

КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Шацкий М.Г.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники¹
г. Минск, Республика Беларусь

Самуйлов И.В. – ст. преподаватель кафедры ЭТТ

Аннотация. В данной работе представлены систематизированные методические рекомендации по проектированию многослойных печатных плат. Рассматривается полный цикл разработки топологии: от формирования структуры слоев и выбора конструкционных материалов до финальной трассировки критических цепей. В материале описаны принципы обеспечения целостности сигналов и электромагнитной совместимостью.

Ключевые слова: Печатная плата, стэк, трассировка, дифференциальная пара, класс точности, препрег, электромагнитная совместимость.

Введение. Проектирование печатных плат является обязательным этапом разработки электронных устройств и включает выбор структуры слоёв, определение технологических ограничений, размещение компонентов и трассировку соединений. Конструктивные параметры платы определяют электрические характеристики, устойчивость к помехам, тепловой режим и технологичность изготовления. Целью работы является систематизированное изложение базовых принципов формирования типовой структуры многослойных печатных плат и последовательности их проектирования с учётом технологических ограничений производства.

Основная часть. Начальным этапом разработки является определение числа слоёв. Последовательность проводящих и диэлектрических слоёв называется стеком платы. Типовые структуры используются для снижения стоимости производства и повышения повторяемости технологического процесса. В условиях ограниченных возможностей локального производства многослойных плат их изготовление часто осуществляется на специализированных предприятиях. На рисунке 1 представлена типовая структура четырёхслойной платы. На рисунке 2 показана структура шестислойной платы. Центральной частью конструкции является диэлектрическое ядро, выполняющее механическую и электрическую функции основания. Проводящие слои формируются из медной фольги методом травления. Между слоями располагается препрег, представляющий собой пропитанный связующим диэлектрический материал, обеспечивающий электрическую изоляцию и механическую фиксацию слоёв.



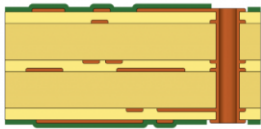
© Ресент

4-х слойная печатная плата MCO фольга 18 мкм TG150

Требуемая толщина платы, мм:	1	1,5	2
Фольга 1	0,018	0,018	0,018
Препрег 1 TG150	1 x 2116	1 x 2116	2116 + 7628
	0,115	0,115	0,115 + 0,193
Фольга 2	0,018	0,018	0,018
Ядро 1 FR-4 (TG 150)	0,71	1,164	1,164
Фольга 3	0,018	0,018	0,018
Препрег 2 TG150	1 x 2116	1 x 2116	2116 + 7628
	0,115	0,115	0,115 + 0,193
Фольга 4	0,018	0,018	0,018
Фактическая толщина платы*, мм:	1,012	1,466	1,852

* Без учета гальванического покрытия, финишного покрытия и маски

Рисунок 1 – Типовая структура четырёхслойной платы



6-и слойная печатная плата MCO фольга 18 мкм TG150

Требуемая толщина платы, мм	1	1,5	2
Фольга 1	0,018	0,018	0,018
Препрег 1 TG150	1 x 2116	1 x 2116	1 x 2116
Фольга 2	0,115	0,115	0,115
Ядро 1 FR-4 (TG 150)	0,018	0,018	0,018
Фольга 3	0,2	0,51	0,71
Препрег 2 TG150	0,018	0,018	0,018
Фольга 4	2 x 2116	1 x 2116	1 x 2116
Ядро 2 FR-4 (TG 150)	0,115 + 0,115	0,115	0,115
Фольга 5	0,018	0,018	0,018
Препрег 3 TG150	0,018	0,018	0,018
Фольга 6	1 x 2116	1 x 2116	1 x 2116
Фактическая толщина платы*, мм:	0,968	1,473	1,873

* Без учета гальванического покрытия, финишного покрытия и масок

Рисунок 2 – Типовая структура шестислойной платы

Типовые конструкции содержат чётное число слоёв, обычно от двух до шестнадцати. Платы с четырьмя и более проводящими слоями относятся к многослойным. По механическим характеристикам различают жёсткие, гибкие и гибко-жёсткие платы. Для большинства устройств общего назначения применяются жёсткие платы на стеклотекстолитовой основе [1].

