

Повышение электромагнитной совместимости внутреннего электрического монтажа

Антон ЕРЕМИН
ae@crels.ru

Модульный принцип построения современных электрических и электронных систем требует использования многочисленных электрических связей как в виде жгутов и кабелей, связывающих оборудование в единый комплекс, так и между печатными платами в пределах одной единицы оборудования. С точки зрения электромагнитной совместимости эти протяженные элементы являются одновременно приемниками помех и их источниками.

В идеальном случае вся электронная схема прибора должна быть выполнена на одной печатной плате. В схемах, в которых обработка низковольтных сигналов совмещена с высокоскоростной цифровой обработкой, такое совмещение часто требует использования зонирования, локального экранирования и использования специальных структур печатных плат. Однако в дальнейшем все эти меры окупаются за счет повышения технологичности изделия при сборке и настройке, улучшения характеристик ЭМС путем исключения протяженных электрических линий и, не в последнюю очередь, повышения надежности изделий посредством исключения одного из «слабых мест» в системах — межплатных проводных связей.

К сожалению, размещение всей схемы на одной печатной плате не всегда реализуемо с учетом требований к габаритам и компоновке оборудования. Иногда конструктор сознательно выбирает деление на функциональные блоки в попытке минимизировать их взаимное влияние, хотя современные технологии производства печатных плат обеспечивают достаточный уровень изоляции цифрового и аналогового сегментов для большинства схем. В любом случае, если принято решение использовать в пределах одного корпуса две и более печатных плат, то необходимо еще на стадии разработки структурной схемы принять меры для снижения эмиссии помех от внутреннего электро монтажа [1].

Во-первых, следует минимизировать количество самих печатных модулей, чтобы уменьшить количество связей внутреннего электро монтажа. Во-вторых, требуется ограничить число сигналов, которые планируется передавать по проводам между платами. В частности, необходимо избегать передачи между платами многопроводных шин адреса и данных. В-третьих, следует минимизировать частоту передаваемых сигналов, напри-

мер избегать передачи между платами тактовых сигналов. В-четвертых, необходимо минимизировать токи передаваемых сигналов. Это значит, в частности, что схемы управления электроприводами должны находиться ближе к двигателю, а не к цифровой части устройства. Последние два правила, способствующие снижению скорости изменения тока, можно с тем же успехом использовать для снижения эмиссии помех от межблочных электрических связей.

Если избежать передачи высокочастотных сигналов между печатными платами не удастся, то источники таких сигналов следует располагать как можно ближе к точке подключения проводной линии (например, ближе к соединителю на печатной плате). Кроме того, с точки зрения электромагнитной совместимости, линии связи, в которых обратный проводник располагается на минимальном расстоянии от сигнального, характеризуются как минимальной чувствительностью к помехам, так и минимальной их эмиссией. К сожалению, это приводит практически к удвоению числа проводников в соединительном кабеле и, следовательно, к ухудшению массогабаритных параметров оборудования. Это еще один аргумент в пользу снижения количества сигналов, передаваемых между печатными платами.

Многопроводные внутриблочные жгуты

Традиционным решением для электрического соединения печатных плат являются внутриблочные жгуты, составленные их отдельных проводов и скрепленные вязкой по всей длине. Для улучшения их ЭМС используются те же приемы, что и для межблочных жгутов. В первую очередь, необходимо уменьшить площади контуров для дифференциальных сигналов, чему способствует использование витых пар. Если в составе жгутов для возврат-

ных токов используются «общие провода», рекомендуется увеличить их количество в жгуте и по возможности равномерно распределить в поперечном сечении жгута. Этот прием эффективен в том числе для снижения перекрестных наводок через общий провод.

Снижение площади излучающего контура для синфазных токов обеспечивается плотной вязкой и закреплением жгутов на минимальном расстоянии от заземляющих конструкций. Даже локальное изменение зазоров между двумя проводами или проводом и элементом заземления может привести к росту наводимых на сигнальные линии помех. Отсутствие продольной вязки или незакрепленный внутренний электро монтаж (рис. 1) являются одними из наиболее впечатляющих «кошмаров» для специалиста по ЭМС, поскольку часто провоцируют нестабильность не только функциональных характеристик, но и характеристик электромагнитной совместимости. Оборудование со свободно проло-



Рис. 1. Пример незакрепленного внутреннего электро монтажа с продольной вязкой пластиковыми поясками

женным внутренним монтажом можно мгновенно «починить» смещением отдельного провода или незакрепленного пучка проводов в сторону на несколько сантиметров. Свободная раскладка внутреннего монтажа допустима только для низкочастотного оборудования с относительно мягкими требованиями к ЭМС.

