразно печатные проводники и контактные площадки выполнять без резких перегибов и острых углов, так как это затрудняет технологию изготовления (печать, травление, пайку), а также приводит к концентрации механических напряжений при нагревании (вследствие разницы температурных коэффициентов линейного расширения фольги и основания) и отслаиванию проводников;
- если длина проводника более 70 мм, то целесообразно предусмотреть дополнительные КП (или металлизированные отверстия) для более надежного сцепления печатных проводников с основанием.

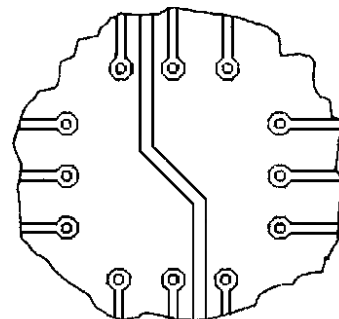


Рисунок 3.6 –  
Прокладка  
проводников,  
перпендикулярно  
отверстиям

Допускается прокладка проводников под углом  $45^\circ$  для уменьшения длины проводника и снижения напряжений в углах при перегибе проводников.

Запрещается прокладка проводников под корпусами навесных элементов, когда между ними существует разность потенциалов. В противном случае увеличивается возможность коррозионного разрушения печатного проводника.

Переход проводника с одной стороны на другую должен осуществляться только через отверстия. Переходы через край не допустимы. Исключение составляют платы ВЧ и СВЧ диапазонов, в которых соединяются между собой заземляющие слои, расположенные на разных сторонах платы.

Печатные проводники, как правило, выполняются одинаковой ширины на всем их протяжении. До минимально допустимых значений проводники могут быть сужены на небольшой длине в узких местах и в местах перекрестий проводников различных слоев. Ширина печатных проводников, с учетом протекающих токов, может быть различной, однако количество их типоразмеров стараются делать минимальным.

Отметим, что узкие проводники (шириной 0,3..0,4 мм) могут отслаиваться от изоляционного основания при незначительных нагрузках. Если такие проводники имеют большую длину, то для увеличения прочности сцепления проводника с основанием через каждые 25-30 мм следует располагать металлизированные отверстия или местные уширения типа контактной площадки с размерами **1 x 1 мм** или более по длине проводника.

Рекомендуется не размещать проводники на минимально допустимом расстоянии от других печатных элементов. Расстояние от проводника до края платы (края выреза) должно быть не менее толщины платы с учетом допуска на габаритные размеры и позиционного допуска расположения печатного элемента (табл. 3.4), но не менее 1 мм.



Качество ПП во многом определяется выбранной технологией пайки ЭРЭ. Если Вы выберете прогрессивный метод пайки - **пайку волной припоя** – то это наложит дополнительные ограничения на вид и расположение элементов печатного рисунка:

1. **Проводники должны быть расположены по плате равномерно и параллельно друг другу.** Это позволяет избежать перегрева отдельных участков платы, так как теплоемкость и теплопроводность фольги и материала основания сильно различаются.

2. **Не должно быть более трех проводников, выходящих из одной контактной площадки под углом менее 45°.** В противном случае возможно собирание капель припоя в указанных местах.

3. **Дорожки должны иметь по возможности один размер и не превышать размер контактной площадки.**

4. **Не должно быть резких перегибов проводников** во избежание собирания припоя в капли в таких местах.

5. **Не должно быть контактных площадок избыточной площади** (более 8 мм<sup>2</sup>). Несоблюдение этого правила может привести к перегреву и отслоению проводящей фольги от основания и растеканию припоя по контактной площадке с образованием соединения с малой механической прочностью.

6. **Необходимо избегать пересечения одной дорожкой другой,** если их толщины отличаются более чем в два раза.

7. Конструктивная реализация некоторых рекомендаций по прокладке проводников представлена в *табл. 3.15*.

**Таблица 3.15 - Топология некоторых вариантов соединений проводников**









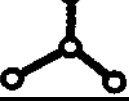



	Рекомендуется	Не рекомендуется
<i>a</i>		
<i>б</i>		
<i>в</i>		
<i>г</i>		

Особо следует остановиться на Т-образных соединениях проводников (строки *a, г табл. 3.15*). Как правило, такая реализация соединений приводит к уменьшению суммарной длины проводников и исключению острого угла между проводниками, выходящими из одной контактной площадки. Однако этот вариант не обеспечивает параллельности дорожек с направлением волны припоя при пайке волной припоя. Поэтому в современных пакетах САПР ПП при настройке программ трассировки можно разрешить или запретить формирование Т-соединений при автоматизированной разводке. Как правило, такое соединение может "безболезненно" применяться для двухсторонних ПП в проводящем слое, расположенном со стороны установки электрорадиоэлементов (за исключением плат с поверхностным монтажом компонентов при пайке волной припоя).

В ряде случаев рекомендуется замена Т-образных соединений на Y-образные (строка *г табл. 3.15*). Такое построение соединений позволяет уменьшить самовозбуждение схем усилительных каскадов.

В *табл. 3.16* представлены рекомендуемые и нерекомендуемые способы формирования контактных площадок.

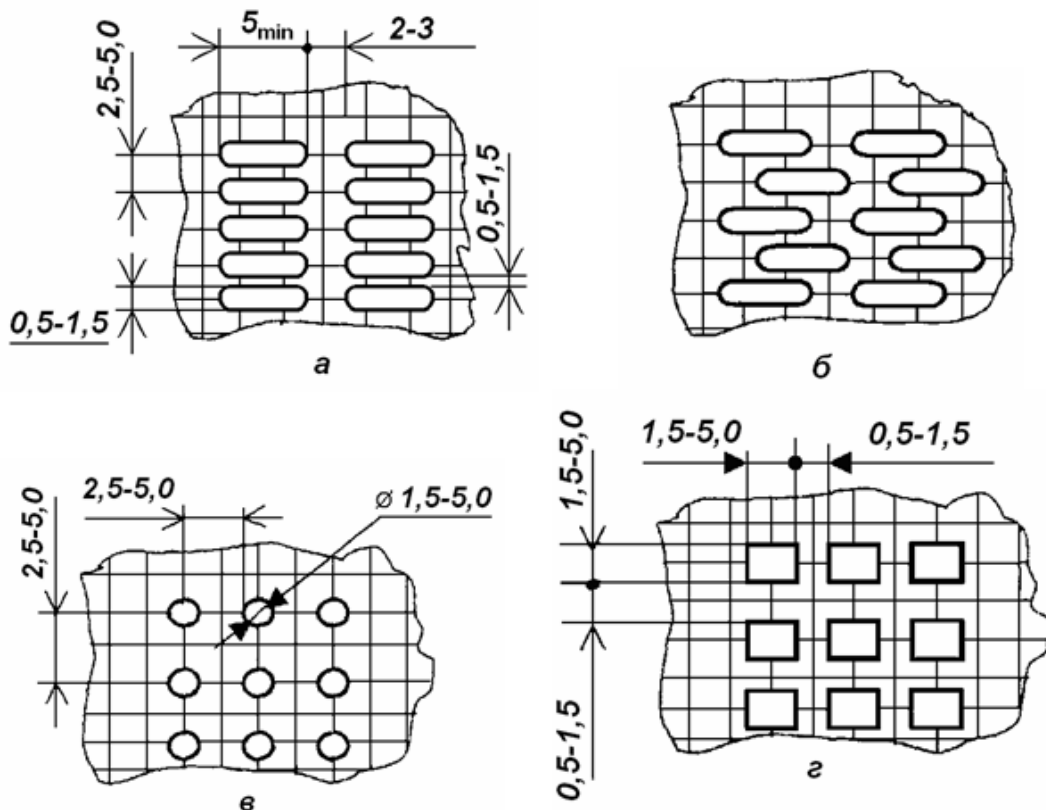
Таблица 3.16 - Способы формирования контактных площадок

Рекомендуется	Не рекомендуется
<i>a</i> 	
<i>б</i> 	
<i>в</i> 	
<i>г</i> 	
<i>д</i> 	
<i>е</i> 	

Несимметричное расположение контактной площадки относительно проводника (строки *a*, *в* табл. 3.16) приводит и к асимметрии паяного соединения. В случае выполнения широких проводников в зоне контактной площадки (строки *б*, *г*, *д*, *е* табл. 3.16) возможно вытекание расплавленного припоя из области паяного соединения (монтажных отверстий) в сторону широкого проводника, что снижает качество пайки. Один из методов борьбы с указанным эффектом (кроме приведенных в табл. 3.16) предполагает наличие паяльной маски (например, эпоксидной), однако он увеличивает стоимость ПП.

Экраны и проводники шириной более 5 мм следует выполнять с вырезами (рис. 3.7), так как при нагреве плат в процессе пайки из изоляционного основания могут выделяться газы. Если проводник или экран имеют большую ширину, то газы, не находя выхода, могут вспучивать фольгу.

Форма вырезов может быть произвольной: овал (рис. 3.7, *a*, *б*), круг (рис. 3.7, *в*), прямоугольник (рис. 3.7, *г*) или сетка. Площадь вырезов обычно составляет 30-50 % от площади экрана.

Рисунок 3.7 - Форма вырезов в экране: *a*, *б* - овал; *в* - круг; *г* - квадрат

Прокладка рядом с входными выходных проводников одного каскада не рекомендуется во избежание возникновения паразитных связей. Проводники входных и выходных цепей, связанные в систему для подсоединения к краевому разъему, целесообразно разделить экранирующими проводниками или тинами с нулевым потенциалом (рис. 3.3); введение экранирующей плоскости увеличивает емкость линии  $C_{л}$ , а введение плоскости с нулевым потенциалом уменьшает  $C_{ПАР}$ . В любом случае коэффициент связи между проводниками уменьшается.

Качество экранирования тем выше, чем ближе экран расположен к проводнику, чем он шире и чем уже проводник.

В общем случае, топологию рисунка необходимо строить таким образом, чтобы снижать паразитные электрические параметры (паразитную емкость между рядом лежащими проводниками или проводником и экранным слоем, их взаимную индуктивность, индуктивность сигнальных проводников и т.д.). Это достигается максимально возможным уменьшением размеров приемных и передающих элементов печатного рисунка (проводников и контактных площадок), соблюдением заданных (расчетных) расстояний между этими элементами и встраиванием между этими цепями малочувствительных и нейтральных цепей (рис. 3.3).

### 3.8 Разработка и оформление чертежей на печатные платы

Оформление конструкторской документации ПП заключается в изготовлении чертежей слоев ПП с выводом на чертеж штампов и всех регламентированных ГОСТом сопроводительных надписей и пояснений, а также подготовке пакета необходимых для производства документов.

Чертеж печатной платы должен содержать основные проекции платы с печатными проводниками и отверстиями. Его выполняют в масштабе 2:1 или 4:1. На чертеже платы линиями типа выносных наносят координатную сетку в соответствии с выбранным масштабом. Координатную сетку наносят либо на все поле платы, либо рисками по периметру, либо фрагментарно в левом нижнем углу.

**Размеры на чертеже печатной платы указывают одним из следующих способов:**

- с помощью размерных и выносных линий;
- нанесением координатной сетки в прямоугольной или в полярной системе координат;
- комбинированным способом с помощью размерных и выносных линий и координатной сетки.

При задании размеров ПП нанесением координатной сетки линии нумеруются.

Печатные проводники шириной менее 2,5 мм изображают на чертеже одной линией, являющейся осью симметрии проводника. Проводники шириной более 2,5 мм можно изображать двумя линиями (расстояние между которыми штрихуется или зачерняется). При этом в технических требованиях чертежа должна быть указана ширина проводника.

Печатные проводники следует изображать на чертеже в виде отрезков линий, совпадающих с линиями координатной сетки или под углом, кратным  $15^\circ$ . Допускается выполнение проводников произвольной конфигурации, о чем делается запись в технических требованиях. Печатные проводники не должны иметь резких перегибов и острых углов. Обычно радиус закругления не менее 2 мм.

Печатные проводники следует выполнять одинаковой толщины на всем протяжении. В узких местах их сужают до минимально допустимой для данного класса ширины на возможно меньшей длине. Печатный проводник, проходящий между двумя близко расположенными контактными площадками (см. рис. 3.8) или любыми отверстиями, следует располагать перпендикулярно линии, соединяющей их центры.

Во многих случаях для плат ограничивается только минимальная ширина проводника. Ее указывают отдельно для свободных и узких мест, как, например, показано в табл. 3.17.

Таблица 3.17 - Пример оформления на чертеже таблицы параметров элементов ПП

Параметры элементов платы	Размеры, мм, не менее	
	в свободных местах	в узких местах
Ширина проводников	0,8	0,3
Расстояние между двумя проводниками	0,8	0,4
Расстояние между двумя контактными площадками или проводником и контактной площадкой	0,8	0,3

Таблицу помещают в «Технические требования», которые размещают на поле чертежа.

При применении не очень качественных материалов и невысокой плотности монтажа для предупреждения отслаивания узких печатных проводников (0,3 .. 0,4 мм) через 25-30 мм желательно располагать металлизированные отверстия или контактные площадки для увеличения прочности сцепления проводника с основанием.

Проводники шириной до 2 мм можно располагать с любой стороны ПП, а с большей шириной - желательно со стороны установки навесных элементов.

Заземляющие проводники следует выполнять максимально широкими. Но для уменьшения паразитных емкостей и возможного вспучивания фольги газами, выделяющимися из основания при нагреве во время пайки, их делают "сетчатыми" или снабжают различными вырезами.

Прокладка входных и выходных печатных проводников рядом или параллельно на разных сторонах платы не рекомендуется во избежание возникновения паразитных наводок.

Печатные проводники входных высокочастотных цепей и мощных выходных цепей прокладываются в первую очередь. Они должны быть разнесенными в пространстве и максимально короткими.

При проектировании ПП цифровых РЭС шины питания для снижения помех делаются максимально широкими; предусматривается равномерное распределение конденсаторов в цепях питания ИС из расчета 0,01 мкФ на корпус (керамический, рядом с ИС) и 1-2 мкФ (электролитический) на 5-7 корпусов ИС.

Отдельные элементы рисунка печатной платы (широкие проводники, контактные площадки, экраны, изоляционные участки и т.п.) можно выделять штриховкой, чернением.

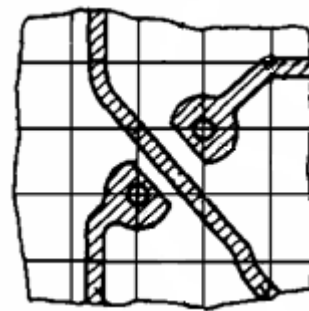


Рисунок 3.8 - Проведение печатного проводника между двумя близко расположенными площадками

Круглые отверстия, имеющие зенковку, и круглые контактные площадки с круглыми отверстиями изображают одной окружностью.

Размер диаметров круглых контактных площадок указывают в технических требованиях.

Если у контактной площадки регламентируется только минимальная радиальная ширина  $b_{\min}$ , то такую площадку показывают окружностью, диаметр которой равен диаметру отверстий, а в технических требованиях указывают: «Форма контактных площадок произвольная,  $b_{\min} = \dots$ ». Контактные площадки для припайки выводов планарных корпусов микросхем выполняют, как показано на *рис. 3.9*.

