

## **Кафедра комп'ютерної інженерії та електроніки**

Назва дисципліни – Конструювання і виготовлення друкованих плат та електронних пристроїв

Викладач: Дзундза Богдан Степанович

1. Александра Лезе, У. Шойерман Трассировка силовых цепей на печатных платах Fr4: рекомендации и ограничения // Компоненты и технологии, № 1. – 2010. Ст. 90-93.
2. Бабічева О. Ф. Автоматизоване проектування електромеханічних пристроїв, компонентів цифрових систем керування та діагностичних комплексів : навч. посібник / О. Ф. Бабічева, С. М. Єсаулов ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 355 с – Розділ 2
3. Біліщук В. Б. Використання персональних комп'ютерів у неруйнівному контролі і технічній діагностиці: практикум. — Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2019 – 40 с.
4. Овчинников, В.А. Автоматизация проектирования и технология производства печатных плат : учебное пособие / В.А. Овчинников, А.Н. Васильев, В.В. Лебедев. 1-е изд. Тверь: ТГТУ, 2009. Ст. 9-27.
5. Новиков В.А Типовые ошибки трассировки печатных плат // CDEBlog. 2011. Ст. 1-22.

## Трассировка силовых цепей на печатных платах FR4: рекомендации и ограничения

Александра ЛЕЗЕ (Alexandra LESE)  
У. ШОЙЕРМАН  
(U. SCHEUERMANN)  
Перевод: Андрей КОЛПАКОВ  
Andrey.Kolpakov@semikron.com

### Введение

Мощность компактных преобразовательных устройств, использующих печатные платы для промежуточных соединений и подводки силовых цепей, непрерывно растет. В качестве примера на рис. 1 показана сборка миниатюрного интеллектуального силового модуля MiniSKiP, широко используемая в промышленных приводах мощностью до 20 кВт.

Протекание токов по проводникам печатной платы приводит к возникновению активных потерь мощности и перегреву. Величина активного сопротивления токонесущей трассы зависит от свойств материала проводника (меди), длины и площади поперечного сечения. Геометрическая форма трасс влияет на распределение тепла и эффективность его передачи на саму печатную плату и в окружающую среду.

Топология разводки платы, на которой размещены мощные элементы, чрезвычайно важна для обеспечения надежности работы



Рис. 1. Сборка миниатюрного интеллектуального силового модуля MiniSKiP

В компактных конверторах малой и средней мощности разводка цепей питания и выходов, как правило, осуществляется по печатной плате (PCB). При полной нагрузке токи печатных проводников могут достигать значения 50 А и более. В статье приводятся результаты исследования токонесущей способности плат широко распространенного типа FR4. Анализируются существующие правила нормирования размеров трасс для мощных применений, приводится их сравнение с экспериментальными результатами тестов, обсуждается влияние геометрии трассировки и толщины слоя меди.

системы. Существующие правила нормирования размеров проводников PCB основаны на анализе зависимости температуры медной трассы по ее сечению от протекающего тока. В различных источниках [1–3] приводятся методики расчета, основанные на данной зависимости и определяющие перегрев меди относительно окружающей среды. Базы данных для подобных вычислений получены с помощью двух независимых моделей, описанных в [4].

На рис. 2 приведены два варианта топологии печатных плат и диаграммы, демонстрирующие измеренные и расчетные значения температуры как функции тока. Как видно на графиках, оценочные величины, полученные с помощью базовых моделей (модель 1,

модель 2), не дают точного отображения температуры соответствующей структуры PCB. Причиной малой достоверности является высокая степень упрощения, присущая данным моделям. В них не учтены такие важные факторы, как характеристики системы охлаждения, свойства окружающей среды, структура ламината и эффект взаимного теплового влияния. Открытым также остается вопрос о допустимости использования стандартных методик для токов выше 35 А, поскольку все опубликованные данные относятся к меньшим значениям [5, 6]. Именно поэтому исследование тепловых режимов печатных плат при работе на больших токах является актуальным и рассматривается в данной статье.

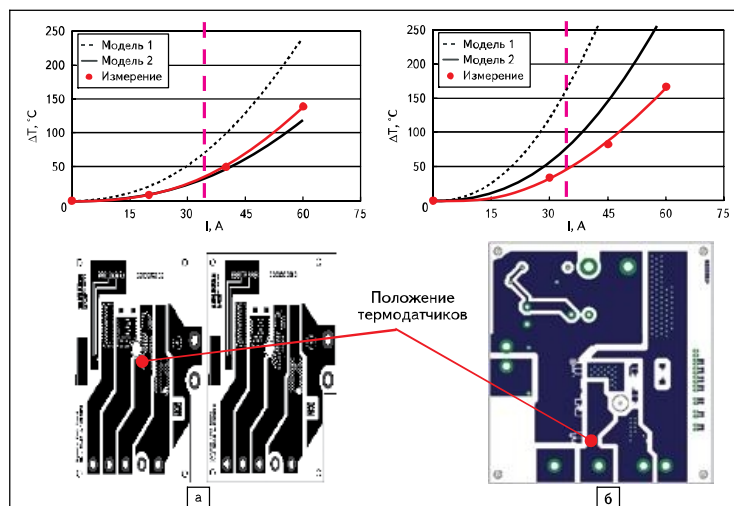


Рис. 2. Расчетные и измеренные значения температуры перегрева для двух топологий печатных плат

## Дизайн тестовой платы и измерения

Для проведения испытаний было разработано несколько тестовых плат с различной топологией. С помощью РСВ, структура трасс которой показана на рис. 3, исследовалось влияние дополнительных медных слоев (А–D), ширины дорожек (Е и D) и геометрии токового пути (Е–D).

Плата была изготовлена в двух версиях с толщиной слоя меди 70 и 105 мкм. Положение термодатчиков, установленных с по-

мощью пайки, показано в правой части рис. 4. В ходе испытаний проводилась запись стационарного значения температуры в установившемся состоянии для заданного тока и исследовалось время отклика системы при изменении нагрузки. Мониторинг температуры осуществлялся на дорожках, проводящих ток, и соседних с ними, а также в окружающем пространстве внутри тестовой камеры; контролировался ток и напряжение между дорожками. В ходе измерений ток увеличивался с шагом 10 А (максимум 80 А) до наступления критического перегрева меди (125 °С).

## Анализ установившегося состояния

### Влияние сечения проводника

Трассы Е и D имеют постоянную ширину (соответственно, 5 и 10 мм). Различные комбинации ширины и толщины слоев дают следующие значения поперечного сечения: 0,35, 0,525, 0,7 и 1,05 мм<sup>2</sup>. Значения температуры перегрева дорожек приведены на рис. 5: трасса с наименьшим сечением не способна пропускать ток более 40 А, но при увеличении площади сечения в 3 раза максимальная токовая нагрузка возрастает до 80 А при том же значении температуры.

В соответствии с рекомендациями производителей печатных плат [7] предельная

рабочая температура ламината FR4 не должна превышать 125 °С. Диаграммы на рис. 5 позволяют определить максимальную токовую нагрузку рассматриваемых типов трасс, удовлетворяющую этому условию. Горизонтальная линия на уровне 125 °С ограничивает значения предельных токов на уровне 30, 40, 48 и 62 А соответственно.

### Влияние геометрии токового пути

В ходе испытаний исследовалась взаимная связь дорожек, расположенных на разных слоях РСВ. Как видно на рис. 3, трасса Е размещается на верхнем крае платы, а топология F включает оба слоя, однако ток пропускается только по верхней трассе. Структура G состоит из дорожек на обеих сторонах РСВ, соединенных между собой переходным отверстием на конце, что дает возможность исследовать тепловой режим платы при протекании тока по последовательному соединению проводников.

В ходе данного вида испытаний изучались трассы, имеющие толщину 70 и 105 мкм и одинаковую ширину, таким образом, поперечное сечение составляло 0,35 и 0,525 мм<sup>2</sup> соответственно.

На рис. 6 и 7 показана зависимость измеренной температуры от тока нагрузки для различных вариантов токовых трасс. Судя по графикам, влияние геометрии проводников идентично для обеих плат: темпе-

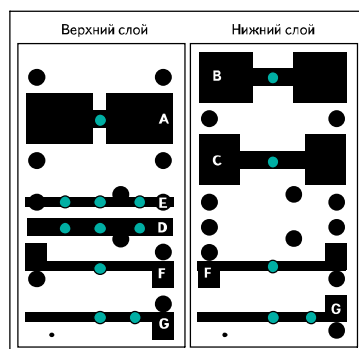


Рис. 3. Тестовая плата для исследования влияния топологии трассировки и положения термодатчика

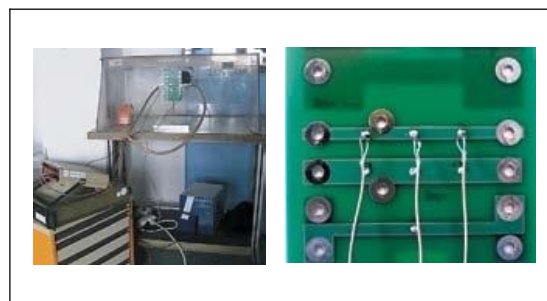


Рис. 4. Измерительный стенд: общий вид, тестируемая плата

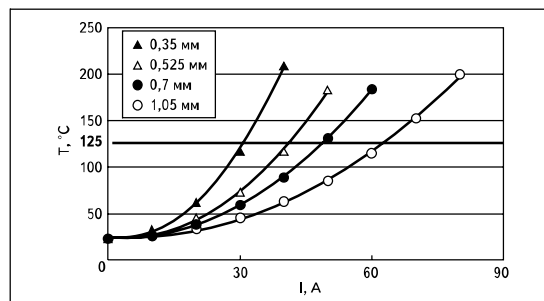


Рис. 5. Влияние площади сечения меди на токонесущую способность

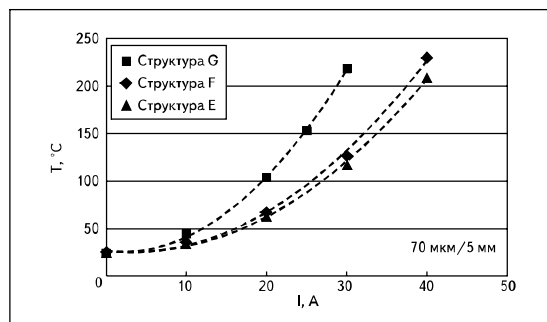


Рис. 6. Влияние геометрии дорожки на перегрев при одинаковой площади сечения (РСВ 70 мкм)

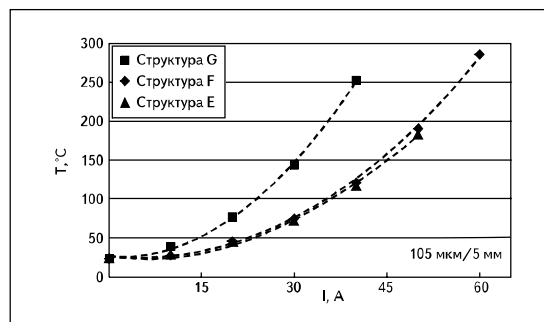


Рис. 7. Влияние геометрии дорожки на перегрев при одинаковой площади сечения (РСВ 105 мкм)

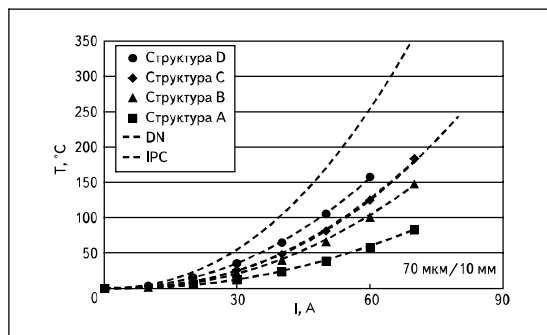


Рис. 8. Оценка зависимости температуры перегрева от тока для различных видов медных трасс с одинаковым поперечным сечением

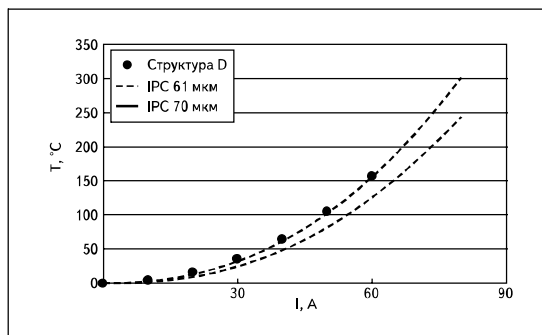


Рис. 9. Измеренные значения температуры при увеличении тока для номинальной и реальной толщины слоя меди

ратура каждой структуры для РСВ 70 мкм при заданном токе выше, чем для РСВ 105 мкм из-за меньшей площади сечения.

Сравнение результатов на рис. 6 и 7 для структур E–G показывает, что наименьшей токонесущей способностью обладает трасса G, проводящая ток на обоих слоях и имеющая, соответственно, в 2 раза больше омическое сопротивление, чем E и F. Температура односторонней дорожки E при максимальном токе нагрузки оказывается несколько меньше, чем у двусторонней F. Очевидно, что «пассивный» медный слой структуры F практически не влияет на тепловое равновесие токонесущего слоя. С точки зрения уровня генерируемых потерь тепловые режимы трасс E и F оказываются практически идентичными, так как одинаковы их активные сопротивления и пропускаемые токи.

#### Влияние площади сечения меди

В данной главе делается попытка приближения к реальным параметрам РСВ, трассировка которых, как правило, выполняется без учета всех тепловых режимов. В частности, здесь проводится сравнение дорожек с одинаковым сечением в точке измерения температуры, но находящихся под влиянием близко расположенных трасс с различной площадью сечения меди.

При переходе от структуры A к C сечение дорожки уменьшается, для трассы D оно минимально. Эпюры на рис. 8 демонстрируют перегрев проводников 70 мкм в зависимости от тока нагрузки для этих четырех случаев. Как показывают графики, увеличение площади сечения дорожки позволяет существенно снизить температуру перегрева, и с ростом тока этот эффект становится еще более выраженным.

#### Оценка действующих правил трассировки

Для правильного выбора сечения трассы, обеспечивающего достаточную токонесущую способность, необходимо средство расчета,

позволяющее определять температуру перегрева дорожки в зависимости от ее сечения и тока нагрузки. Наиболее корректным путем нахождения этого соотношения является использование термодинамической модели, описываемой следующим образом:

$$I = k \Delta T^x A^y,$$

где  $I$  — ток нагрузки, А;  $\Delta T$  — градиент температуры, °C;  $A$  — сечение трассы, мм<sup>2</sup>;  $k$ ,  $x$ ,  $y$  — специфические константы.

Таблица. Константы для вычислений

Модель	$k$	$x$	$y$
IPC	100,75	0,43	0,68
DN	62,00	0,45	0,69

Коэффициенты  $k$ ,  $x$ ,  $y$  определяются экспериментально; два набора констант, полученных в результате измерений (DN и IPC [4]), приведены в таблице. Расчет температуры перегрева меди относительно окружающей среды производится на основе значения тока и площади сечения трассы. В качестве определяющего фактора используется наименьшее значение ширины дорожки. Оценка качества модели была проведена с помощью обоих наборов коэффициентов для структуры D с толщиной слоя меди 70 мкм при ширине дорожки 10 мм.

На рис. 8 показана зависимость температуры перегрева от тока для трасс A и D с использованием моделей DN и IPC. Приведенные данные нормализованы по отношению к температуре окружающей среды. Модель DN дает преувеличенные значения температуры для всех трасс, модель IPC позволяет получить хорошее приближение для структуры C и преувеличенное — для A и B. Температура дорожек для обоих значений толщины слоев с одинаковой шириной при использовании модели IPC оказывается заниженной (кривая D на рис. 8).

Полученные результаты позволяют объяснить разницу между измеренными и рас-

четными значениями на рис. 2. Трасса на тестовой плате (рис. 2а) имеет постоянную ширину, а модель 2 (соответствующая IPC) дает заниженное значение. Температура в примере на рис. 2б измеряется в самой узкой зоне трассы, где модель IPC дает завышенное значение.

При оценке абсолютных значений, получаемых с помощью описанных моделей, необходимо учитывать реальную толщину слоя меди. Стандартные правила проектирования позволяют выбрать размер проводника и рассчитать температуру перегрева для номинального значения толщины слоя меди. Действительная же величина с учетом производственных допусков может оказаться существенно меньше.

Измерения показали, что при номинальном значении 70 мкм действительное среднее значение толщины слоя меди на верхнем слое платы составляет 61 мкм. На рис. 9 приведена зависимость температуры перегрева от тока для структуры D в сравнении с расчетными значениями на базе модели IPC при номинальной и минимальной толщине слоя. Очевидно, что результаты вычислений для второго случая (61 мкм) оказываются в области более высоких температур, чем для первого (70 мкм), при одинаковом токе.

Девияция ширины печатных трасс из-за дефектов травления не превышает 0,1%, и ей можно пренебречь.

#### Анализ переходных режимов

Приведенные выше рассуждения относятся к случаю установившегося теплового равновесия при протекании по трассе РСВ фиксированного постоянного тока. Однако для анализа реальных рабочих режимов большое значение имеют переходные состояния, вызванные изменением нагрузки. Поскольку уровень тока DC при испытаниях увеличивается с дискретным шагом (10 А), это дает возможность оценить тепловую постоянную времени печатной платы.