Контроль путей протекания синфазных токов внутри оборудования не менее важен, чем для межблочных кабельных и жгутовых связей. Для обеспечения минимальной площади контура синфазные токи должны иметь тракт с минимальным импедансом в непосредственной близости от трассы прокладки жгута [2]. Разрыв этого тракта или рост его импеданса неизбежно приводят к образованию «альтернативных» токовых контуров и, соответственно, к ухудшению параметров электромагнитной совместимости. Таким образом, необходимо снизить индуктивность конструктивных элементов под проводными связями, обеспечить малый импеданс в точках соединения элементов и принять меры по обеспечению защиты этих соединений от коррозии.

Прием разнесения в пространстве для снижения перекрестных наводок между линиями может стать действенной мерой даже при незначительном увеличении расстояния между проводниками. Очевидно, что его значимость растет с расширением частотного спектра для цифровых сигналов и ужесточением требований к соотношению «сигнал/шум» для аналоговых сигналов. Напряженность доминирующих магнитного и электрического полей снижается обратно пропорционально кубу расстояния между источником и приемником помехи. Следовательно, увеличение расстояния между проводниками, например, с 1,5 до 10 мм может уменьшить напряженность шумового поля более чем на 40 дБ.

Внутриблочный электромонтаж аналогично межблочным жгутам можно экранировать для снижения помех от оборудования, чувствительности к ним или для уменьшения перекрестных наводок в пределах прибора. Экраны внутренних кабелей заземляют с обоих концов, однако точки заземления должны быть выбраны исходя из расположения этих кабелей. Идеальная точка заземления для изоляции шумовых токов — «корпус», т. е. система экранирующего заземления. Точка заземления может быть расположена не только непосредственно на стенке корпуса, но и на поверхности любых проводящих деталей, имеющих с этим корпусом качественное высокочастотное соединение. Такими деталями могут быть перегородки, кронштейны или корпуса блочных соединителей. Если невозможно обеспечить непосредственное соединение экрана с корпусом методом круговой заделки, необходимо использовать короткую перемычку в виде ленты. Монтажный провод более технологичен для таких целей, но он имеет больший высокочастотный импеданс по сравнению с лентой.

Однако если расстояние до ближайшей конструкции велико, нет смысла использовать ленту большой длины. Приемлемой и часто используемой точкой заземления экранов внутреннего электромонтажа является выделенный для этого участок на краю печатной платы. В случае низкоимпедансного соединения этого участка с корпусом с помощью опорной стойки и изоляции от общей системы сигнального заземления платы такой способ мало уступает по эффективности приему непосредственного соединения.

Если ни корпусная деталь, ни отдельный участок заземления недоступны, допустимо соединить экран внутриблочного монтажа с системой сигнального заземления. Однако система заземления в этом случае должна обладать достаточно малым высокочастотным импедансом и быть представлена, как минимум, поверхностью заземления, а не набором проводников. Напомним, что экран является источником шумовых высокочастотных токов достаточно большой амплитуды, поэтому его соединение даже с широкими проводниками заземления печатной платы может недопустимо повысить потенциал «сигнальной земли». Использование печатных плат с несколькими поверхностями заземления в структуре позволит дополнительно снизить импеданс для шумовых токов и, следовательно, амплитуду шумового напряжения в системе сигнального заземления.

Разумеется, из приведенного выше правила заземления экранов имеются исключения, когда приходится выбирать не между хоро-

шим и очень хорошим вариантами, а, как часто случается на практике, между плохим и очень плохим. Первое исключение — дифференциальные линии низковольтных сигналов, поступающих с датчиков физических величин. При двухстороннем соединении их экранов с системой заземления могут образоваться токовые петли значительного размера, а наводки от экранных токов на низкоамплитудный полезный сигнал могут оказаться недопустимо велики. В свою очередь, это потребует установки дополнительных фильтров перед операционным усилителем на приемной стороне. В таком случае экран соединяют с землей на стороне усилителя, если датчик не заземлен. Если датчик заземлен, то соединение выполняют на стороне датчика.