Выбор числа слоёв определяется функциональной структурой схемы. Если схема содержит только аналоговые цепи или выполняет функции распределения питания, возможно применение двухслойной платы, где один слой используется для сигналов или питания, а второй – для земли. При наличии цифровых узлов требуется многослойная структура, позволяющая разделить аналоговые и цифровые слои и снизить уровень взаимных помех.

Опорный слой представляет собой проводящий слой, используемый в качестве потенциала отсчёта напряжения для группы цепей. Он также служит путём возврата токов и распределения паразитных токов утечки. Ток утечки – это нежелательный ток, протекающий через изоляционный материал или по поверхности платы между проводниками. Наличие выделенных опорных слоёв уменьшает влияние паразитных токов на рабочие цепи. Если один общий слой используется для всех цепей, колебания потенциала на нём могут приводить к отклонению уровней напряжения в различных узлах схемы.

Опорные слои выполняют также функцию электромагнитного экранирования. Токи, протекающие по сигнальным проводникам, индуцируют электромагнитные поля, которые могут воздействовать на соседние цепи. Расположение проводящего слоя земли рядом с сигнальным уменьшает распространение поля за пределы межслойного пространства. Аналогично, наличие опорных слоёв над и под сигнальным проводником уменьшает влияние внешних источников помех.

Проводящие слои делятся на сигнальные и силовые. Силовые используются для распределения питания между элементами. Сигнальные служат для передачи информационных сигналов. Связь между слоями осуществляется с помощью переходных отверстий – металлизированных каналов, обеспечивающих электрическое соединение проводников различных уровней структуры.

После выбора структуры выполняется определение класса точности. Он задаёт минимально допустимые размеры проводников, зазоров и отверстий. К параметрам класса точности относятся минимальная ширина дорожки, минимальное расстояние между элементами топологии, минимальный диаметр переходных отверстий и контактных площадок. Эти значения определяются требованиями используемых компонентов и возможностями производства. Минимальные расстояния между выводами компонентов задаются в их технической документации. Если в схеме присутствует компонент с малым

шагом выводов, класс точности платы определяется именно этим элементом. При этом остальные элементы топологии могут выполняться с большими допусками, что снижает стоимость изготовления.

Ширина проводников и диаметр переходных отверстий выбираются исходя из величины протекающего тока. Для расчёта используют специализированные программы, учитывающие толщину медной фольги, ширину дорожки и допустимый перегрев. На практике применяется фольга толщиной 18, 35 и 75 мкм. Для увеличения допустимого тока вместо увеличения толщины меди может применяться параллельное соединение проводников или полигонов.

Полигон представляет собой сплошную область меди, соединённую с определённым электрическим потенциалом. Он используется для уменьшения сопротивления возвратных токов, улучшения теплоотвода и снижения уровня помех.

Диаметр переходных отверстий также определяется токовой нагрузкой. Распространённый типовой размер составляет 0,3 мм диаметр сверления и 0,6 мм диаметр контактной площадки. Токовая проводимость переходного отверстия пропорциональна площади металлизации его стенок, поэтому для передачи больших токов применяют несколько отверстий, соединённых параллельно [2].

На этапе размещения компонентов сначала определяются точки входа и выхода сигналов, обычно расположенные у краёв платы. Затем анализируются цепи питания. Входящие напряжения фильтруются конденсаторами различного типа. Конденсаторы с большей ёмкостью устанавливаются ближе к входу питания платы, а конденсаторы малой ёмкости – максимально близко к выводам микросхем. Такое размещение уменьшает влияние флуктуаций токов от источника питания, а также помех, которые наводятся на проводник между источником питания и нагрузкой.

При размещении микросхем учитываются рекомендации производителя по топологии обвязки. Эти рекомендации позволяют корректно расположить элементы цепей стабилизации, фильтрации и согласования. Дополнительно анализируются интерфейсные цепи, для которых могут требоваться подтягивающие резисторы или согласующие цепи. Шумящие элементы и чувствительные узлы желательно размещать на расстоянии друг от друга для уменьшения взаимного влияния [3].