При выполнении обозначения отверстий на ПП таким способом на поле чертежа ПП приводится таблица отверстий, в которой указывается:

- условное обозначение отверстий;
- диаметры отверстий, мм;
- диаметры зенковок с двух сторон, мм;
- наличие металлизации;
- размеры контактных площадок;
- количество отверстий.

Размеры, количество граф и форма таблицы ГОСТом не устанавливаются.

Параметры отверстий (диаметр, допуск на диаметр, зенковку и допуск на нее, наличие и отсутствие металлизации) непосредственно около каждого отверстия не проставляют. Условные обозначения диаметра отверстий в платах выполняются на чертежах ПП в соответствии с ОСТ 27-72-694-834.

Участки платы, по которым не должны проходить печатные проводники, обводят штрихпунктирной линией и соответствующее указание делают в технических требованиях. Зенковку на отверстиях графически не показывают.

В технических требованиях, располагаемых на поле чертежа ПП, могут указываться особенности ее изготовления:

1. Плату изготовить .. методом.
2. Плата должна соответствовать .. (ГОСТ, ОСТ, ТУ и т. д.).
3. Шаг координатной сетки, .. мм.
4. Конфигурацию проводников выдерживать по координатной сетке с отклонением от чертежа, .. (1,5; 1,0 или 0,5 мм) мм.
5. Допускается скругление углов контактных площадок и проводников (радиус скругления, мм).
6. Места, обведенные штрих-пунктирной линией, не занимать.
7. Ширина проводников в свободных местах .. мм, в узких .. мм.
8. Расстояние между двумя проводниками, между контактными площадками или между проводниками и контактными площадками: в свободных местах - .. мм, в узких местах - .. мм.
9. Форма контактных площадок - произвольная, максимальный размер, указать в мм.
10. Предельные отклонения между центрами отверстий .. мм.

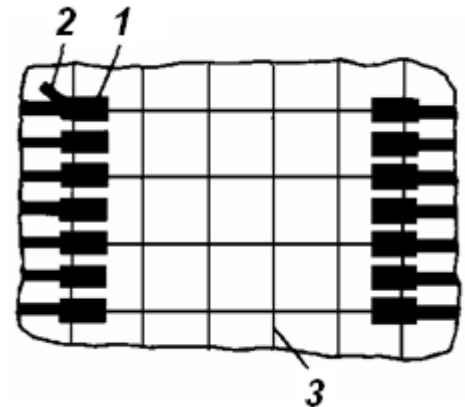


Рисунок 3.9 - Контактные площадки для пайки выводов электрорадиоэлементов:

- 1 - контактные площадки для элементов с планарными выводами; 2 - ключ у площадки, к которой будет припаиваться вывод № 1 микросхемы; 3 - линии координатной сетки

11. Суммарная площадь металлизации платы .. ;  
 12. Указания о гальваническом покрытии проводников печатной платы, например: «Печатный монтаж серебрить  $Sr9$ », «Поверхности контактных площадок покрыть сплавом «Розе» чистым ТУ 6-09-6706-70» и т.п.

Для поверхностей печатной платы, которые в процессе изготовления подвергаются механической обработке (контур платы, отверстия, пазы и т.п.), устанавливают норму на **шероховатость**.

Шероховатость ограничивают, нормируя максимально допустимое значение параметра шероховатости  $R_z$  (высота неровностей, вычисленная по десяти точкам профиля); обычно  $R_z$  не должна превышать 40 мкм.

Шероховатость поверхностей печатной платы на чертеже обозначают следующим образом:

- на линиях контура или выносных, относящихся к поверхностям платы, на которых находятся печатные проводники (или противоположные им для односторонних плат), ставят знак  $\nabla$ , означающий, что шероховатости этих поверхностей должны удовлетворять нормам, установленным на материал, из которого изготовлена плата;
- для всех поверхностей, подвергаемых механической обработке, обычно устанавливают одинаковые требования шероховатости поверхности. При этом в правом верхнем углу чертежа ставят знак  $\nabla$  и пишут значение параметра шероховатости, например  $Rz\ 40$ . После этого ставят знак ( $\nabla$ ), который означает, что норма  $Rz < 40$  мкм относится ко всем поверхностям, кроме обозначенных знаком  $\nabla$ . В рассмотренном нами примере в правом верхнем углу чертежа должно быть написано:

$Rz\ 40$  ( $\nabla$ ).

В соответствующей графе основной надписи чертежа должна быть указана марка материала, из которого сделана печатная плата или изображенная на чертеже деталь ПП, а также номер ГОСТ или ТУ на этот материал.

С 1995 года ГОСТ 2.123-83 введен в действие ГОСТ 2.123-93 «Комплектность конструкторских документов на печатные платы (ПП) при автоматизированном проектировании», учитывающий современного уровня технологии проектирования и изготовления. Этот стандарт устанавливает комплектность конструкторских документов (КД) на односторонние (ОПП), двусторонние (ДПП) и многослойные (МПП) печатные платы, а также требования по их выполнению при автоматизированном проектировании и изготовлении.

Документы на носителях данных (магнитные носители данных, перфоленты и т.п.), включаемые в комплект конструкторских документов на ПП, предназначены для получения конструкторских документов в традиционной форме:

- для механической обработки,
- для контроля ПП,
- для изготовителя фотшаблона,
- для передачи информации о результатах проектирования в систему (подсистему) автоматизированного изготовления ПП.

В каждом конкретном случае состав конструкторских документов, передаваемых для изготовления ПП, определяется разработчиком совместно с изготовителем в соответствии с комплектностью, установленной ГОСТ 2.123. По согласованию с предприятием-изготовителем допускается производить изготовление ПП по аттестованным документам на носителях данных.

Состав конструкторских документов на ПП, выполненных базовым способом, приведен в *табл. 3.18*.

Таблица 3.18 - Состав конструкторских документов на ПП

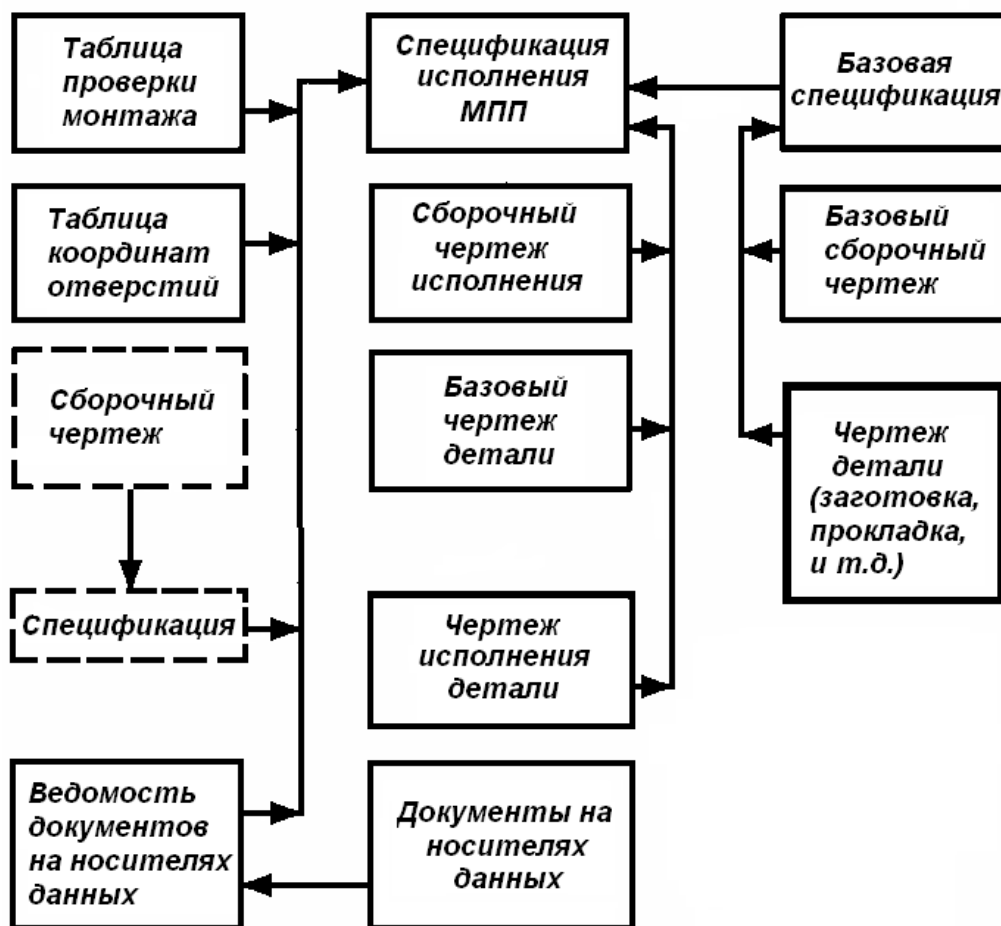
Код док.	Наименование документа	Основное содержание документа	Указания по выполнению документа	
			ОПП и ДПП	МПП
-	Чертеж детали (заготовки)	Изображение ПП, материалы, габаритные размеры отверстий и т.д.	Выполняется на каждый типоразмер согласно ГОСТ 2.106	Может оформляться по правилам ГОСТ 2.109 для деталей, на которые не выпущены чертежи
-			При оформлении чертежа детали базовым способом чертеж заготовки не выполняется	
-	Чертеж детали (прокладки)	Изображение прокладки, материал, габаритные размеры	Не выполняется	Может оформляться по правилам ГОСТ 2.106, ГОСТ 2.109 для деталей, на которые не выпущены чертежи
-	Базовый чертеж детали	Постоянные данные для всех исполнений типоразмера (изображение ПП, материал, габаритные размеры, размеры отверстий, шероховатость и другие требования)	Выполняется на каждый типоразмер для ОПП и ДПП	Выполняется на печатную плату как составную часть МПП
-	Чертеж исполнения детали	Переменные данные, относящиеся к конкретному исполнению (изображение ПП, отверстия и их размеры, технические требования, проводящий рисунок и т.д.)	Для ДПП выполняется на каждое исполнение проводящего слоя	Выполняется на каждое исполнение проводящего слоя печатной платы
СБ	Базовый сборочный чертеж	Постоянные данные, общие для всех исполнений типоразмера (изображение МПП, размеры, технические требования, постоянная часть прово-	Не выполняется	Выполняется на каждый типоразмер

Код док.	Наименование документа	Основное содержание документа	Указания по выполнению документа	
			ОПП и ДПП	МПП
		дящего рисунка, номера позиций)		
СБ	Сборочный чертеж исполнения	Переменные данные, относящиеся к конкретному исполнению (упрощенное изображение МПП, отверстия, технические требования, проводящий рисунок)	То же	Выполняется на каждое исполнение
-	Базовая спецификация	По ГОСТ 2.113, ГОСТ 2.108, ГОСТ 2.417	Не выполняется	Выполняется на каждое исполнение
-	Спецификация исполнения	По ГОСТ 2.113, ГОСТ 2.108, ГОСТ 2.417	То же	То же
Д	Технические требования	Одинаковые технические требования для МПП	Выполняется согласно ГОСТ 2.417	
ТБ	Таблица проверки монтажа	Данные для контроля электрических соединений	Выполняется на каждое исполнение. При автоматизированном контроле печатных плат допускается таблицы не выполнять	
ТБ	Таблица координат отверстий	Принятые условные обозначения отверстий, соответствующее количество отверстий, координаты расположения отверстий всех слоев ПП		
T1M	Данные фотошаблона (1)	Информация о рисунке слоя ПП	Выполняется на каждый слой	
T2M	Данные сверления (1)	Информация о координатах расположения диаметра и количества отверстий ПП	Выполняется на каждое исполнение с учетом конструктивно - технологических вариантов	
T3M	Данные для обработки контура (1)	Информация о контуре ПП	Выполняется на каждый типоразмер	
T4M	Данные контроля (1)	Информация о координатах контактов или контактных площадок, электрически соединенных между	Выполняется на каждое исполнение или слой	



Код док.	Наименование документа	Основное содержание документа	Указания по выполнению документа	
			ОПП и ДПП	МПП
		собой, слоя ПП		
ВН	Ведомость документов на носителях данных	По ГОСТ 28388 и 1.3 данного стандарта	Выполняется на каждое исполнение. Допускается выполнять в соответствии с отраслевыми нормативно - техническими документами	
По действующей НТД	Данные о результатах проектирования печатных плат		Выполняется на магнитном носителе данных в соответствии с ГОСТ 28388. Допускается выполнять в соответствии с отраслевыми нормативно-техническими документами	

Пример построения комплекта конструкторских документов для МПП приведено на рис. 3.10.



Условные обозначения:

— — — — — документы для конструктивно-технологического варианта открытых контактных площадок, выступающих выводов, послойного наращивания;

← — направление входимости документа.

Рисунок 3.10 – Пример построения комплекта конструкторских документов для МПП

Установленный ГОСТ 2.123 состав конструкторских документов может дополняться в зависимости от характера, назначения и конструктивно-технологического варианта изготовления, а также от технического оснащения автоматизированных систем проектирования и изготовления ПП. В состав комплекта конструкторских документов на ПП допускается включать программные документы, полученные в результате автоматизированного проектирования и необходимые для производства ПП. По согласованию с изготовителем и заказчиком допускается вместо таблиц, указанных в номенклатуре, включать в комплект КД на ПП программы автоматизированного контроля ПП.

Программы на носителях данных записывают в «Ведомость документов на носителях данных» (ВН). При выполнении трех и менее документов на носителях данных ВН можно не выпускать. При этом ВН записывают в спецификацию ПП в раздел «Документация» после документов, предусмотренных ГОСТ 2.102, в таком же порядке записывают в спецификацию ПП программы на носителях данных в случае, когда ВН выпускается. Программные документы и программы, выполненные на носителях данных, записывают в конце раздела «Комплекты» спецификации.

В состав постоянных данных, помещаемых на базовом чертеже, могут быть включены:

- изображение ПП;
- размеры и прочие указания для механической обработки;
- указания о материале;
- разметка для установки электрического соединителя;
- крепежные отверстия для установки ПП в сборочной единице;
- контрольные элементы (для контроля и приведения испытаний ПП);
- технические требования;
- проводящий рисунок;
- маркировка позиционных обозначений электрорадиоэлементов и конструкторский адрес;
- место обозначения ПП;
- место обозначения сборочной единицы;
- место порядкового номера изменения;
- номера позиции для МПП и т.д.

В состав переменных данных, помещаемых на чертеже исполнения, могут быть включены:

- упрощенное изображение ПП;
- проводящий рисунок ПП;
- маркировка позиционных обозначений электрорадиоэлементов и/или конструктивный адрес;
- обозначение ПП;
- обозначение сборочной единицы;
- порядковый номер изменения;
- таблица переходных и монтажных отверстий;
- технические требования;
- номера позиций для МПП и т.д.

При выполнении чертежа исполнения ПП автоматизированным способом на двух или более листах технические требования помещают *на первом листе*, проводящий рисунок может быть выполнен на последующих листах. **Следует заметить, что это положение стандарта очень часто нарушается.**

### 3.9 Маркирование печатных плат

Правильная эксплуатация и ремонт печатных плат и печатных узлов невозможны без применения маркировочных знаков. Маркировка передает различную информацию: наименование изделия, дату изготовления, данные, необходимые для монтажа ЭРЭ, и др. В отдельную группу можно выделить знаки, удостоверяющие качество, - клеймо, которое является разновидностью маркировки.

