

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ БЕЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

**АЛЕКСАНДР ПОНОМАРЕВ**, инженер

*В статье рассматривается наиболее часто встречающаяся проблема при проектировании многослойных печатных плат – уменьшение электромагнитных помех и способы ее решения.*

Для начала вспомним азы – попытаемся разобраться, пропускают ли конденсаторы поток электронов. На рисунке 1 показано, как под воздействием приложенного к конденсатору напряжения положительные заряды на верхней пластине начинают отталкивать положительные заряды на нижней пластине, в результате чего на ней остаются отрицательные заряды. Если к конденсатору приложить напряжение источника переменного тока, можно сделать неверный вывод о том, что ток протекает через слой диэлектрика. Этот ток Джеймс Максвелл назвал током смещения, при котором положительные заряды вытесняют заряды на противоположной обкладке конденсатора, оставляя отрицательные заряды, и наоборот. Ток смещения определяется как изменение электрического поля со временем  $dE/dt$ .

Необходимо также понимать, что электроны и положительно заряженные

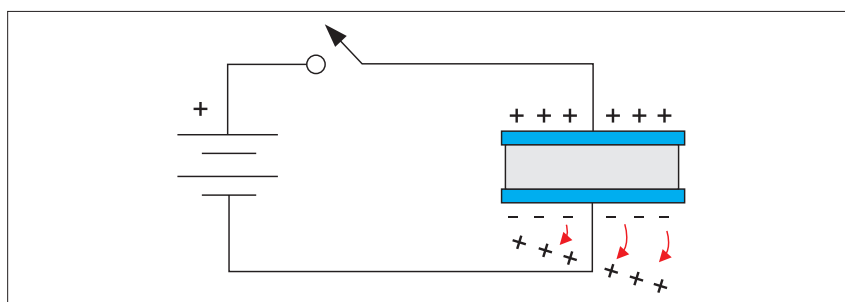


Рис. 1. Иллюстрация понятия о токе смещения через конденсатор

дырки перемещаются в медном проводнике не с околосветовой скоростью, а со скоростью примерно 1 см/с из-за очень сильной атомной связи молекул меди [4]. Их передвижение называется током проводимости, который мы измеряем с помощью амперметра. Ток проводимости связан с тангенциальной составляющей магнитного поля.

Влияние одного электрона в молекуле меди на своего соседа и на всю последующую линию передачи проис-

ходит со скоростью распространения электромагнитного поля в диэлектрике. Другими словами, колебание одного электрона на одном конце микрополосковой линии передается по цепочке на ее другой конец.

Рассмотрим теперь цифровой сигнал с волновым фронтом, распространяющимся со скоростью примерно в половину световой (около 15 см/нс в стеклотекстолите) вдоль микрополосковой линии по смежному с ней зазем-

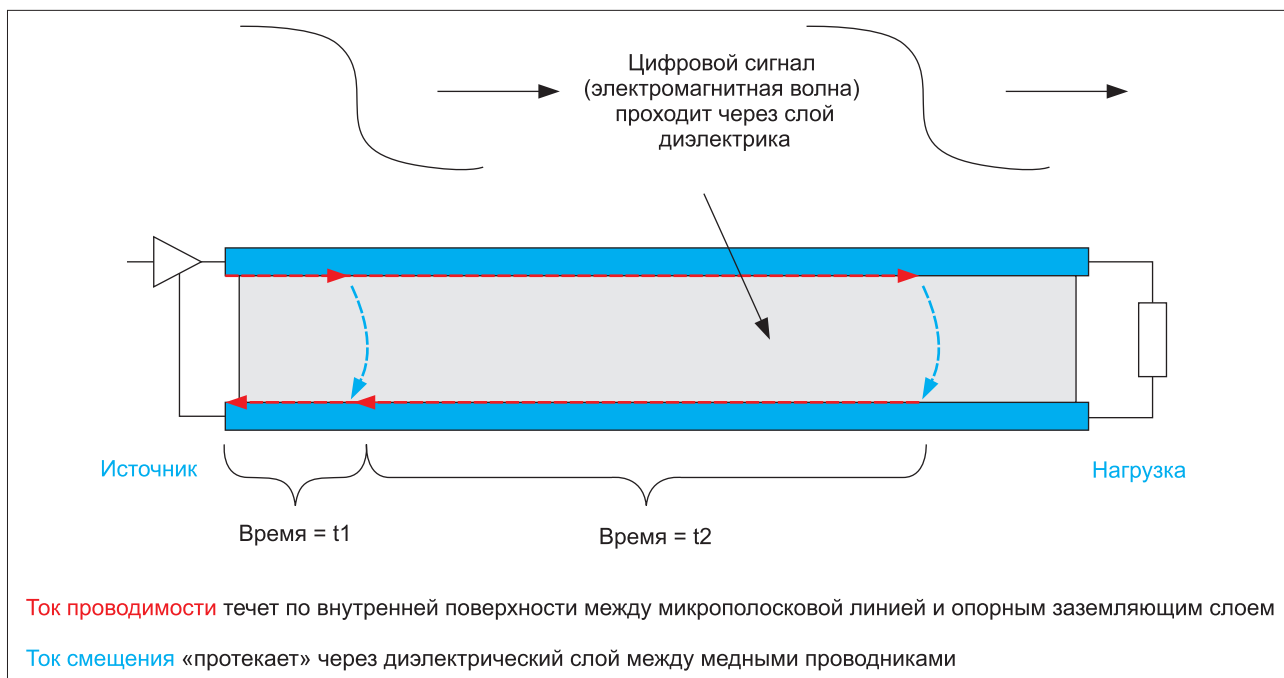


Рис. 2. Цифровой сигнал (электромагнитная волна) проходит через диэлектрический слой между микрополосковой линией и заземляющим опорным слоем

ляющему опорному слою (ЗОС) (см. рис. 2).

Электромагнитное поле цифрового сигнала распространяется по слою диэлектрика, а не по медному проводнику. Проводник всего лишь «задает направление» электромагнитной волне [5–6] – можно сказать, что для электромагнитного поля он выполняет ту же роль, что и рельсы для локомотива. Как только сигнал появляется между микрополосковой линией и ЗОС, он начинает распространяться по линии передачи, образованной микрополосковым проводником и смежным ЗОС. Таким образом, следует рассматривать комбинацию тока проводимости и тока смещения (в диэлектрическом слое).