Вторым исключением, также учитывающим возможность образования нежелательных петель заземления, являются комбинированные жгуты, содержащие как аналоговые, так и цифровые сигналы. Предположим, что с учетом амплитуд сигналов и их частотных спектров возникающие между ними перекрестные наводки считаются допустимыми. В этом случае может оказаться, что на одном конце экран должен быть соединен с цифровым сегментом системы сигнального заземления, а на другой — с аналоговым сегментом, изолированным от цифрового. Таким образом, заземление экрана с двух концов образует токовую петлю, объединяя два сегмента с сильно отличающимися шумовыми потенциалами, условно «грязную цифровую землю» и «чистую аналоговую землю». В этой ситуации экран соединяют с системой заземления на одном конце. Для защиты чувствительных аналоговых сигналов экран соединяют с аналоговым сегментом системы заземления, а для снижения излучения от цифровых сигналов — с цифровым сегментом системы заземления. Однако в приведенных двух исключительных ситуациях необходимо помнить об ограничениях экранов с односторонним заземлением. Напомним, что экраны с односторонним заземлением эффективны для защиты только от электрического поля и только до частоты резонанса на длине экрана [3].

Использование ленточных кабелей

Существенная трудоемкость раскладки, вязки и заделки индивидуальных проводов в соединители, высокая вероятность ошибок при выполнении работ и ограниченность пространства внутри современного электронного модуля способствовали распространению плоских шлейфов и соответствующих им соединителей под массовую заделку проводов «в один шаг» как средства внутреннего электромонтажа. Кроме того, для обеспечения ЭМС плоские шлейфы поддерживают контролируемую раскладку проводов друг относительно друга, тогда как в многопроводных внутренних жгутах провода обычно расположены случайным образом. Поэтому характеристики перекрестных наводок и других параметров ЭМС при использовании ленточных кабелей являются повторяемыми от изделия к изделию, чего нельзя сказать о многопроводных жгутах.

Однако ленточные кабели с единственным обратным проводником обладают рядом существенных недостатков. Первый недостаток — образование «контуров для излучения и приема помехи» между сигнальным проводом и обратным. Второй — связь сигналов через единственный «общий провод». Третий — значительный уровень емкостных и индуктивных перекрестных наводок между сигналами в шлейфе с такой схемой.

Чередование сигнальных проводов и проводов заземления в шлейфе рекомендуется для приложений с цифровыми сигналами со временем фронта порядка десятков нс или частоте несущей порядка МГц. Например, для плоского шлейфа длиной 1,5 м и шириной 5 см сигнал с временем фронта менее 12 нс и несущей частотой выше 1 МГц станет причиной образования излучаемых помех, превышающих пределы, установленные для промышленного оборудования стандартами МЭК [4]. Это значит, что для сигналов с временем фронта меньше указанного или с большей несущей частотой необходимо зарезервировать как минимум один обратный проводник для каждого высокочастотного сигнала, использовать ленточные кабели с «поверхностью заземления» или гибкие печатные платы.

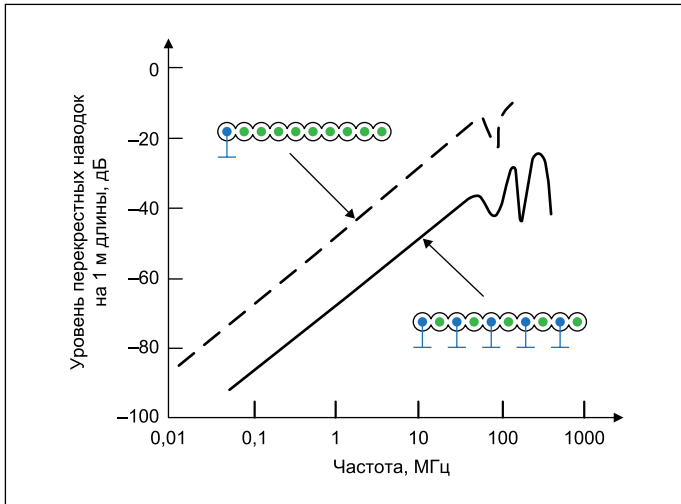


Рис. 2. Частотные характеристики удельных перекрестных наводок в плоском шлейфе в зависимости от количества проводников, зарезервированных для обратных токов