В соответствии с ГОСТ 2.314 - 68 "Правила нанесения на чертежи указаний о маркировании и клеймении", **маркированием** принято называть процесс нанесения на изделие, его части, упаковку и т.д. знаков, характеризующих это изделие. Соответственно **маркировка** - это совокупность знаков (текстовая информация, пиктограммы, товарные знаки - логотипы и наименования фирм-производителей и т.п.), необходимых для характеристики данного изделия. К маркировке относятся обозначение и шифр изделия, обозначение конструкторского документа, дата изготовления и др. Маркировку можно рассматривать как отдельный элемент конструкции.

Разновидностью маркирования является **клеймение** - процесс нанесения на изделие знаков, удостоверяющих качество этого изделия. **Клеймо** - это знак, удостоверяющий качество изделия (клеймо ОТК, клеймо заказчика и др.).

Маркировочные надписи должны легко восприниматься, нести максимум информации и быть лаконичными. Кроме того, маркировка должна различаться на обычном для наблюдения расстоянии, а ее изготовление быть технологичным. Немаловажными являются требования к высокой стойкости маркировки при изготовлении и эксплуатации изделия и неизменности внешнего вида в течение требуемого времени.

Маркировочные надписи, как правило, не стандартизированы, и на практике применяют множество вариантов цифровых, буквенных, символических обозначений и их комбинаций, производимых различными по габаритам, форме и цвету знаками.

Основными способами нанесения информации на печатные платы и узлы являются:

- **травление** (одновременно с нанесением проводников);
- **краской** (вручную, через трафарет или штемпелеванием);
- **клеевые этикетки** (бумажные или тканевые).

К достоинствам получения маркировки травлением можно отнести долговечность, отсутствие дополнительных затрат на материалы и достаточно высокую разрешающую способность (не меньшую, чем у элементов печатного рисунка), поскольку данная информация наносится на фотошаблон, сеточный трафарет и т.д. одновременно с формированием рисунка проводников. К сожалению, данная маркировка является токопроводящей и отбирает место у элементов печатного монтажа. Цвет маркировочных знаков, полученных травлением, может быть либо красноватым (цвет медной фольги), либо, в зависимости от типа покрытия - от серебристо-блестящего до серого. Контрастность такой маркировки зависит также от цвета материала основания ПП.

Травлением обычно наносят:

- обозначения ПП или ПУ по основному конструкторскому документу,
- шифр платы,
- иногда и нумерацию выходных контактных площадок или знаки полярности.

*Большая часть маркировки на ПП наносится краской.* Ручные способы нанесения применяются редко (обычно для единичного производства) из-за высокой стоимости и неэкологичности производства. Краской можно наносить марки-

ровку любого назначения и содержания. Основным недостатком маркирования краской является недостаточная стойкость к истиранию или возможность повреждения внешними механическими воздействиями при монтаже или ремонте.

**Трафаретная печать** является основным способом в массовом производстве и применяется при нанесении маркировки и паяльной маски. *Точность нанесения* - примерно  $\pm 0,015'$  (0.38 мм).

**Штемпелеванием** обычно наносятся знаки приемки (клейма) как после контроля отдельных технологических операций, так и при окончательной приемке

В процессе производства электронные печатные платы подвергаются высокотемпературным и химическим воздействиям. В некоторых случаях температура процессов при пайке может превышать 250 °С, а для очистки печатных плат после пайки используются агрессивные химикаты. Следовательно, маркировка должна выполняться на материалах, стойких к высокотемпературным воздействиям: полиамида (до 380 °С), полиэфирамида (до 250 °С) и полиэстра (до 200 °С).

Из навесных маркировок возможно применение технологических бирок и надеваемых на выводы полупроводниковых приборов, как правило, транзисторов, разноцветных изоляционных трубок - кембриков.

Последние служат для электрической изоляции и цветовой маркировки, которая выбирается следующим образом для эмиттера - черным цветом, для коллектора - желтый, и для базы - белый

Таким образом, маркирование печатного узла может выполняться всевозможными способами.

Так, обозначение шифра печатной платы целесообразно выполнять травлением, поскольку наносимая информация является постоянной и должна быть сохранена в течение всего срока службы (для ремонта, заказа и т.д.). Как и все проводники, эта информация должна быть покрыта защитным слоем

Обозначение ПУ, типа устройства, порядковый (серийный) номер могут изменяться. В частности, в разных печатных узлах, отличающихся количеством устанавливаемых ЭРЭ, перемычек и т.п. могут использоваться одинаковые ПП (например, в материнских платах компьютеров). От этого может меняться тип устройства, серийный номер и т.д. Поэтому данную маркировку наносят краской, а для увеличения долговечности ее покрывают защитным слоем.

Для правильного монтажа компонентов, удобства ремонта и эксплуатации наносятся следующие маркировочные знаки:

- маркировка позиционных обозначений навесных электрорадиоэлементов в соответствии со схемой электрической принципиальной;
- знаки полярности ("+" - обычно для диодов, электролитических конденсаторов, «+», «-», «~» и др. - для выходных контактных площадок);
- функциональное назначение ЭРЭ (например, разъемов) (NO PAPER - нет бумаги, TRANSPORT - отправка и т.д.);
- обозначения выводов многовыводных компонентов (например, разъемов), а также нумерация выходных контактных площадок;
- места установки ЭРЭ.

Маркировка знаков полярности и нумерации выводов многовыводных компонентов необходима в первую очередь для однозначности установки ЭРЭ на ПП. Для этой же цели может служить различная форма маркировочных знаков, обозначающая места установки электронных компонентов.

**Маркировочные краски** применяют двух цветов: черная и белая. Белая краска обеспечивает лучшую контрастность на стеклотекстолите и гетинаксе, и потому используется наиболее часто. Кроме того, зрительно воспринимаемая ширина белых линий больше, чем черных, что повышает распознаваемость маркированного элемента.

Размеры и тип шрифта маркировочных знаков выбираются исходя из минимизации расхода материала и удобства чтения. Обычно высота шрифта составляет **2-3,5** мм, шрифт прямой, обеспечивающий наибольшую различимость знаков.

Маркировка является местом возможного скопления пыли и грязи и соответственно уменьшения пробойного напряжения или утечки тока. Следовательно, при ее нанесении со стороны печатных проводников без применения защитных масок пересечение маркировочным знаком более одного проводника нежелательно, а для изделий спецтехники - недопустимо.

Наиболее часто для маркирования печатных плат при ручном или трафаретном маркировании с небольшим разрешением применяются маркировочные эпоксидные краски **МКЭБ** (маркировочная краска эпоксидная белая) и **МКЭЧ** (маркировочная краска эпоксидная черная).

При маркировке сеткографией применяются специальные кислото-щелочестойкие краски марок **Ст**. Например, **Ст 3.191-01**, черная ТУ 29-02-1126-86.

## 4 Трассировка проводников печатных плат в ручном и интерактивном режимах

### 4.1 Подготовка к трассировке

Графический редактор **P-CAD PCB** позволяет выполнять трассировку проводников печатных плат в ручном и интерактивном режимах. Перед началом его работы с учетом всевозможных требований разрабатываемого проекта (используемой элементной базы, типа применяемой несущей конструкции РЭС, применения готовых, типовых решений и т.п.) и возможностей технологического оборудования необходимо задать важнейшие условия трассировки.

К ключевым параметрам трассировки относят:

1. Размеры ПП и размеры области, доступной для трассировки.
2. Шаг координатной сетки.
3. Форма и размеры контактных площадок.
4. Размеры монтажных отверстий.
5. Слои, на которых выполняется трассировка ПП.
6. Форма и размеры переходных отверстий (для двусторонних и многослойных ПП).
7. Классы цепей (цепи питания, цепи «земля», сигнальные цепи и т.д.).
8. Ширина печатных проводников для различных классов цепей.
9. Допустимые зазоры для каждого слоя ПП: проводник-проводник, проводник - контактная площадка, контактная площадка - контактная площадка, проводник - переходное отверстие, переходное отверстие - контактная площадка, переходное отверстие - переходное отверстие.
10. Используемые алгоритмы трассировки (например, разрешить использовать алгоритм разводки микросхем памяти, алгоритм разрыва ранее проложенных трасс, алгоритм одновременной разводки цепей различного класса, алгоритм сглаживания изгибов проводников и т.п.).
11. Возможность прокладки проводников под углом  $45^\circ$  (для насыщенных ПП данную возможность рекомендуется исключать).
12. Барьеры для трассировки (например, области под планарными разъемами, области под некоторыми ЭРЭ, области ранее оттрассированных фрагментов схемы и т.п.).
13. Правила трассировки: индивидуальных цепей, цепей различного класса, цепей на определенном слое, отдельных слоев и т.д.

14. Стиль соединения проводников (например, разрешение или запрет на Т-образное соединение с ближайшим сегментом проводника или переходных отверстий).

15. Текущий контроль допустимых зазоров

Подготовка выполняется следующим образом

#### ■ Запустить редактор печатных плат *P-CAD PCB*.

- Запустить *P-CAD PCB* можно любым из возможных способов (см. разд. 4.2 [12]).

#### ■ Загрузить файл размещения ПП.

Для этого выполнить команды *File/Open*. В открывшемся стандартном окне *Windows* выбрать файл с именем «*Результат размещения*» и открыть его. На рабочем поле должна появиться ПП размещенными элементами и связями между ними (рис 4.1).

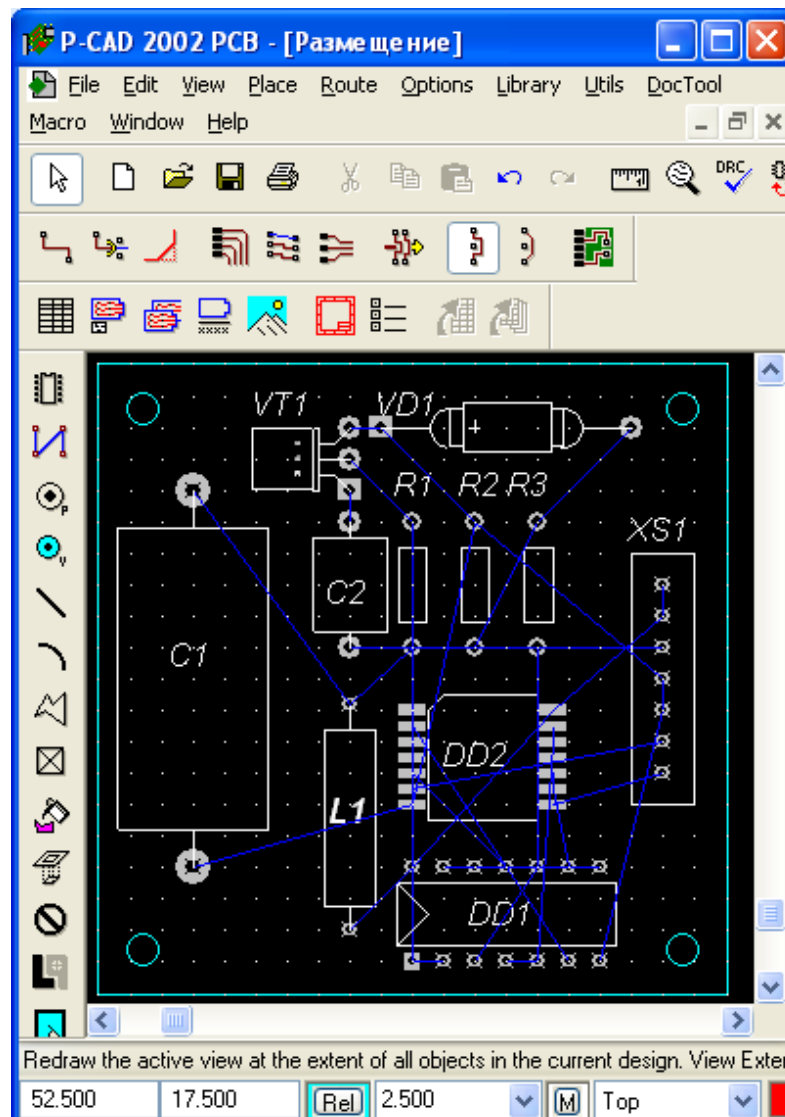


Рисунок 4.1 - ПП с размещенными элементами и связями между ними

#### ■ Сохранить проект.

Для этого выполнить команды *File/Save As* и записать проект под именем «*Ручная трассировка*» в более компактном формате *Binary Files* (с расширением *.pcb*).

## ■ Выполнить настройку конфигурации проекта.

Для этого в меню **Options** командой **Configure** на закладке **General** в области **AutoSave** установить флажок **Enable AutoSave** (рис 4.2)

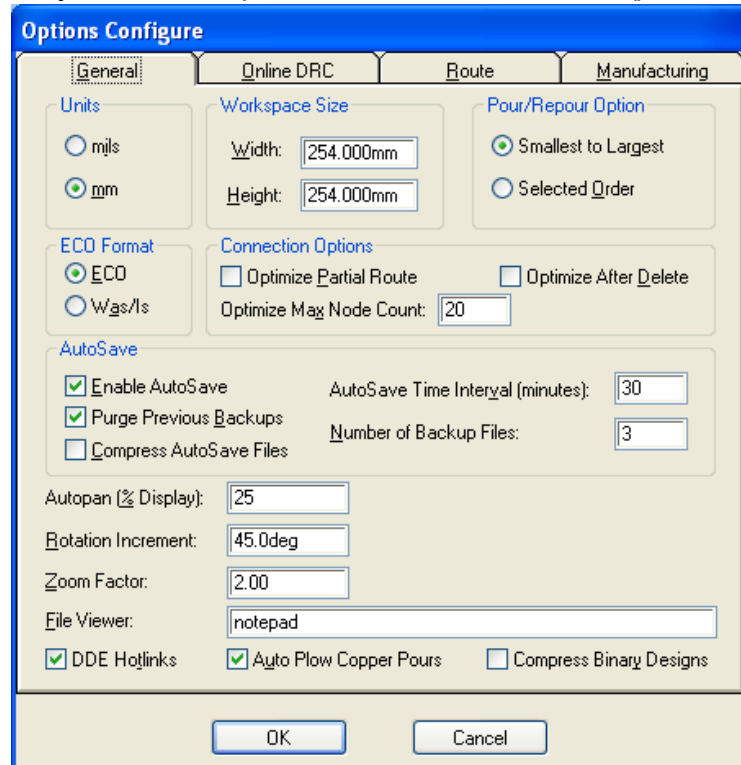


Рисунок 4.2 – Окно **Options Configure** на закладке **General**

В окне **Options Configure** на закладке **Online DRC** в строке **Enable Online DRC** включить режим текущей проверки допустимых зазоров, остальные флажки установить в окнах в соответствии с рис. 4.3. Нарушение зазора отмечается индикатором ошибок в виде круга с перекрестием.