Электромагнитные помехи (ЭМП) возникают при появлении переднего фронта распространяющейся волны. В определенный момент времени электрическое поле за первым волновым фронтом является устойчивым при любом приложенном напряжении в этот самый момент, а напряженность электрического поля перед первым волновым фронтом равна нулю. Быстрый фронт импульса содержит высокочастотные гармоники, которые и являются причиной появления ЭМП.

Если импеданс нагрузки равен характеристическому импедансу линии передачи, электромагнитная волна не отражается от источника сигнала. Однако при рассогласованных импедансах возникают отражения. На практике большинство отраженных цифровых сигналов одновременно перемещается в прямом и обратном направлениях по линии передачи. Переходная зона сигнала (передний и задний фронты) этих волн является источником ЭМП.

При проектировании печатных плат учитываются следующие два очень важных правила.

1. Каждый сигнальный или силовой проводник (либо слой) на печатной плате следует рассматривать как линию передачи.
2. Прохождение цифрового сигнала в линии передачи сопряжено с изменениями электромагнитного поля в пространстве между медным проводником и заземляющим опорным слоем.

Для построения линии передачи используются два смежных проводника с заключенным между ними полем. В качестве таких проводников применяется микрополосковая или полосковая линии, соседствующие с ЗОС либо с силовым проводником. Например, если несколько сигнальных слоев расположить между слоем питания и ЗОС, при распространении высокоскоростных сигналов появятся ЭМП. Следование этим двум правилам определяет порядок размещения слоев на плате.

Другими словами, каждый сигнальный или силовой проводник, как и все слои питания, должен соседствовать с заземляющим опорным слоем. Несколько ЗОС соединяются друг с другом методом сшивания.

Если тракт тока проводимости нарушается в ЗОС из-за щели или зазора, электромагнитное поле начинает «просачиваться» через слой диэлектрика, что приводит к излучению на краях и перекрестной связи с другими цепями через сквозные переходные отверстия. Так происходит и при передаче сигнала через несколько заземляющих опорных слоев или слоев питания в отсутствие рядом находящихся массивов «сши-

вающих» переходных отверстий или конденсатора, который соединяет ЗОС со слоями питания.

Для построения линии передачи требуется расположить по соседству друг с другом два металлических проводника, между которыми удерживается поле. В качестве такой среды используется, например, микрополосковая линия, соседствующая с заземляющим опорным слоем; полосковая линия рядом с ЗОС или силовой проводник (либо слой). Несколько сигнальных слоев между слоями питания и ЗОС станут источниками ЭМП при прохождении высокоскоростных сигналов. Два выше упомянутых правила определяют расположение слоев в многослойной сборке.

Другими словами, по соседству с каждым сигнальным или силовым проводником, как и со всеми слоями питания, должен располагаться ЗОС. Необходимо объединить несколько заземляющих опорных слоев с помощью массива «сшивающих» переходных отверстий. Давайте рассмотрим несколько примеров проектирования многослойных печатных плат с малыми ЭМП.

#### ТИПОВАЯ ШЕСТИСЛОЙНАЯ ПЛАТА (ALTIUM)

В таблице 1 представлены параметры шестислойной платы. Если в 1990-х и в начале 2000-х гг. такая компоновка считалась приемлемой, то при передаче намного более быстрых смешанных сигналов выбор этих параметров для современных печатных плат чреват возникновением больших ЭМП. В рассматриваемом случае возникают две проблемы: у двух нижних сигнальных слоев – один опорный слой питания, а силовые и заземляющие опорные

Таблица 1. Пример очень распространенного, но неправильного размещения слоев шестислойной платы, в результате которого возникают ЭМП

	Название слоя	Тип	Материал	Толщина, мил	Диэлектрик	Диэлектрическая проницаемость
	верхний покрывной	покрытие				
	верхний припойный	маска припоя/покрытие	материал поверхности	0,4	припой	3,5
	верхний	сигнальный	медь	1,4		
	диэлектрик	диэлектрический	основа	7	FR-4	4,2
	заземление	сигнальный GND	медь	1,4		
	диэлектрик 3	диэлектрический	препрег	15	FR-4	4,2
	сигнальный слой 1	сигнальный	медь	1,4		
	диэлектрик 5	диэлектрический	основа	10	FR-4	4,2
	сигнальный слой 2	сигнальный	медь	1,4		
	диэлектрик 4	диэлектрический	препрег	15	FR-4	4,2
	питание	сигнальный питание	медь	1,4		
	диэлектрик 1	диэлектрический	основа	7	FR-4	4,2
	нижний	сигнальный	медь	1,4		
	нижний припойный	маска припоя/покрытие	материал поверхности	0,4	припой	3,5
	нижний покрывной	покрытие				

слои не соседствуют с этими сигнальными слоями и расположены далеко друг от друга. В результате на эти слои наводятся помехи при переходных процессах в слоях питания.

За некоторыми исключениями (например, в случае питания и сигналов ОЗУ DDR-типа) токи возвращаются к своему источнику по заземляющему опорному слою. Привязка этих сигналов к слою питания может стать причиной возникновения сильных ЭМП из-за отсутствия четко определенного возвратного тракта, если он не проходит через межслойную емкость, величина которой мала в рассматриваемом случае. Кроме того, наличие щелей в обратном тракте приводит к проникновению поля в другие участки диэлектрических слоев платы, что, в свою очередь, вызывает перекрестные и электромагнитные помехи.

Еще одна проблема появляется в том случае, когда слой питания и ЗОС разделены двумя сигнальными слоями. Любые переходные процессы в цепи питания становятся причиной возникновения перекрестных помех в диэлектрических слоях, а также в сигнальных проводниках на слоях 3 и 4. Польза от применения межслойной емкости сводится к нулю, если расстояние между этими слоями превышает 3–4 мил (0,08–1 мм).

Давайте теперь рассмотрим несколько примеров проектирования многослойных печатных плат с линиями передачи цифровых сигналов.