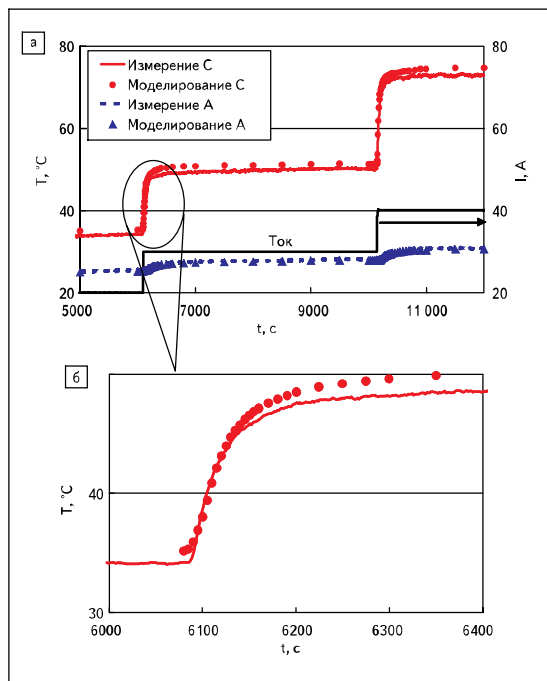


Рис. 10.  
а) Измеренные и расчетные значения температуры;  
б) определение тепловой постоянной времени

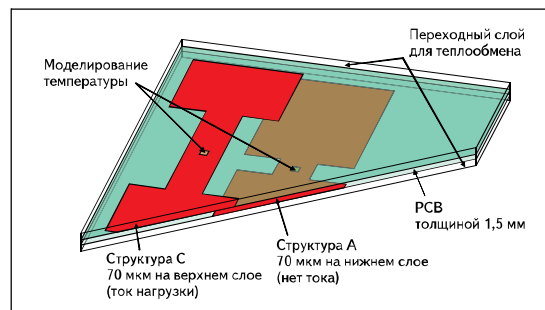


Рис. 11. Поперечное сечение моделируемой структуры

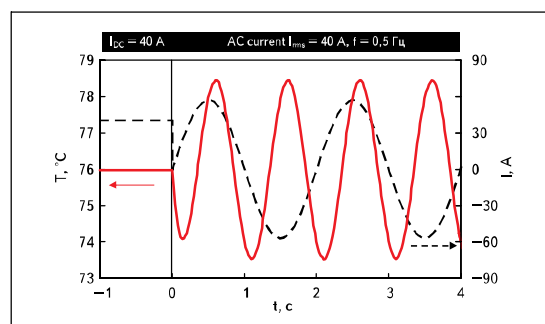


Рис. 12. Моделирование теплового режима при протекании низкочастотного переменного тока при окружающей температуре 25 °С

На рис. 10 показаны результаты измерения температуры, проведенные в центре дорожек А и С (рис. 3) на плате 70 мкм. Мониторинг температуры также проводился на ненагруженной трассе А при протекании тока по проводнику С.

Для анализа динамических тепловых режимов была создана простая 3D-модель РСВ, представленная на рис. 11. Потери, определяемые произведением падения напряжения и тока нагрузки, рассеиваются в структуре С, имеющей постоянную ширину и известное сечение слоя меди. Печатная плата помещается между двумя идеальными радиаторами с переходным слоем, моделирующим передачу тепла в окружающую среду. Параметры интерфейсного слоя выбирались таким образом, чтобы модель обеспечивала достоверное значение установившейся температуры при различных значениях тока нагрузки. Чтобы корректно задать тепловую связь токонесущей трассы и ненагруженной дорожки А, теплопроводность материала FR4 задана на уровне 1,5 Вт/мК. Как показано на рис. 10, созданная таким образом модель позволяет получить хорошее приближение при анализе тепловых переходных процессов.

Протестированная тепловая модель печатной платы может быть использована для исследования динамических тепловых характеристик на частотах, где медленные термодат-

чики не способны дать корректные результаты. Моделирование подтвердило, что пульсации температуры на частоте 50 Гц составляют около 0,1%, и ими можно пренебречь. Как показано на рис. 12, переходные тепловые процессы в печатных дорожках наиболее ярко выражены на частотах ниже 1 Гц. При 0,5 Гц амплитуда изменения температуры составляет примерно  $\pm 5\%$  от среднего значения перегрева трассы относительно окружающей среды.

## Заключение

В преобразователях малой и средней мощности силовые транзисторы и модули, как правило, размещаются на печатных платах, а силовоточные соединения цепей питания и выходов осуществляются с помощью печатных трасс. Для обеспечения надежной работы системы в этих условиях большое значение приобретает правильный выбор ширины и толщины дорожек РСВ.

Экспериментальные исследования тестовых печатных плат, созданных на стандартном материале FR4, показали, что существующие правила трассировки и методики теплового расчета могут быть использованы только для установившихся состояний при токах, не превышающих 35 А. Модель IPC [4] дает хорошие результаты только для длинных трасс с постоянной площадью сечения.

Вопреки некоторым рекомендациям размещение параллельной дорожки на обратной стороне РСВ не увеличивает токонесущую способность трассы. Значительного повышения допустимой токовой нагрузки можно добиться только за счет увеличения сечения меди в проводящих слоях, а значит, при разводке силовых трасс следует максимально использовать свободную площадь печатной платы.

Анализ динамических тепловых режимов, проведенный с помощью созданной модели РСВ, подтвердил, что колебания температуры дорожки относительно среднего значения вносят существенный вклад при частоте изменения тока ниже 1 Гц.

## Литература

1. <http://www.geocities.com/CapeCanaveral/Lab/9643/TraceWidth.htm>
2. <http://www.ultracal.com/calc.htm> PCBTmp.exe
3. <http://www.pcbstandards.com>
4. Brooks D. Temperature Rise in PCB Traces // Reprinted from the Proceedings of the PCB Design Conference, West, 23–27 March, 1998.
5. [http://www.pontro.com/current\\_cap.htm](http://www.pontro.com/current_cap.htm)
6. IPC-2221. General Standard on Printed Board Design. Figure 6-4.
7. <http://www.ksg.de>

## 2 ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЗАСОБИ ПРОЕКТУВАННЯ

### 2.1 Вимоги до систем автоматизованого проектування

1. Удосконалення методів проектування, зокрема використання методів багатоваріантного проектування та оптимізації для пошуку ефективних варіантів і ухвалення рішень.

2. Підвищення частки творчої праці інженера-проектувальника.

3. Підвищення якості проектної документації.

4. Удосконалення керування процесом розроблення проектів.

5. Часткова заміна натурних експериментів і макетування моделюванням на ЕОМ.

6. Зменшення обсягу випробувань і доведення дослідних зразків унаслідок підвищення рівня достовірності проектних рішень і, отже, зниження тимчасових витрат.

На сьогодні ситуація в сфері САПР технічних систем склалася так, що утворився очевидний розрив між *спеціалізованим інформаційним і програмним забезпеченням*, що реалізовує проектний розрахунок виробів на різних етапах проектування (спеціалізовані САПР), і інструментальними засобами проектування на ЕОМ. Якщо в першому випадку вітчизняна наука має незаперечні пріоритети як у сфері математичного моделювання технічних систем, побудови інформаційного і програмного забезпечення, так і у сфері розроблення процедур ухвалення рішень, то в сфері побудови просторових геометричних моделей деталей і вузлів є істотне відставання від зарубіжних розробок.

*Інструментальні засоби* – це CAD/CAE/CAM-системи, які останнім часом набули великого поширення у двигунобудуванні.

### 2.2 Призначення CAD/CAE/CAM-систем

CAD/CAE/CAM-системи призначені для комплексної автоматизації проектування, конструювання та виготовлення продукції машинобудування. У них фактично об'єднані три системи різного призначення, розроблені на єдиній базі, аббревіатури, які розшифровуються у такий спосіб:

– CAD – *Computer Aided Design* – комп'ютерна підтримка конструювання;

– CAE – *Computer Aided Engineering* – комп'ютерна підтримка інженерного аналізу;

– *CAM – Computer Aided Manufacturing* – комп’ютерна підтримка виготовлення;

– *PDM – Product Data Management* – системи керування проектними даними.

Розподіл CAD/CAE/CAM-систем за етапами технологічної підготовки виробництва (далі – ТПВ):

1. *Етап конструювання (CAD, CAE)* – припускає об’ємне і плоске геометричне моделювання, інженерний аналіз на розрахункових моделях високого рівня, оцінку проектних рішень, отримання креслень.

2. *Етап технологічної підготовки виробництва* (далі – ЕТПВ) – на Заході називають *CAPP (Computer Automated Process Planing)* – припускає розроблення технологічних процесів, технологічного оснащення, керувальних програм (далі – КП), для обладнання з чисельно-програмним керуванням (далі – ЧПК). Сюди входить завдання САПР ТП – розроблення технологічної документації (маршрутної, операційної), що доводиться до робочих місць і регламентує процес виготовлення деталі.

3. *Конкретний опис обробки* на обладнанні з ЧПК у вигляді керувальних програм уводиться в систему автоматизованого керування виробничим обладнанням, яку на Заході називають *CAM*.

#### *CAE-системи*

Системи, використовувані для аналізу й оцінки функціональних властивостей проєктованих двигунів, їхніх систем, вузлів і деталей, охоплюють широке коло завдань моделювання пружно-напруженого, деформованого, теплового стану, коливань конструкції, стаціонарного та нестационарного газодинамічного і теплового моделювання з урахуванням в’язкості, турбулентних явищ, прикордонного шару тощо. Найпоширеніші CAE-системи, що використовують вирішення систем диференціальних рівнянь у приватних похідних методом кінцевих елементів (далі – МКЕ). Вони поділяються на універсальні системи аналізу з використанням МКЕ і спеціалізовані. В авіадвигунобудуванні найвідоміші такі універсальні системи, як Nastran, Ansys, вітчизняні ІСПА, КОСМОС та інші, що дають змогу виконувати різні види аналізу на розподіленому рівні. Спеціалізовані системи МКЕ орієнтовані на певні різновиди аналізу. Прикладами таких систем можуть бути пакети Flotran, Fluid, призначені для моделювання гідрогазодинамічних процесів, OPTRIS – для моделювання деформацій тощо.

#### *PDM-системи*

Використовують на всіх етапах проєктування, даючи змогу здійснювати режим колективного проєктування, автоматизуючи функції управління, що

обумовлюються цим режимом: призначення та забезпечення класу відповідальності, прав доступу, ведення бази даних проекту тощо.

### 2.3 Рівні CAD/CAE/CAM-систем

Залежно від функціональних можливостей, набору модулів і структурної організації CAD/CAE/CAM системи можна умовно розподілити на три групи: легкі, середні й важкі системи (рис. 2.1).

*Легкі системи.* Це перший в історичному розвитку клас систем. Серед цієї категорії можна виокремити такі системи, як CAD-KEY, Personal Designer, ADEM, T-Flex. Вони зазвичай використовуються на персональних комп'ютерах окремими користувачами. Такі системи призначені переважно для якісного виконання креслень. Вони можуть також використовуватися для двовимірного (2D) моделювання та нескладних тривимірних побудов.

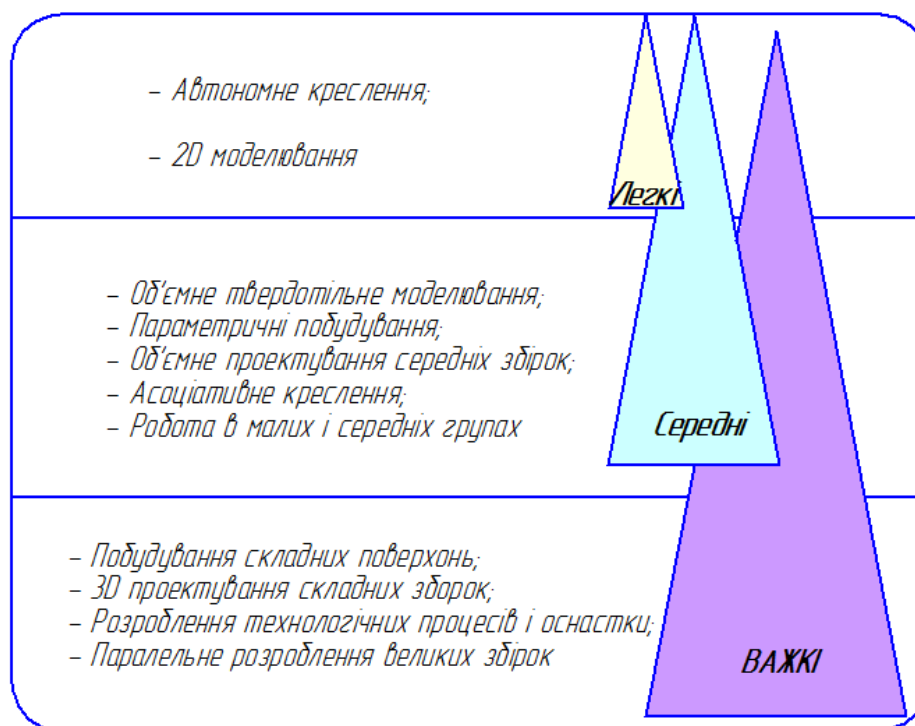


Рисунок 2.1 – Класи CAD/CAE/CAM-систем і обсяги виконуваних функцій

Ці системи досягли останнім часом високого рівня досконалості. Вони прості у використанні, містять безліч бібліотек стандартних елементів, підтримують різні стандарти оформлення графічної документації.

*Системи середнього класу.* Це клас, що з'явився порівняно недавно, щодо недорогих тривимірних систем CAD. До нього належать

системи AMD, Solid Edge, Solid Works, AUTOCAD, КОМПАС тощо. Їхня поява обумовлена із збільшенням потужності персональних комп'ютерів і розвитком операційної системи. За їхньою допомогою можна виконувати до 80 % типових машинобудівних завдань, не залучаючи великі й дорогі CAD/CAM-системи важкого класу.

Більшість систем середнього класу ґрунтуються на тривимірному твердотільному моделюванні. Вони дають змогу проектувати більшість деталей загального машинобудування, збірні одиниці середнього рівня складності, виконувати спільну роботу групам конструкторів. У цих системах можливо проводити аналіз перерізів і зазорів у складках.

*Системи важкого класу.* Такі системи надають повний набір інтегрованих засобів проектування, виробництва, аналізу виробів. До цієї категорії систем належать ANSYS, EDS/Unigraphics, Inventor, NASTRAN, ALIAS, ADAMS, I-DEAS, CATIA, Pro/ENGINEER, CADD5, EUCLID, Cimatron. Вони використовують потужні апаратні засоби, зазвичай, робочі станції з операційною системою UNIX.

Системи важкого класу дають змогу вирішувати широкий спектр конструкторсько-технологічних завдань. Окрім функцій, доступних системам середнього класу, важким CAD/CAM-системам доступно:

- проектування деталей найскладнішого типу, що містять дуже складні поверхні;
- виконання побудови поверхонь за результатами обміру реальної деталі, виконання згладжування поверхонь і складних з'єднань;
- проектування масивних зборок, що потребують ретельного компонування та що містять елементи інфраструктури (кабельні джгути, трубопроводи);
- робота зі складними збірками в режимі варіантного аналізу для швидкого перегляду й оцінки якості компонування виробу.

## **2.4 Модульність CAD/CAE/CAM-систем**

Сучасним системам CAD/CAM властивий модульний принцип побудови. Нижче перелічений склад базових модулів для CAD, CAM і PDM-систем [2].

*Модулі CAD-систем:*

- створення об'ємної моделі деталі й вузлів зі статичним аналізом складності виробів;
- проектування поверхонь будь-якої складності;
- параметризація розмірів деталей;

- оформлення складальних і моделювальних креслень за об'ємними моделями відповідно до стандартів;

- фотореалістичне відображення виробу з урахуванням текстури матеріалу, кольору й шорсткості поверхні;

- виведення зображення на плотер;

- імпорт-експорт моделі між різними CAD-системами через інтерфейси.

*Модулі САМ-систем:*

- проектування технологічних процесів виготовлення продукції та оснащення;

- динамічний контроль процесу збирання;

- вибір параметрів холодного штампування (імітується весь процес штампування, зокрема «накладення» штампувальних пристроїв на поверхню деталі);

- створення та налаштування програм для верстатів із ЧПК (моделюється кінематика верстата, його робоча зона, стійка керування, заготовка, її кріплення та інструмент; на екрані детально відображується процес обробки);

- оптимізація параметрів процесів литва деталей із пластмас;

- модулі програмування для верстатів із ЧПК;

- створення, редагування та моделювання програм вимірювання та контролю відповідності деталі її об'ємної моделі за допомогою координатно-вимірювальної машини.

*Модулі PDM-систем:*

- керування загальною для розробників базою даних;

- інформаційно-пошукова система документування;

- автоматизований розподіл завдань між розробниками;

- завдання статусу кожного розробника;

- визначення структури інформаційних потоків;

- визначення комплексу документації;

- контроль змін;

- контроль виконання мережного план-графіка проекту;

- контроль повноти різномірної інформації про виріб:

- геометричні дані (модель з розмірами та допусками);

- креслення;

- властивості матеріалів;

- специфікації;

- результати міцнісних розрахунків;

- технологічні процеси виготовлення;

- програми для верстатів із ЧПК;



- вартість компонентів;
- фотореалістичні зображення тощо;
- автоматизоване створення звітів про проекти за цими даними;
- архівація.

#### *Рівні архівації моделі виробу*

Електронна модель виробу, що складається з перелічених даних, проходить у процесі створення три рівні архівації:

- 1) архів розробника;
- 2) архів групи розробників;
- 3) загальний архів готових проектів.

Переміщення інформації на вищий рівень відбувається внаслідок «електронного підпису» особи, яка ухвалює рішення.

## **2.5 Функції, властивості та приклади CAE/CAD/CAM-систем**

Функції CAD-систем у машинобудуванні підрозділяють на функції *двовимірного (2D)* і *тривимірного (3D)* проектування. До функцій 2D належать креслення, оформлення конструкторської документації, до функцій 3D – отримання тривимірних моделей, метричні розрахунки, реалістична візуалізація, взаємне перетворення 2D і 3D моделей [2].

*Головні функції САМ-систем:* розроблення технологічних процесів, синтез керувальних програм, для технологічного обладнання з числовим програмним керуванням (далі – ЧПК), моделювання процесів обробки, зокрема побудова траєкторій відносного руху інструменту та заготовлення в процесі обробки, генерація процесорів посту для певних типів обладнання з ЧПК (NC – Numerical Control), розрахунок норм часу обробки.

*Функції САЕ-систем* досить різноманітні, оскільки вони обумовлюються проектними процедурами аналізу, моделювання, оптимізації проектних рішень. До складу машинобудівних САЕ-систем насамперед належать програми для таких процедур:

- моделювання полів фізичних величин, зокрема аналіз міцності, який зазвичай виконується відповідно до МКЕ;
- розрахунок станів і перехідних процесів на макрорівні;
- імітаційне моделювання складних виробничих систем на основі моделей масового обслуговування та мереж.

*Приклади систем моделювання полів фізичних величин відповідно до МКЕ:* Nastran, Ansys, Cosmos, Nisa, Moldflow. *Приклади систем моделювання динамічних процесів на макрорівні:* Adams і Dyna – у механічних системах, Spice – в електронних схемах, ПА9 – для багатоаспектного моделювання,

тобто для моделювання систем, принципи дії яких базуються на взаємовпливі фізичних процесів різного походження.

Для зручності адаптації САПР до потреб певних використань, для її розвитку доцільно мати у складі САПР інструментальні засоби адаптації та розвитку. Ці засоби представлені тією або іншою CASE-технологією, зокрема мови розширення. У деяких САПР застосовують оригінальні інструментальні середовища.

Прикладами можуть бути об'єктно-орієнтоване інтерактивне середовище CAS CADE в системі EUCLID, яка містить бібліотеку компонентів, у САПР T-Kiex CAD 3/J передбачено розроблення доповнень у середовищах Visual O+/- і Visual Basic.