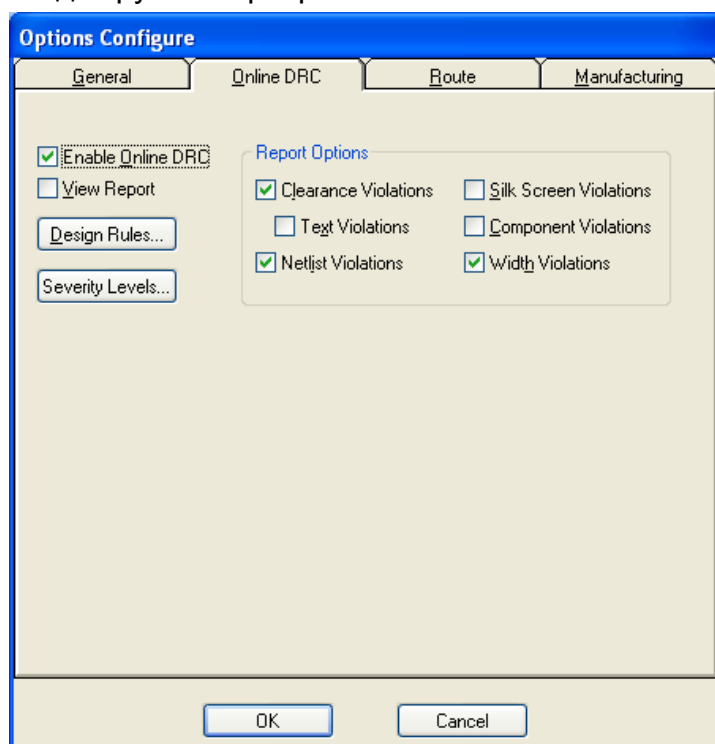


Рисунок 4.3 - Окно **Options Configure** на закладке **Online DRC**

На закладке **Route** установите параметры и флажки, как показано на *рис. 4.4*. Рассмотрим назначение этих элементов более подробно.

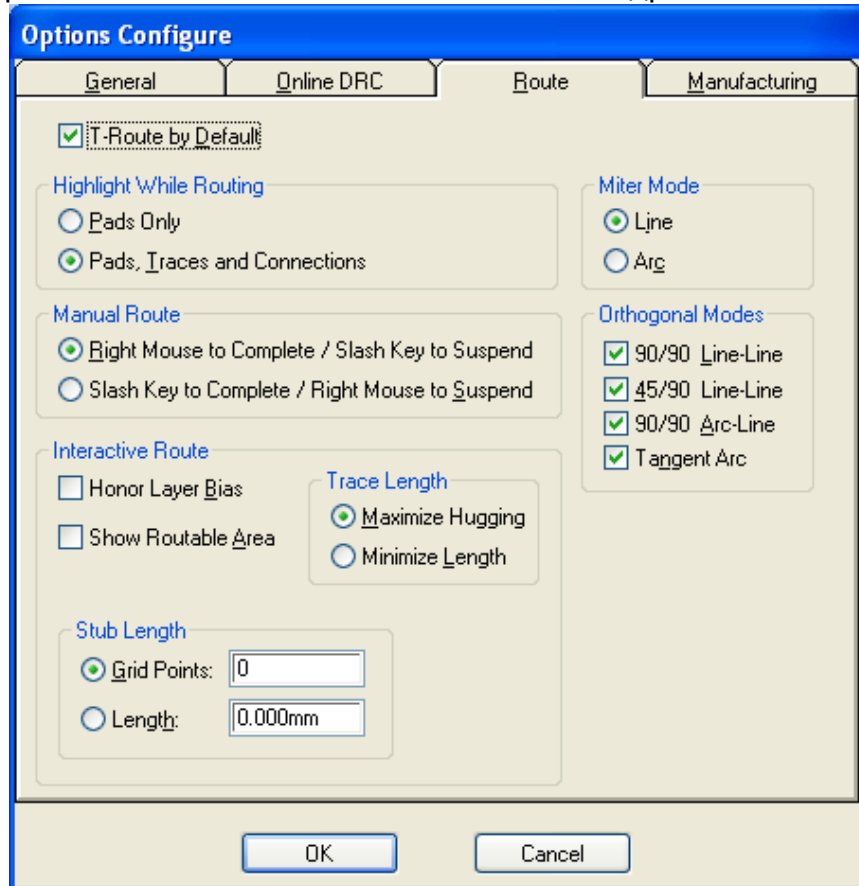


Рисунок 4.4 - Окно **Options Configure** на закладке **Route**

Установка флажка **T-Route Default** включает режим **T**-образной раскладки проводников как основной. В этом случае ответвления трассы могут быть в произвольных местах. Рекомендуется включить этот флажок.

Группа **Highlight While Routing** (Подсветка в процессе трассировки) задает режим подсвечивания текущей цепи во время трассировки. Удобнее работать, если подсвечиваются не только контактные площадки (флажок **Pads Only**), но также проводники и соединения (флажок **Pads, Traces and Connections**).

В рамке **Miter Mode** устанавливается режим сглаживания изломов проводников. Возможно сглаживание отрезком линии под углом 45 градусов (**Line**) или дугой окружности (**Arc**).

Выбор клавиш для завершения интерактивной трассировки цепи производится в рамке **Manual Route**. Установка флажка **Right Mouse to Complete/Slash Key to Suspend** позволяет использовать правую кнопку мыши для автоматического завершения трассы по кратчайшему пути. Клавиша «/» (слеш) в этом случае используется для остановки трассировки. Для тех, кто привык к тому, что при нажатии правой кнопки мыши текущая операция обрывается, предпочтительнее будет второй флажок - **Slash Key to Complete/Right Mouse to Suspend**.

В рамке **Orthogonal Modes** устанавливаются способы проведения проводников и линий. Возможные следующие варианты:

- **90/90 Line-Line** - проведение отрезков линий и проводников под углом 90 градусов;
- **45/90 Line-Line** - рисование линий и проводников под углом 90/45 градусов;



- **90/90 Arc-Line** - производится сопряжение проводников расположенных под углом 90 градусов дугой;
- **Tangent Arc** - создаются дуги касательные к проводникам с текущим радиусом.

В рамке **Interactive Route** задаются параметры интерактивной разводки. В группе **Stub length** задается минимальная длина сегмента линии (в дискретах сетки) для организации соединения с контактной площадкой.

При установленной утилите **InterRoute Gold** доступны еще ряд параметров. Выбор флажка **Maximize Hugging** в группе **Trace Length** обеспечивает максимально тесное прижатие новой трассы к существующим. Режим **Minimize Length** позволяет проложить трассу минимальной длины с минимумом переходных отверстий.

При установленном флажке **Honor Layer Bias** трассы будут прокладываться с учетом приоритетных направлений в отдельных слоях.

Установка флажка **Show Routable Area** делает видимыми предпочтительные области трассировки. При работе в **Windows XP/2000** область трассировки показывается как прозрачная штриховка, а в **Windows 95/98** выделяется цветом.

■ **Установить шаги сетки равные 0,625, 1,25 и 2,5 мм (рис. 4.5) с помощью команд *Options/Grids***

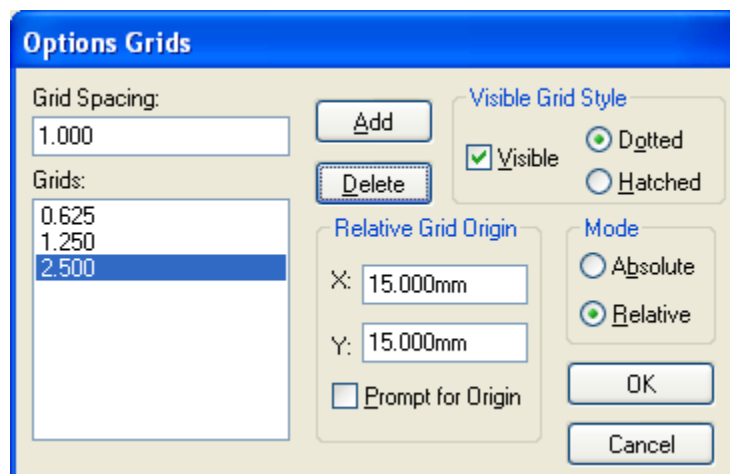


Рисунок 4.5 – Установка шага сетки

■ **Установка допустимых зазоров для каждого слоя трассировки**

По командам **Options/Design Rules** вызывается одноименное окно. На закладке **Layers** этого окна (рис. 4.6) имеется возможность установить допустимые зазоры для следующих элементов печатного монтажа:

- **Pad to Pad** - контактная площадка - контактная площадка (КП - КП),
- **Pad to Line** - КП - проводник,
- **Line to Line** - проводник - проводник,
- **Pad to Via** - КП - переходное отверстие (ПО),
- **Line to Via** - проводник - ПО,
- **Via to Via** - ПО - ПО

Следует установить для каждого слоя трассировки зазор в **0,3** мм. Для этого ввести во всех окнах значение зазора **0,3** для слоя **Top**, нажать на кнопку **Update** и повторить процедуру для слоя **Bottom**. Щелкнуть ЛК по кнопке **Close**.

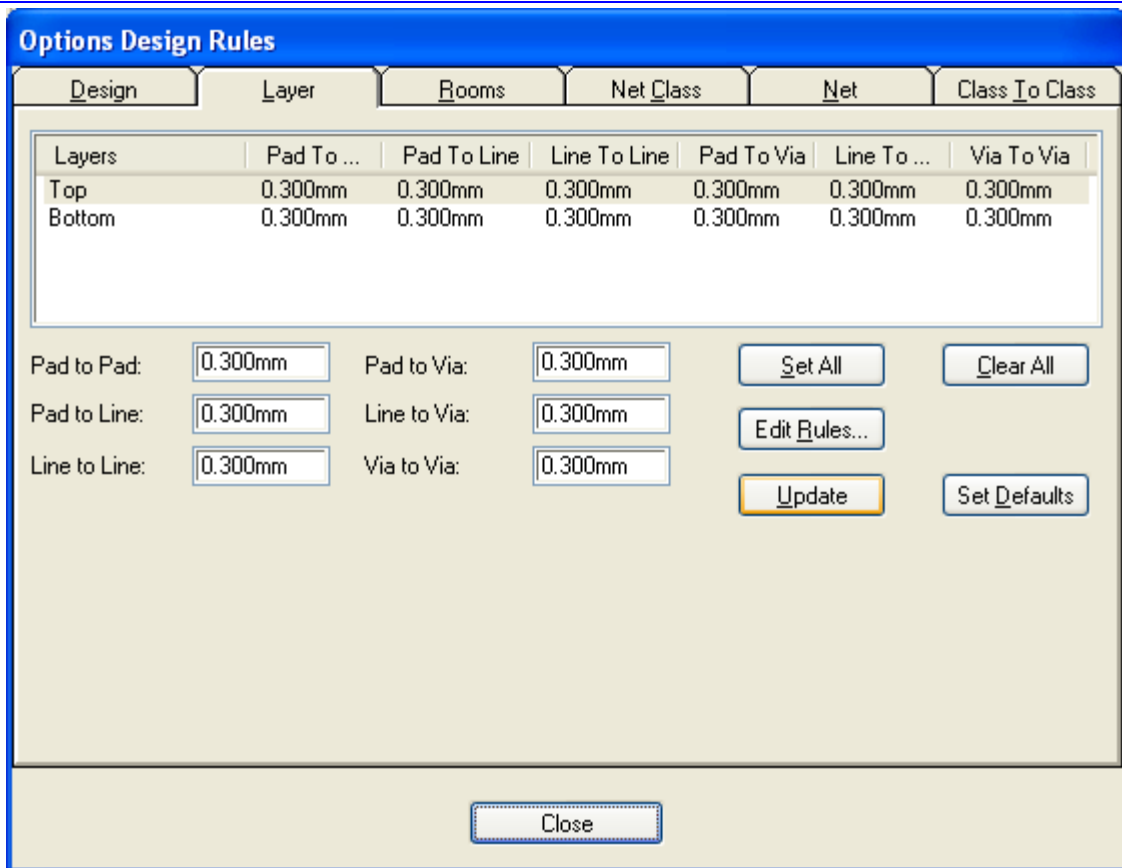


Рисунок 4.6 - Установка допустимых зазоров для элементов печатного монтажа на каждом слое

#### ■ Установка ширины трасс проводников

По командам **Options/Current Line** задать список значений ширины трасс проводников **0,3** и **0,5** мм (рис. 4.7)

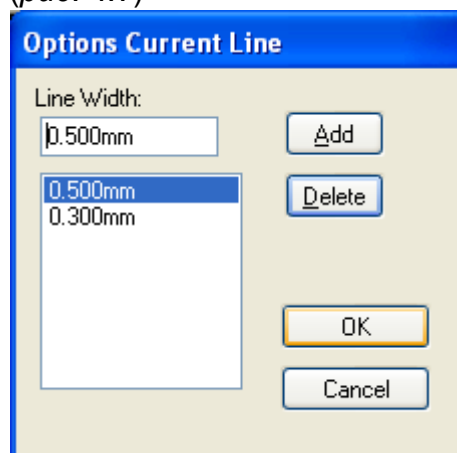


Рисунок 4.7 - Установка ширины трасс проводников

#### 4.2 Оптимизация размещения путем перестановки секций и выводов

В ряде случаев, особенно в случае проектирования достаточно однородных плат цифровых устройств, выполненных на микросхемах малой и средней степени интеграции, перед выполнением трассировки имеет смысл выполнить перестановку логически эквивалентных секций и выводов размещенных ЭРЭ. Это делается для того, чтобы добиться минимального пересечения проводников и макси-

мального сокращения их длины. Данная функция весьма полезна, только пользоваться ею надо достаточно аккуратно, внося коррективы в принципиальные схемы через механизм ECO.

### ■ Инициация перестановки вентиляей и выводов

● Для выполнения оптимизации путем перестановки вентиляей и выводов используются команды **Utils/Optimize Nets** (Оптимизация цепей). Откроется диалоговое окно **Utils Optimize Nets** (рис. 4.8).

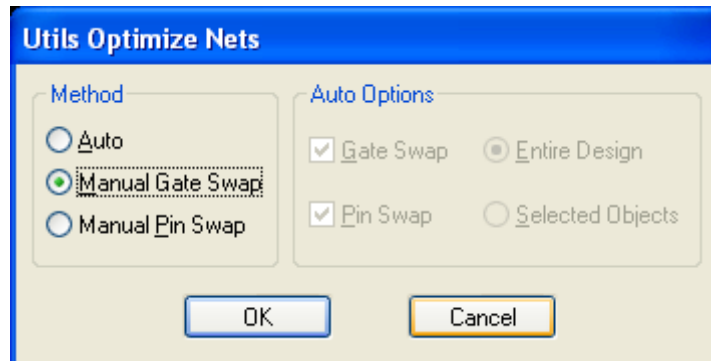


Рисунок 4.8 - Диалоговое окно **Utils Optimize Nets**

● В области **Method** выбирается с помощью соответствующих переключателей метод оптимизации:

- **Auto** - автоматическая оптимизация;
- **Manual Gate Swap** - ручная перестановка эквивалентных вентиляей;
- **Manual Pin Swap** - ручная перестановка эквивалентных выводов.

● Разумно использовать ручную перестановку.

● При перестановке выводов справедливы следующие правила.

- Переставляемые выходы должны быть логически эквивалентными. Величина логической эквивалентности вывода **Pin Eq** не должна быть равна нулю, необходимо также, чтобы она была одинаковой для двух переставляемых выходов. Возможна перестановка неэквивалентных выходов только после подтверждения их при ручной перестановке. В автоматическом режиме перестановка неэквивалентных выходов не производится.
- Если к выводу присоединен проводник или область металлизации, то перестановка не производится.
- Перестановка выходов не выполняется, если цепь, присоединенная к выводу, имеет атрибут **OPTIMIZE = "NO"**.
- Перестановка выходов не производится, если компонент имеет атрибут **NOSWAP = "Yes"**.