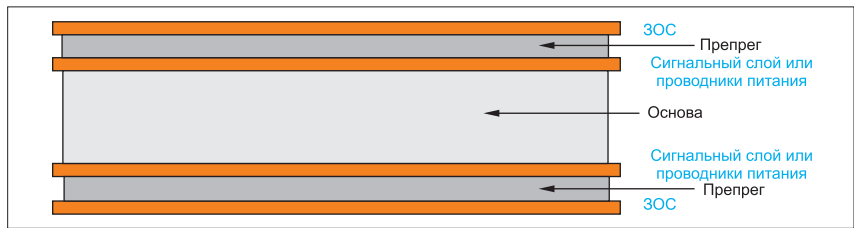


Рис. 3. Пример правильно разработанной четырехслойной платы, у которой сигнальные слои и слои питания расположены рядом с ЗОС

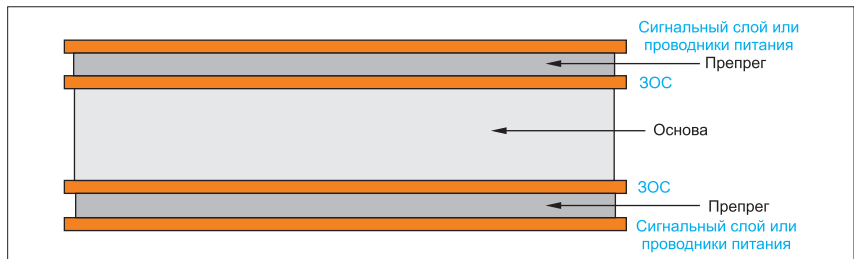


Рис. 4. Для лучшего подавления ЭМП заземляющие опорные слои устанавливаются внутри четырехслойной платы

### ПРИМЕР 1. ЧЕТЫРЕХСЛОЙНАЯ ПЛАТА

На рисунке 3 схематично показана конструкция четырехслойной печатной платы с подавлением ЭМП. В качестве слоя питания используются либо трассированные (широкие) проводники печатной платы, имеющие большое сечение, либо сплошной слой питания, который проходит вдоль сигнальных слоев 2 и 3. Между всеми слоями можно легко установить переходные отверстия, т. е. оба ЗОС соединяются с массивом «сшивающих» отверстий. Ряды этих отверстий, расположенных по периметру платы (например,

через каждые 5 мм), образуют клетку Фарадея.

Если, например, требуется обеспечить доступ к сигнальным и трассированным/сплошным силовым проводникам, можно просто перевернуть пары слоев так, чтобы два ЗОС оказались посередине, а два сигнальных слоя – наверху и внизу платы. При этом следует использовать трассированный слой питания и развязывающие конденсаторы, а не слой питания (см. рис. 4).

В четырехслойных платах следует использовать массив переходных отверстий, соединяющих два заземляющих

Таблица 2. Пример корректного размещения слоев восьмислойной платы с хорошим подавлением ЭМП

	Название слоя	Тип	Материал	Толщина, мил	Диэлектрик	Диэлектрическая проницаемость
	верхний защитный слой	покрытие				
	верхний масочный	маска припоя/покрытие	материал поверхности	0,04	припой	3,5
	верхний	сигнальный	медь	1,417		
	диэлектрик 1	диэлектрический	препрег	5	FR-4	4,2
	02	внутренний GND	медь	0,7		
	диэлектрик 10	диэлектрический	основа	10	FR-4	4,2
	03	сигнальный	медь	0,7		
	диэлектрик 5	диэлектрический	препрег	10	FR-4	4,2
	04	внутренний GND	медь	0,7		
	диэлектрик 3	диэлектрический	основа	4	FR-4	4,2
	05	внутренний питание	медь	0,7		
	диэлектрик 2	диэлектрический	препрег	10	FR-4	4,2
	06	сигнальный	медь	0,7		
	диэлектрик 8	диэлектрический	основа	10	FR-4	4,2
	07	внутренний GND	медь	0,7		
	диэлектрик 9	диэлектрический	препрег	5		4,2
	нижний	сигнальный	медь	1,417		
	нижний масочный	маска припоя/покрытие	материал поверхности	0,04	припой	3,5

опорных слоя с максимальным расстоянием между ними 1 см.

### ПРИМЕР 2. ВОСЬМИСЛОЙНАЯ ПЛАТА (ALTIUM)

И четырех-, и восьмислойные платы (см. табл. 2) проектируются с учетом упомянутых выше двух правил, благодаря которым обеспечивается корректная линия передачи. Кроме того, в рассматриваемом примере проектирования восьмислойной платы силовой слой и ЗОС находятся на расстоянии 0,1 мм, чего вполне достаточно для реализации межслойной емкости. Чем меньше это расстояние, тем лучше результат. Например, диапазон расстояния 1–3 мил (0,025–0,076 мм) идеален, чтобы минимизировать ЭМП. Все ЗОС необходимо соединить вместе с помощью 1-см массива переходных отверстий.

Разумеется, на практике используется намного больше итераций при создании корректных пар «сигнальный слой – ЗОС» или «слой питания – ЗОС» для линий передачи.

### ДВУХСЛОЙНЫЕ ПЛАТЫ

При проектировании двухслойных плат сигнальные и трассируемые силовые проводники прежде размещали, как правило, на слое 1, а заземление – на слое 2. Однако в настоящее время для трассировки сигналов приходится использовать, по меньшей мере, два слоя. На рисунке 5 показан случай применения триплета, когда между двумя сигнальными проводниками размещается заземляющий опорный проводник [5].

Такой подход позволяет сохранить параметры линии передачи в отношении трассируемого слоя питания, выполненного в виде отдельных проводников. Благодаря триплету утечки электромагнитного поля становятся незначительными, поскольку оно удерживается между этими проводниками и обратным трактом.