Важливе значення для забезпечення відкритості САПР, її інтегрованості з іншими автоматизованими системами (далі – АС) мають інтерфейси, що реалізуються в системі форматами міжпрограмних обмінів. Очевидно, що передусім необхідно забезпечити зв'язки між CAE, CAD і CAM-підсистемами.

## 2.6 Програмні мови

*Мови* – формати міжпрограмних обмінів – використовуються IGES, DXF. Express (стандарт ISO 10303-11, входить у сукупність стандартів STEP), SAT (формат ядра ACIS) тощо.

*Найперспективнішими* вважаються діалекти мови Express, що пояснюється загальним значенням стандартів STEP, їхньою спрямованістю на різне застосування, а також на використання в сучасних розподілених проектних і виробничих системах. Дійсно, такі формати, як IGES або DXF описують тільки геометрію об'єктів, тоді як в обмінах між різними САПР і їхніми підсистемами фігурують дані про різноманітні властивості й атрибути виробів [3].

*Мова Express* використовується в багатьох системах інтерфейсу між CAD/CAM-системами. Зокрема, в систему CAD+ STEP включено середовище SDAI (Standard Data Access Interface), в якому можливе подання даних про об'єкти з різних систем CAD і додатків (але описаних за правилами мови Express). CAD++ STEP забезпечує доступ до баз даних більшості відомих САПР із наведенням даних у вигляді STEP-файлів. Інтерфейс програміста дає змогу відкривати й закривати файли проектів у базах даних, проводити читання та запис. Як об'єкти можуть використовуватися точки, криві, поверхні, текст, приклади проектних рішень, розміри, зв'язки, типові зображення, комплекси даних тощо.

## 2.7 Поняття про CALS-технологію

*CALS-технологія* – це технологія комплексної комп'ютеризації сфер промислового виробництва, мета якої – уніфікація та стандартизація специфікацій промислової продукції на всіх етапах її життєвого циклу. Головні специфікації представлені проектною, технологічною, виробничою, маркетинговою, експлуатаційною документацією. У CALS-системах передбачено зберігання, обробка та передача інформації в комп'ютерних середовищах, оперативний доступ до даних у потрібний час і в потрібному місці. Відповідні системи автоматизації назвали **автоматизованими логістичними системами або CALS (Computer Aided Logistic Systems)**. Оскільки під логістикою зазвичай розуміють дисципліну, присвячену питанням постачання та керування запасами, а функції CALS набагато ширше й обумовлюються з усіма етапами життєвого циклу промислових виробів, застосовують і більш розповсюджену розшифровку аббревіатури *CALS – Continuous Acquisition and LifeCycle Support*.

Застосування CALS дає змогу істотно зменшити обсяг проектних робіт, оскільки описи багатьох складників обладнання, машин і систем, що проектувалися раніше, зберігаються в базах даних мережних серверів, доступних будь-якому користувачеві технології CALS. Істотно полегшується вирішення проблем ремонтоздатності, інтеграції продукції різних систем і середовища, адаптації до змінних умов експлуатації, спеціалізації проектних організацій тощо.

Розвиток CALS-технології повинен призвести до появи так званих віртуальних виробництв, при яких процес створення специфікацій з інформацією для програмно-керованого технологічного обладнання, достатній для виготовлення виробу, може бути розподілений у часі й просторі між багатьма організаційно автономними проектними студіями. Серед безперечних досягнень CALS-технології варто назвати легкість розповсюдження передових проектних рішень, можливість багатократного відтворення частин проекту в нових розробках тощо.

Побудова відкритих розподілених автоматизованих систем для проектування та керування у промисловості становить основу сучасної CALS-технології. Головна проблема їх побудови – забезпечення одноманітного опису й інтерпретації даних, незалежно від місця і часу їх отримання в загальній системі, що має масштаби аж до глобальних. Структура проектної, технологічної та експлуатаційної документації, мови її подання повинні бути стандартизованими. Тоді стає реальною успішна робота над загальним проектом різних колективів, розділених в часі й

просторі та які використовують різні CAE/CAD/CAM-системи. Та сама конструкторська документація може бути використана багато разів у різних проектах, а та сама технологічна документація адаптована до різних виробничих умов, що дає змогу істотно скоротити й здешевіти загальний цикл проектування та виробництва. Крім того, спрощується експлуатація систем.

Отже, інформаційна інтеграція є невід’ємною властивістю CALS-систем. Тому CALS-технологія базується на низці стандартів, що забезпечують таку інтеграцію.

Важливі проблеми, що потребують вирішення під час створення комплексних САПР, – керування складністю проектів та інтеграція програмного забезпечення (далі – ПЗ). Ці проблеми охоплюють питання декомпозиції проектів, розпаралелювання проектних робіт, цілісності даних, міжпрограмних інтерфейсів тощо.

## **2.8 Комплексні автоматизовані системи**

Відомо, що часткова автоматизація зазвичай не дає очікуваного підвищення ефективності функціонування підприємств. Тому переважним є впровадження інтегрованих САПР, що автоматизують всі головні етапи проектування виробів. Подальше підвищення ефективності виробництва та конкурентоспроможності продукції можливе шляхом інтеграції систем проектування, керування та документообігу. Така інтеграція лежить в основі створення *комплексних систем автоматизації*, в яких, крім функцій САПР, реалізуються засоби для автоматизації функцій керування проектуванням, документообігу, планування виробництва, обліку тощо.

CALS-технологія базується на низці стандартів і насамперед це стандарти STEP, а також Parts Library, Mandate, SGML (Standard Generalized Markup Language), EDIFACT (Electronic Data Interchange For Administration. Commerce, Transport) тощо. Стандарт SGML визначає способи уніфікованого оформлення документів певного призначення – звітів, каталогів, бюлетенів тощо, а стандарт EDIFACT – способи обміну подібними документами.

Одна з найвідоміших реалізацій CALS-технології розроблена фірмою Computervision. Це технологія названа *EPD (Electronic Product Definition)* і орієнтована на підтримання процесів проектування та експлуатації виробів машинобудування.

У CALS-системах на всіх етапах життєвого циклу виробів використовується документація, отримана на етапі проектування. Тому

## ЗАНЯТТЯ № 0

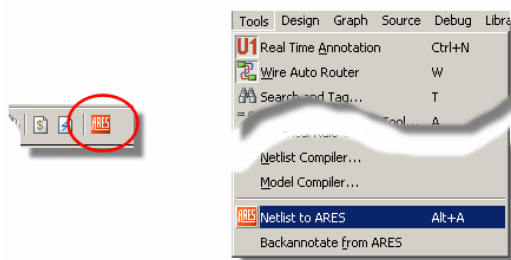
### ПРОЕКТУВАННЯ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ В ПРОГРАМІ ARES

**МЕТА ЗАНЯТТЯ:** практично засвоїти методику

**ТРИВАЛІСТЬ ЗАНЯТТЯ:** 16 ауд. год.

#### Основні теоретичні відомості

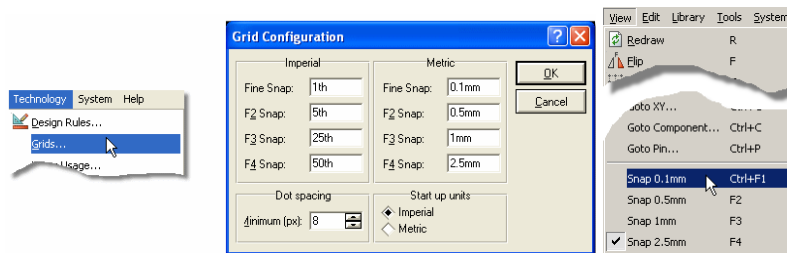
Після завершення проектування електричної схеми пристрою в ISIS генерують файл з інформацією про підключення елементів (Netlist). Автоматично генерують такий файл і завантажують його у програму ARES командою "Netlist to ARES" (рис. 0.1).



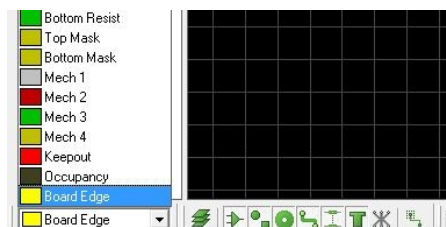
**Рисунок 0.1 — Розміщення команди "Netlist to ARES"**

При розміщенні елементів і доріжок використовують прив'язку до сітки. Тому в багатьох випадках, перед початком проектування друкованої плати необхідно настроїти кроки сітки (рис. 0.2), які будуть використовувати при проектуванні. ARES може працювати в імперських або метричних одиницях вимірювання довжини. Перемикатися між режимами можна командою "Metric" в меню "View".

Перед розміщенням елементів на платі, потрібно вказати розміри і форму плати. Рисування меж друкованої плати в ARES здійснюють в шарі "Board Edge" (рис. 0.3) командами 2-d графіки (рис. 1.4), які також присутні в програмі ARES.

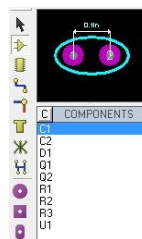


**Рисунок 0.2 — Параметри сітки**



**Рисунок 0.3 — Вибір шару "Board Edge"**

Для розміщення елементів на платі вмикають режим елементів ("Component Mode") (рис. 0.4). При цьому відображається список елементів у селекторі об'єктів, які відповідають елементам схеми. Процедура розміщення елементів на друкованій платі в ARES є аналогічною до процедури розміщення елементів на схемі в програмі ISIS.

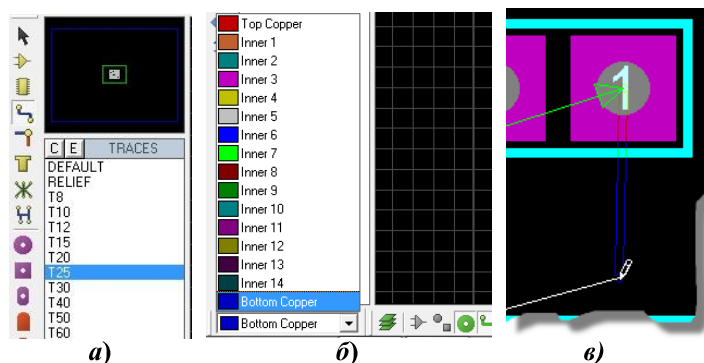


**Рисунок 0.4 — Список елементів для розміщення на платі**

Після розміщення елементів рисують доріжки. В ARES побудувати доріжки можна вручну або за допомогою авторoutersa. Рисують доріжки увімкнувши режим доріжок ("Track



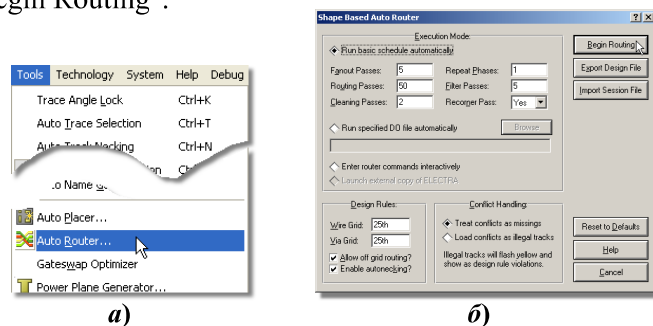
Mode") (рис. 0.5,*а*). Вказують потрібний шар (рис. 0.5,*б*). Рисування доріжки починають з контактної площадки першого елемента і закінчують на контактній площадці другого елемента, які потрібно з'єднати. Таким самим чином можна з'єднувати між собою вже нарисовані доріжки або контактні площадки з доріжками.



*а* — список стилів доріжок; *б* — список шарів; *в* — рисування доріжки

Рисунок 0.5 — Побудова доріжок

В автоматизованому режимі побудови доріжок використовують автороутер (рис. 0.6). Запускають програму кнопкою "Begin Routing".



*а* — команда виклику автороутера; *б* — вікно настроювання автороутера

Рисунок 0.6 — Автоматизована побудова доріжок

### **Завдання для самостійної підготовки**

Засвоїти теоретичний матеріал згідно з такими питаннями.

1 Методика проектування друкованих плат в програмі ARES. Налаштування програми ARES перед проектуванням друкованої плати.

2 Розміщення елементів в програмі ARES. Використання шарів для проектування друкованих плат. Побудова доріжок з'єднань між елементами на друкованій платі.

### **Завдання на практичне заняття**

Спроектувати друковану плату для схеми з завдання практичного заняття № 2 (рис. 2.6) у ручному і автоматизованому режимах.

### **Контрольні запитання**

1 Для чого використовують сітку при проектуванні друкованих плат в програмі ARES?

2 За допомогою якої команди перемикаються між шарами друкованої плати?

3 В яких шарах друкованої плати проектують друковані провідники?

4 Як змінити товщину доріжки?

5 Для чого використовують автороутер?

## 9. Технология, виды и параметры печатных плат

Основные принципы изготовления и применения печатных схем стали известны в начале XX века, однако промышленный выпуск печатных схем и плат был организован лишь в начале 40-х годов.

С переходом на микроэлектронные элементы, резким уменьшением размеров и возрастанием быстродействия схем первое место занимают вопросы обеспечения постоянства характеристик печатных проводников и взаимного их расположения. Значительно усложнились задачи проектирования и оптимального конструирования печатных плат и элементов.

Печатные платы нашли широкое применение в электронике, позволяя увеличить надёжность элементов, узлов и машин в целом, технологичность (за счёт автоматизации процессов изготовления печатного рисунка, сборки и монтажа), плотность размещения элементов (за счёт уменьшения габаритных размеров и массы), быстродействие, помехозащищённость элементов и схем. Печатный монтаж – основа решения проблемы компоновки микроэлектронных элементов. Особую роль печатные платы играют в цифровой микроэлектронике. В наиболее развитой форме (многослойный печатный монтаж) он удовлетворяет требованиям конструирования вычислительных машин третьего и последующих поколений.

При разработке конструкции печатных плат проектировщику приходится решать следующие задачи: конструктивные (определение размеров и компоновочной схемы), схемно-топологические (размещение, трассировка), радиотехнические (расчёт паразитных наводок), теплотехнические (температурный режим работы платы и элементов) и технологические (выбор метода изготовления).

### 9.1. Классификация методов конструирования печатных плат и узлов

При конструировании ЭВА на печатных платах (ПП) используют два основных принципа конструирования: одноуровневый и многоуровневый. Выбор принципа конструирования определяется возможностями технологии обеспечить необходимый уровень интеграции при данной сложности (количестве элементов) схемы.

*Одноуровневый* (моносхемный) заключается в том, что вся электрическая схема располагается на одной ПП. Принцип применения ограничен, так как очень сложные ПП имеют низкую надёжность, неудобны при настройке и ремонте ЭВА.

*Многоуровневый* принцип применяют при производстве массовой и серийной ЭВА. Он заключается в том, что конструкция ЭВА состоит из модулей нескольких (двух и более) уровней иерархии. Под конструктивным модулем понимается любой узел ЭВА, который по конструктивному оформлению и технологии производства является самостоятельным и имеет стандартные средства электрического и механического сопряжения.

Высокая ремонтпригодность ЭВА при многоуровневом принципе обеспечивается оформлением конструктивных модулей одного из уровней иерархии в виде сменной единицы (типового элемента замены). Многоуровневый принцип конструирования позволяет организовать производство конструктивных модулей по независимым циклам, т.е. обеспечивает специализацию производства, достичь высокой степени унификации и стандартизации узлов и деталей проектируемой ЭВА, автоматизировать и механизировать процессы изготовления и сборки деталей, использовать прецизионное оборудование высокой производительности и прогрессивные технологические процессы. Недостатки принципа: увеличение размеров и массы ЭВА за счет конструктивного оформления и снижение надежности из-за увеличения количества разъемных и паяных соединений.

В соответствии с ГОСТ различают три метода выполнения ПП:

- ручной;
- полуавтоматизированный;
- автоматизированный.

Предпочтительными являются полуавтоматизированный и автоматизированный методы.

## 9.2. Технологии печатных плат

Особенностями производства ЭВМ на современном этапе являются: использование большого количества стандартных элементов; выпуск этих элементов в больших количествах и высокого качества – одно из основных требований производства средств ЭВА; массовое производство стандартных блоков с использованием новых элементов и унификация элементов, что создает условия для автоматизации их производства; высокая трудоёмкость сборочных и монтажных работ. Наиболее сложной и трудоемкой задачей при конструировании ЭВА являются проектирование и производство печатных плат, что объясняется наличием большого числа соединений и требованием их высокой плотности.

Основным направлением при разработке и создании печатных плат является широкое применение автоматизированных методов проектирования с использованием ЭВМ, что значительно облегчает процесс разработки и сокращает продолжительность всего технологического цикла.

Основные достоинства печатных плат:

- увеличение плотности монтажа и возможность микроминиатюризации изделий;
- высокая стабильность электрических характеристик;
- унификация и стандартизация конструктивных решений;
- возможность комплексной автоматизации монтажно-сборочных работ.

Типы производства:

**Единичное** – производство, при котором изделие выпускается единичными экземплярами. Характеризуется малой номенклатурой изделий, малым объемом партий, универсальным оснащением цехов, рабочими высокой квалификации.

**Серийное** – характеризуется ограниченной номенклатурой изделий, изготавливаемых повторяющимися партиями сравнительно небольшим объемом выпуска. В зависимости от количества изделий в партии различают мелко-, средне- и крупносерийные производства.

**Универсальное** – используется специальное оборудование, которое располагается по технологическим группам, техническая оснастка универсальная, квалификация рабочих средняя.

**Массовое** – характеризуется узкой номенклатурой и большим объемом изделий, изготавливаемых непрерывно; использованием специального высокопроизводительного оборудования, которое расставляется по поточному принципу. В этом случае транспортирующим устройством является конвейер. Квалификация рабочих низкая.

### 9.3. Виды печатных плат

Основой печатной платы является подложка из стеклотекстолита – диэлектрика, представляющего собой спрессованные листы стеклоткани, пропитанной эпоксидным компаундом (смолой). На поверхности стеклотекстолита находится токопроводящий слой медной фольги (проводник). Типовая толщина проводника 0,035 и 0,018 мм. Этот слой является обязательным для всех классов ПП. После проведения определенных технологических операций остаются только нужные элементы этого проводника (токопроводящие «дорожки», контактные площадки).

В зависимости от того, сколько таких слоев имеет ПП, она может попадать в один из трех нижеприведенных классов:

**Односторонние** (однослойные). Проводник присутствует только на одной стороне ПП.

**Двухсторонние** (двухслойные). Проводник присутствует на обеих сторонах ПП.

**Многослойные**. Представляют собой как бы слоеный пирог из двухсторонних плат, между которыми проложены прокладки из стеклоткани, пропитанной в эпоксидной смоле.

**Гибкие**. Выполняются, как правило, двухсторонними с металлизированными отверстиями и контактными площадками толщиной не более 0,6 мм.