● При перестановке секций (вентилей) справедливы следующие правила.

- Вентиля должны быть логически эквивалентными.
- Вентиля должны принадлежать компонентам одного и того же типа (**Type**) и номинала (**Value**). Последнее позволяет выполнить перестановку дискретных компонентов (резисторов, конденсаторов и т.п.).
- Перестановка вентиляей между компонентами может быть ограничена с использованием атрибута **SWAPEQUIVALENCE**. Например, одна схема может быть использована для контроля другой схемы на плате, и использование атрибута приемственности перестановок

**SWAPEQUIVALENCE** позволяет вносить одновременные изменения в плату и схеме.

- Если к выводу присоединен проводник или область металлизации, то перестановка выводов не производится.
- Перестановка выводов не производится, если цепь, присоединенная к выводу, имеет атрибут **OPTIMIZE = "NO"**.
- Перестановка выводов не производится, если компонент имеет атрибут **NOSWAP = "Yes"**.

#### ■ Вручную поменять местами соединения 1-го и 2-го выводов разъема.

● Для ручной перестановки секций (выводов)<sup>4</sup> необходимо выбрать переключатель **Manual Gate Swap** в диалоговом окне **Utils Optimize Nets** (см. рис. 4.8). В этом случае курсор изменяет свою форму на диагональное перекрестие. Отменить режим перестановки можно клавишей <Esc> или щелчком ЛК мыши.

● Щелкнуть ЛК по 1-му выводу, принадлежащему вентилю, который необходимо переставить. Все цепи, присоединенные к выбранному вентилю, окрашиваются в голубой цвет выделения. В фиолетовый цвет окрашиваются все цепи и контактные площадки, принадлежащие эквивалентным вентилям (рис. 4.9).

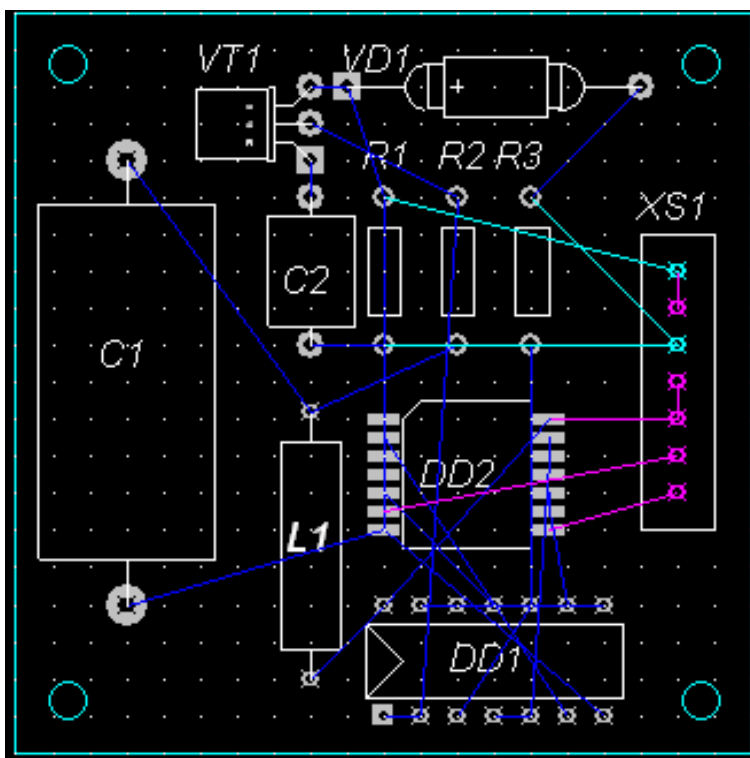


Рисунок 4.9 - Выделение 1-го и 2-го выводов XS1

● После этого щелкнуть ЛК по 2-му выводу, с которым необходимо поменять соединение. Откроется диалоговое окно **Manual Gate Swap** ручной перестановки выводов, показанное на рис. 4.10. В нем указывается уменьшение (со знаком «-») или увеличение (со знаком «+») длины как отдельных цепей, которые перемещаются, так и суммарной длины всех соединений. В данном случае перестановка сократит длину соединений, поэтому следует нажать кнопку **Swap**, и соединения поменяются местами.

<sup>4</sup> Напомним, что в разъеме каждый вывод – это эквивалентная секция.

Если делается попытка перестановки вентиляей, к которым она неприменима, раздается предупреждающий звуковой сигнал.

- Вслед за тем следует попытаться аналогичным образом последовательно поменять местами и другие пары соединений на разъеме.

- Подобным образом можно поменять и эквивалентные секции микросхем.

### ■ Вручную поменяем местами эквивалентные выводы в секциях микросхем и других ЭРЭ.

- Для этого вновь заполнить команды **Utils/Optimize**

**Nets**, но в открывшемся диалоговом окне в области **Method** выбрать **Manual Pin Swap**. Курсор изменит свою форму на диагональное перекрестие. Перестановка вывода может быть отменена нажатием клавиши **<Esc>** или щелчком ПК мыши.

- Затем выбирается вывод, который будет переставлен. Все цепи, подключенные к нему, и их контактные площадки окрашиваются в **ярко-голубой цвет**, все эквивалентные выводы окрашиваются в **фиолетовый цвет**. Щелчком ЛК мыши выбирается контактная площадка для перестановки.

При попытке перестановки логически неэквивалентных выводов появляется предупреждение.

- После выбора вывода для перестановки появляется диалоговое окно ручной перестановки выводов (рис. 4.11), в котором отображаются имена цепей и изменение длины электрической связи в результате такой перестановки. Для выполнения перестановки нужно нажать кнопку **Swap**, для отмены - **Cancel**.

- В результате таких перестановок достигается лучший вариант использования секций и выводов, который предполагает минимальную длину соединений и минимальное число пересечений связей.

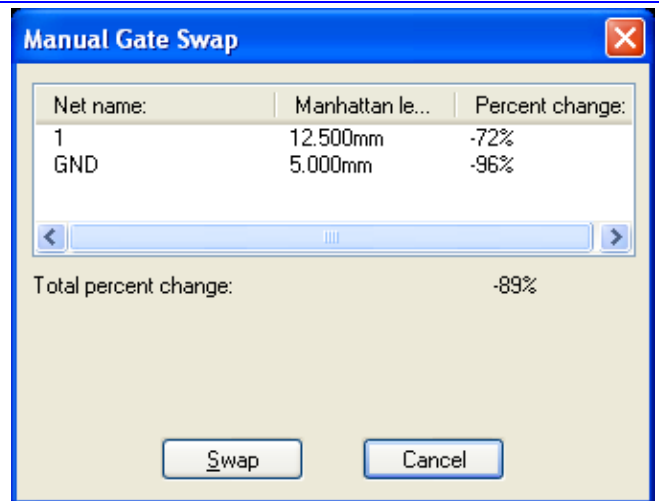


Рисунок 4.10 - Диалоговое окно **Manual Gate Swap**

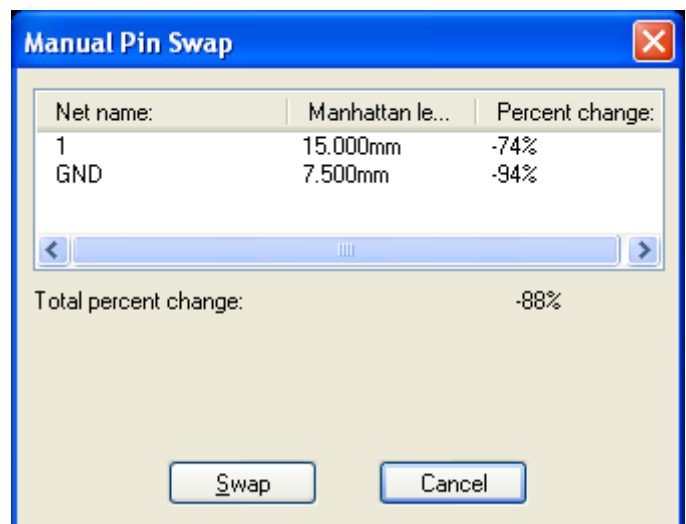


Рисунок 4.11 - Диалоговое окно **Manual Pin Swap**

### ■ Поменяем местами в автоматическом режиме эквивалентные выводы и секции микросхем и других ЭРЭ.

- Выполнить команды **Utils/Optimize Nets** и в открывшемся диалоговом окне в области **Method** выбрать **Auto** (см. рис. 4.8).

- При выборе автоматического режима в области **Auto Options** могут быть заданы (отмечены соответствующими флажками) параметры оптимизации:

- **Gate Swap** - перестановка эквивалентных вентиляей;

- **Pin Swap** - перестановка эквивалентных выводов;
- **Entire Design** - оптимизация в пределах всего проекта;
- **Selected Objects** - оптимизация выбранных объектов.

● После выполнения автоматической перестановки цепей появляется окно с отчетом, представленное на *рис. 4.12*. В нем указываются в области **Settings** параметры оптимизации цепей, текущее состояние процесса оптимизации - **Current Status** и отчет о количественных результатах оптимизации - **Cumulative Status**:

- **Numbers of gates swapped** - число переставленных вентиляей;
- **Numbers of pins swapped** - число переставленных выводов;
- **All net total length before** - длина всех цепей до оптимизации;
- **All net total length after** - длина всех цепей после оптимизации;
- **All net total length changed** - изменение длины всех цепей в процессе оптимизации;
- **Selected net total length before** - длина выбранных цепей до оптимизации;
- **Selected net total length after** - длина выбранных цепей после оптимизации;
- **Selected net total length changed** - изменение длины выбранных цепей в процессе оптимизации.

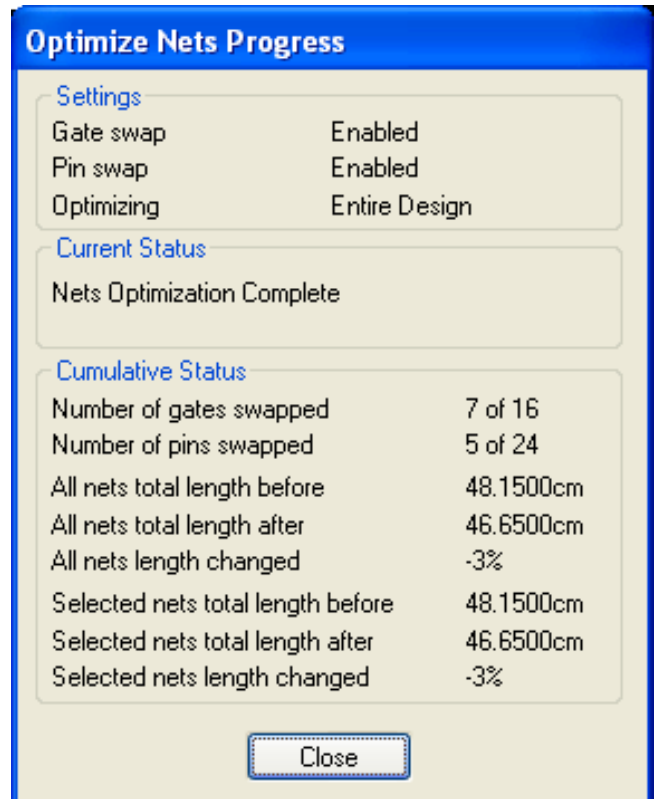


Рисунок 4.12 - Отчет о перестановке вентиляей и контактов

Все перестановки необходимо записывать в файл изменений (**ECO**-файл) с помощью команды **Utils/Record ECOs**, которая может быть вызвана из главного меню или нажатием соответствующей пиктограммы. В дальнейшем этот файл используется для обратной коррекции принципиальной электрической схемы.

Диалоговое окно, открываемое при выборе команды **Utils Record ECOs**, показано на *рис. 4.13*



Рисунок 4.13 - Диалоговое окно **Utils Record ECOs**

### 4.3 Выбор способа трассировки

Немалое количество проектировщиков РЭС полагают, что автоматическую трассировку печатных плат следует проводить только в случае низкочастотных и неотчетственных плат, а во всех остальных случаях лучше проводить трассировку вручную всей платы или, по крайней мере, ее наиболее ответственных цепей. По всей вероятности, в ряде случаев это мнение обосновано. Тем более, что даже после проведения автоматической трассировки обычно требуется ручная или интерактивная оптимизация печатного монтажа.

Для ручной и интерактивной трассировки в системе **P-CAD** предлагаются инструменты, которые условно можно разделить на три группы:

- **Инструменты для ручной трассировки**, к которым можно отнести команду **Route Manual**, с помощью которой прокладка трас производится целиком вручную в жестком соответствии с замыслом разработчика. Система **P-CAD** в этом случае исполняет роль электронного кульмана, осуществляя, тем не менее, пассивный контроль за соблюдением технологических норм и правил.
- К более интеллектуальным **инструментам интерактивной трассировки** можно отнести команду **Route Interactive**, осуществляющую трассировку и инструмент для сглаживания изгибов проводников **RouteMiter**. В этом режиме разработчик лишь указывает направление фрагмента трассы, а система формирует ее сама с учетом принятых правил трассировки. При желании возможно автоматическое завершение начатой трассы и автоматическая корректировка фрагментов уже проложенных трасс (режим **Push Traces** - расталкивание трасс).
- К **специальным инструментам интерактивной трассировки** относят:
  - **Route Fanout** - для полуавтоматической генерации выравнивающих отрезков трасс для группы проводников;
  - **Route Bus** - для одновременной трассировки в интерактивном режиме нескольких параллельных проводников, образующих шину или жгут;
  - **Route MultiTrace** - для автоматической трассировки (в одном слое) несколько соединений, указанных пользователем.


В любом случае при трассировке необходимо учитывать следующие **критерии качества результатов трассировки**:

- процент реализованных соединений,
- суммарная длина проводников,
- число монтажных слоев,
- число межслойных переходов,
- равномерность распределения проводников,
- минимальная область трассировки,
- минимизация длины параллельных участков близко лежащих проводников и др.

### 4.4 Ручная трассировка соединений печатных плат

■ **Получают рисунок ПП в режиме ручной трассировки (*Route Manual*) в следующем порядке:**

- Перейти в режим ручной трассировки можно либо с помощью команд

меню **Route /Manual** (трассировка/ручная), либо с помощью пиктограммы  на инструментальной панели. Эта команда является достаточно гибким инструмен-

том, позволяющим проводить трассы точно по желанию пользователя. Перед началом трассировки необходимо разместить компоненты на печатной плате и задать электрические связи между их выводами.

● Для проведения трассы необходимо предварительно выбрать сигнальный слой, в котором будет располагаться первый сегмент трассы (например, верхний слой **Top**), и выбрать или задать ширину сегмента. Для выбора сигнального слоя и ширины проводника используйте соответствующие окна со списком в статусной строке редактора **P-CAD PCB** (рис. 4.14).