Чередование сигнальных и заземляющих проводников является эффективным средством снижения уровня не только излучаемых волн помех, но и перекрестных наводок в плоских шлейфах. На рис. 2 приведены теоретические характеристики удельных емкостных перекрестных наводок, возникающих в 10-проводном ленточном кабеле длиной 1 м с шагом раскладки 2,5 мм. В этом эксперименте все сигнальные линии соединены с общим проводом через 100-Ом нагрузку. Верхняя характеристика отражает уровень перекрестных наводок между 9 и 10 линиями, у которых перекрестные наводки в шлейфе максимальны. Нижняя характеристика описывает уровень перекрестных наводок в любой паре соседних линий при чередовании сигнальных и общих проводов в шлейфе. Как видно из рисунка, до частоты резонанса уровень наводок в шлейфе с чередованием проводников снижен на 20 дБ, или в 10 раз.

Параллельная прокладка шлейфов друг над другом также может стать причиной повышенного уровня перекрестных наводок. В этом случае описанный выше прием чередования сигнальных и общих проводников не существенно снижает взаимное влияние сигналов. При совместной прокладке эффективнее использовать шлейф в экране или поместить между лентами разделитель из изоляционного материала толщиной в несколько миллиметров для разнесения источника и приемника помехи в пространстве.

Плоские ленточные кабели, состоящие из витых пар, эффективны для снижения перекрестных наводок и взаимодействия в ближней зоне. Однако эффект повива в ближней зоне весьма ограничен по сравнению с плоскопараллельной укладкой проводников с малым шагом. Эти ограничения имеют в своей основе две причины. Первая — при снижении расстояния между проводниками помехи, вызванные дифференциальным сигналом, оказываются гораздо слабее помех от синфазного сигнала. Следовательно, влияние повива на общий уровень дифференциальных помех скрыто фоновым излучением синфазного шума. Напомню, что повив влияет на уровень излучения только для дифференциального сигнала, но не для синфазного. Вторая причина — особенности конструкции таких кабелей, заключающиеся в наличии участков без повива приблизительно каждые 0,5 м для обеспечения массовой заделки в соединители серии IDC. Эти участки существенно снижают эффект от повива сигнального и обратного проводов.

Гибкие печатные платы

Основные области применения гибких печатных плат — это соединения многослойных плат с плотным рисунком монтажа. В РФ на сегодняшний день доступны для заказа гибкие печатные платы с шириной проводника и зазора между ними 100 мкм. Максимальное

количество слоев для этой группы изделий на полиимидной подложке — 8 шт. Гибкие печатные платы — экономичное решение для внутреннего электромонтажа во всех типах устройств, начиная с бытовой техники и заканчивая космическими аппаратами. Некоторые аналитики оценивают снижение стоимости внутривидеомонтажа до 70% при переходе от многопроводных жгутов к гибким печатным платам.

С точки зрения электрических свойств гибкие платы обеспечивают непрерывность импеданса линий передачи высокоскоростных сигналов и отличную ЭМС. Импеданс линии, ее помехозащищенность и перекрестные наводки на гибкой плате являются более предсказуемыми аналогично жесткой печатной плате.

Однако у гибких печатных плат имеются и определенные недостатки. Эти печатные платы часто требуют большей аккуратности при монтаже, так как менее стойки к царапинам и разрыву. Полиимидный диэлектрик менее механически стабилен в процессе производства по сравнению со стеклотекстолитом — его слои могут сдвигаться, сжиматься и расширяться при производстве. Следовательно, необходимо задавать относительно широкие зазоры между переходным отверстием и проводником в слое. Ширина зазора для предотвращения нежелательных замыканий металлизации отверстия и проводника при производстве должна составлять не менее 250 мкм. Ремонт или доработка схемы гибкой платы также существенно затруднены, так как требуют удаления защитного слоя и восстановления его после корректировки [5].