**Рельефные**.

#### 9.3.1. Односторонние печатные платы

Маршрут изготовления односторонних плат фотохимическим способом традиционно включает штамповку, сверление, фотолитографию, трав-

ление медной фольги, защиту поверхности и подготовку к пайке, разделение заготовок. В отличие от современных электронных устройств, даже бытового назначения, для односторонних плат необходимы контурное фрезерование, нанесение защитных маскирующих покрытий, их сборка ведется с посадкой кристаллов непосредственно на плату или поверхностным монтажом.

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

Односторонние печатные платы (рис. 13) обеспечивают самую большую точность выполнения проводящего рисунка и совмещения его с отверстиями. Во избежание отслоения печатных проводников все элементы следует монтировать без зазоров между корпусом элемента и печатной платой. Для повышения прочности крепления элементов возможно изготовление односторонних печатных плат с металлизацией отверстий, но их стоимость будет сопоставима с двухсторонними. Односторонние печатные платы благодаря их дешевизне используются преимущественно в бытовой аппаратуре.



Рис. 13. Поперечное сечение односторонней платы

Типовые параметры плат:

максимальные размеры заготовки — 400 x 330 мм;

минимальный диаметр отверстия — 0,6 мм;

минимальная ширина проводника — 0,15 мм;

минимальный зазор — 0,15 мм;

толщина фольги — 36 мкм;

толщина платы — 0,4 — 1,6 мм.

Альтернативой фотохимическому способу изготовления односторонних плат является фрезерование проводящего слоя в медной фольге на двухкоординатных фрезерных станках с ЧПУ. Метод наиболее эффективен при изготовлении прототипов плат, позволяет разработчику получить опытный образец за 1,5 — 2 ч в условиях конструкторского бюро.



### 9.3.2. Двухсторонние печатные платы

В настоящее время двухсторонние платы (рис. 14) составляют значительную долю объема выпуска плат.

Внимание разработчиков к этому виду плат объясняется своеобразным компромиссом между их относительно малой стоимостью и достаточно высокими возможностями. Технологический процесс изготовления двухсторонних плат, также как односторонних, является частью более общего процесса изготовления многослойных ПП. Однако для двухсторонних плат не требуется применять прессования слоев, значительно проще выполняется очистка отверстий после сверления.

Вместе с тем для большинства двухсторонних плат за рубежом проектные нормы «проводник/зазор» составляют 0,25/0,25 мм (40% от объема выпуска), 0,2/0,2 мм (18%) и 0,15/0,15 мм (18%). Это позволяет использовать такие платы для изготовления широкого круга современных изделий, они вполне пригодны как для монтажа в отверстия, так и для поверхностного монтажа. Нередко на проводники двухсторонних плат наносится золотое покрытие, для металлизации отверстий используется серебро.

Известны две разновидности двухсторонних печатных плат: без металлизации и с металлизацией сквозных отверстий. Первые по многим параметрам соответствуют односторонним платам. Но из-за наличия еще одного слоя (в данном случае – первого) повышается трассировочная способность печатных плат и в определенной степени плотность компоновки элементов. Серьезная проблема таких плат – обеспечение электрических переходов между слоями, для чего применяются заклепки, проволоочные перемычки или пайка выводов элементов с двух сторон печатных плат. Все это резко усложняет монтаж и в целом повышает стоимость устройства. Платы первой разновидности обычно используются в любительских и макетных устройствах.

Платы второй разновидности имеют высокую трассировочную способность, обеспечивают высокую плотность монтажа элементов и хорошую механическую прочность их крепления. Они допускают монтаж элементов на поверхности и являются наиболее распространенными в производстве радиоэлектронных устройств.



Рис. 14. Поперечное сечение двухсторонней печатной платы

Типовые параметры двухсторонних плат:

максимальные размеры заготовки – 300 x 250...500 x 500 мм;

минимальный диаметр отверстия – 0,4...0,6 мм;

минимальная ширина проводника – 0,15 мм;

минимальный зазор – 0,15 мм;

толщина фольги – 18...36 мкм;

толщина платы – 0,4 – 2,0 мм.

Отметим, что отечественные разработчики точно так же, как их зарубежные коллеги, закладывают в технические задания на изготовление двухсторонних плат нанесение паяльной маски, маркировку, весьма часто – фрезерование плат по сложному контуру. Как правило, сборка таких плат предусматривает поверхностный монтаж компонентов.

### 9.3.3. Многослойные печатные платы

Многослойные печатные платы (МПП) составляют две трети мирового производства печатных плат в ценовом исчислении, хотя в количественном выражении уступают одно- и двухсторонним платам.

По своей структуре МПП (рис. 15) значительно сложнее двухсторонних плат. Они включают дополнительные экранные слои («земля» и «питание»), а также несколько сигнальных слоев.

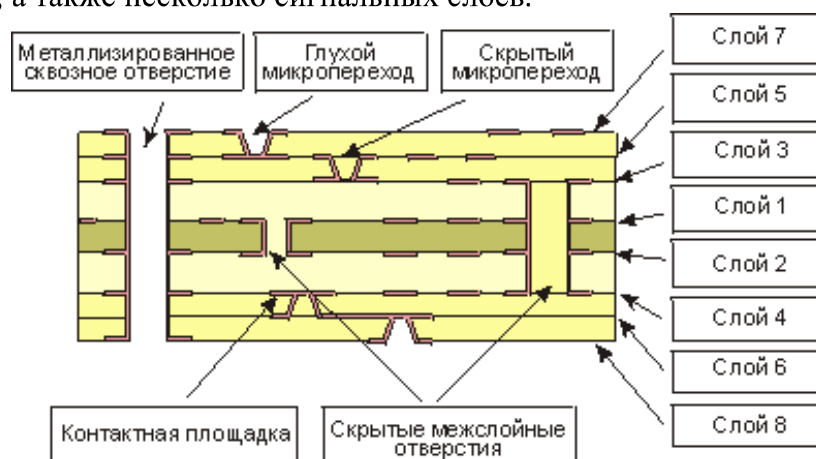


Рис. 15. Многослойная печатная плата

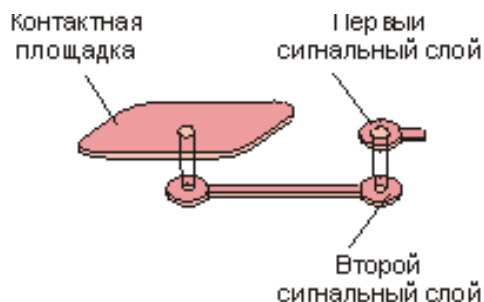
Для обеспечения коммутации между слоями МПП применяются межслойные (**vias**) и микропереходы (**microvias**).

Межслойные переходы могут выполняться в виде сквозных отверстий, соединяющих внешние слои между собой и с внутренними слоями, применяются также глухие и скрытые переходы.

Глухой переход – это соединительный металлизированный канал, видимый только с верхней или нижней стороны платы. Скрытые же переходы используются для соединения между собой внутренних слоев платы. Их применение позволяет значительно упростить разводку плат, например,

12-слойную конструкцию МПП можно свести к эквивалентной 8-слойной коммутации.

Специально для поверхностного монтажа разработаны микропереходы, соединяющие между собой контактные площадки и сигнальные слои (рис. 16).



**Рис. 16.** Микропереходы в контактных площадках

Для изготовления МПП производится соединение нескольких ламинированных фольгой диэлектриков между собой, для чего используются склеивающие прокладки – препреги (рис. 17). Поэтому толщина МПП растет непропорционально быстро с ростом числа сигнальных слоев.

В связи с этим необходимо учитывать большое соотношение толщины платы к диаметру сквозных отверстий. Например, для МПП с диаметром отверстий 0,4 мм и толщиной 4 мм это соотношение равно 10:1, что является весьма жестким параметром для процесса сквозной металлизации отверстий.

8-слойная печатная плата 3,25 +/- 0,03

МАТЕРИАЛ	ТОЛЩИНА
Медная фольга	0,017
Препрег 2113(2)	0,19 +/- 0,02
Медная фольга	0,035
Стеклотекстолит FR-4	0,51 +/- 0,05
Медная фольга	0,035
Препрег 7628(2)	0,36 +/- 0,03
Медная фольга	0,035
Стеклотекстолит FR-4	0,51 +/- 0,05
Медная фольга	0,035
Препрег 7628(2)	0,36 +/- 0,03
Медная фольга	0,035
Стеклотекстолит FR-4	0,51 +/- 0,05
Медная фольга	0,035
Препрег 2113(2)	0,19 +/- 0,02
Медная фольга	0,017

**Рис. 17.** Структура 8-слойной печатной платы 3,25+/-0,03

Тем не менее, даже учитывая трудности с металлизацией узких сквозных отверстий, изготовители МПП предпочитают достигать высокой плотности монтажа за счет большего числа относительно дешевых слоев, нежели меньшим числом высокоплотных, но соответственно более дорогих слоев.

Многослойные печатные платы отличаются очень высокой трассировочной способностью и плотностью монтажа элементов. Они почти не имеют ограничений по устанавливаемым элементам (микросхемы любой степени интеграции, поверхностно монтируемые элементы и т.д.).

Вариантов изготовления многослойных печатных плат предложено очень много, но практическое применение имеют два.

*Четырехслойные печатные платы попарного прессования.* При их изготовлении используется технология двухсторонних печатных плат с металлизацией сквозных отверстий. Печатные платы относительно просты в изготовлении и являются самыми дешевыми из многослойных плат. Они имеют более высокую трассировочную способность по сравнению с аналогичными двухслойными платами, но их монтажная способность ниже, чем у аналогичных двухсторонних печатных плат. Это вызвано тем, что на наружных слоях платы находятся контактные площадки отверстий для перехода на смежный и противоположный слой многослойных печатных плат. Часто такие платы используются в варианте, когда два слоя отводятся для цепей «земля» и «питание» (в виде сетчатых слоев), а остальные — для трассировки функциональных цепей.

С появлением других приемов изготовления многослойных печатных плат технология попарного прессования стала применяться реже.

*Многослойные печатные платы с металлизацией сквозных отверстий.* Имеются две разновидности таких печатных плат: с внутренними межслойными переходами и без них. Фактически это один вариант изготовления, но наличие внутренних переходов с технологической точки зрения можно рассматривать как дополнительную разновидность. Данные платы позволяют монтировать любые элементы с одной или двух сторон.

Посредством чередования экранных и функциональных слоев внутри платы удастся получать проводники (цепи) с определенными электрическими параметрами, например с нормированным волновым сопротивлением.

Трассировочная способность многослойных печатных плат (при прочих равных условиях) зависит от количества слоев. На практике в основном используются платы с количеством слоев от 8 до 12. Увеличение числа слоев связано с проблемами металлизации сквозных отверстий (требуется сложное специализированное оборудование и тонкие технологии).

Многослойные печатные платы с внутренними межслойными переходами имеют более высокую трассировочную способность по сравнению с многослойными печатными платами без переходов (при одинаковой их толщине), однако имеют более высокую стоимость. Поэтому применение таких

плат оправдано только в случаях, когда размеры или количество слоев и соответственно толщина платы по разным причинам не должны превышать заданные значения. Тогда для обеспечения трассировки всех функциональных цепей приходится применять многослойные печатные платы с внутренними межслойными переходами.

Стоимость многослойных печатных плат очень высока и зависит от количества слоев, причем при наличии межслойных переходов она почти в два раза выше, чем без них. Такие платы применяются в быстродействующих устройствах с микросхемами высокой степени интеграции. На практике это микросхемы в корпусах с 64 и более выводами. Принятые границы степени интеграции достаточно условны.

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

#### *9.3.4. Гибкие печатные платы*

Использование гибких диэлектрических материалов для изготовления печатных плат дает как разработчику, так и пользователю электронных устройств ряд уникальных возможностей. Это, прежде всего, уменьшение размеров и веса конструкции, повышение эффективности сборки, улучшение электрических характеристик, теплоотдачи и в целом надежности.

Если учесть основное свойство таких плат – динамическую гибкость, становится понятным всевозрастающий объем их применения в автомобилях, бытовой технике, медицине, в оборонной и аэрокосмической технике, компьютерах, в системах промышленного контроля и бортовых системах.

Гибкие печатные платы (ГПП) изготавливаются на полиимидной или лавсановой пленке, поэтому могут легко деформироваться даже после формирования проводящего рисунка. Большая часть конструкций ГПП аналогична конструкциям печатных плат на жесткой основе.

**Односторонние ГПП** (рис. 18) наиболее распространены в этом классе плат, поскольку обладают наилучшей динамической гибкостью. Контактные площадки плат расположены с одной стороны, в качестве материала проводящей фольги чаще всего используется медь.



Рис. 18. Односторонняя гибкая печатная плата

**Односторонние ГПП с двухсторонним доступом** (рис. 19) имеют один проводящий слой, контактные площадки к которому выполнены с обеих сторон платы.



Рис. 19. Односторонняя гибкая печатная плата с двухсторонним доступом

**Двухсторонние ГПП** имеют два проводящих слоя, которые могут быть соединены сквозными металлизированными переходами (на рис. 20 проводники нижнего слоя идут перпендикулярно проводникам верхнего слоя). Платы этого типа обеспечивают высокую плотность монтажа, часто применяются в электронных устройствах с контролируемым волновым сопротивлением (импедансом) плат.



Рис. 20. Двухсторонняя гибкая печатная плата

**Многослойные ГПП** (рис. 21) содержат не менее трех проводящих слоев, соединенных металлизированными отверстиями, которые обеспечивают межслойное соединение. В платах проще реализовывать высокую плотность монтажа, поскольку не требуется обеспечивать больших значений соотношений «высота/диаметр отверстия». Прогнозируется применение таких ГПП для сборки на них многокристальных интегральных схем.



Рис. 21. Многослойная гибкая печатная плата

**Жесткогибкие ПП** (рис. 22) являются гибридными конструкциями и содержат как жесткие, так и гибкие основания, скрепленные между собой в единую сборку и электрически соединенные металлизированными отвер-



ствиями. Наиболее распространены в изделиях оборонной техники, однако расширяется их применение и в промышленной электронике.

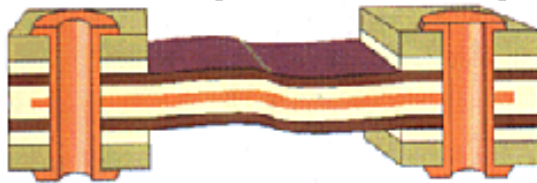


Рис. 22. Жесткогибкая печатная плата

В ГПП с местным ужесточением (укреплением) возможно размещение внутри гибкой основы жестких металлических деталей (рис. 23). Получаются многоэтапным процессом фотолитографии и травления.



Рис. 23. Гибкая печатная плата с местным ужесточением

#### 9.3.5. Рельефные печатные платы

Конструкция и технология изготовления рельефных печатных плат (РПП) существенно отличаются от традиционных двухсторонних (ДПП) и многослойных (МПП). РПП (рис. 24) представляет собой диэлектрическое основание, в которое углублены медные проводники, выполненные в виде металлизированных канавок, и сквозные металлизированные отверстия, имеющие форму двух сходящихся конусов. Такие канавки и отверстия заполняются припоем. Обычно РПП имеют два проводящих и один изоляционный слой.

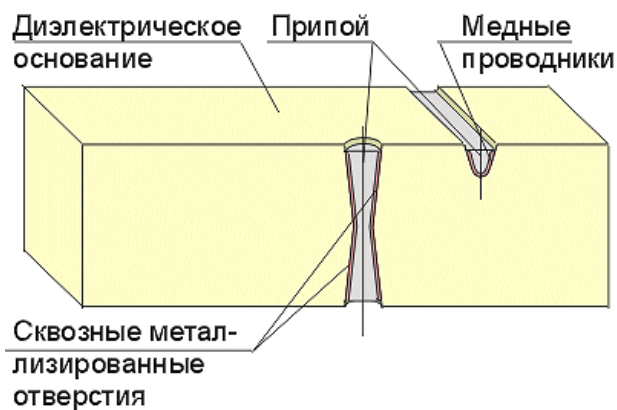


Рис. 24. Рельефная печатная плата

Как видно из рис. 25, элементы проводящего рисунка могут быть следующих видов:

- прямолнейные проводники на первом и втором слоях;
- переходные металлизированные отверстия (для электрического соединения элементов рисунка на проводящих слоях);
- сквозные монтажные металлизированные отверстия (для монтажа штыревых выводов электронных компонентов);
- металлизированные ламели (для монтажа планарных выводов электронных компонентов);
- глухие монтажные металлизированные отверстия (для монтажа планарных выводов электронных компонентов, формованных для пайки встык).

Проводники прямолинейны и параллельны осям X и Y, что связано с особенностью технологического оборудования изготовления канавок.

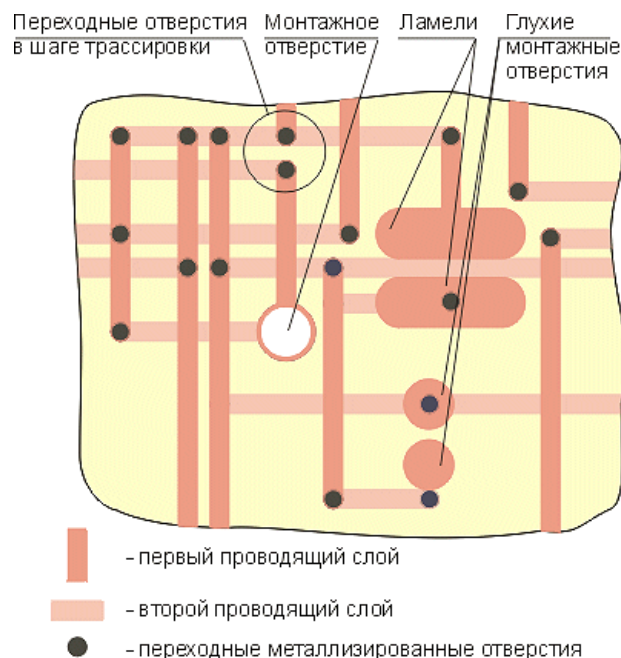
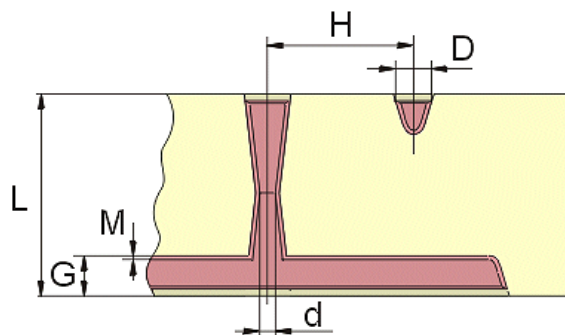


Рис. 25. Элементы проводящего рисунка

**Характеристики рельефных плат.** Диаметр переходных металлизированных отверстий на поверхности диэлектрического основания не превышает ширины проводника (рис. 26). При этом контактные площадки вокруг переходных отверстий отсутствуют, что дает возможность установки переходов в шаге трассировки (в соседних дискретах трассировки) без всяких ограничений. Обычно трассировка РПП проводится в строго ортогональной системе, что означает проведение горизонтальных проводников на одном проводящем слое, вертикальных – на другом. Это обеспечивает большие трассировочные возможности, чем при других системах, но при этом появляется большое число переходов. В отличие от любых других, для РПП переходы повышают, а не понижают надежность платы.