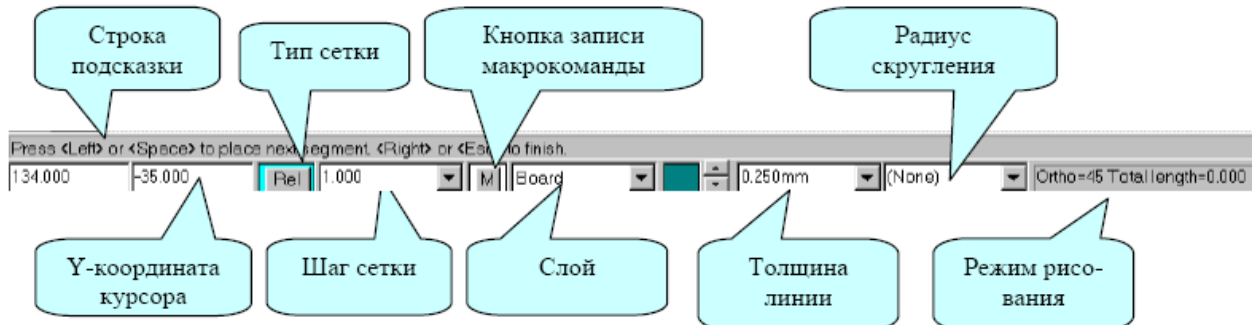


Рисунок 4.14 - Использование статусной строки редактора **P-CAD PCB** для задания параметров трассировки

● Используя клавиши серый «+» и «-» на цифровой клавиатуре установить масштаб изображения таким, чтобы были видны узловые точки сетки. Это значительно облегчит процесс трассировки.

● Начинать трассу можно только от **контактных площадок (КП)**, которые имеют электрические связи. Начало трассы фиксировать щелчком **ЛК** внутри **КП**, **переходного отверстия (ПО)** или существующей трассы.

Рисовать фрагмент проводника перемещением курсора при нажатой **ЛК**. Пока нажата **ЛК** мышки, на экране видно контурное изображение вводимого сегмента и его конец можно сдвигать (см. рис. 4.15)

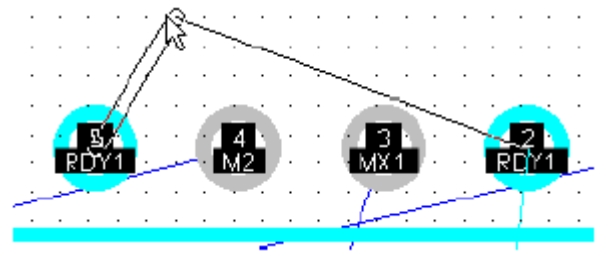


Рисунок 4.15 - Вид текущего сегмента проводника при нажатой **ЛК** мыши

● Отпускание **ЛК** фиксирует точку излома. Форму излома трассы (ортогональная или по диагонали) переключать при нажатой **ЛК** нажатием клавиши «O», а нажатием клавиши «F» - менять расположение точки излома.

● Проводник между двумя **КП** можно также рисовать и двумя щелчками **ЛК**: в 1-й **КП** и 2-й **КП**.

● Смену текущего слоя в процессе прокладки трассы выполнять нажатием клавиши «L» или выбором в строке состояний нужного слоя. При этом автоматически вставляется **ПО** и трасса переводится на другой слой.

● Ширину проводника без прерывания прокладки трассы можно менять с помощью строки состояний.

● Завершать трассировку проводника (до **КП** вывода радиоэлемента)

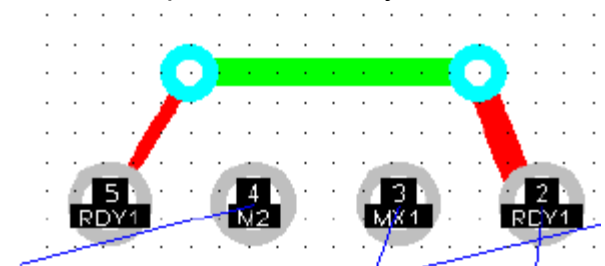


Рисунок 4.16 - Фрагмент трассы с проводниками разной ширины расположенными в разных слоях



щелчком ПК или выбором другой команды. Завершение трассы точно на КП отмечается ромбом с перекрестием.

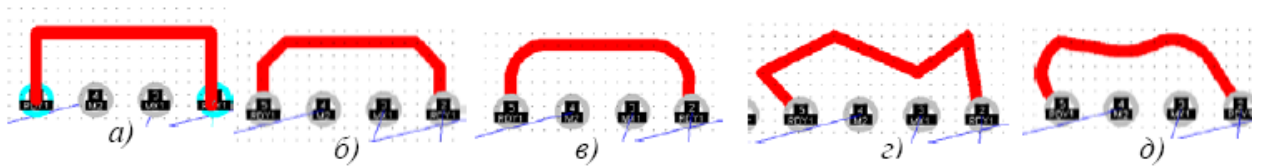



Рисунок 4.17 - Варианты выполнения изломов проводников

- По умолчанию при щелчке ПК мыши система пытается завершить неразведенную связь сегментом по кратчайшему расстоянию от текущей до конечной точки. Как правило, такое соединение выполняется некорректно, поэтому лучше не пытаться заставить систему самостоятельно завершать трассу. Прервать выполнение трассировки без ее завершения можно клавишами с косой чертой «/» или «\».

Чтобы удалить последний проложенный сегмент трассы, используется клавиша **Backspace**. Эта клавиша позволяет производить поочередное удаление нескольких проложенных ранее сегментов.

- Удалить весь введенный фрагмент трассы можно после завершения его трассировки командой **Edit/Undo** (аналог – кнопка  на инструментальной панели.).

- Обычно варианты сопряжения отдельных сегментов трассы определены назначением устройства или технологическими ограничениями. В системе **P-CAD** предусмотрены различные варианты сопряжения отдельных сегментов трасс:

- проводники ортогональны (рис. 4.17,.а);
- сглаживание отрезками прямых под углом 45 градусов (рис. 4.17, б);
- сопряжение по дуге (проводники ортогональны) (рис. 4.17,.в);
- проводники под любым углом без сглаживания (рис. 4.17,.г);
- сглаживание касательными дугами (проводники под любым углом) (рис. 4.17,.д).

Переключение между различными режимами сглаживания в процессе ручной трассировки производится с помощью горячей клавиши «С>». При этом горячая клавиша «F» позволяет изменить положение точки излома при сглаживании прямыми линиями и сопряжении по дуге.

В пределах трассы система допускает использование любых вариантов сглаживания или их комбинаций.

- Удобно установить по умолчанию в качестве основного - режим так называемого **T-образного** соединения проводников (рис. 4.18.).

Реализация такого соединения при выполнении команды **Route/Manual** имеет свои особенности. Во-первых, поскольку трасса реализуется как полилиния, т.е. конец одного сегмента является началом другого, необходимо вначале полностью создать верхнюю часть соединения, завершив его созданием нажатием клавиши «/» или ПК мыши.

Затем на существующей трассе указать точку подключения нового фрагмента (в данном случае вертикального) щелчком левой кнопки мыши при нажатой клавише **Shift**. Дальнейшие построения выполняются как обычно.

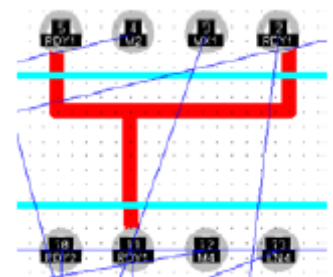



Рисунок 4.18 - T-образная трассировка

● При прокладке трассы вручную возможны нарушения технологических ограничений. Система сообщает о выявленных нарушениях, если включен режим

**Online DRC** (нажата кнопка ) , но сама их не исправляет. После завершения трассы при включенном режиме **Online DRC** в строке информации отображается число ошибок

● В строке информации в процессе прокладки трассы отображается информация о приращении координат текущего сегмента ( $dX$ ,  $dY$ ) и общая длина проводника (**Total Length**).

### ■ Прокладка трасс на ПП учебного примера в режиме ручной трассировки (**Route Manual**)

● Прокладку трасс начнем с коротких соединений сигнальных цепей. Для этого в строке состояний установить слой **Top** (трассы красного цвета) и ширину трассы 0,3 мм.

● Первыми соединяем КП выводов тех элементов, которые стоят рядом и трассы имеют простую конфигурацию (рис. 4.19).

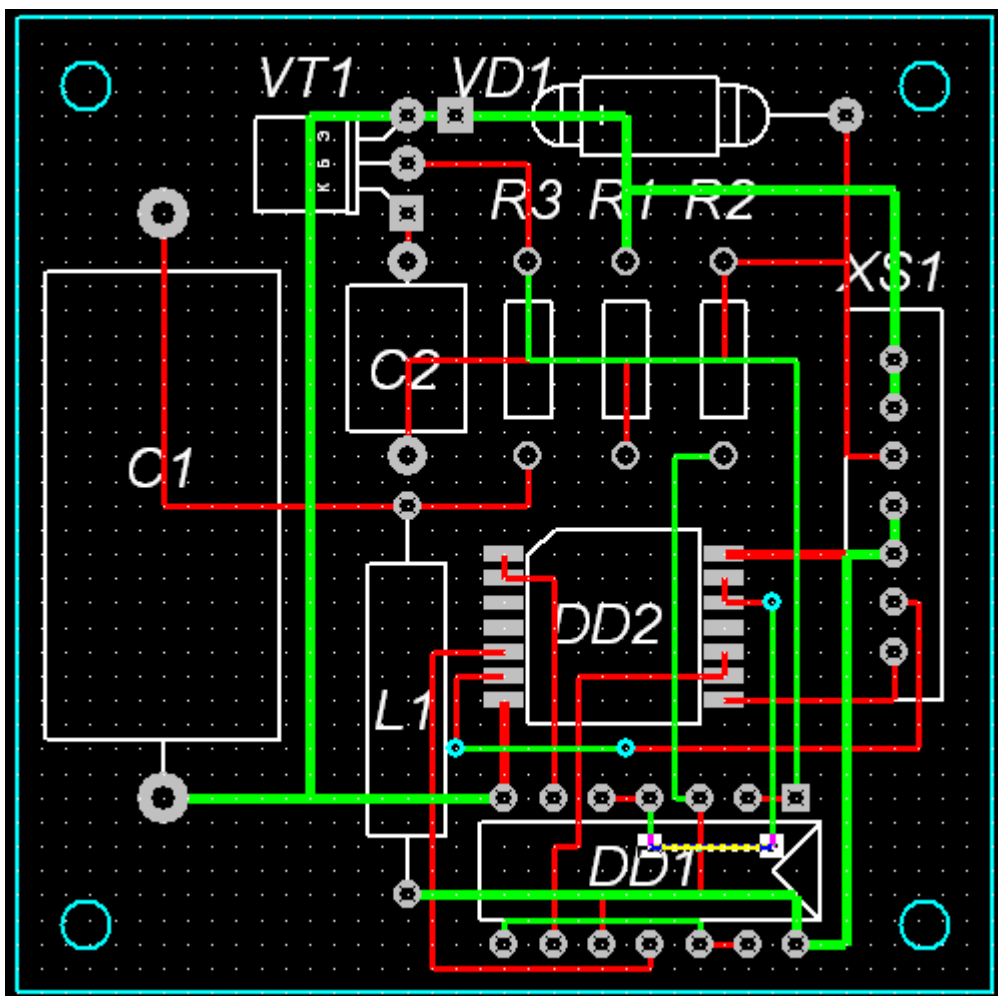


Рисунок 4.19 - Проведение трасс в режиме ручной трассировки

● Для цепей питания и заземления ширину трассы установим 0,5 мм и постараемся провести в слое **Bottom** (см. рис. 4.19). Однако, так как выводы микросхемы **DD2** планарные, следовательно, трасса к ним должна подходить в слое **Top**. Поэтому от КП 7-го и 14-го выводов **DD2** следует проводить трассы вначале

в слое **Top**, а затем, нажав клавишу «L», перейти в слой **Bottom** и завершить трассу.

- В процессе разводки связей обычно становится ясно, что для получения более простого рисунка проводников необходимо часть элементов переместить на плате на другое место или повернуть их необходимый угол.

- После завершения трассировки печатной платы надо сохранить полученный результат проектирования рисунка ПП под именем «**Ручная трассировка**». Для этого выполнить команды **File/Save**.

#### 4.5 Интерактивная трассировка цепей печатных плат

■ **Получают рисунок ПП средствами графического редактора P-CAD PCB в режиме интерактивной трассировки (*Route Interactive*) с учетом тех же критериев качества трассировки в следующем порядке:**

- Загрузим файл размещения ПП с помощью команды **File/Open**. В открытом стандартном окне **Windows** выбрать файл с именем «**Результат размещения**» и открыть его. На рабочем поле должна появиться ПП размещенными элементами и связями между ними (см. *рис 4.1*).

- Командами **File/Save As** сохранить проект под именем «**Интерактивная трассировка**» в более компактном формате **Binary Files** (с расширением **pcb**).

- Перейти в режим интерактивной трассировки можно либо с помощью команд меню **Route/Interactive** (трассировка/интерактивная), либо с помощью



пиктограммы на инструментальной панели. При интерактивной трассировке автоматически огибаются препятствия и автоматически выдерживаются заданные зазоры.

- Установить масштаб изображения таким, чтобы были видны узловые точки сетки.

- В строке состояний выбрать сигнальный слой, в котором будет располагаться первый сегмент трассы (например, верхний слой **Top**).

- Там же выбрать или задать текущую ширину сегмента.

- Для начала трассировки активизируйте команду **Route/Interactive**, нажмите **ЛК** мыши на контактной площадке, с которой должна начинаться трасса, и, не отпуская кнопку мыши, перемещайте курсор в направлении следующей контактной площадки, входящей в трассируемую цепь. За курсором потянется контурное изображение участка трассы (уже не одиночного сегмента, как было в предыдущем случае), автоматически огибающее, если это возможно встречающиеся препятствия (*рис. 4.20*). При этом соблюдаются допустимые зазоры.

- Конфигурация трассируемого участка трассы будет динамически меняться в зависимости от положения курсора и наличия препятствий.

- Фиксировать проложенный сегмент трассы отпуская **ЛК**.

- Завершать прокладку трассы отпуская **ЛК** в точке окончания линии связи.

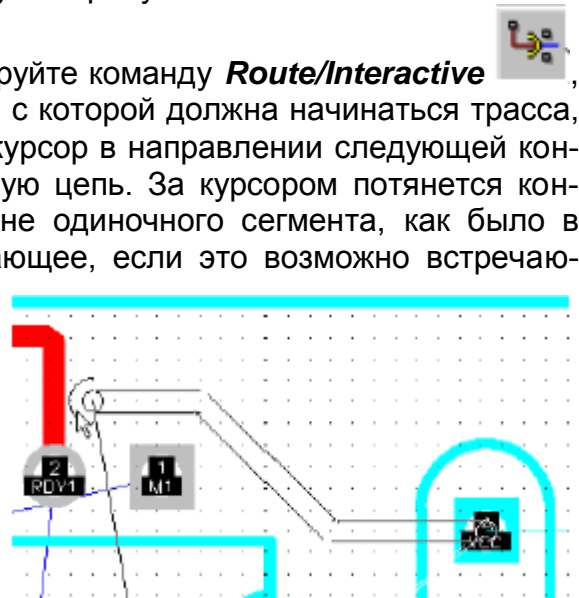


Рисунок 4.20 - Прокладка участка трассы в интерактивном режиме

- Для создания следующего участка вновь нажимайте **ЛК** мыши и перемещайте курсор в новое положение, следя за конфигурацией создаваемого проводника.
- Как и в ручном режиме вначале трассировать короткие соединения сигнальных цепей.
- При нажатии **ПК** мыши появляется контекстное меню интерактивной трассировки, содержащее следующие команды (рис. 4.21):



- **Complete** - автоматически завершает прокладку текущей трассы по заданным правилам проектирования<sup>5</sup>. В случае неудачи выдается звуковой сигнал.