Конструктивно гибкие печатные платы состоят из изоляционной подложки, проводников и скрепляющего их клеевого слоя. Однослойные гибкие печатные платы имеют только один печатный слой, нанесенный на подложку, а двухсторонние — два, с обеих сторон подложки. Многослойные структуры состоят из одно- и двухслойных плат, собранных в пакет.

В качестве подложки чаще всего используется полиимидная пленка, имеющая отличные механические и температурные характеристики. Реже используют более дешевый полиэстер, особенно когда требуется повышенная химическая стойкость. Температурные характеристики полиэстера и его гибкость хуже, чем у полиимида.

Материал проводников — медь, нанесенная электролитическим способом на подложку, или в виде фольги в зависимости от планируемой токовой нагрузки на линию. Химическая обработка поверхности проводников улучшает адгезию и долговечность сцепления с подложкой. Контактные площадки под пайку или соединение токопроводящим клеем покрывают оловом или золотом.

Для склеивания слоев часто используют пленочный полиимидный клей, обладающий отличными температурными свойствами, что критично при передаче сильноточных сигналов или в военной технике. Кроме того, у этого клея — минимальный коэффициент температурного расширения, что важно при склейке многослойных структур. Реже используют более дешевый полиэстеровый клей, имеющий по сравнению с полиимидным меньшую прочность и теряющий стабильность в условиях циклически изменяющихся температур.

В последнее время клеевые технологии при изготовлении печатных плат заменяют на процесс спекания, так как, во-первых, слой клея увеличивает толщину структуры на 25–50 мкм на слой, а во-вторых, клей размягчается при повышении температуры и абсорбции влаги из воздуха. Спеченные же печатные платы функционируют и в условиях повышенной влажности, и при повышенных температурах.

На гибких двухслойных гибких печатных платах можно реализовать не только микрополосковые однополярные, но и микрополосковые дифференциальные линии связи. Эта конфигурация очевидно имеет минимальную толщину и меньший радиус изгиба. Соответственно, трехслойные и более сложные структуры могут включать также полосковые однополярные и дифференциальные линии. Для дифференциальных линий допуск на расстояние между проводниками является дополнительным фактором, влияющим на общую погрешность задания волнового сопротивления. Допуск на волновое сопротивление гибких печатных плат, обусловленный характеристиками материалов и технологией изготовления, выше, чем у жестких печатных плат: он составляет 15–20%. Точность волнового сопротивления можно улуч-

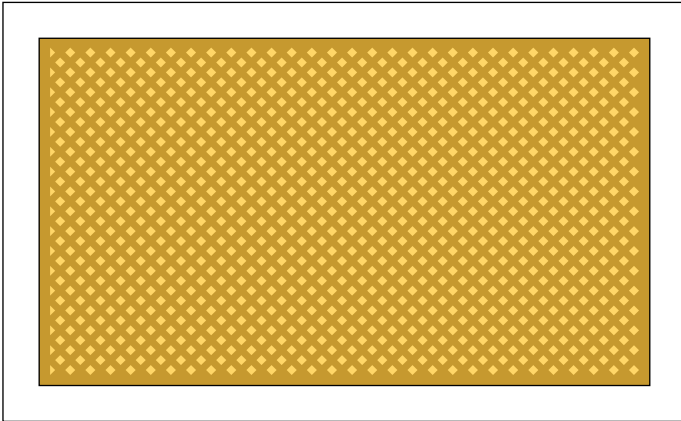


Рис. 3. Сетчатая структура поверхности заземления гибкой печатной платы

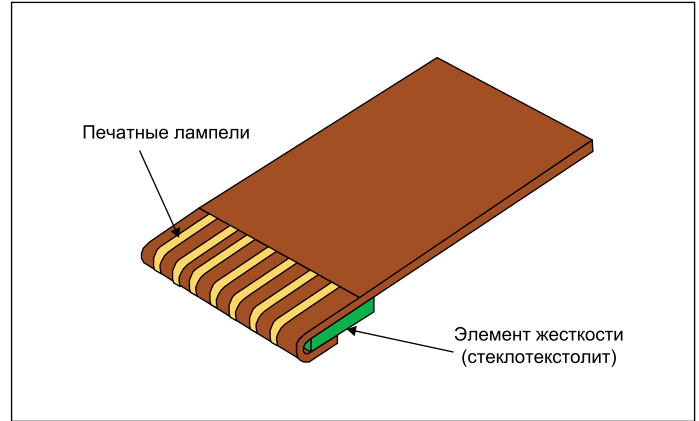


Рис. 4. Конструктивное исполнение зоны стыковки гибкой печатной платы с использованием соединительных ламелей