**Рис. 26.** Диаметр переходных металлизированных отверстий

Основным параметром конструкции РПП, определяющим другие, является минимальный шаг трассировки. Здесь существенно использование переменного шага трассировки. Первоначально это диктовалось применяемым технологическим оборудованием, обеспечивавшим перемещение с дискретностью 10 мкм. В дальнейшем обнаружилось, что это повышает трассировочные возможности за счет симметричного прохождения трасс через большинство монтажных точек. Кроме того, переменный шаг позволяет повысить технологичность путем смещения центров переходных отверстий от краев монтажных точек.

#### 9.4. Толщина печатных плат

Толщина односторонних и двухслойных печатных плат напрямую зависит от используемого материала, который выбирается конструктором по соображениям механической прочности и жесткости. Если исходным материалом является фольгированный диэлектрик (стеклотекстолит и т.д.), то толщина печатной платы определяется именно им.

Марки и номенклатура некоторых отечественных и импортных материалов представлены в табл. 1, 2.

**Таблица 1.** Марки и номенклатура некоторых отечественных материалов

Марка	Диэлектрик и назначение	Толщина	
		материала	фольги
1	2	3	4
СФ-1Н-35Г	Стеклотекстолит	0,5 – 3,0	0,035
СФ-2Н-35Г			0,035
СФ-1Н-50Г			0,05
СФ-2Н-50Г			0,05
СФ-1-35Г	Стеклотекстолит	0,5 – 3,0	0,035
СФ-2-35Г			0,035
СФ-1-50Г			0,05
СФ-2-50Г			0,05
ФС-1, ФС2	Стеклотекстолит	0,5 – 3,0	0,018
			0,035
			0,05

Продолжение табл. 1			
1	2	3	4
СТНФ-1-18	Стеклотекстолит для ДПП и МПП	0,1 – 1,0	0,018
СТНФ-2-18		1,5	0,018
СТНФ-1-35		2	0,035
СТНФ-2-35		2,5	0,035
СТФ-1-18		3	0,018
СТФ-2-18			0,018
СТФ-1-35			0,035
СТФ-2-35			0,035
СТПА-5-1	Стеклотекстолит для полуаддитивной технологии	0,15 – 2,0	0,005
СТПА-5-2			
ФТС-1-18А	Стеклотекстолит, травящийся для МПП	0,09 – 0,5	0,018
ФТС-2-18А			
ФТС-1-35А		0,1 – 0,5	0,035
ФТС-2-35А			
СТАП-1-5	Стеклотекстолит для ДПП и МПП	0,08 – 2,0	0,005
СТАП-2-5			0,005
СТАП-2-18			0,018
СТАП-2-35			0,035

Таблица 2. Марки и номенклатура некоторых импортных материалов

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

Толщина многослойных плат зависит от разных факторов: количества слоев, числа прокладок, толщины используемых материалов и структуры платы. При изготовлении полностью из двухстороннего фольгированного диэлектрика она может быть рассчитана по формуле

$$H_{\Pi} = 0,5 N_{\text{сл}} H_{\text{с}} + (0,6 - 0,9)(0,5 N_{\text{сл}} - 1) N_{\text{пр}} H_{\text{пр}},$$

где  $H_{\Pi}$  – толщина многослойных печатных плат;

$N_{\text{сл}}$  – количество слоев;

$H_{\text{с}}$  – толщина материала (фольгированного диэлектрика);

$N_{\text{пр}}$  – количество прокладок в одном промежутке;

$H_{\text{пр}}$  – толщина прокладочной ткани.

Толщина многослойных печатных плат при изготовлении полностью из двухстороннего фольгированного травящегося стеклотекстолита ФТС-2-18Б-018 и прокладочной стеклоткани СТП4-0.062 (три прокладки в зазоре) рассчитывается по формуле

$$H_{\text{п}} - 0,198 H_{\text{сл}} - 0,162,$$

позволяющей решить и обратную задачу – определить, сколько слоев можно «вложить» в плату заданной толщины. В частности, это необходимо знать для типовых печатных плат с заданной (стандартной) толщиной.

Например, печатные платы с толщиной 1,5 и 1,6 мм могут содержать не больше восьми слоев.

Очевидно, что при использовании других материалов получаются соответственно иные показатели.

### 9.5. Класс точности

Точность изготовления печатных плат зависит от комплекса технологических характеристик и с практической точки зрения определяет основные параметры элементов печатной платы. В первую очередь это относится к минимальной ширине проводников, минимальному зазору между элементами проводящего рисунка (все это выполнено из меди) и ряду других параметров.

Предусматривается пять классов точности печатных плат, и в конструкторской документации на печатную плату должно содержаться указание на соответствующий класс, который обусловлен уровнем технологического оснащения производства (табл. 3). Поэтому выбор класса точности всегда связан с конкретным производством. Попытка решить эту задачу в обратном порядке может привести к тому, что проект не будет реализован.

**Таблица 3.** Параметры печатных плат для разных классов точности

Условное обозначение	Номинальное значение основных параметров для класса точности				
	1	2	3	4	5
t, mm	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
S, mm	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
b, mm	0,3	0,2	0,1	0,05	0,025
f	0,4	0,4	0,33	0,25	0,2

Примечание. t – ширина печатного проводника; S – расстояние между краями соседних элементов проводящего рисунка; b – гарантированный поясик; f – отношение номинального значения диаметра наименьшего из металлизированных отверстий к толщине печатной платы.

Печатные платы 3-го класса наиболее распространены, поскольку, с одной стороны, обеспечивают достаточно высокую плотность трассировки и монтажа, с другой – для их производства требуется рядовое, хотя и специализированное оборудование.

Печатные платы 4-го класса выпускаются на высокоточном оборудовании, но требования к материалам, оборудованию и помещениям ниже, чем для пятого класса.

При изготовлении печатных плат 5-го класса необходимо применение уникального высокоточного оборудования, специальных (как правило, дорогих) материалов, безусадочной фотопленки и даже создание в производственных помещениях «чистой зоны» с термостатированием. Таким требованиям отвечает далеко не каждое производство. Но многослойные печатные платы небольшого размера могут выполняться по 5-му классу на оборудовании, обеспечивающем получение плат 4-го класса. Комплексно решить все эти проблемы удастся только на реальном производстве.

Выпуск печатных плат 2-го и 1-го классов осуществляется на рядовом оборудовании, а иногда даже на оборудовании, не предназначенном для изготовления печатных плат. Такие печатные платы с невысокими (и даже с низкими) конструктивными параметрами предназначены для недорогих устройств с малой плотностью монтажа. К этим классам относятся печатные платы любительского и макетного уровня, часто единичного или мелкосерийного производства.

За рубежом принята другая классификация печатных плат по уровню точности (табл. 4). В ней регламентируются не только конструктивные параметры, но и шаг трассировки, что фактически связывает уровень производства с параметрами печатных плат и степенью интеграции элементной базы.

**Таблица 4.** Классификация зарубежных печатных плат по уровню точности

Уровень	Ширина проводника и зазор	Шаг проектирования		Шаг выводов	
		Наружные слои	Внутренние слои	Планарные	Матричные
0	0,2	1,25	0,625	0,625	2,5
1	0,15	0,625	0,625	0,5	1,25
2	0,1	0,625	1	0,5	1
3	0,075	0,5	1	0,5	1
4	0,05	0,5	0,5	0,25	0,5
0,05	0,25	0,25	0,25	0,25	0,5

#### 9.6. Параметры проводников и зазоров

Основные параметры (размеры и допустимые отклонения) проводников и зазоров между элементами проводящего рисунка оговорены и непосредственно зависят от принятого класса точности печатных плат.

Минимальная ширина проводников и величина зазоров – основные факторы, влияющие на трассировочную способность печатной платы. Однако это относится только к слаботочным цепям, для которых сечение печатных проводников, исчисляемое величиной порядка 0,005 мм<sup>2</sup>, не является ограничением. Но на печатных платах часто присутствуют цепи, не-

сущие достаточно большие токовые нагрузки. Их следует конструировать не с минимальными значениями печатных проводников, а с учетом конкретной токовой нагрузки из условий исключения опасного перегрева этих проводников. Кроме того, не исключено, что смежные проводники будут находиться под высоким потенциалом, поэтому зазоры между ними должны выдерживать соответствующее напряжение.

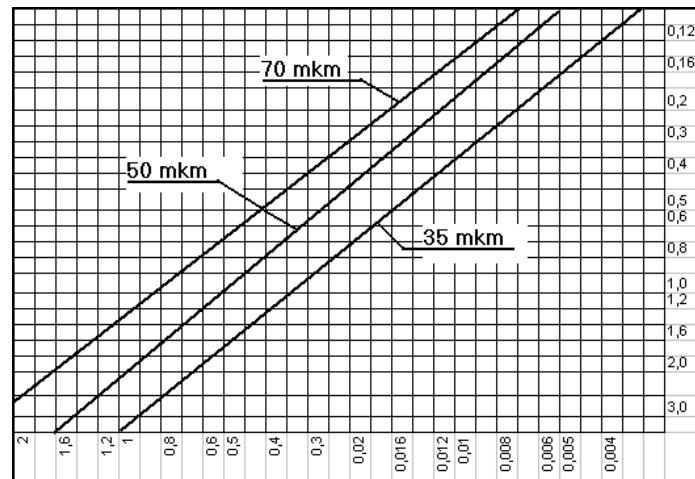
Допустимая токовая нагрузка на элементы проводящего рисунка, выполненные из медной фольги,  $100 - 250 \text{ А/мм}^2$ . Обычно нижний предел принимается для внутренних проводников многослойных печатных плат, верхний – для наружных слоев. Считается, что теплообмен проводников на наружных слоях лучше и они способны пропускать большие токовые нагрузки без опасного перегрева. Конкретные размеры печатных проводников в зависимости от токовой нагрузки либо рассчитывают, используя приведенные данные, либо выбирают по номограмме (рис. 27), в которой представлены различные значения перегрева в условиях естественной конвекции для одиночных печатных проводников постоянной ширины, расположенных на наружных слоях и расстоянии, равном ширине проводника.

Величину допустимой токовой нагрузки, полученную по номограмме, следует скорректировать для печатных проводников:

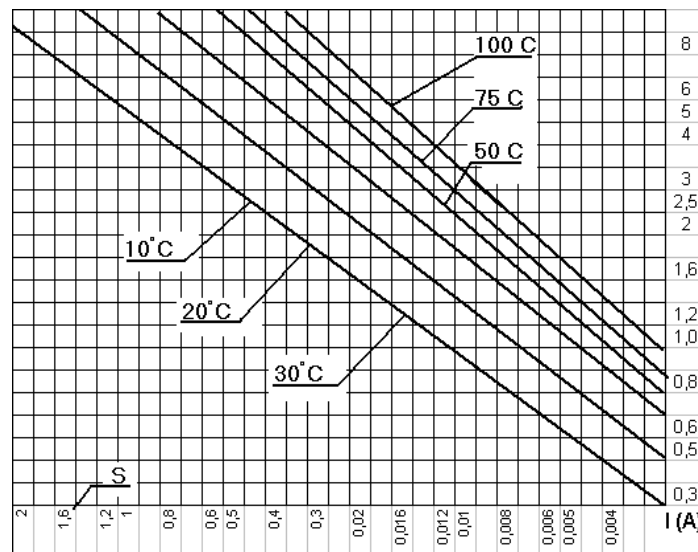
расположенных на расстоянии больше своей ширины, увеличить на 15%;

на платах, выполненных по полуаддитивной технологии, уменьшить на 25%;

на платах, выполненных по аддитивной технологии, уменьшить вдвое.



**Рис. 27.** Допустимая токовая нагрузка на элементы проводящего рисунка, выполненные из медной фольги



**Рис. 27.** Допустимая токовая нагрузка на элементы проводящего рисунка, выполненные из медной фольги (продолжение)

В ряде случаев, чтобы оценить нагрузочную способность печатных проводников, достаточно помнить, что проводник толщиной 35 мкм (а это наиболее распространенная толщина) и шириной 1 мм при перегреве в 20<sup>0</sup>С пропускает ток в 3 А. С помощью этих данных легко рассчитать нагрузочную способность проводников любой ширины. Но повторяем, что это оценочный расчет.

Минимальные зазоры между элементами проводящего рисунка (т.е. зазоры между любыми металлизированными элементами печатной платы) определяются в основном технологией печатных плат и допустимым напряжением между соседними (смежными) элементами. Значения максимально допустимого рабочего напряжения между элементами рисунка в зависимости от условий эксплуатации для печатных плат, изготовленных из фольгированного текстолита, представлены в табл. 5.

**Таблица 5.** Значения максимально допустимого рабочего напряжения между элементами рисунка в зависимости от условий эксплуатации

Расстояние между элементами проводящего рисунка, не менее	0,1	0,2	0,3	0,4	0,7	1,2	2
Нормальные условия	25	50	150	300	400	600	830
Относительная влажность 93% при температуре 40° С	15	30	100	200	300	360	430
Пониженное атмосферное давление 660 Па (5 мм рт.ст.)	10	30	50	80	100	130	160

В слаботочной и низковольтной аппаратуре (а это большинство устройств, построенных с применением цифровых и аналоговых микросхем) ширина печатных проводников и зазоры выбираются минимальными для технологии и конструкции изделия. Эти данные для печатных плат раз-

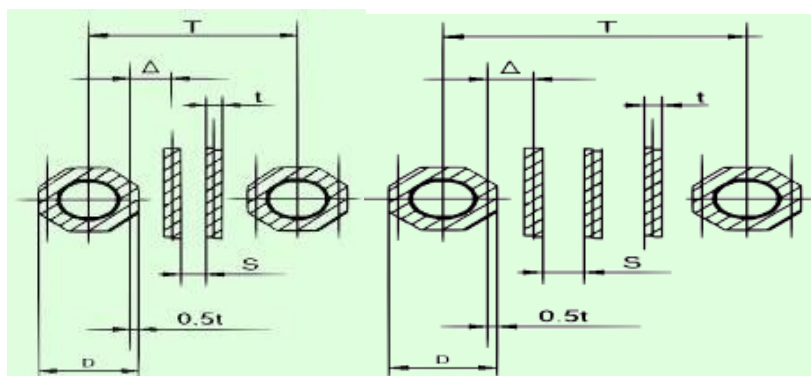


личных классов точности и нескольких вариантов изготовления содержится в табл. 6.

**Таблица 6.** Ширина печатных проводников и зазоров между ними для П.П. различных классов точности в нескольких вариантах изготовления

Класс точности	Ширина проводника, мм		Минимальный зазор, мм	
	Номинальное значение	Минимальное значение	Без покрытия	С покрытием
1	0,75	0,6	0,55	0,75
2	0,45	0,35	0,35	0,45
3	0,25	0,2	0,15	0,25
4	0,15	0,12	0,1	0,15
5	0,1	0,07	0,07	0,1

Кроме того, размеры (ширина) печатных проводников, зазоры между ними и величина допусков влияют на шаг трассировки. Формально на печатной плате возможен любой шаг трассировки, но для получения максимальной трассировочной способности необходимо его согласовать с шагом металлизированных отверстий. На рис. 28 изображен фрагмент печатной платы с нанесенной сеткой трассировки (с координатной сеткой), на котором видно, что почти все параметры проводников, зазоров и контактных площадок связаны между собой и с шагом металлизированных отверстий.



**Рис. 28.** Фрагмент печатной платы с нанесенной сеткой трассировки

$$T = \Delta n, \quad D = t + S, \quad D = \Delta (n-2) - 3t, \quad D = \Delta k + t.$$

Обычно шаг трассировки выбирается кратным шагу отверстий, точнее, шаг между отверстиями должен быть равен целому числу шагов трассировки проводников.

Именно поэтому нежелательно иметь на печатной плате группы отверстий с различными шагами, но на сегодняшний день одновременное использование элементов с разными шагами стало правилом, а не исключением. Чаще всего на одной плате компонуются элементы с метрическим и дюймовым шагами выводов. В подобной ситуации можно ориентироваться на шаг большинства элементов. В затруднительных случаях лучше взять за основу шаг отверстий у элементов, размещаемых в центральной

части печатной платы. Именно в этой области необходимо обеспечить наибольшую трассировочную способность, поскольку трассировка там самая плотная.

В метрической системе наиболее распространенным считается шаг выводов в 2,5 мм (имеются в виду штыревые выводы). Это основной шаг при формовке выводов многих навесных элементов, включенных в ОСТ 4.010.030-81 или ОСТ 45.010.030-92, в соответствии с ГОСТ 29137-91. Для шага металлизированных отверстий, равного 2,5 мм, можно принять шаг трассировки 2,5; 1,25; 0,625; 0,5 и 0,3125, для дюймового шага (2,54 мм) – 2,54; 1,27; 0,635 и 0,3175.

В табл. 7 приведены минимальные расчетные (теоретические) значения и соответствующие рекомендуемые шаги трассировки, в которых учитывается кратность шага металлизированных отверстий.

**Таблица 7.** Минимальные расчетные (теоретические) значения и соответствующие рекомендуемые шаги трассировки

Класс точности	1	2	3	4	5
Проводники без покрытия	0,75±0,15	0,45±0,1	0,25±0,05	0,15±0,03	0,1±0,03
Проводники с покрытием	0,75	0,45	0,25±0,05	0,15±0,03	1±0,03
Минимальный зазор	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
Расчетный шаг трассировки	1,65	1,0	0,55	0,35	0,23
Рекомендуемый шаг трассировки	2,5	1,25	0,625	0,5	0,3175
	2,54	1,27	0,635		0,3175

#### 9.7. Защитные покрытия печатных плат

Как правило, печатные платы подвержены влиянию окружающей среды (имеются в виду пыль, грязь, влага, микрофлора и многое другое). Кроме того, печатные проводники на наружных слоях оказываются просто без электрической изоляции, что может стать причиной всяческих отказов в работе аппаратуры. Эти проблемы решаются при помощи защитного изоляционного покрытия. В простейшем случае плата после монтажа всех элементов и промывки покрывается лаком (одним или несколькими слоями). Лак наносится методами окунания, полива или распыления, и под ним оказываются не только все проводники, но и элементы, что не всегда желательно. Некоторые элементы просто не допускают лакировки, например соединители, различные лепестки, контакты и ряд микросхем.

