

Как улучшить электромагнитную совместимость и защитить печатную плату от электромагнитных помех. Семь советов проектировщикам

Электромагнитные помехи (ЭМП; Electromagnetic Interference, EMI) сопровождают работу всех электронных устройств, которыми мы пользуемся сегодня. Если одновременно включить радиоприемник и телевизор, можно наблюдать шумовые помехи от телевизора, влияющие на радиосигнал, и наоборот. С данным явлением мы сталкиваемся и при посадке в самолет, когда экипаж просит отключить мобильные телефоны, планшеты и ноутбуки. Это делается для предотвращения влияния помех от сигналов гаджетов на навигационные сигналы самолета.

Перевод:
Сергей Шихов

sergey@aconi.ru

В условиях высокого спроса на потребительскую электронику проектировщикам приходится учитывать воздействие ЭМП. Было бы крайне неприятно, если бы человек, разговаривающий по мобильному телефону на улице, вызывал помехи в наушниках своего соседа.

Полностью избавиться от ЭМП невозможно, но мы, безусловно, можем адаптировать наш подход к проектированию печатных плат, чтобы сделать их менее восприимчивыми к воздействию ЭМП, одновременно повышая электромагнитную совместимость (ЭМС; Electromagnetic Compatibility, EMC).

Электронная система состоит из печатных плат (ПП), интегральных микросхем, межсоединений и кабелей ввода/вывода. На высоких частотах, в зависимости от длины проводников и протекающих в них токов, межсоединения склонны работать как антенны, что приводит к возникновению ЭМП. Эти электромагнитные излучения создают помехи для других устройств, находящихся поблизости. Именно поэтому изучение и анализ ЭМП/ЭМС так важны. Нарушает ли излучение вашего прибора работу других расположенных рядом устройств? Соответствует ли оно установленным стандартам? Достигнуто ли соответствие стандартам по ЭМП (ГОСТ/IPC CISPR)?

В статье мы рассмотрим рекомендации по проектированию печатных плат, позволяющие контролировать и предотвращать проблемы ЭМП и ЭМС.

Что такое ЭМС и ЭМП на печатной плате?

Электромагнитная совместимость — это способность электронной системы функционировать в электромагнитном окружении должным образом, не создавая недопустимых электромагнитных помех в устройствах и системах рядом с собой. ЭМС гарантирует, что система работает в соответствии с назначением при соблюдении установленных мер безопасности.

ЭМП — это электромагнитные возмущения, при которых энергия передается посредством излучения или проводимости от одного электронного устройства к другому, ухудшая качество сигнала и вызывая сбои в работе. ЭМС фокусирует внимание на требованиях к испытаниям и на взаимных помехах между соседним оборудованием.

Помехи могут возникать в любом частотном диапазоне выше нуля (постоянного тока — DC). Обычно это происходит на частотах, превышающих 50 МГц.

Всякий раз, когда устройство отклоняется от установленных стандартов, проблемы ЭМС/ЭМП начинают доминировать над производительностью системы. Поэтому устранять ЭМП нужно еще на начальной стадии проектирования печатной платы. Борьба с помехами на более поздних этапах производства может быть излишне рискованной и дорогостоящей.

Для создания платы, соответствующей требованиям ЭМС, основное внимание следует уделять проектированию проводящих цепей электронной схемы,

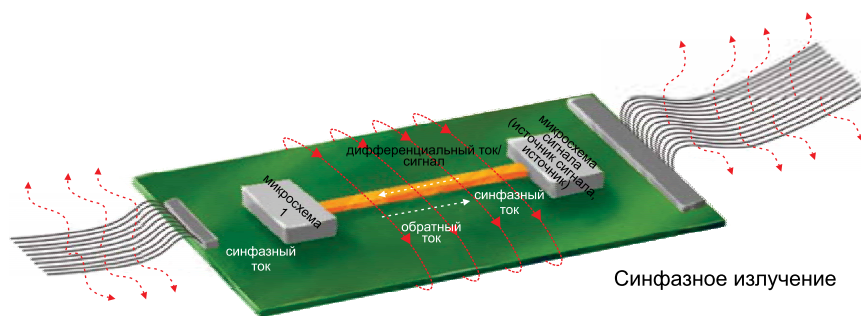


Рис. 1. Электромагнитные помехи представляют собой как синфазные, так и дифференциальные излучения