шить за счет использования более толстых подложек, позволяющих увеличить ширину печатного проводника и тем самым точность обеспечения его ширины при производстве. Другой прием повышения точности — использование технологии спекания для формирования стека, увеличивающей стабильность толщины диэлектрика.

Цельная поверхность заземления в виде слоя фольги существенно снижает гибкость платы с линиями передачи данных, поэтому сетчатая структура этой поверхности (рис. 3) — распространенный прием повышения гибкости. Основная характеристика сетки — отношение ширины проводника к шагу сетки. Чем ниже это значение, тем меньшее количество металла остается в слое и гибче становится структура. Например, если это отношение равно 0,3, то количество меди в поверхности заземления уменьшается приблизительно вдвое по сравнению со сплошным слоем. Кроме того, благодаря удалению большего процента меди волновое сопротивление возрастает по сравнению со сплошным слоем металла. Относительная диэлектрическая проницаемость используемого в качестве диэлектрика полиимида ниже по сравнению со стеклотекстолитом (3,2–3,4), что позволяет делать тоньше линии передачи данных с заданным волновым сопротивлением, а значит, уменьшить радиус изгиба платы. Полиимидная пленка является материалом «с непрерывной структурой», что исключает вариации волнового сопротивления при прокладке проводников над участками с разной диэлектрической проницаемостью, свойственные жестким печатным платам на основе стеклотекстолита.

Несмотря на возможность расположения печатных проводников на минимальном расстоянии от поверхности заземления в конфигурации микрополосковой линии гибкие печатные платы, аналогично жестким, могут иметь усиленное экранирование [6].

Первый способ — это экранирование сверху и снизу поверхностями заземления, выполненными из цельных полос медной фольги или в виде сетки с минимальной шириной проводника. Аналогично жесткой печатной плате можно дополнительно расположить с краев экранирующие проводники, имеющие с поверхностями заземления соединения с помощью переходных отверстий. К сожалению, такая многослойная структура оказывается достаточно жесткой и обычно является статической, не предназначенной для многократных изгибов.

Второй способ — нанесение на поверхность готовой структуры тонких металлических слоев методом напыления. Такие экраны легче и гибче, но, как и в случае кабелей с экраном из фольги, их не рекомендуют использовать для динамических соединений, которые подвержены в процессе эксплуатации периодическим изгибам. Кроме того, слой металла, полученный методом напыления, имеет сопротивление существенно выше сопротивления фольги той же толщины, что дополнительно снижает эффективность экранирования. Поскольку экраны внутриблочных связей часто заземляют на систему сигнального заземления, для обеспечения контакта экрана с поверхностью заземления гибкой печатной платы перед напылением полезно оставить соединительные окна в защитном покрытии.

Третий, реже применяемый способ, — нанесение покрытий на основе токопроводящих чернил, как правило, с серебряным наполнителем. Один из его вариантов — экранирование слоями проводящих полимеров (например, на эпоксидной основе с серебряным наполнителем). Высота экранирующего слоя составляет около 25 мкм. Эти полимеры также уступают меди с точки зрения проводимости, но существенно лучше меди с точки зрения гибкости.

Комбинирование жестких и гибких печатных плат, а точнее, формирование на поверхности гибких печатных плат жестких структур для поверхностного монтажа — почти идеальный способ компоновки аппаратуры. Он сочетает в себе преимущества одноплатной компоновки и возможность монтажа частей интегрированного печатного модуля в разных плоскостях.