- **Push Traces** - включает режим «расталкивания» проводников. Этот режим можно также включить кнопкой  на инструментальной панели. На (рис. 4.22) показана иллюстрация работы с его использованием;

Рисунок 4.21 - Контекстное меню интерактивной трассировки

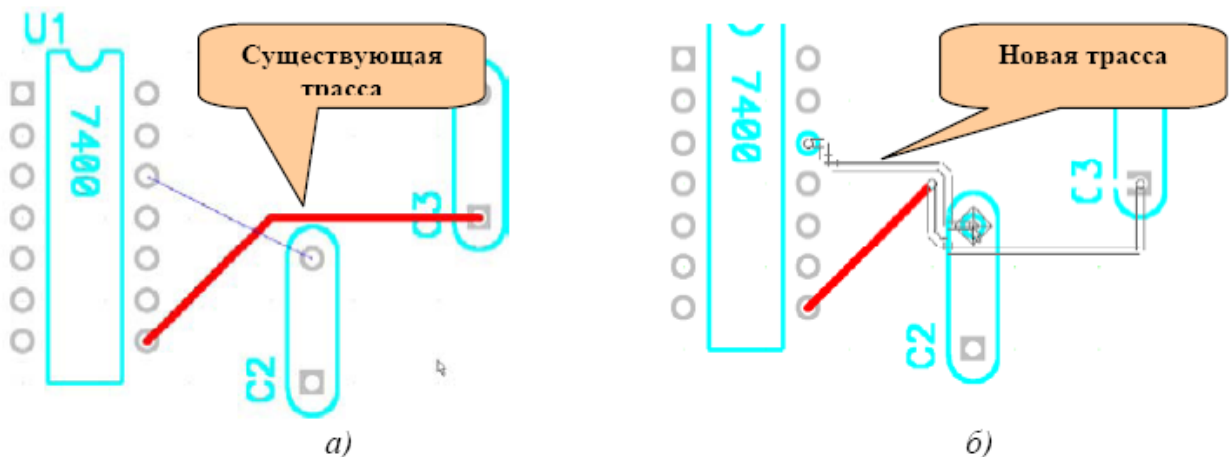


Рисунок 4.22 - Действие режима расталкивания трасс (**Push Traces**): а - исходное состояние на фрагменте ПП; б - попытка реализовать соединение между микросхемой и конденсатором С2. Видно, что система автоматически сместила часть существовавшей трассы (показана контуром) так, чтобы появилась возможность проложить новую трассу.

- **Suspend** - приостанавливает прокладку трассы, оставляя ее незавершенной;
- **Cancel** - отменяет последний введенный сегмент и прекращает трассировку проводника;
- **Options** - установка параметров конфигурации проекта по команде **Option/Configure**;
- **Layers** - открытие окна команды **Option/Layers** для изменения структуры слоев платы;
- **Via Style** - Открытие окна команды **Option/ Via Style** для выбора стиля текущего переходного отверстия или его редактирования;

<sup>5</sup> При автоматическом завершении трассы переключения со слоя на слой не происходит, т.е. система пытается реализовать весь фрагмент в текущем слое!!

- **Unwind** - отмена ввода последнего сегмента (аналогично нажатию клавиши **Backspace**).

■ Прокладка трасс на ПП учебного примера в режиме интерактивной трассировки (**Route Interactive**).

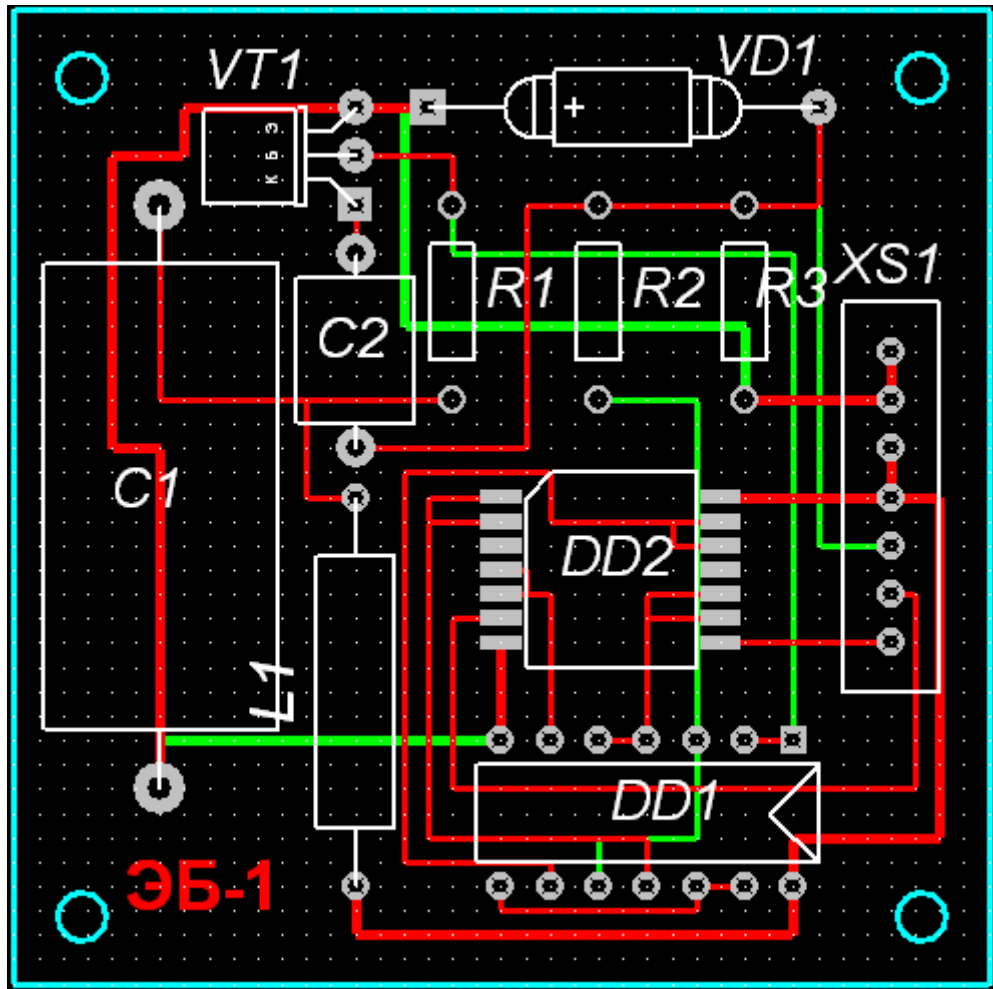



Рисунок 4.23 - Проведение трасс в режиме интерактивной трассировки

- Трассировку выполним в соответствии с рис. 4.23.
- Для сохранения полученного результата выполнить команды **File/Save**.

#### 4.6 Сглаживание проводников

При разработке ПП для улучшения электромагнитной совместимости рекомендуется сглаживать прямые углы между проводниками. В системе **P-CAD** для этой цели может использоваться команда **Route/Miter**, активизируемая из основного меню или

кнопкой  на инструментальной панели.

- Команда активизируется и курсором указывается угол трассы (см. рис. 4.24). При нажатой ЛК мыши смещением курсора

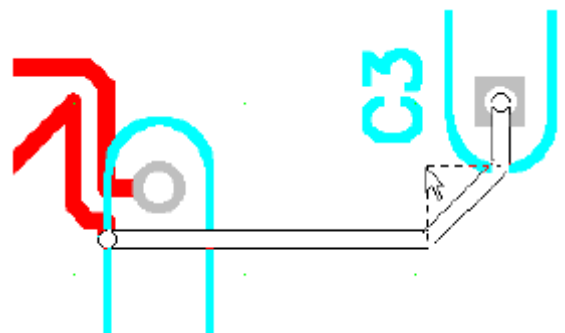


Рисунок 4.24 - Сглаживание проводника командой **Route/Miter**

задается необходимая величина сглаживания.

- Режим сглаживания (дуга или линия) устанавливается на закладке **Route** команды **Options/Configure**.

- С помощью команды **Route/Miter** допустимо также проводить сглаживание Т-образных соединений проводников, как показано на рис. 4.25.

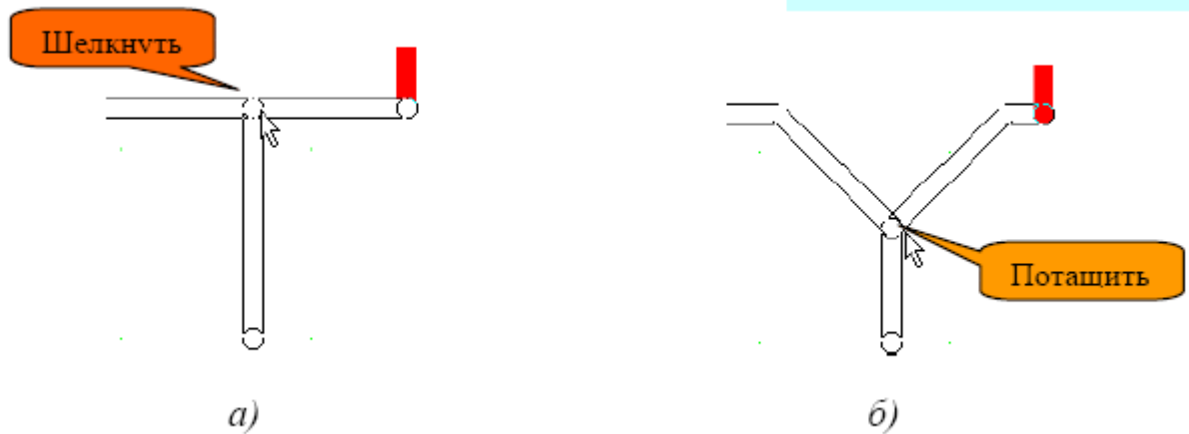


Рисунок 4.25 - Сглаживание Т-образных соединений проводников командой **Route/Miter**

- Результат сглаживания представления печатного монтажа, приведенного на рис 4.24, показан на рис. 4.26.

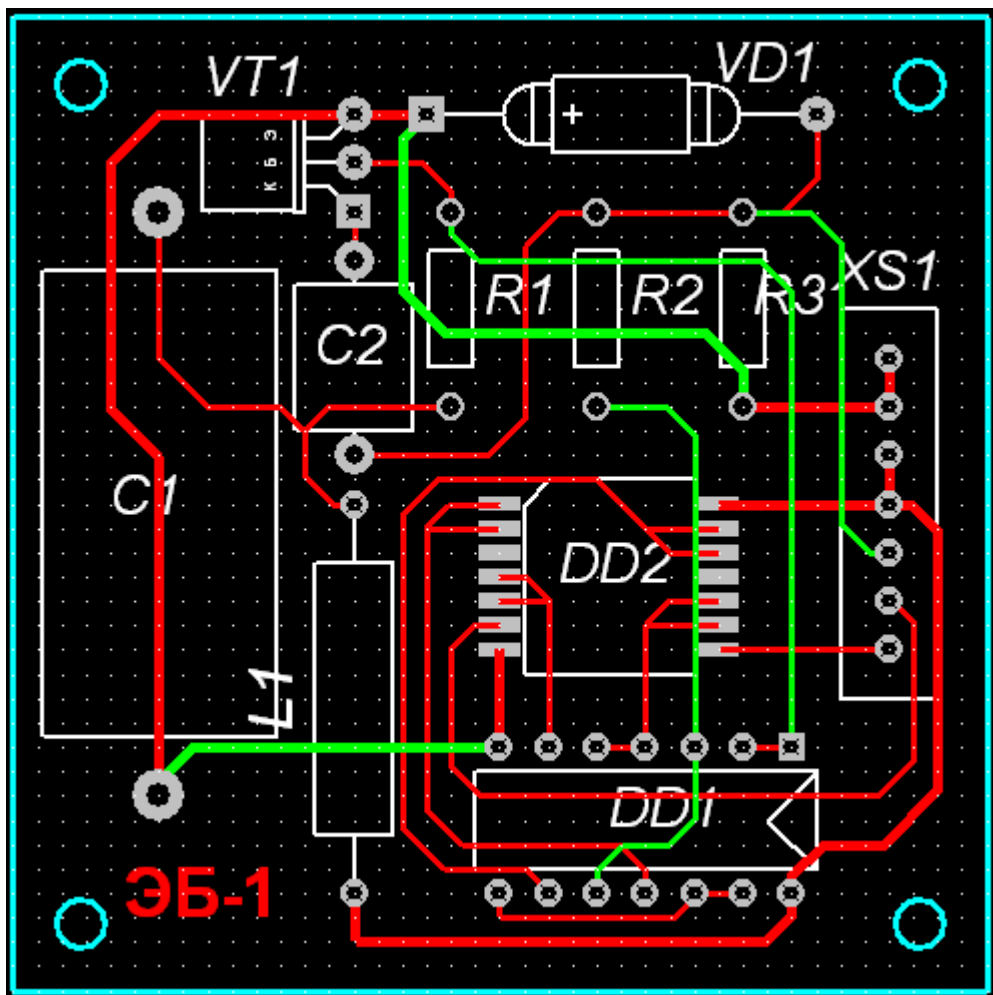


Рисунок 4.26 – Сглаживание трасс с помощью команды **Route/Miter** печатной платы, полученной в режиме интерактивной трассировки

#### 4.7 Проверка печатной платы

После разработки рисунка печатной платы его необходимо проверить на соответствие правилам проектирования, исходной принципиальной схеме и соблюдения технологических ограничений.

Запуск утилиты проверки (верификации) осуществляется с помощью команды **Utils/DRC**. Откроется диалоговое окно **Utils Design Rule Check**.

Отметив флажок **View Report** (Вывод отчета на экран), можно вывести текст отчета на экран. Флажок **Annotate Errors** (Пометка на ПП мест ошибок) позволяет отметить ошибки на плате специальными значками-индикаторами, которые автоматически исчезают при исправлении ошибки (рис. 4.27).