### ЗАЩИТНЫЕ ПРОВОДНИКИ

Приведем еще примеры, позволяющие упростить решение задач по электромагнитной совместимости. Мы рассмотрим защитные проводники на печатной плате, относительно применения которых имеется противоречивая информация. Существуют разные мнения о том, какие типы схем – аналоговые, смешанных сигналов или цифровые – в наибольшей мере выигрывают от использования защитных проводников, как они блокируют электромагнитные поля, как следует заземлять концы проводников и какие типы линий – микрополосковые или полосковые – получают наибольшие преимущества от использования защитных проводни-

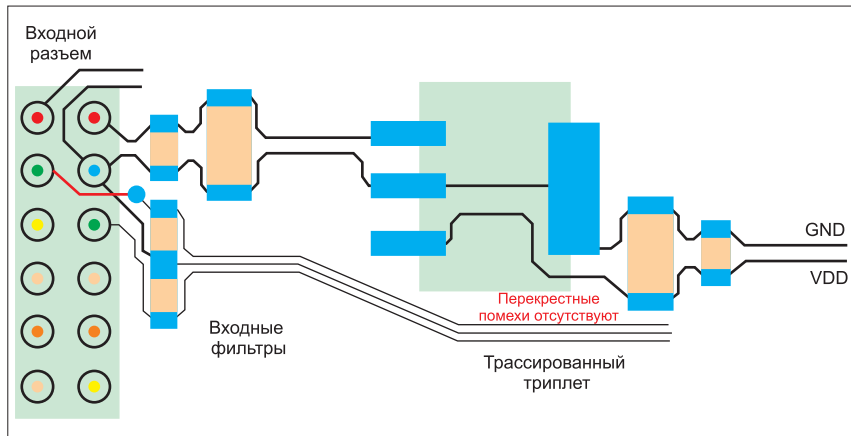


Рис. 5. Пример трассировки сигнальных триплетов, а также соблюдения принципов построения линий передачи для трассировки слоя питания

ков. Мы убедимся в том, что наилучший метод контроля над перекрестными помехами на практике – обеспечить оптимальную высоту проводников относительно платы и установить их на достаточно большом расстоянии друг от друга для контроля над перекрестными помехами.

Защитные проводники (guard traces) играют большую роль в некоторых схемах, особенно в тех, где используются источники маломощных сигналов и компоненты с очень высоким входным импедансом. Например, в схемах измерения сигналов биообъектов, которые имеют высокий входной импеданс, имеется риск возникновения емкостной связи между внешней частью аппаратуры и проводниками. В этих случаях полезный сигнал настолько мал, что его может исказить помеха даже очень небольшой мощности. Защитный проводник, расположенный вокруг сигнального проводника, подавляет емкостную связь. Не всегда можно однозначно ска-

зать, в каких схемах – аналоговых или цифровых – лучше использовать защитные проводники.

Тот же вывод можно сделать и в отношении устройств со смешанными сигналами при решении вопроса об использовании в них защитных проводников. Входные каскады устройств со смешанными сигналами являются аналоговыми. В определенной части схемы этих устройств аналоговый сигнал преобразуется в цифровой. У современных устройств все РЧ-приемники являются цифровыми. Радиочастотные схемы больше не состоят из индуктивных и емкостных цепей. Например, в мобильном телефоне отсутствуют индуктивности и конденсаторы – антенны напрямую соединены с кристаллом, который преобразует аналоговые сигналы в цифровые даже на очень высоких радиочастотах. Заметим также, что в разных источниках информации, касающейся использования защитных проводников, упоминаются перекрестные

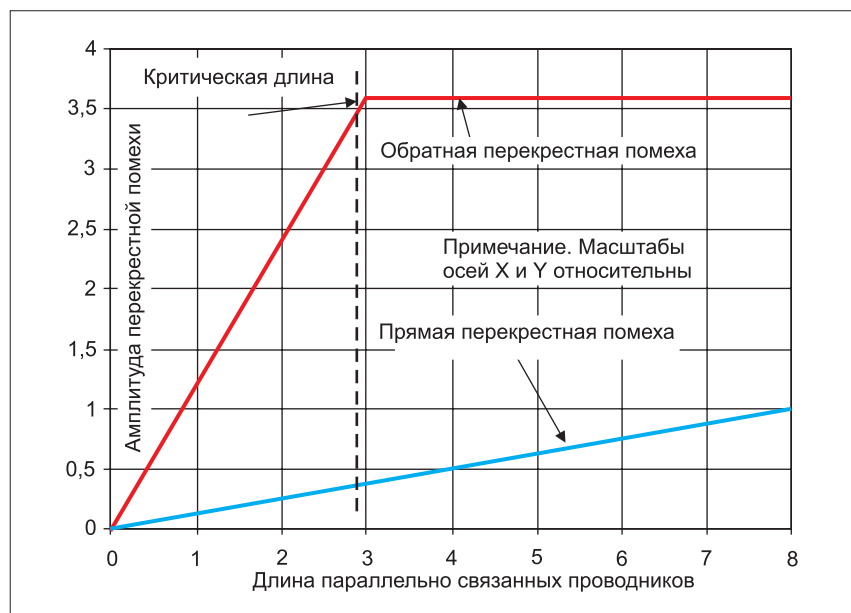


Рис. 6. Зависимость прямой и обратной перекрестной помехи от длины параллельно связанных проводников

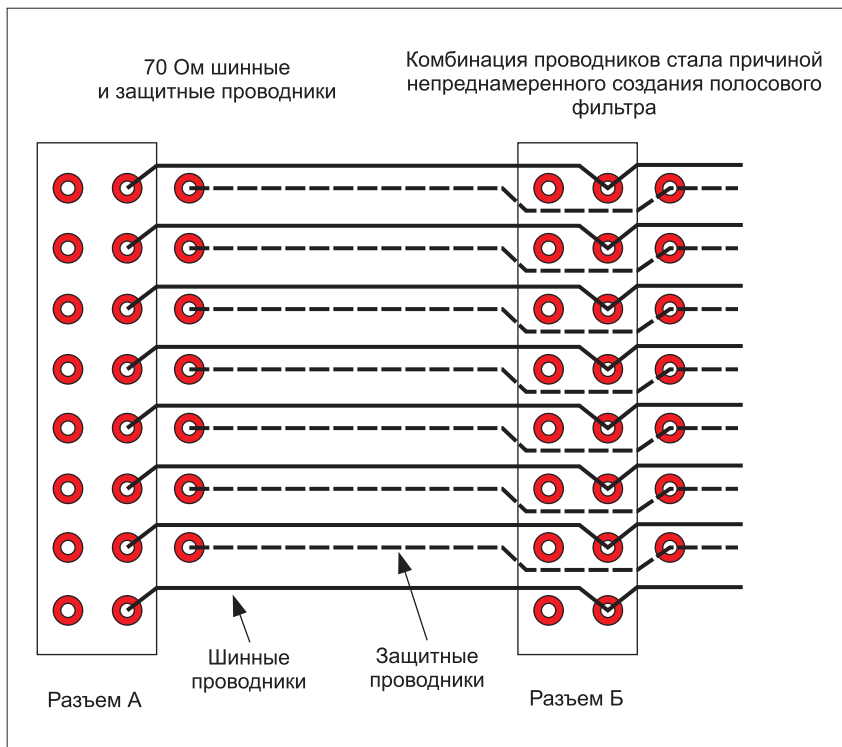


Рис. 7. Шина объединительной платы с «защитными» проводниками

помехи на ближнем и дальнем концах линии. В случае цифровых устройств необходимо обеспечить защиту от обратных перекрестных помех (см. рис. 6).

#### НАЗНАЧЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПРОВОДНИКОВ

Назначение защитных проводников заключается в том, что, находясь между двумя линиями передачи, они ослабляют электромагнитное поле, т. е. действуют как экран, и подавляют нежелательные перекрестные помехи между линиями. На практике защитный проводник, установленный между двумя линиями передачи, увеличивает

интервал между ними, что и уменьшает перекрестную помеху. Собственно защитный проводник не блокирует электромагнитное поле.

Этот проводник представляет собой распределенную LC-цепь с некоторой резонансной частотой. Если геометрические размеры этой цепи выбраны верно, она резонирует на некоторой частоте, становясь полосовым фильтром, который увеличивает, а не уменьшает перекрестную помеху. На рисунке 7 представлена схема неудачно разработанной объединительной платы суперкомпьютера. Импеданс линий передачи объединительной платы был задан равным 70 Ом.

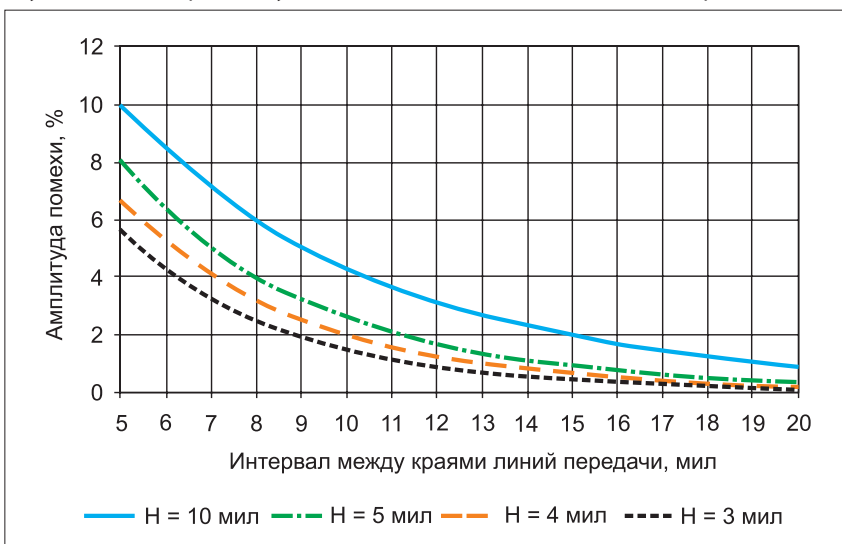


Рис. 8. Относительная амплитуда обратной перекрестной помехи в зависимости от интервала между краями линий и высотой проводника над слоем

Разработчики объединительной платы вставили защитные проводники, чтобы контролировать нежелательные перекрестные помехи. Длина проводников оказалась такой, что они резонировали на тактовой частоте компьютера. В результате появилась нежелательная связь между сигналами, распространяющимися в поперечном направлении объединительной платы, что сделало работу компьютера нестабильной. Инженерам пришлось переделать схему платы. Заметим, что печатные платы современных изделий содержат настолько много цепей и сигнальных проводников, что места для защитных проводников не хватает.

#### СПОСОБЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПРОВОДНИКОВ

Известно немало рекомендаций относительно способов заземления защитного проводника, которые повышают эффективность ослабления перекрестных помех. К этим способам относится использование защитных проводников с: «плавающим» земляным потенциалом; одним заземленным концом; двумя заземленными концами. На практике не имеет значения, как они заземлены, т. к. все они представляют собой LC-цепи, которые могут образовать полосовой фильтр, и ни один из защитных проводников не станет выполнять возложенных на него функций.

Более того, заземление обоих концов проводника не означает, что его потенциал станет равен нулю и он будет играть роль экрана. Проводники с заземлением любого вида не экранируют электромагнитные поля – только интервал между проводниками определяет возможность контроля над перекрестными помехами. На рисунке 8 показано, как с увеличением интервала между двумя линиями улучшается контроль над перекрестными помехами.

Кроме того, считается, что длина защитного проводника должна быть в точности равна длине связанных участков линий передачи, чтобы он эффективно работал в полосковой конфигурации. Однако длина защитного проводника не оказывает влияния на его способность контролировать перекрестные помехи, поскольку именно расстояние между проводниками определяет степень ослабления помехи.

#### МИКРОПОЛОСКОВЫЕ И ПОЛОСКОВЫЕ ЛИНИИ

В ряде источников утверждается, что эффективность защитных проводников по-разному проявляется при подавлении помех в микрополосковых и полосковых топологиях. В частности,

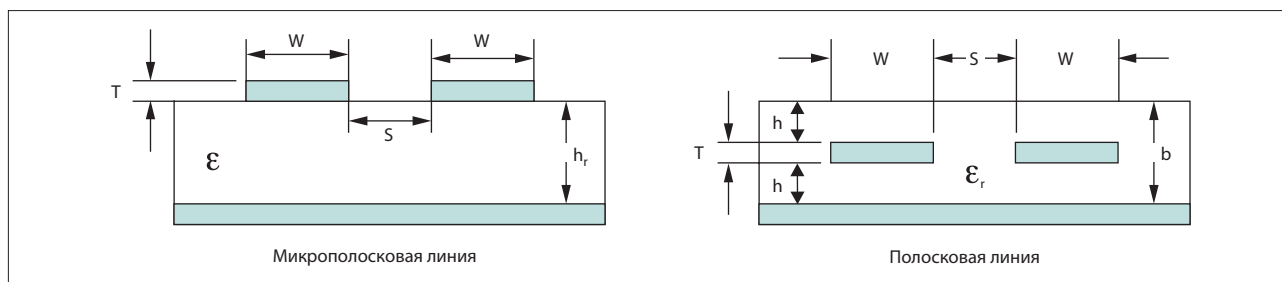


Рис. 9. Относительные физические размеры дифференциальных проводников

утверждается, что защитные проводники нецелесообразно использовать в микрополосковой конфигурации, но они эффективно работают в полосковой топологии, если оба конца защитного проводника заземлены. Однако это не так – эффективность использования заземленных или незаземленных защитных проводников не зависит от конфигурации линии передачи.