Если гибкая плата не интегрирована с жесткой, то она может иметь с ней как разъемное соединение, так и неразъемное. Для реализации разъемного соединения используются соединители с разными конфигурациями, устанавливаемые на гибкую плату методом штыревого или поверхностного монтажа. Для менее ответственных применений применяются печатные ламели и элемент жесткости (например, пластина из стеклотекстолита), чтобы имитировать соединитель. Гибкую печатную плату в этом случае оборачивают вокруг элемента жесткости необходимой толщины и закрепляют клеем (рис. 4).

Условно неразъемное соединение выполняется с помощью пайки, точечной сварки или приклеивания токопроводящим клеем к площадкам на жесткой печатной плате [7]. Однако линии стыковки жестких участков с гибкими в составе таких комбинированных структур должны также рассматриваться как зоны повышенных механических напряжений. Размещение переходных отверстий на жестких участках ближе 1,5 мм от этой линии нежелательно. Если необходимо соединить жесткие участки многослойной гибкой платой с малым радиусом, то можно использовать несколько одно- или двухслойных гибких плат с воздушным зазором. При этом отличия в длине этих участков позволяют избежать излишних усилий на растяжение или сжатие (рис. 5).

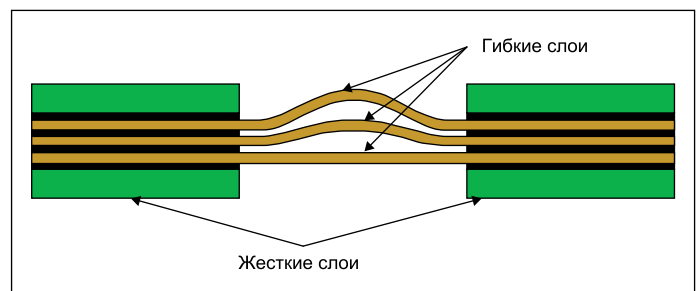


Рис. 5. Конструкция печатной платы с воздушными зазорами между гибкими слоями

Длина гибкого участка комбинированной платы может составлять всего несколько миллиметров, но при этом не должны нарушаться требования к минимальным радиусам изгиба в зависимости от количества слоев в гибкой структуре и ее толщины. По сравнению с межплатными шлейфами на основе гибких печатных плат это решение обладает повышенной надежностью, меньшей трудоемкостью сборки и лучшей ЭМС. На дату публикации статьи в РФ доступен заказ комбинированных печатных плат с количеством слоев до 24 шт. в жесткой части и до восьми слоев в гибкой.

Выводы

Особенности конструкции внутреннего электрического монтажа, заключающиеся в снижении длины электрических связей при

их более плотной компоновке, требуют использования специфического набора приемов для обеспечения ЭМС изделия. Особое внимание в этом случае уделяется массогабаритным характеристикам и гибкости внутрислойных электрических соединений. Современные технологии гибких печатных плат позволяют гармонизировать характеристики ЭМС изделия с прочими требованиями к конструкции.

В настоящей статье приведен обзор базовых инструментов, обеспечивающих минимизацию не только перекрестных наводок от электрических линий внутрислойного монтажа, но и излучаемых помех. Детально изучить приемы обеспечения электромагнитной совместимости, предусматривающие ослабление помехи на всем ее пути от источника к приемнику, можно на семинарах, проводимых ООО «КРЭЛС» в Санкт-Петербурге, Москве или с выездом на ваше предприятие. ■

Литература

1. Christos Christopoulos. Principles and Techniques of Electromagnetic Compatibility. 2nd Edition. Taylor & Francis Group. 2007.
2. J. Sherwin. Understanding Common-Mode Signals. Tutorial 2045. Maxim Integrated. 2003.
3. Michel Mardiguan. Controlling Radiated Emission By Design. 3rd Edition. Springer International Publishing. 2014.
4. ГОСТ IEC 61000-6-4-2016. Электромагнитная совместимость (ЭМС). Часть 6-4 Стандарт электромагнитной эмиссии для промышленных обстановок.
5. Flex Design Guide. Sierra Circuits. 2022.
6. EMI Shielding Methods For Flex and Rigid-Flex PCB Designs. Epec Engineering Technologies Webinar. 2021.
7. Joseph Fjelstad. Flexible Circuit Technology. 4th Edition. BR Publishing Inc. 2011.