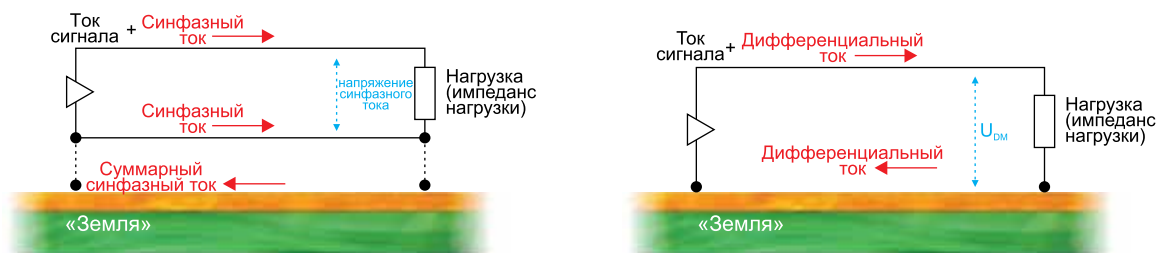


Рис. 2. Неправильная развязка приводит к появлению паразитных синфазных (СМ) и дифференциальных (DM) токов

выбору компонентов и разводке печатной платы. Чтобы устройство было готово к выходу на рынок, оно должно соответствовать предписанным стандартам по ЭМП/ЭМС.

Проектирование печатных плат, соответствующих требованиям ЭМС

Применение надежных методов обеспечения электромагнитной совместимости при проектировании печатных плат позволяет достичь соответствия стандартам ЭМС с ощутимо меньшими затратами по сравнению с альтернативными мерами на более поздних этапах производства. Когда проект печатной платы можно считать соответствующим требованиям ЭМС? По сути, электромагнитная совместимость зависит от трех аспектов:

- плата не должна создавать помех другим системам;
- она не должна быть чувствительной к излучению от других систем;
- особенно важно, чтобы плата не создавала помех самой себе (внутренних помех).

Каковы источники электромагнитных помех?

Существует два типа электромагнитной эмиссии: кондуктивная и излучаемая.

Кондуктивные помехи проникают в систему через линии ввода питания и кабели, в то время как излучаемые возникают из-за электромагнитных волн от силовых и коммуникационных линий, переключающих устройств и электростатических разрядов.

Излучаемые помехи распространяются во внешней среде от электронных устройств и дорожек, мешая работе других электронных систем. Простой пример: помехи от мо-

бильных телефонов и ноутбуков, влияющие на функционирование бортовой авионики.

Кондуктивные помехи могут быть подавлены путем установки линейных сетевых фильтров, подключаемых непосредственно на вводе питания или рядом с разъемами.

Электромагнитные излучения также могут исходить от высокочастотных дорожек. Аналогичным образом они могут генерироваться силовыми шинами и шинами заземления из-за некачественной развязки по питанию. Это приводит к возникновению паразитных токов, таких как синфазные (Common-Mode, CM) и дифференциальные (Differential-Mode, DM) токи (рис. 1, 2).

Помните закон Фарадея из школьного курса? Он гласит, что магнитное поле, создаваемое катушкой, прямо пропорционально площади контура и силе тока в нем.

$$\begin{aligned} \mathcal{E}ДС &= di/dt \propto \text{площадь контура (катушки)} \propto \\ &\propto \text{сила тока в контуре} \\ &(\text{ток, протекающий через катушку}). \end{aligned}$$

Таким образом, первоочередная задача проектировщика — уменьшить площадь контура/катушки. При уменьшении площади контура магнитный поток также снижается.

Вопрос в том, как этого добиться? Допустим, на верхнем слое платы проходит сигнальная дорожка. Мы можем минимизировать петлю тока, разместив плоскость заземления (ground plane) непосредственно под этой дорожкой. Теперь прямой ток будет течь по дорожке к нагрузке, а обратный ток — по слою заземления, расположенному прямо под ней.

Толщина диэлектрика между слоями составляет около 3 mil (примерно 0,076 мм), благодаря чему площадь образованного контура становится чрезвычайно малой. Как следствие,

расположение слоя «земли» непосредственно под дорожкой снижает ЭМП за счет кардинального уменьшения площади контура тока.

Второй важный аспект — минимизация скорости изменения тока (di/dt). Поскольку большая сила тока приводит к более интенсивному излучению, снижение силы тока также уменьшает уровень ЭМП. Даже при работе платы на высоких частотах поддержание малой скорости нарастания сигнала способствует снижению помех.

Избегайте рассогласования импедансов. Несогласованные импедансы вызывают выбросы (overshoot) и звон (ringing) в цифровых сигналах, что приводит к увеличению излучаемых помех.

Правильно спроектированная система всегда имеет согласованные импедансы от источника до нагрузки, включая линию передачи. Такой подход не только обеспечивает максимальную мощность, но и позволяет минимизировать отражения. Это важно, поскольку отражения способны усилить гармоники в линии передачи, повышая тем самым уровень излучаемых помех.