### ОСЛАБЛЕНИЕ ПЕРЕКРЕСТНЫХ ПОМЕХ

Понимание механизма, обеспечивающего контроль над помехами, возвращает нас к фундаментальным правилам физики и пониманию природы электромагнитных полей.

При классической трассировке проводников интервал между линиями передачи шириной 5 мил (0,127 мм) составляет 5 мил. При таком интервале высота проводника над уровнем платы составляет те же 5 мил. Такая конфигурация может применяться в четырехслойной печатной плате, например в материнской плате ПК. При этом уровень перекрестной помехи составляет 8%. Если он слишком высок для проектируемой системы, можно установить защитный проводник между линиями передачи, что увеличит интервал между ними до 15 мил (0,381 мм). В результате перекрестная помеха уменьшится до 0,8%, т.е. в 10 раз. Можно предположить, что именно защитный проводник поспособствовал сокращению перекрестной помехи, но на самом деле она уменьшилась благодаря увеличению интервала между проводниками.

При ослаблении перекрестных помех на печатной плате следует добиться того, чтобы сигнальная линия передачи прошла как можно ближе к сплошному слою заземления. В идеальном случае процесс проектирования печатной платы следует начинать, используя проводник как можно меньшей толщины. Эта величина должна быть технологически реализуемой. В большинстве случаев толщина проводника не может быть меньше 4 мил (0,10 мм). Далее следует задать интервал между линиями передачи и ширину проводника с учетом требуемого импеданса.

При использовании данных, представленных в документации производителей, следует исходить из того, что результаты симуляций и расчетов основаны на теоретических расчетах, а не на информации, полученной экспериментально. Результаты симуляций рекомендуется проверять на корректность с помощью фактически полученных данных.

Итак, защитные проводники, применяемые на печатных платах, в действительности не позволяют контролировать перекрестную помеху независимо от способов их реализации и заземления. Поскольку при использовании этих проводников образуются полосовые фильтры, перекрестные помехи могут увеличиваться. Только корректное понимание фундаментальных основ физики и природы электромагнитных полей позволяет подавлять перекрестные помехи.

### LVDS-ПРОВОДНИКИ

Одним из самых распространенных способов решения задачи по обеспечению ЭМС является использование дифференциальных интерфейсов. Рассмотрим наиболее важные рекомендации по применению LVDS-интерфейса.

– На рисунке 9 представлены относительные физические размеры дифференциальных проводников с импедансом 100 Ом ( $\pm 5\%$ ) для микрополосковой и полосковой топологий.

Микрополосковые линии находятся либо на верхнем, либо на нижнем слое печатной платы. Микрополосковая конструкция состоит из дифференциальной пары и одного опорного слоя (как правило, заземления). Полосковые линии находятся между двумя опорными слоями, что повышает их емкость по сравнению с микрополосковой конфигурацией. Как правило, у них больше задержки на распространение по сравнению с микрополосковыми линиями. Хотя полосковым линиям требуется дополнительный слой, что может привести к повышению их стоимости, у этой топологии меньше ЭМП и лучше ЭМС.

– Расстояние между двумя соседними парами LVDS-линий должно

превышать или быть равным удвоенному расстоянию между двумя отдельными проводниками одной LVDS-пары.

Чтобы минимизировать поступающий шум и излучаемое электромагнитное поле от других сигнальных проводников, следует обеспечить тесную связь между линиями LVDS-пары. С этой целью длины сигнальных проводников дифференциальной пары должны быть равными. Как видно из рисунка 10, длины проводников не должны различаться даже при использовании конденсаторов, обеспечивающих связь по переменному току. Кроме того, вдоль всей длины LVDS-пары должно сохраняться одно и то же расстояние между ее сигнальными проводниками.

- При трассировке сигнальных LVDS-проводников следует выбирать самый прямой маршрут и минимальную длину проводника, соединяющегося с разъемом.
- Во избежание отражений необходимо свести к минимуму длину ответвлений и отводов (см. рис. 11). Согласующие резисторы следует устанавливать как можно ближе к выводам последовательно-параллельного преобразователя, чтобы уменьшить длину отводов и эффективно согласовать дифференциальные линии.