При окунании лак попадает во все щели и зазоры, в которых он после полимеризации образует сгустки, причиняющие (из-за усадок) механические повреждения, так что в процессе конструирования необходимо предусматривать зазоры, обеспечивающие удаление остатков жидкого лака (в

производстве для этого применяется центрифугирование). При любых способах нанесения лак проникает по капиллярам во внутренние полости соединителей и выводит их из строя. Из-за сложностей технологического порядка от лакировки отказываются и защищают печатные платы масками.

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

Одним из эффективных приемов групповой пайки считается пайка волной, при которой монтажная сторона платы с предварительно установленными элементами пропускается над волной расплавленного припоя. Волна омывает печатные проводники и выводы элементов, при этом выполняется групповая пайка всех элементов и припой покрывает все остальные открытые металлические поверхности на плате, а не только места пайки. Этот процесс при всей его простоте не обеспечивает стабильного качества пайки на платах с минимальными зазорами между элементами проводящего рисунка. Всегда существует опасность образования перемычек в узких зазорах, поэтому пайка волной (без применения защитных масок) допустима только на платах 1-го и 2-го классов точности. К тому же тратить огромное количество припоя на покрытие проводников, для которых это совершенно излишне, большое расточительство.

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

Для металлизированных отверстий в маске имеются окна в форме контактных площадок. Если плата выполняется по высокому классу точности (5-му или 4-му), то маску делают больше контактной площадки на 0,1 мм. В платах с низким классом точности контактные площадки больше и размеры окон в маске выполняются по размерам контактных площадок.

Защитная маска для элементов, монтируемых на поверхность, должна быть в любом случае больше контактной площадки: для рассыпных элементов – на 0,1 мм, для микросхем с шагом 0,625 мм и менее – всего на 0,05 мм. Допускается, чтобы плотные группы контактных площадок имели общую маску, точнее единое окно для группы плоских контактных площадок, но по возможности этого следует избегать, так как наличие даже узкой полоски защитной маски между смежными контактными группами при пайке снижает вероятность их замыкания. Если пайка производится волной припоя, то такое объединение вообще недопустимо.

При составлении заявки к производству печатных плат следует указать, необходимо ли закрывать переходные отверстия маской. Для маски должны быть созданы отдельные слои (обычно это слои MSKGTP и MSKGBT).

# Типовые ошибки трассировки печатных плат

## Введение

В данном документе показаны типовые ошибки допускаемые разработчиками при трассировке печатных плат. Также показаны варианты правильной трассировки. В данном документе рассматриваются фундаментальные основы, без знания которых, даже простые низкоскоростные платы могут оказаться неработоспособными или с набором недостатков. Это могут быть необъяснимые сбои в работе, зависания, локальные перегревы, электрические пробойи на плате и т.п. Также из-за несоблюдения технологических норм и правил могут возникать производственно-технологические дефекты – некачественная пайка, локальные замыкания между дорожками и т.п. В данном документе не рассматриваются такие важные задачи как трассировка скоростных цепей, дифференциальных пар, цифровая и аналоговая земли, правильная компоновка и структура слоев печатной платы. Эти темы очень объемны и требуют отдельного рассмотрения.

## Содержание

1. Правильное подключение выводов микросхем
2. Подключение переходных отверстий
3. Правило 3/4
4. Подключение земли и питания
5. Трассировка силовых цепей питания
6. Зазоры
7. Трассировка BGA
8. Трассировка цепей содержащих кварцевый резонатор
9. Внутренние вырезы на плате (фреза)
10. Дискретность угла установки компонентов на плате

## 1. Правильное подключение выводов микросхем

Все соединения между выводами микросхем должны находиться вне зоны пайки.

На рисунках 1.1 и 1.2 приведены примеры неправильной подводки проводников к резисторным сборкам. Области неправильного подключения обведены для наглядности линией белого цвета. Нарушено технологическое правило – соединения между выводами должны находиться вне зоны пайки. В результате велик риск непропая или некачественного контакта, особенно для варианта на рис.1.2.

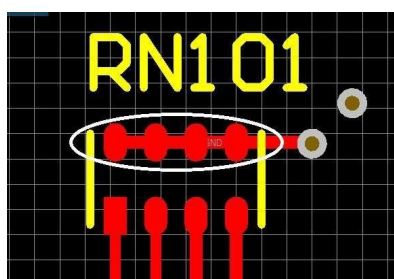


Рис. 1.1

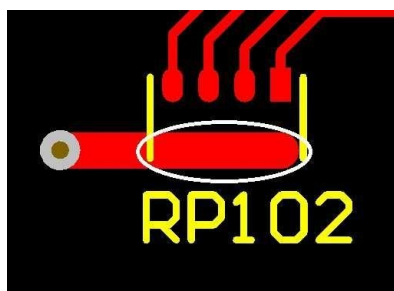


Рис. 1.2

На рис.1.3 показан вариант правильной трассировки резисторной сборки.

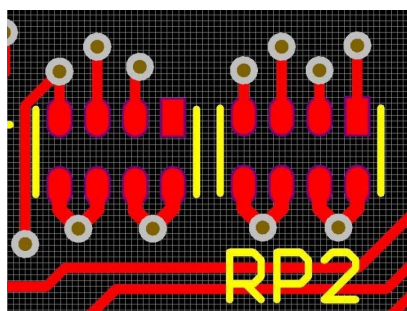


Рис. 1.3

На рисунках 1.4, 1.5 и 1.6 показано неправильное соединение выводов микросхем. На данных примерах это цепи питания и земли. Кроме технологических ошибок, такие соединения ухудшают функционирование микросхемы.

Например, на рис.1.4 видно, что четыре земляных вывода микросхемы соединены между собой (технологическая ошибка) и одиночным тонким проводником вся группа выводов подключается к земле платы. Так подключать нельзя!

Множественность выводов питания и земли на корпусе микросхемы преследует двоякую цель:

- a) Обеспечить прохождение требуемых токов потребления как в типовом режиме (статические токи потребления), так и импульсных токов потребления (ток в импульсе может значительно превосходить средний ток потребления);
- b) Снизить паразитную индуктивность (и емкость) подключения выводов, что повышает помехоустойчивость и стабильность работы высокоскоростных микросхем.

Для рассмотренной группы выводов велико как паразитное резистивное сопротивление между выводами и землей, так и паразитная индуктивность. Ориентировочный расчет для меди толщиной 35мкм дает следующие данные:  $R_p = 4.5 \text{ мОм}$ ,  $L_p = 0.44 \text{ нГн}$ .

Если подключить каждый вывод этой группы отдельным коротким проводником (например 0.35мм), то паразитное сопротивление уменьшится в 20 раз, а индуктивность в 50 раз.

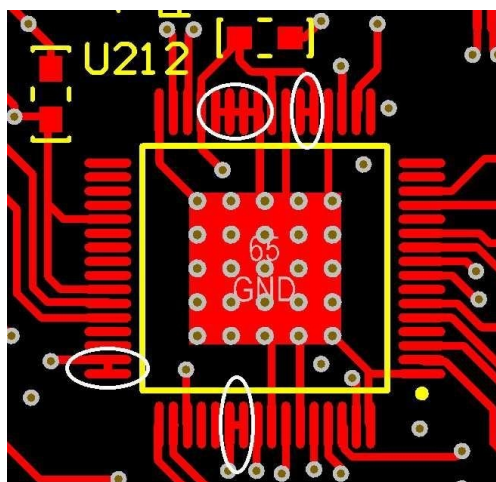


Рис.1.4

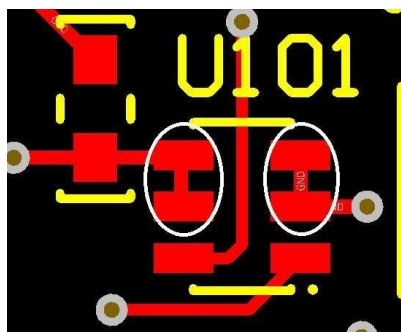


Рис.1.5

На рис.1.6 видно, что в результате заливки полигоном земли, группы выводов земли микросхемы (на рисунке выделены группа из 4-х и из 2-х выводов) оказались на практически сплошном полигоне земли. Риск некачественной пайки при монтаже очень велик. При сплошной заливке полигонами какого-либо участка платы (особенно на слоях Top и Bottom) необходимо анализировать полученный результат, чтобы избежать появления подобных моментов. Можно менять форму полигона с соответствующими зазорами и проводниками для подключения, делать вырезы в полигонах и т.п.

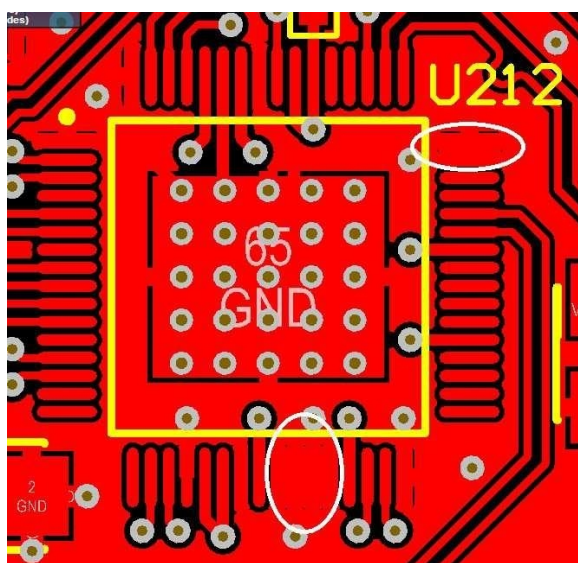


Рис.1.6

На рисунке 1.7 показан пример исключения – выводы припаиваются непосредственно на полигон земли. Такой прием применяется тогда, когда другими средствами обеспечить отвод тепла от микросхемы не удастся, или затруднительно. В данном примере показана микросхема преобразователя питания, работающая непосредственно на трансформатор.

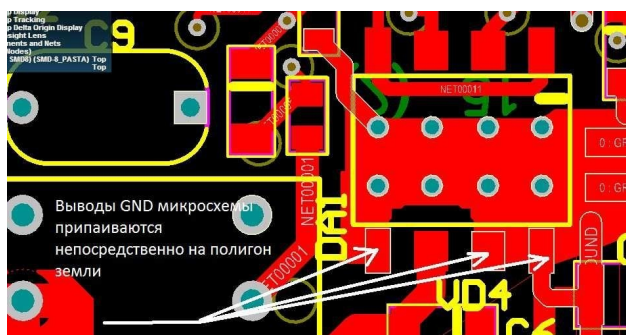


Рис.1.7

## 2. Подключение переходных отверстий

Переходные отверстия (Via) должны быть удалены от контактных площадок компонентов на расстояние не меньше, чем 0.25мм (допустимо до 0.1(0.15)мм при плотной компоновке).

На рис.2.1 показаны слишком маленькие расстояния от переходных отверстий до контактной площадки. При этом нет никаких препятствий на плате, чтобы обеспечить минимум 0.25мм.

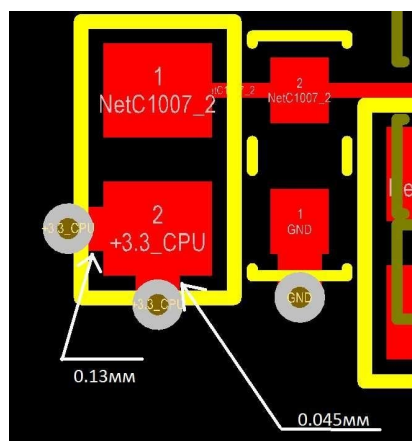


Рис.2.1

На рис.2.2 переходные отверстия краем заходят на контактную площадку L1711. Никаких препятствий, чтобы обеспечить правильное расположение, также нет.

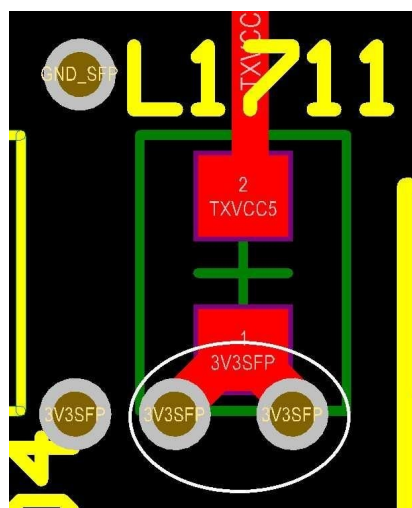


Рис.2.2



### 3. Правило 3/4

Правило 3/4 (0.75) - ширина проводника подключаемого к контактной площадке не должна превышать ширину контактной площадки умноженную на 0.75.

Исключения можно делать только для силовых цепей и там, где это действительно нужно (например, рис.1.7 или рис.3.5).

На рисунке 3.1 показана группа достаточно медленных статусных сигналов подключаемых к контактным площадкам микросхемы. Ширина контактной площадки микросхемы - 0.27мм, ширина подключаемого проводника - 0.254мм. Ширина проводника в данном случае избыточна и ничем не обоснована - класс разводки -4 (0.15/0.15).

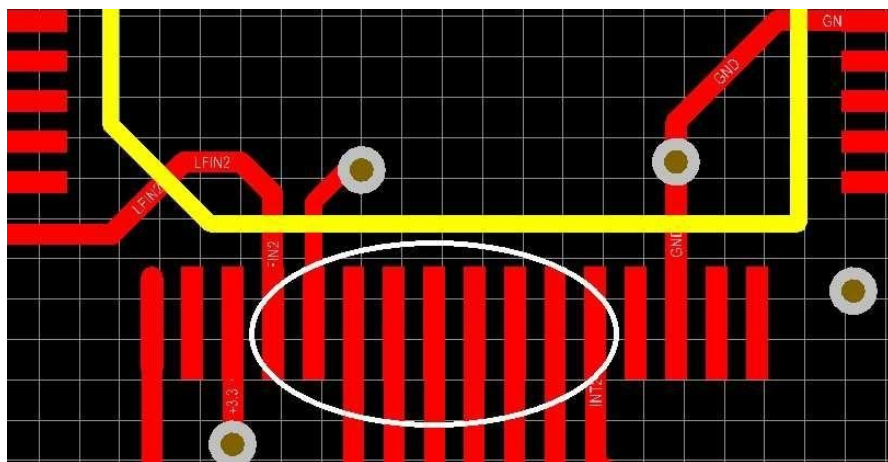


Рис.3.1

По правилу 3/4 для вышеописанного случая вполне подойдет проводник с шириной - 0.2мм. (см. рис.3.2).

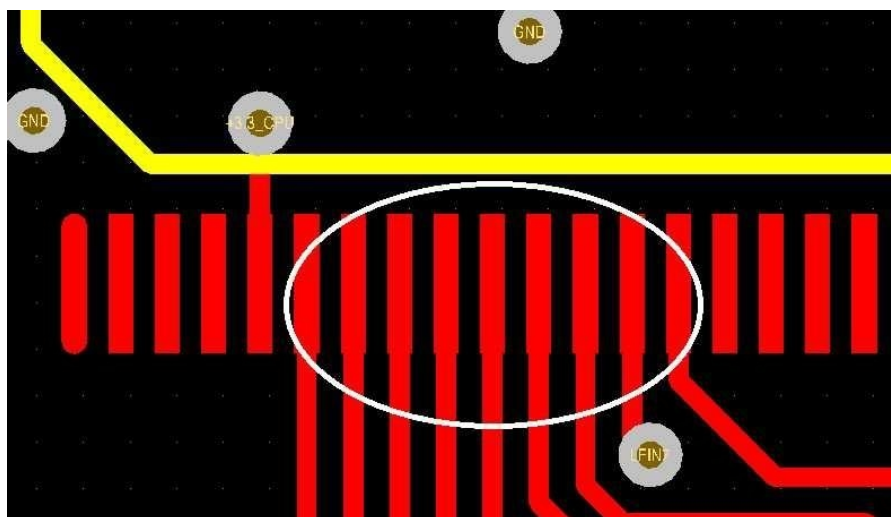


Рис.3.2

На рисунках ниже по тексту показано подключение конденсатора с неправильным выбором ширины проводников (Рис.3.3) и с правильным (Рис.3.4).



Рис.3.3



Рис.3.4

На рис.3.5 приведен пример подключения силовых проводников микросхемы преобразователя. Для преобразователя питания на ток 3А, подключаем силовые выводы микросхемы проводниками равными по ширине 0.35мм (ширина контактных площадок микросхемы 0.35мм) к соответствующим полигонам. Правило 3/4 выполнять в данном случае необязательно.

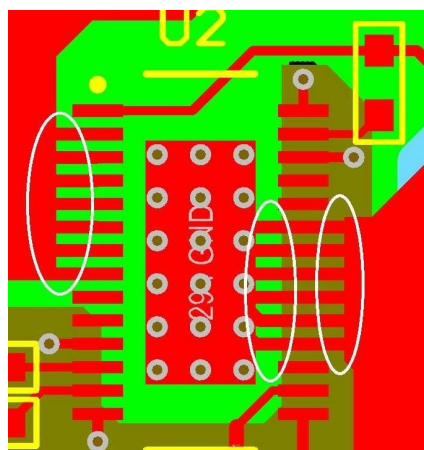


Рис.3.5

## Подключение земли

На рисунке 4.1 приведен пример неправильного подключения земли к разъему SFP. Стрелками показаны длинные (>2мм) и тонкие (0.254мм) подключения земель. Паразитные параметры (R и L) при таком подключении будут велики.

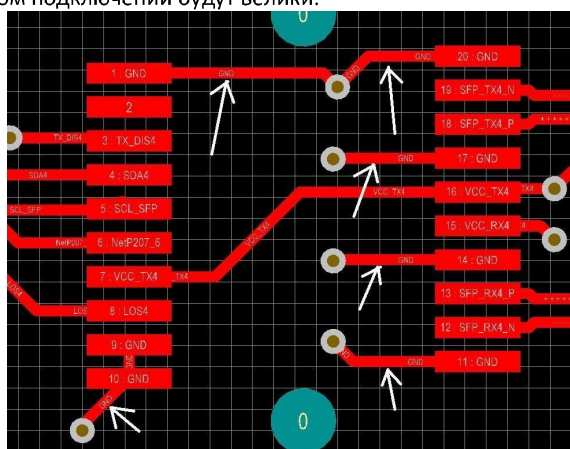


Рис.4.1

Рис.4.2

На рисунках 4.3 и 4.4 показано плохое подключение земли к конденсаторам (фильтры питания). Конденсатор C1517 на рис.4.3 удостоивается звания – «Суперконденсатор», хуже подключение земли трудно придумать.