После размещения выполняется трассировка соединений. Рассмотрим последовательность действий на примере четырёхслойной платы. Верхний слой обычно используется для размещения компонентов и силовых цепей. Применение полигонов питания уменьшает сопротивление и индуктивность проводников. При подключении конденсаторов к полигонам используются термальные переключки – узкие проводники между площадкой и полигоном. Их применение облегчает пайку и регулирует сопротивление соединения.

При трассировке проводников предпочтительно использовать повороты под углом 45 градусов. Повороты под прямым углом увеличивают неоднородность линии и могут изменять распределение поля в проводнике.

Второй слой обычно используется как сплошной полигон земли. Он выполняет функцию опорного слоя для верхнего сигнального или силового слоя. В простых устройствах этот слой может быть полностью заполнен медью. В более сложных платах он может разделяться на участки различных потенциалов.

Третий слой часто применяется как сигнальный. На нём размещаются линии передачи цифровых сигналов. Среди них выделяют три категории: линии без требований к волновому сопротивлению, линии с контролируемым сопротивлением и дифференциальные пары. Линии первой категории допускают произвольную геометрию в пределах технологических ограничений. Линии второй категории требуют постоянной ширины и расположения над сплошным опорным слоем. Дифференциальные пары должны иметь одинаковую длину проводников, постоянный зазор между ними и одинаковые условия окружения по всей длине трассы.

При трассировке сначала выполняются наиболее критические цепи. Обычно это дифференциальные линии высокоскоростных интерфейсов. Затем прокладываются

одиночные линии с контролируемым сопротивлением, после чего остальные сигнальные соединения. Расстояние между линиями выбирается исходя из требований электромагнитной совместимости и конструкции стека. Практически используется правило, при котором расстояние между соседними дифференциальными парами принимается не менее двух или трёх толщин диэлектрического слоя между ними и опорной плоскостью.

Четвёртый слой многослойной платы часто выполняется как дополнительный слой земли или питания. Такое распределение слоёв позволяет сформировать симметричную структуру, уменьшающую механические деформации при нагреве и охлаждении.

Для линий с контролируемым сопротивлением важно отсутствие разрывов опорного слоя под трассой. Разрыв приводит к изменению распределения поля и изменению характеристического сопротивления. По этой причине такие линии не проводят над прорезями в полигонах или областями с другим потенциалом [4].

В высокочастотных схемах учитываются также длина линий и задержки распространения сигнала. Однако в платах для низкочастотных устройств эти факторы оказывают меньшее влияние и могут не учитываться на ранних этапах проектирования.

Заключение. Таким образом, проектирование многослойной печатной платы представляет собой последовательный процесс, включающий выбор структуры слоёв, определение технологических ограничений, размещение компонентов и трассировку соединений. Конструктивные решения должны приниматься с учётом электрических параметров схемы, требований компонентов и возможностей производства. Соблюдение изложенных принципов позволяет получить плату с предсказуемыми характеристиками и технологичной конструкцией.

Список литературы

1. Типовые сборки и конструкции печатных плат [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.rezonit.ru/directory/v-pomoshch-konstruktoru/proektirovanie-elementov-konstrukcii-pechatnoj-platy-proizvodstva-v-rezonit/tipovye-sborki-i-konstruktsii-pechatnykh-plat/> Дата доступа: 15.11.2025.
2. Многослойные печатные платы [Электронный ресурс]. Режим доступа: pcbtech.ru Дата доступа: 15.11.2025
3. Практические рекомендации по разработке печатных плат / Тютюков С.А.: Тютюков С.А., 2020. 190 с.
4. Проектирование современных печатных плат. Часть 7. Трассировка сигнальных линий. Дифференциальные пары / Тютюков С.А.: Компоненты и технологии, 2018

UDC 621.3.049.75

DESIGN AND PRINCIPLES OF MULTILAYER PRINTED CIRCUIT BOARDS

Shatskiy M.G.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

Samuilov I. V. – Senior Assistant at the Department of EET

Annotation. This paper presents systematic methodological recommendations for the design of multilayer printed circuit boards. The full cycle of topology development is considered: from the formation of the layer structure and the selection of structural materials to the final tracing of critical circuits. The material describes the principles of ensuring signal integrity and electromagnetic compatibility.

Keywords. printed circuit board, stackup, routing, differential pair, precision class, prepreg, electromagnetic compatibility.