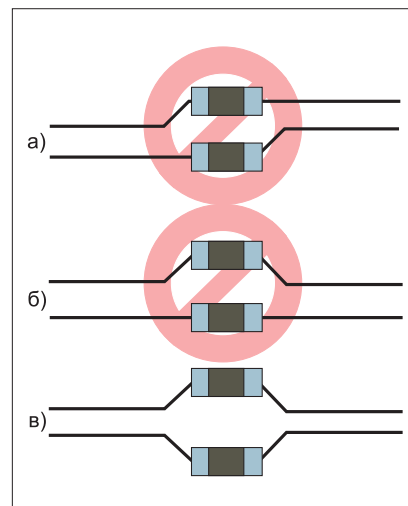


Рис. 10. Сигнальные проводники дифференциальной пары должны быть симметричными

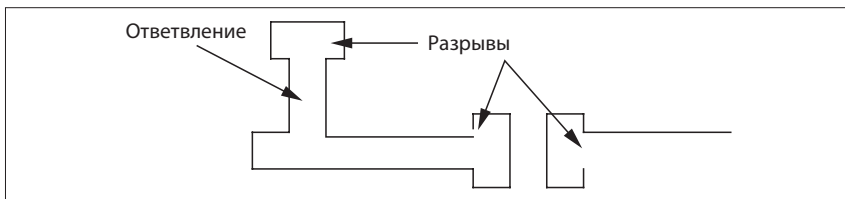


Рис. 11. Ответвления проводников и разрывы импеданса

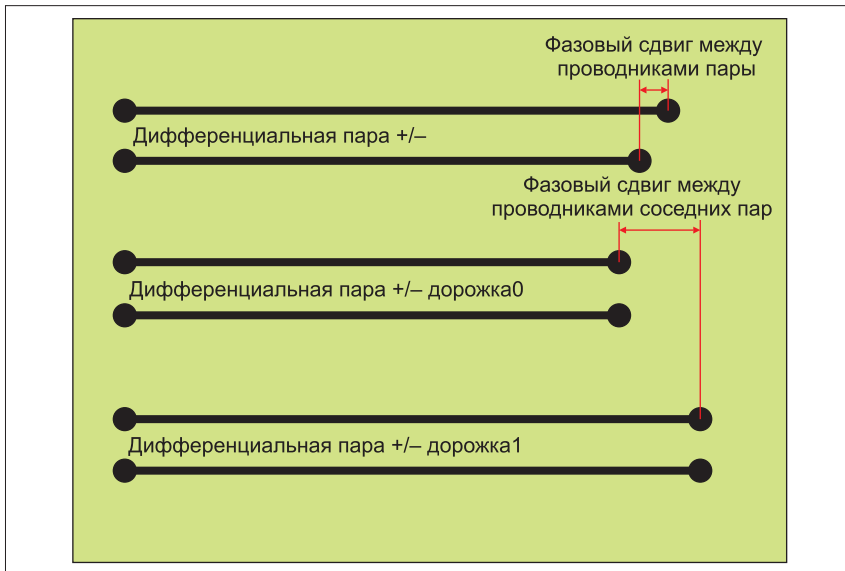


Рис. 12. Фазовый сдвиг между проводниками одной и двух дифференциальных пар

– По возможности следует избегать трассировки высокочастотных проводников через переходные отверстия. Рассогласование импедансов между переходными отверстиями и сигнальными проводниками приводит к появлению отражений в линиях передачи. Любые неоднородности или разрывы в одной сигнальной линии дифференциальной

пары отражаются на состоянии другой сигнальной линии этой пары.

– Проводники с высокоскоростными сигналами устанавливаются на внутренний слой. В четырехслойной печатной плате проводник с высокоскоростным сигналом можно поместить на второй или третий слой. Кроме того, следует создать переходные отверстия для высокоско-

ростных сигналов с контролируемым импедансом.

– Следует минимизировать фазовый сдвиг между соседними парами и внутри каждой пары (см рис. 12). Если фазовый сдвиг между проводниками дифференциальной пары задан равным  $\pm 30$  пс, необходимо, чтобы длины проводников не отличались друг от друга более чем на 5 мм. Следует избегать переплетения «змейкой» одной стороны дифференциальной пары с целью компенсации фазового сдвига. Из-за фазовых сдвигов между LVDSL-линиями возрастает излучение, и уменьшается раскрыв глазковой диаграммы. Из-за некорректно выполненной трассировки проводников, разъемов и кабельных проводов может появиться фазовый сдвиг, который исключается с помощью тесно связанных LVDS-пар. При использовании экранированного кабеля витой пары следует учитывать фазовый сдвиг между парами линий соответствующих кабелей.

– Рекомендуется, чтобы под проводниками был сплошной заземляющий слой. Высокочастотный обратный ток, проходящий через щель или поры в слое, становится источником излучения. Целостность сигнала ухудшается, он взаимодействует с соседними сигналами, и возрастает задержка на распространение. Если невозможно избежать трассировки через щели в слое, следует разместить «сшивающие» конденсаторы вокруг нее, чтобы обеспечить обратный тракт для ВЧ-токов (см. рис. 13).