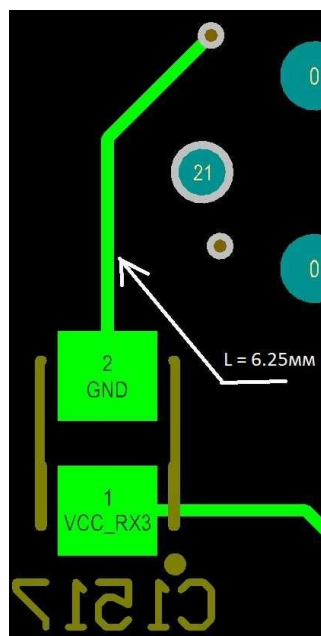


Рис.4.3

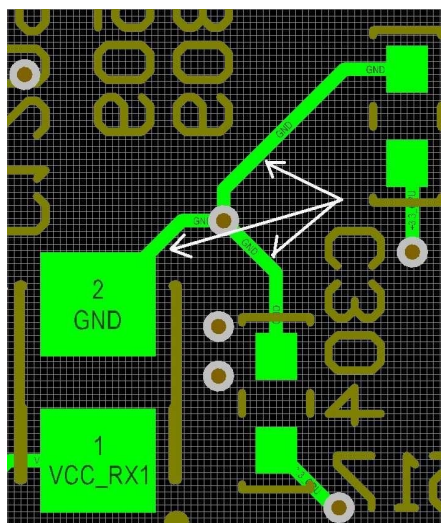


Рис.4.4

Плохое подключение земли к выводам микросхемы показано на рисунке 4.5. Подключение практически эквивалентно подключению на рис.1.4. Технологичность здесь соблюдена – соединение выводов вне зоны пайки. Основной недостаток такой же, как для рис.1.4 – подключение группы выводов одиночным проводником.

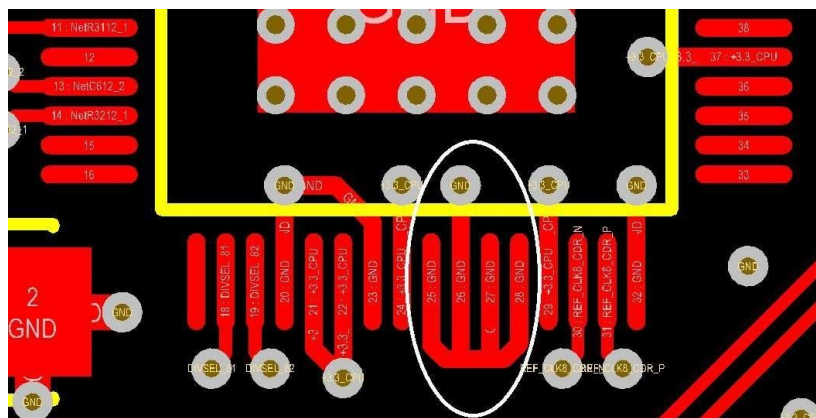


Рис.4.5

Правильное подключение выводов GND у микросхемы к полигону земли показано на рис.4.6.

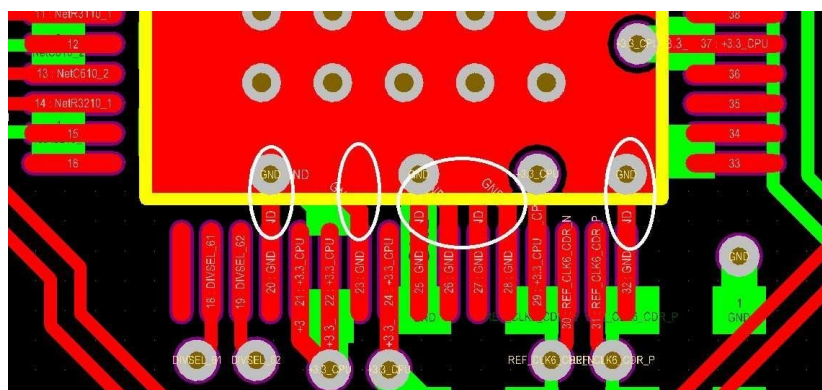


Рис.4.6

#### Подключение питания

Основные правила: учитывать протекающие токи (постоянные и импульсные), фильтрующие компоненты по возможности располагать ближе к соответствующим выводам микросхем и других дискретных компонентов. Обеспечивать низкоиндуктивное подключение – широкими проводниками или полигонами.

Вариант трассировки питания для маломощной микросхемы показан на рис.4.7.

К фильтрующему конденсатору от переходного отверстия (полигона питания) необходимо обеспечить соединение достаточно широким проводником (м.б. равен или уже по ширине аналогичного соединения с землей). Далее подключение к выводу питания микросхемы делаем по правилу 3/4.

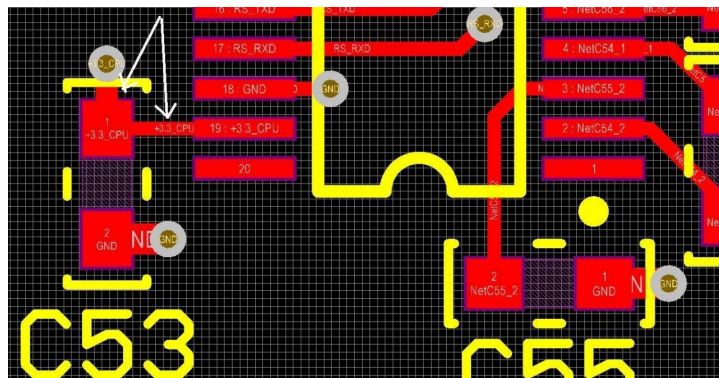


Рис.4.7

Плохая подводка питания к микросхеме показана на рисунке 4.8. Конденсатор фильтра питания стоит достаточно далеко от выводов питания микросхемы и два вывода питания соединяются и питаются от одного проводника. По хорошему, необходимо было фильтрующие конденсаторы поставить возле каждого вывода питания и на более коротких расстояниях (1..2мм). Если на слое Top разместить их не удастся из-за других элементов трассировки, то необходимо разместить конденсаторы на слое Bottom.

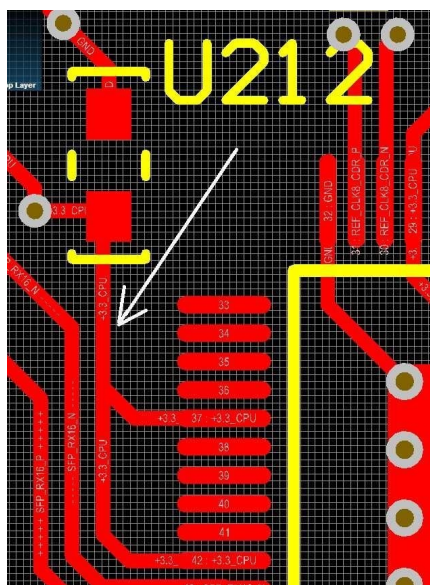


Рис.4.8



## 5. Трассировка силовых цепей питания

Вариант плохой трассировки силовых цепей показан на рисунке 5.1. Подключение силовых площадок элементов в данном примере осуществлено тонкими проводниками – 0.25мм. Поскольку цепь рассчитана на протекание тока 5А, то прохождение тока по тонким проводникам вызовет нагрев проводников до 60С. Сопротивление и индуктивности в этих узких местах также будут велики.

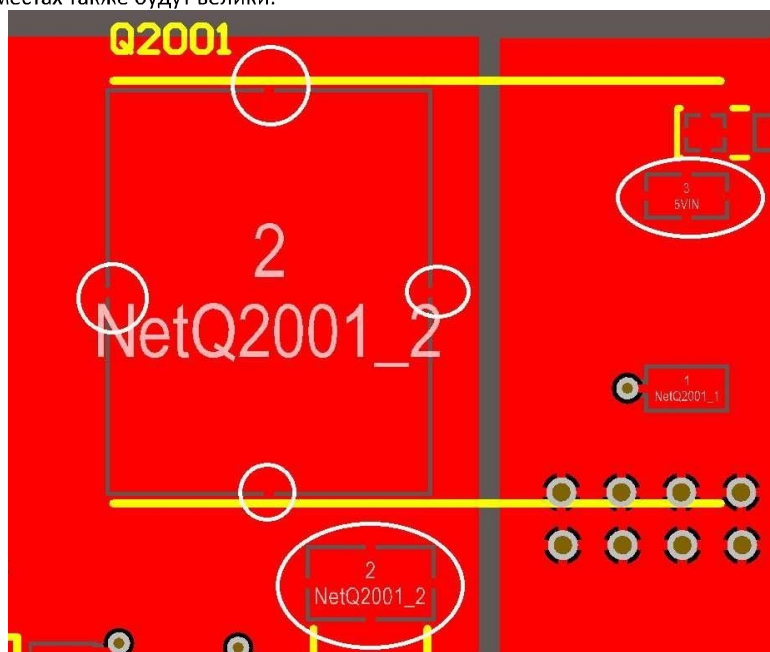


Рис.5.1

Вариант правильной трассировки силовых цепей показан на рисунке 5.2. Увеличение ширины силовых проводников до 1мм, обеспечивает запас по протекаемому току до 10А при нагреве до 45С. Сопротивление и индуктивности также будут минимальными, не оказывающими вредного паразитного влияния.



Рис.5.2

## 6. Зазоры

### Зазоры между выводами компонентов и полигонами

Пример бездумной заливки микросхемы полигонами приведен на рисунке 6.1.

Плата сделана по 5-му классу точности с выставленными зазорами 0.11мм.

На рисунке видно, что в результате заливки полигонов, практически каждая ножка микросхемы окружена металлизацией с толщиной 0.13мм (шаг микросхемы 0.65мм).

Технологичность таким способом значительно ухудшена – малейший дефект или на самой плате или в процессе монтажа вызовет локальное замыкание дорожек, которое потом трудно будет обнаружить. С точки зрения функционирования такое решение также лишено смысла.

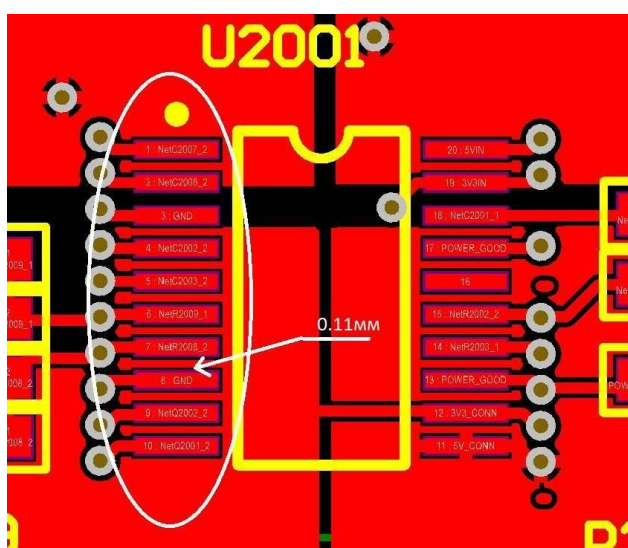


Рис.6.1

На рисунке 6.2 приведен пример грамотной разводки части питания устройства.

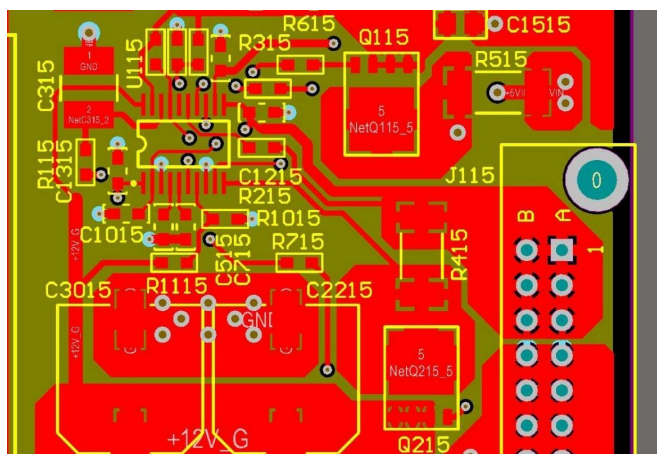


Рис.6.2



То же самое, но испорченное неграмотной заливкой полигоном земли, показано на рис.6.3. Сразу видим ухудшение технологичности. Также видно, что образовалось большое количество тонких проводников земли, которые заполняют собой свободные места, образуя какие-то контура, длинные тонкие проводники, электрически подключенные в каком-либо произвольном месте. Также зазоры между проводниками и полигонами автоматически уменьшились до минимальных – в данном примере до 0.15мм. Поскольку данная схема работает при входном напряжении 12В, то это не сказывается на работе схемы. Но если бы схема была бы рассчитана на работу в диапазоне 36 – 72В, то данную плату после изготовления можно сразу было выкидывать на помойку. Зазор 0.15мм не обеспечивает работу при таких напряжениях (напряжение пробоя 45В).

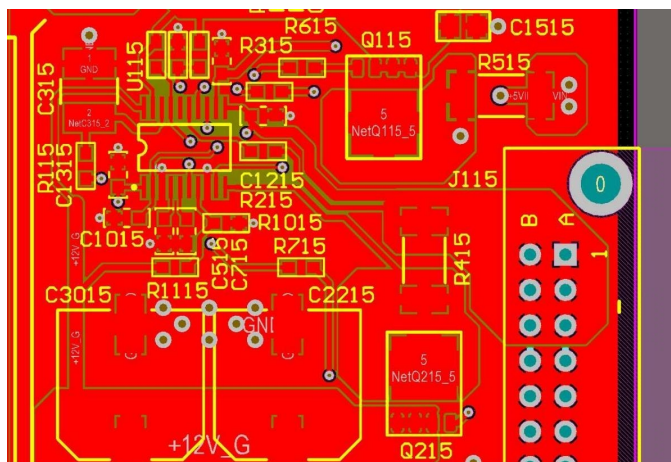


Рис.6.3

Зазоры у компонентов, подвергающихся периодическому механическому воздействию.

К таким компонентам можно отнести любые выводные соединительные разъемы, кнопки и т.п. Необходимо из соображений механической прочности, а также лучшей пайки увеличивать зазоры у выводов таких элементов, в случае подключения группы выводов через полигоны. Также необходимо учитывать рабочее напряжение, действующее на контактах, чтобы обеспечить величину зазора вне области пробоя. Рекомендуемый зазор из соображений механической прочности – не менее 0.2мм.

На рисунке 6.4 видно, что подключение полигонов сделано с минимальными зазорами возле всех выводов разъема – 0.11mm. Для напряжений питания 3.3В и 5В такой зазор обеспечивает электрическую прочность, но не является хорошим решением по причинам описанным выше.

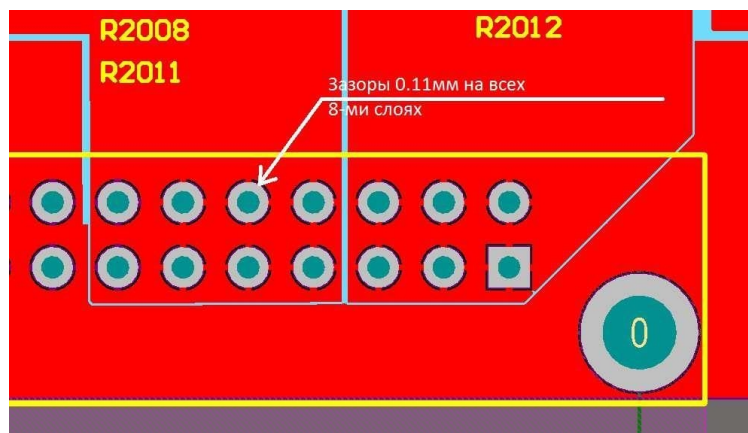


Рис.6.4

Пример правильного подключения полигонов к разъему приведен на рисунке 6.5. Полигон питания +12V подключен с зазором 0.25мм. Зазор обеспечивается отдельным правилом зазора для данной цепи. Ниже полигон земли подключен с зазором 0.15мм на слое Top, что диктуется требованием такого зазора для этого слоя. Соответственно зазор для всех других слоев увеличен до 0.2мм. Также можно использовать вырезы в полигонах для обеспечения необходимого зазора. На рисунке это нижняя группа контактов с зазором 0.3мм.

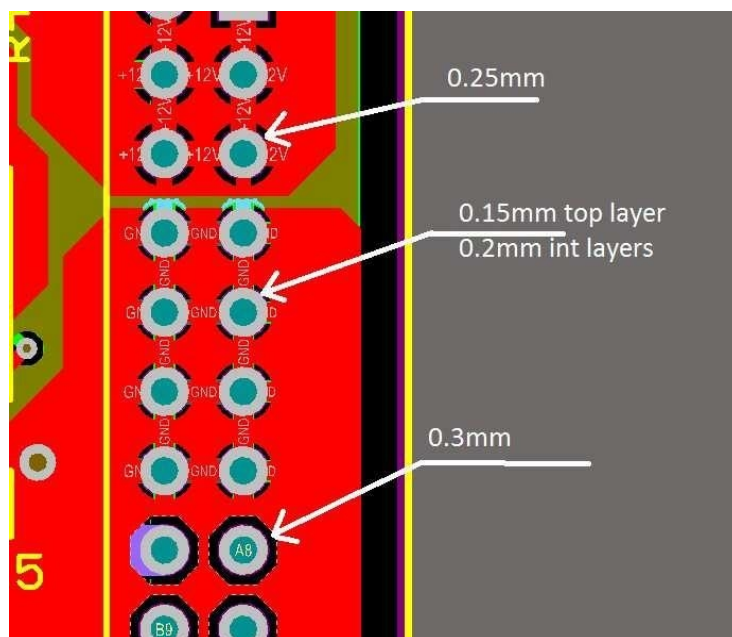


Рис.6.5

## 7. Трассировка BGA

### Заливка полигонами

Использование сплошных областей металлизации (заливки медью) под корпусом BGA микросхемы считается плохим тоном. Причём чем дальше область от центра корпуса, тем больше риск. Это объясняется тем, что если контактная площадка целиком покрыта областью заливки, поверхность пайки определяется не формой контактной площадки, а формой окна в паяльной маске. Форма капли припоя при этом будет не оптимальной (припой как бы растекается), контакт при этом получается некачественным и может быть разрушен в процессе длительной эксплуатации оборудования, например, за счёт механических нагрузок, связанных с вибрацией или тепловым расширением. Также необходимо учитывать эффект теплопроводности – расплавленный припой утекает в сторону источника тепла, качество и надёжность пайки ухудшаются.

На рис.7.1 показан пример такой заливки. Видно, что в центре микросхемы 16-ть шариков микросхемы объединены сплошной заливкой, все остальные выводы получаются в окружении полигона земли. Такое решение серьезно ухудшает технологичность.