Группа флажков в области **Report Options** позволяет задать правила проверки платы (рис. 4.28):

- **Netlist Compare** - сравнение списков соединений текущей печатной платы и принципиальной схемы или другой платы;

- **Clearance Violations** - нарушение зазоров;

- **Netlist Violations** - проверка соответствия соединений проводников текущей печатной платы с исходным списком цепей проекта;

- **Unrouted Nets** - неразведенные цепи;

- **Text Violations** - проверка на нарушение зазоров текста;

- **Width Violations** - проверка на нарушение ширины печатного проводника;

- **Unconnected Pins** - проверка на наличие неподсоединенных выводов;

- **Net Length** - проверка длины цепей;

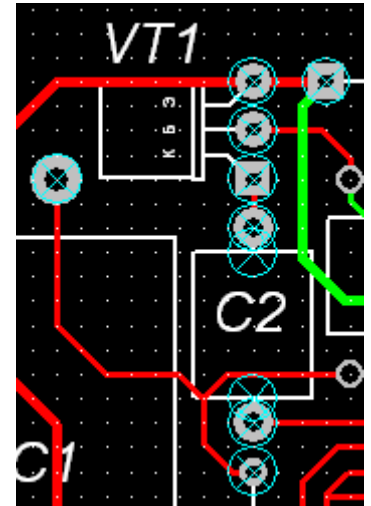


Рисунок 4.27 - Индикация ошибок

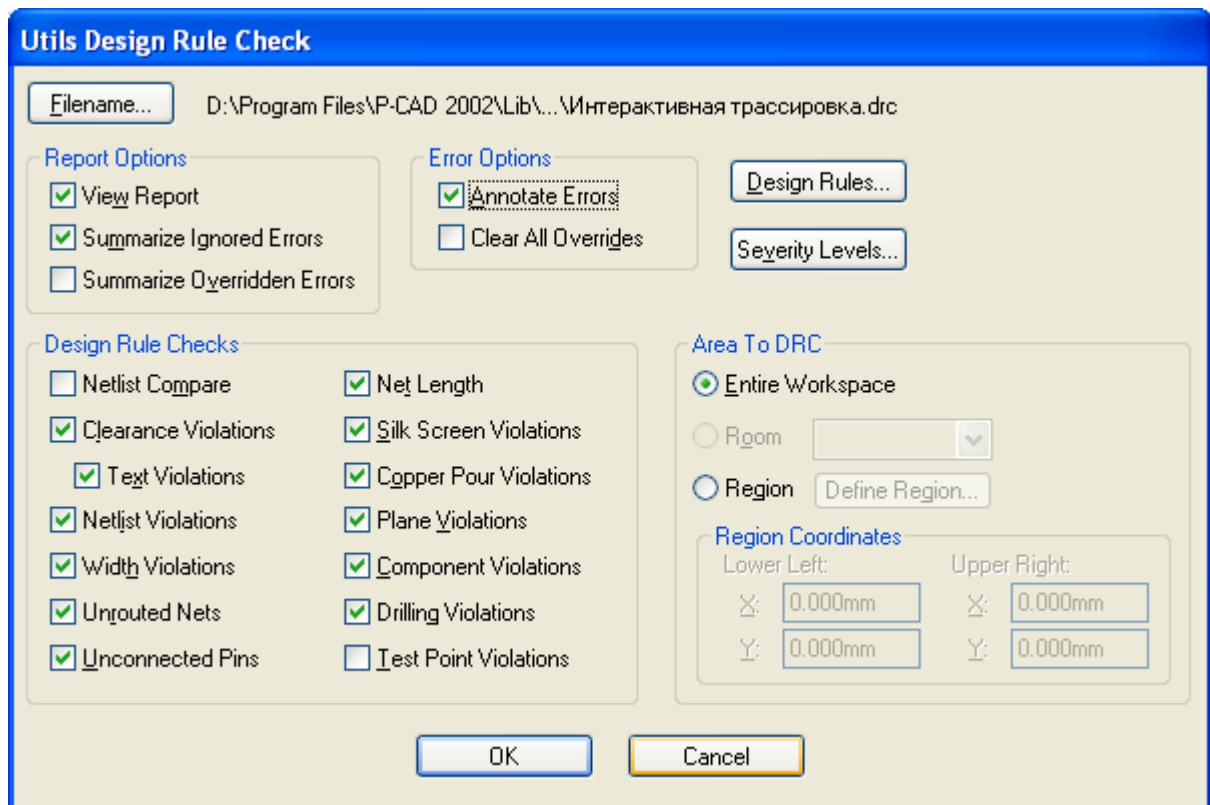


Рисунок 4.28 – Диалоговое окно задания способов проверок проекта

- **Silkscreen Violations** - нарушение зазоров между КП или ПО и маркировкой в слое шелкографии.
- **Copper Pour Violations** - проверка правильности выполнения областей металлизации в сигнальных слоях на величину зазоров, наличие "островков" и т.п.;
- **Plane Violations** - проверка на нарушение областей металлизации во внутренних слоях типа "земля" или "питание";
- **Component Violations** - обнаружение ошибок в размещении компонентов в комнате, нарушение высоты и т.п.;
- **Drilling Violations** - проверка правильности сверления отверстий.

С помощью кнопки **Filename** выбирается имя файла отчета с расширением **.drc**, в который заносится информация об ошибках.

В результате на экран выводятся сообщения об ошибках (рис. 4.29). Из них следует, что в нескольких местах трассы проведены с нарушением зазоров.

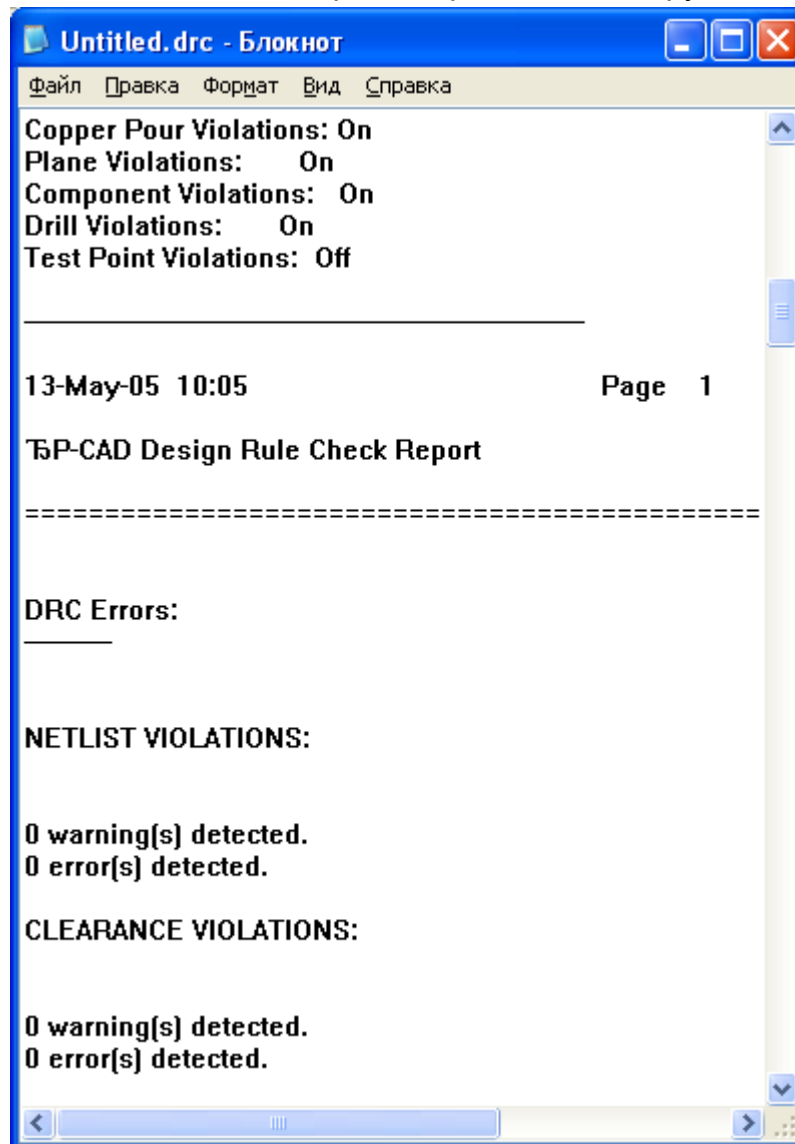


Рисунок 4.29 - Сообщения о технологических ошибках трассировки

Закрывать окно **Блокнот**, и на экране останется рисунок ПП с помеченными кружками ошибками (рис. 4.30). Для исправления ошибок следует фрагменты помеченных трасс отодвинуть от КП.



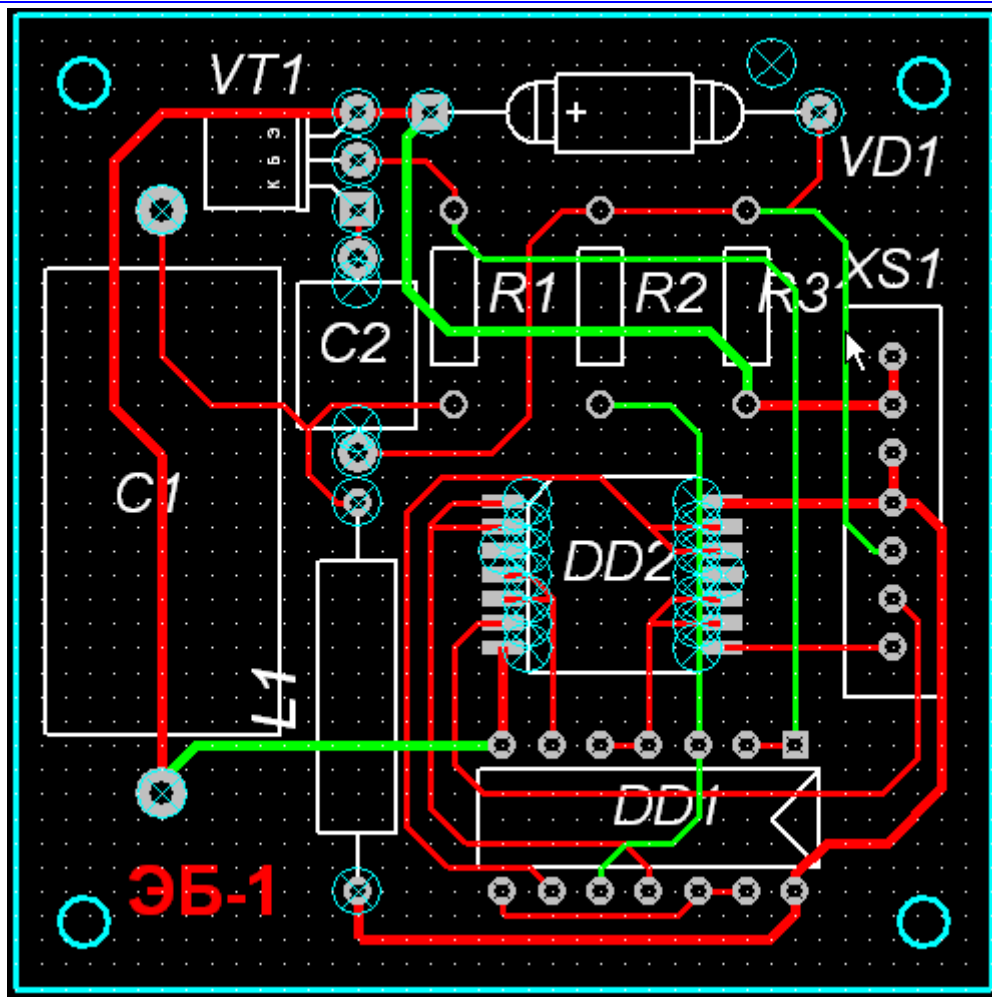


Рисунок 4.30 - Рисунок ПП с помеченными кружками ошибками

Для этого выполнить команды **Edit/Select**, щелкнуть ЛК по соответствующему фрагменту цепи, он выделится цветом. Вновь нажать ЛК и, не отпуская ее, сместить фрагмент так чтобы добиться нужного зазора. Аналогично сместить другие фрагменты цепей.

Необходимо добиться, чтобы повторная проверка рисунка ПП не обнаружила ошибок.

Не забудьте сохранить полученный результат проектирования рисунка ПП с помощью команды **File/Save**.

## 5 Контрольные вопросы

- 1) Как загружается файл размещения ПП?
- 2) Каким образом задаются установки проекта (условия проектирования)?
- 3) Как задаются шаг сетки и допустимые зазоры?
- 4) Каким образом выполняется ручная оптимизация соединений элементов, размещенных на плате?
- 5) Как производится ручная трассировка проводника?
- 6) Каким образом прокладываются проводники при интерактивной трассировке?
- 7) Как задается ширина сигнальных цепей, земляных шин и шин питания?
- 8) Каким образом производится смена слоя в процессе разводки проводника?
- 9) Какими командами выполняется редактирование рисунка печатной платы?

- 10) Какими командами производится изменение ширины проводника целой цепи?
- 11) Какими командами выполняется оптимизация цепей?
- 12) Как проверяется соответствие разработанной платы условиям проектирования?
- 13) Как сохранить полученный результат?

## 6 Отчетность

Для получения зачета по работе студент должен представить чертеж печатного узла с размещенными электрорадиоэлементами. Чертеж должен быть оформлен в соответствии с требованиями ЕСКД.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кофанов Ю.Н., Сарафанов А.В., Трегубов С.И. Автоматизация проектирования РЭС. Топологическое проектирование печатных плат: Учеб. Пособие. 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Радио и связь, 2006, 220 с.
2. Разработка и оформление конструкторской документации радиоэлектронной аппаратуры: Справочник / Ч. Т. Романычева, А. К. Иванова, А. С. Куликов и др.; Под ред. Э.Т. Романычевой. - 2-е изд., перераб. и доп. -М.: Радио и связь, 1989. - 448 с.
3. Ненашев А.П. Конструирование радиоэлектронных средств. - М.: Высш. шк., 1990. - 432 с.: ил.
4. Савельев М.В. Конструкторско-технологическое обеспечение производства ЭВМ: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. Шк., 2006. – 319 с.: ил.
5. Чернышев А.А. Основы конструирования и надежности электронных вычислительных средств: Учеб. для вузов. - М.: Радио и связь, 1998. - 448 с.: ил.
6. Стешенко В.Б. EDA. Практика проектирования радиоэлектронных устройств. – СПб.; БХВ-Петербург, 2003. – 720 с.: ил.
7. Стешенко В.Б. P-CAD. Технология проектирования печатных плат. — СПб.: БХВ-Петербург, 2003. — 720 с.: ил.
8. Мактас М.Я. Восемь уроков по P-CAD 2006. - М.: СОЛОН-Пресс, 2003. - 224 с.: ил.
9. Разевиг В. Д. Проектирование печатных плат в P-CAD 2006. - М.: Солон-Р, 2006.
10. Саврушев Э.Ц. P-CAD для Windows. Система проектирования печатных плат. Практик. пособие — М.: Издательство ЭКОМ, 2006. - 320. с.: ил.
11. Лопаткин А.В. Проектирование печатных плат в системе P-CAD 2006. Учебное пособие для практических занятий. – Нижний Новгород, НГТУ, 2006. - 190 с.
12. Кобрин Ю.П. Диалоговое размещение электрорадиоэлементов в **P-CAD 2006**. – Томск, ТУСУР, 2012. - 48 с.
13. Кобрин Ю.П. Создание электрических схем графическим редактором **P-CAD Schematic**. – Томск, ТУСУР, 2012. - 46 с.
14. Кобрин Ю.П. Разработка посадочных мест на печатной плате для монтажа конструктивных элементов. – Томск, ТУСУР, 2012. - 78 с.
15. Кобрин Ю.П. Создание компонентов радиоэлектронных средств с помощью программы работы с библиотеками **P-CAD Library Executive**. – Томск, ТУСУР, 2012. - 30 с.

16. Кобрин Ю.П. Создание углового штампа чертежа и форматок в P-CAD 2006. – Томск, ТУСУР, 12 - 31 с.
17. ОС ТУСУР 6.1-97. Образовательный стандарт ВУЗа. Работы студенческие учебные и выпускные квалификационные. Общие требования и правила оформления. – Томск, ТУСУР, 1997. – 40 с.