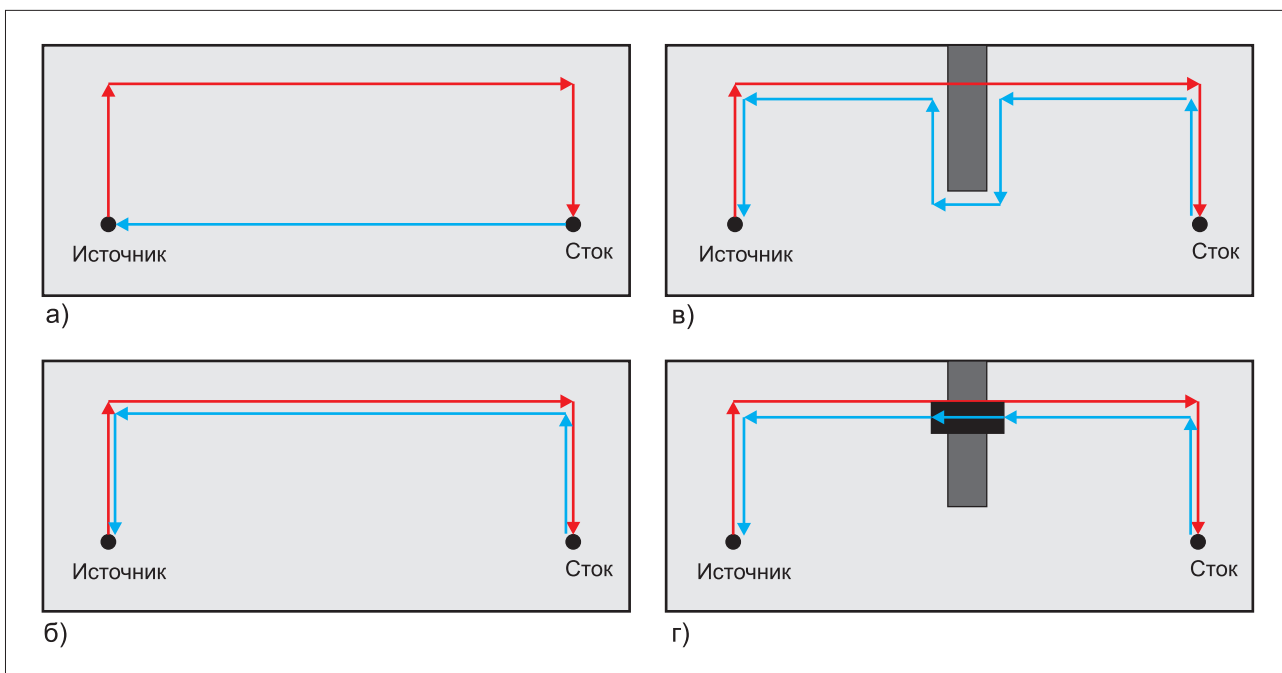


Рис. 13. Тракт с обратным током и результирующая петля контура

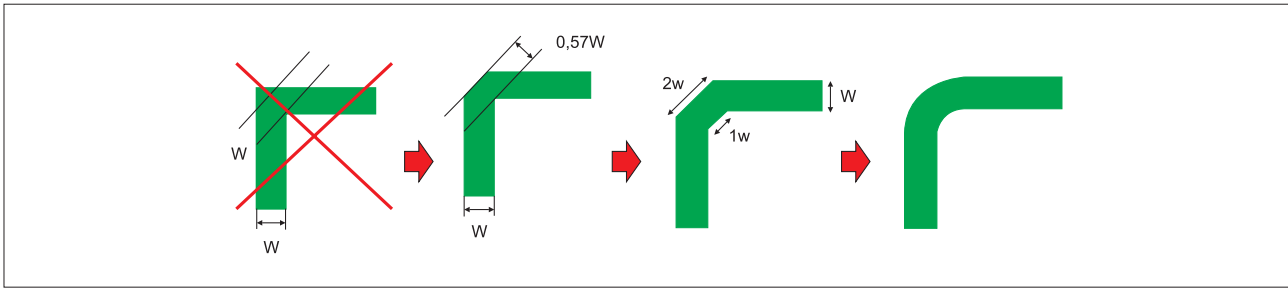


Рис. 14. Неприемлемое и допустимое взаимное расположение проводников

Как можно ближе к щели устанавливаются конденсаторы емкостью не более 1 мкФ.

- Допустимыми считаются случаи, когда проводники расположены относительно друг друга под углом 45°, но рекомендуется трассировать их с использованием закругленных изгибов (см. рис. 14). Следует избегать асимметричных изгибов и не располагать проводники под прямыми углами к выводам компонентов или по отношению к другим проводникам. Проводники, расположенные под прямым углом относительно друг друга, излучают в большей мере.
- Для связи по переменному току рекомендуется использовать конденсаторы небольшого типоразмера (0603 и меньше), чтобы минимизировать неоднородности контактных площадок. Применяются также конденсаторы фильтров со связью по переменному току типоразмера 0201. Не следует размещать высокоскоростные LVDS-проводники вблизи краев печатной платы.
- Необходимо, чтобы импеданс LVDS-проводников соответствовал дифференциальному импедансу выбранной физической среды. Этот импеданс также должен соответствовать согласующему резистору, который подключен к дифференциальной паре на входе последовательно-параллельного преобразователя. Импеданс должен быть согласован на всех разъемах. Для проверки импеданса рекомендуется использовать измеритель отраженного сигнала.
- Не следует устанавливать зонд или измерительный наконечник на проводники с высокоскоростными дифференциальными сигналами.
- Не рекомендуется осуществлять трассировку высокоскоростных сигналов под кристаллами, осцилляторами, генераторами тактовых сигналов, импульсными регуляторами мощности, монтажными отверстиями, магнитными компонентами или ИС, которые используют синхросигналы.
- Устанавливайте высококачественные развязывающие конденсаторы X7R

вблизи выводов устройства. Используйте несколько конденсаторов с разными емкостями (0,1, 0,001 и 1 мкФ), чтобы обеспечить низкий импеданс в полосах более высоких частот. Устанавливайте конденсаторы с наименьшей емкостью как можно ближе к выводу питания. Соединяйте контактную площадку конденсатора с заземляющим слоем через переходное отверстие. Используйте два-три отверстия, чтобы обеспечить низкоимпедансный тракт с заземляющим слоем.

- Рекомендуется использовать ферритовые бусины для развязки питания ИС с остальной схемой распределения питания.
- Проводники, соединяющие развязывающие конденсаторы с земляным слоем, должны быть как можно более короткими и широкими. Соединяйте силовые и заземляющие проводники со слоями питания и заземления и используйте переходные отверстия, чтобы уменьшить индуктивность. Шунтирующие конденсаторы должны быть на том же слое, что и само устройство. Не следует размещать конденсаторы на противоположной стороне платы.
- Не следует подключать заземляющие или силовые проводники к проводникам, импеданс которых контролируется. Используйте широкие низкоимпедансные проводники для питания и заземления.
- Применяйте индуктивность или ферритовые бусины для разделения питания и минимизации шумовой связи.
- Поскольку чем больше переходных отверстий, тем меньше индуктивность, следует использовать эти отверстия для соединения силовых и заземляющих проводников. Не размещайте переходные отверстия между шунтирующими конденсаторами и ИС.
- Минимизируйте токовые контуры. Как известно, обратный ток проходит по тракту с наименьшим импедансом. На высоких частотах обратный ток протекает непосредственно под сигнальным трактом. Шум, генерируемый токовыми кон-

турами, можно минимизировать, уменьшив контуры. При этом сокращаются электромагнитные помехи, и повышается устойчивость к электростатическому разряду. Сплошной заземляющий слой обеспечивает непрерывный низкоимпедансный тракт обратного тока для высокоскоростных сигналов.

#### РАЗЪЕМЫ И КАБЕЛИ

Дифференциальные пары должны располагаться рядом друг с другом. Необходимо контролировать их электрическую длину.

Рекомендуется использовать экранированные высокоскоростные разъемы с экраном вокруг интерфейса разъема.

При использовании ленточного кабеля следует между каждой дифференциальной парой установить заземляющую линию, которая служит барьером для шума, распространяющегося между соседними парами.

При использовании двойного коаксиального кабеля применяется экран для каждой кабельной пары. В схемах точка-точка следует использовать экраны вокруг всех кабельных пар независимо от типов кабелей. Общий экран позволяет улучшить параметры линии передачи – повысить скорость, увеличить расстояние между передатчиком и приемником, решить проблемы, связанные с ЭМП. У двойного коаксиального кабеля очень малый фазовый сдвиг и уровень ЭМП благодаря его конструкции и двойному экрану. ⇐

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ron Schmitt. *Electromagnetics Explained – A Handbook for Wireless/RF, EMC, and High Speed Electronics*. Newnes. 2002.
2. Eric Bogatin. *Signal Integrity – Simplified (3rd edition)*. Prentice Hall. 2018.
3. Daniel Beeker. *Effective PCB Design: Techniques To Improve Performance*.
4. Rick Hartley. *Control of Noise, EMI and Signal Integrity in PC Boards (2-day seminar)*. Rick Hartley Enterprises.
5. Ralph Morrison. *Digital Circuit Boards: Mach 1 GHz*. Wiley. 2012.
6. Ralph Morrison. *Fast Circuit Boards: Energy Management*. Wiley. 2017.