Исключение: В некоторых случаях производитель может рекомендовать применение сплошной металлизации под корпусом BGA. Обычно это обусловлено необходимостью отводить повышенную тепловую мощность без использования радиатора. В таком случае необходимо придерживаться рекомендаций производителя. Во всех остальных случаях этого нужно избегать.

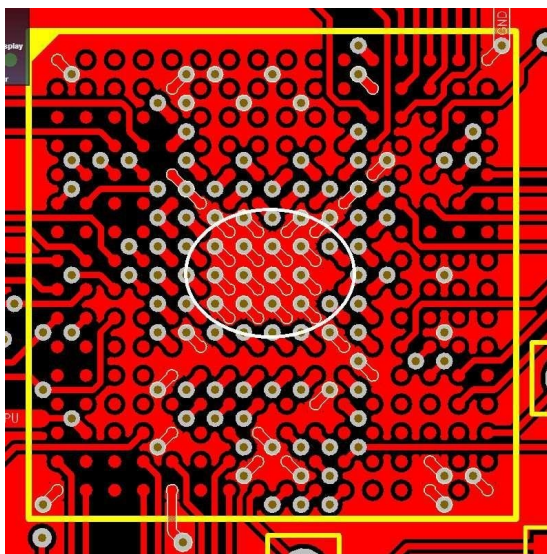


Рис.7.1

### Выдерживание запрещенной зоны вокруг BGA

При компоновке элементов необходимо стремиться, не размещать вплотную к микросхеме BGA другие компоненты. Рекомендуемая область отступа не менее 3..5мм, также необходимо учитывать крепление теплоотводящего радиатора (если требуется). При очень плотной компоновке это расстояние можно уменьшить до 1мм.

На рис.7.2 показано плохое (слишком близкое) расположение компонентов. Большинство компонентов в приведенном примере располагаются на расстоянии 0.5мм; 0.85мм.

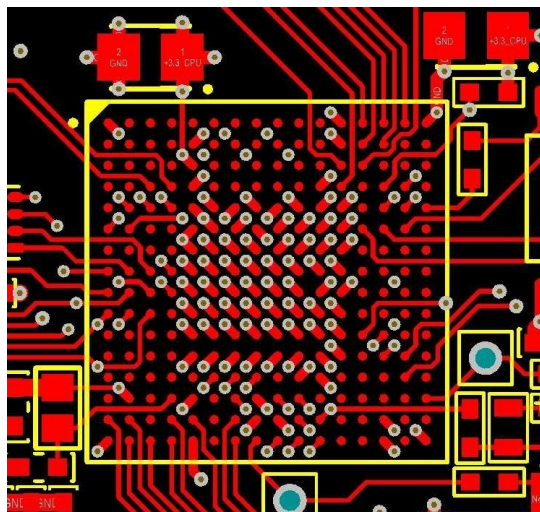


Рис.7.2

На рис.7.3 показано правильное расположение компонентов. Большинство компонентов в приведенном примере располагаются на расстоянии не ближе 3мм.

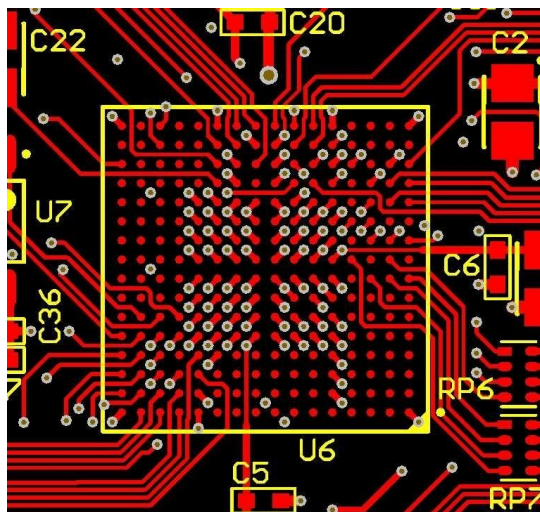


Рис.7.3

#### Переходные отверстия

Все переходные отверстия под BGA корпусом следует всегда закрывать защитной маской.

## 8. Трассировка цепей содержащих кварцевый резонатор

На рисунке 8.1 показана часть трассировки микроконтроллера, который использует для своей работы кварцевый резонатор. В большинстве схем использующих кварцевый резонатор, для стабильного запуска генерации, используются два конденсатора малой емкости. На рисунке это конденсаторы C97 и C100. Земляные выводы этих конденсаторов нельзя подключать к земле печатной платы в произвольном месте. Необходимо земли конденсаторов объединить между собой и подключить к земляной ножке микроконтроллера. Земляной вывод микроконтроллера в свою очередь необходимо с другой стороны подключить к переходному отверстию, подключенному к внутреннему полигону земли и/или к полигону на Top/Bottom. В этом случае, участок земли, показанный стрелкой, будет так называемой «чистой землей». Этот участок необходимо делать по возможности короче. К нему нельзя подключать земли никаких других элементов. Исключение составляет конденсатор, установленный в цепи внешнего сброса микроконтроллера (на рисунке слева от C100). Такая трассировка обеспечивает максимальную помехоустойчивость, особенно при наносекундных помехах, которые могут вызывать труднообъяснимые сбои и зависания в работе микроконтроллера.

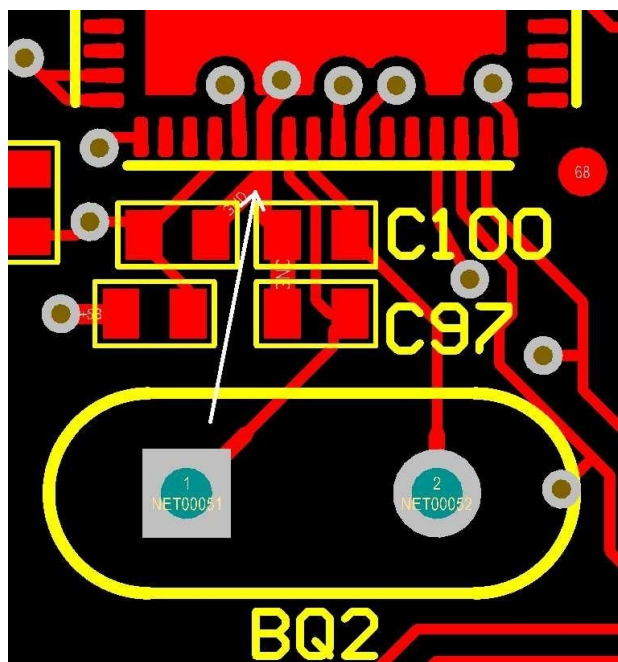


Рис.8.1



На рисунке 8.2 показан пример неправильной трассировки кварцевого резонатора. Кварц расположен достаточно далеко от микросхемы. Земля конденсаторов обвязки подключена непосредственно к внутреннему полигону земли, земляной вывод микроконтроллера также сразу подключается туда же. В результате расстояние по слою земли получилось равным 15мм. Никакой «чистой земли» при таком подключении не получается, поскольку все сидит на общей цифровой земле. Устройство будет работать при отсутствии и/или малом уровне помех. При сильных помехах устройство будет «сбоить» (особенно при наносекундных помехах, поскольку внутренние сплошные слои питания и земли не обеспечивают хорошей защиты от такого вида помех.).

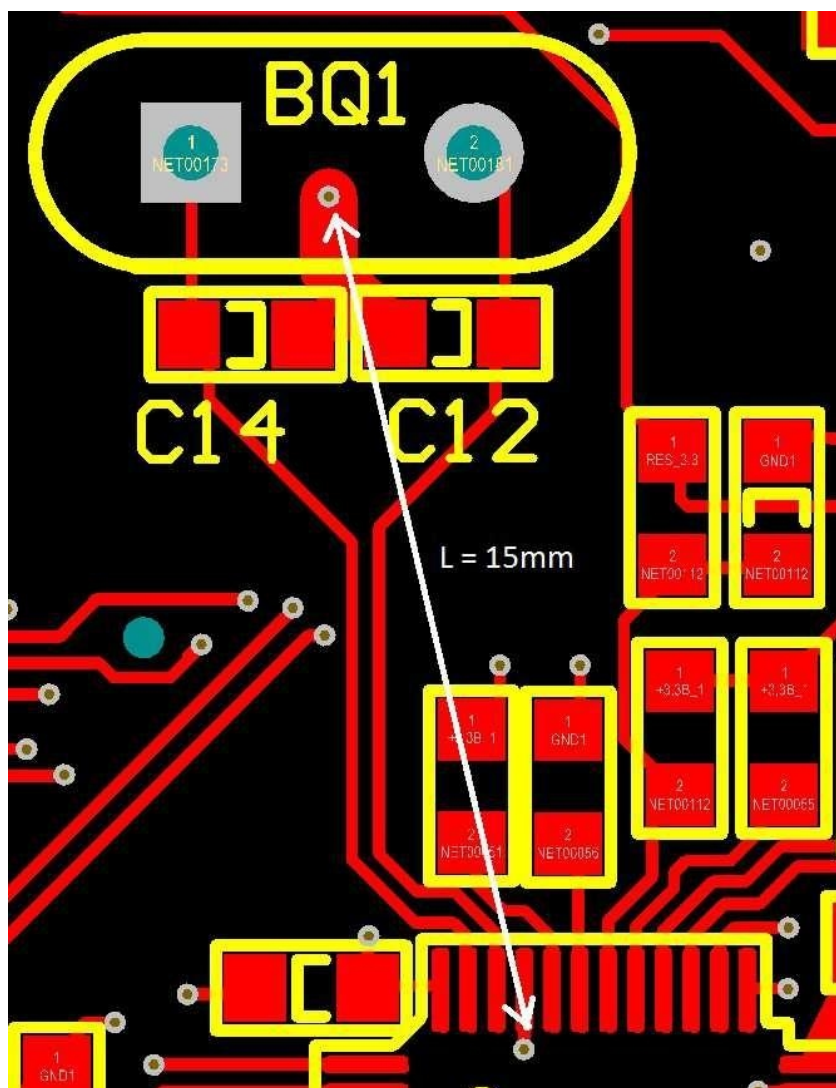


Рис.8.2

## 9. Внутренние вырезы на плате (фреза)

Внутренние вырезы на плате обычно используются, когда необходимо обеспечить гальваническую изоляцию на плате, а в силу плотной компоновки или по другим причинам этого обеспечить не удастся. Для приборов, на каких-либо цепях которого находится напряжение 220В, обычно требуется обеспечить гальваническую развязку от низковольтных цепей, не менее 1.5кВ (1500В). Для этого необходимо обеспечить расстояние между высоковольтными и низковольтными цепями не менее 5мм (ориентировочно считается по плате 1мм = 300В). Если на плате не удастся обеспечить требуемое расстояние, то необходимо выполнить пропил (фрезеровку) в плате. Фрезеровка выполняется в наиболее узких местах, где расстояние по плате выдержать не получается. В результате в работу включается воздушный промежуток, напряжение пробоя которого достаточно велико (3-4кВ на 1мм, может уменьшаться из-за различных сторонних факторов – повышенная влажность, конфигурация проводников и т.п.).

Минимальный диаметр фрезы на заводе-производителе – как правило, 0.8мм. Это и есть минимальная ширина фрезерованного паза. Делая вырезы в плате шириной в 1мм, легко обеспечить отсутствие каких-либо проблем при изготовлении печатной платы.

На рисунке 9.1 в качестве примера приведена часть платы, где показано применение вырезов для обеспечения гальванической изоляции.

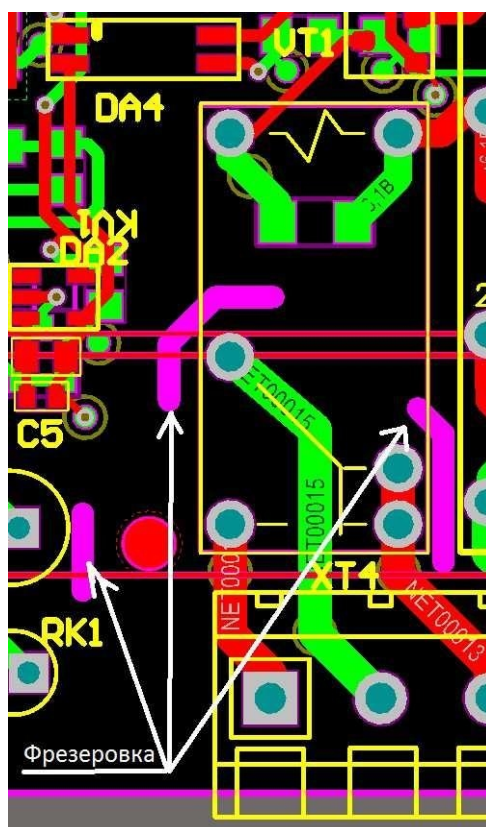


Рис.9.1

## 10. Дискретность угла установки компонентов на плате

Компонент, может быть повернут вокруг своей оси с дискретностью 1 градус. В большинстве случаев угла установки компонентов (Rotation Step) в 90 или 45 градусов более чем достаточно. Однако иногда может возникнуть ситуация, когда такие углы не позволяют разместить все компоненты на плате. Такая ситуация может возникнуть если габариты конструктива (платы) жестко ограничены, кол-во элементов для размещения на плате велико и имеется несколько видов цепей для которых необходима гальваноразвязка в 1500В. В этом случае компоненты можно устанавливать с любым, удобным для компоновки углом (дискретность 1 градус). Единственное неудобство состоит в том, что проводники в этом случае должны будут проводиться под углами, отличными от стандартных. Пример такой трассировки приведен на рис.10.1 (Top) и рис.10.2 (Bottom).

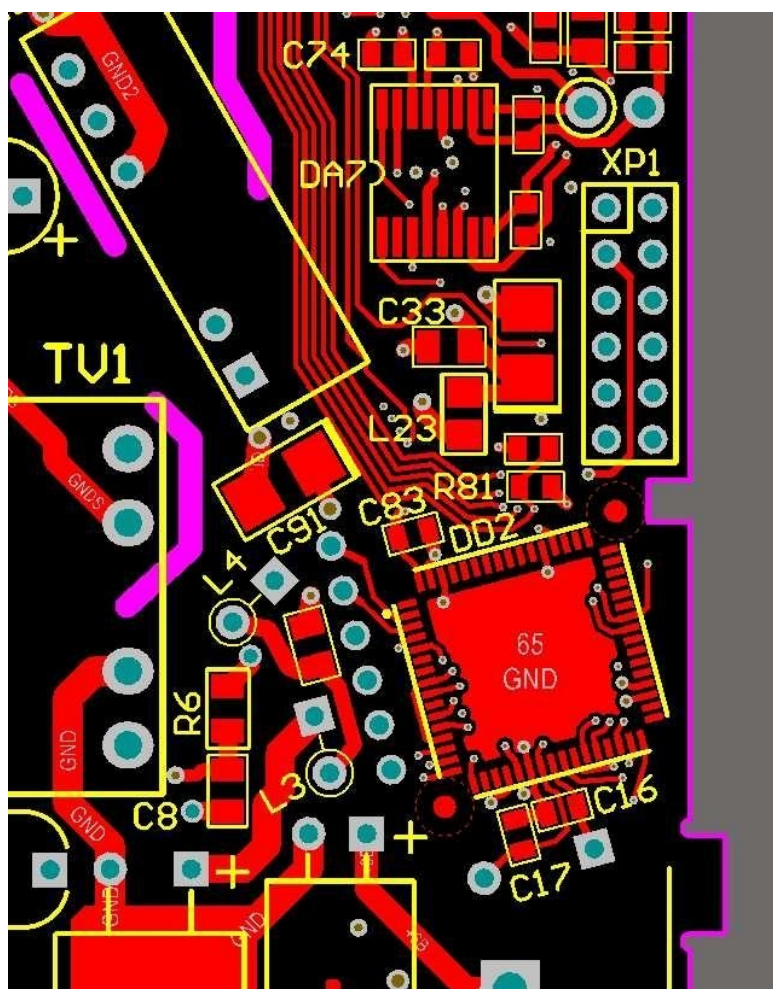


Рис.10.1



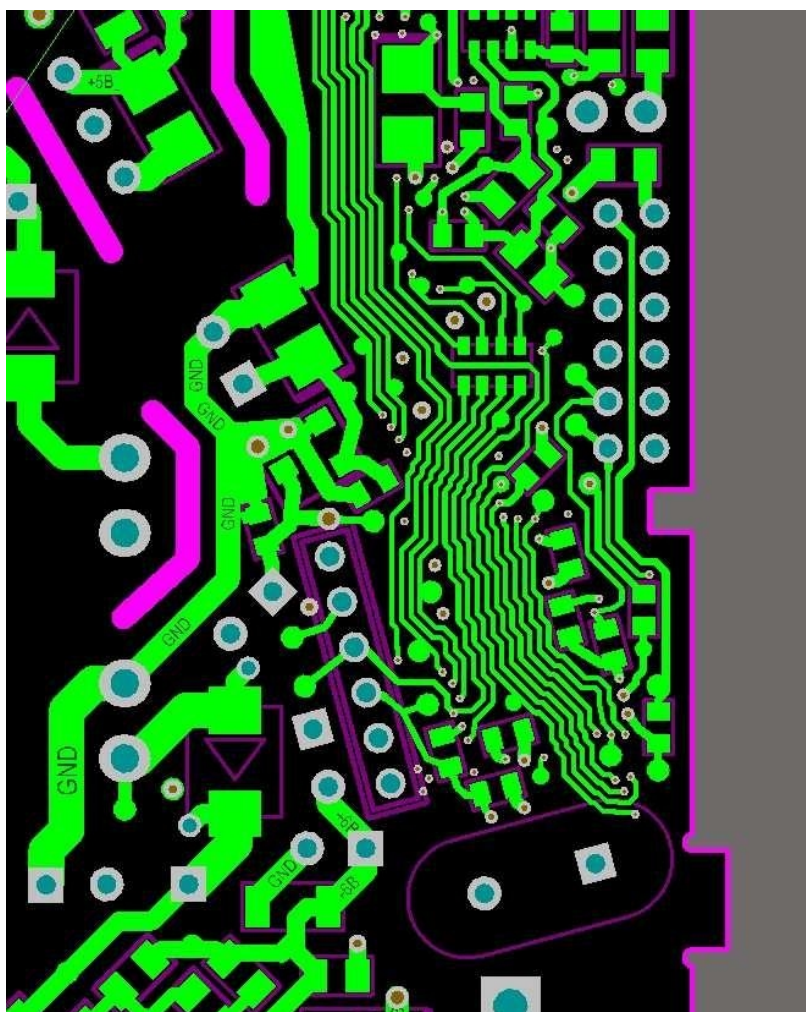


Рис.10.2

Автор документа:  
инженер – схемотехник  
Новиков В.А.

14.09.2011