Согласованные импедансы снижают уровень излучения от устройства, делая его более технологичным, эффективным и удобным в эксплуатации.

Семь рекомендаций по проектированию для снижения электромагнитных помех и обеспечения хорошей электромагнитной совместимости печатных плат

Как разработать плату с низким или практически нулевым уровнем электромагнитных помех? Это вполне достижимо.

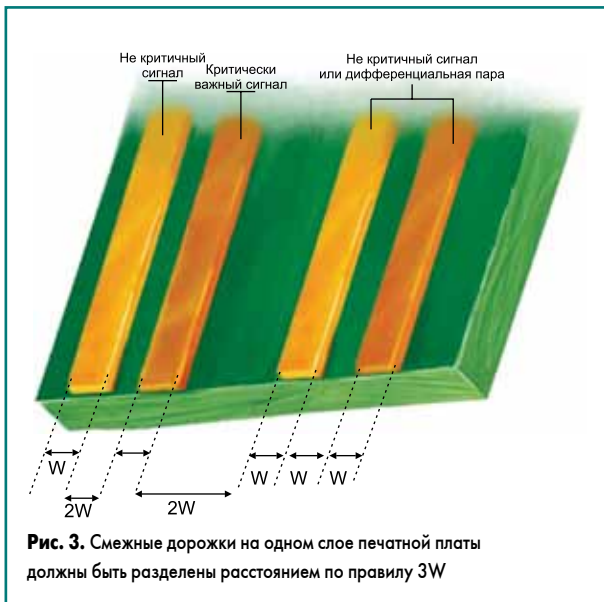


Рис. 3. Смежные дорожки на одном слое печатной платы должны быть разделены расстоянием по правилу 3W

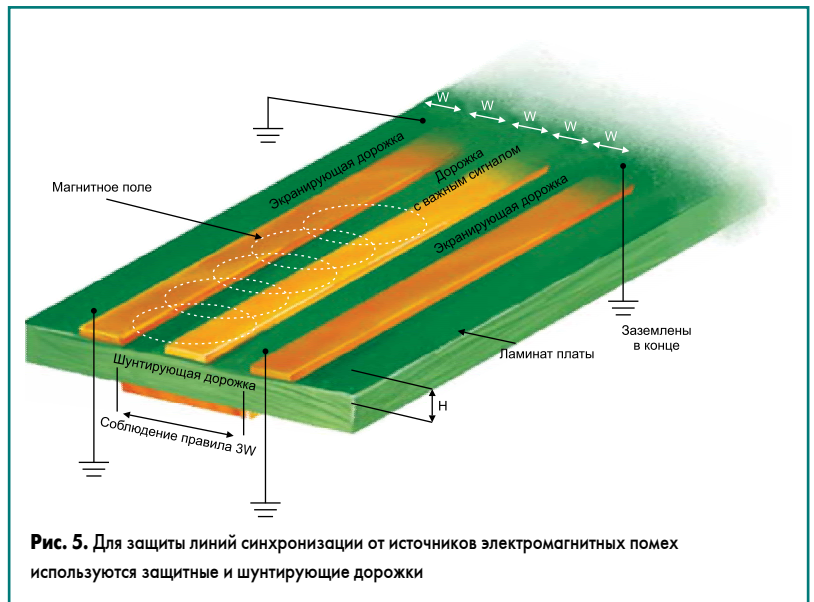


Рис. 5. Для защиты линий синхронизации от источников электромагнитных помех используются защитные и шунтирующие дорожки

Несмотря на то что не существует универсальных и жестких правил проектирования, в статье даны рекомендации, общие для всех типов ПП. Приведенные ниже правила проектирования гарантируют, что вы не создадите вместо платы антенну, излучающую электромагнитную энергию.

Расстояние между дорожками и их расположение

Дорожки — это проводящие пути, по которым ток передается от источника к приемнику на печатной плате. Когда эти дорожки образуют изгибы или пересечения, они могут превращаться в излучающую антенну.

Вот некоторые правила проектирования дорожек.

Расстояние между дорожками

Все сигнальные линии (тактовые, видео, аудио, сброса и т. д.) должны быть отделены от других дорожек. Общее правило гласит, что расстояние между осевыми линиями дорожек должно составлять 3W, где W — это ширина дорожки (рис. 3).

Такой подход помогает уменьшить перекрестные помехи (crosstalk) и связь между соседними дорожками на одном слое ПП. Дифференциальные пары являются исключением из этого правила.

Прокладывайте дорожки дифференциальных пар близко друг к другу

Такая трассировка увеличивает степень связи и снижает уровень шума в синфазном режиме. Например, предположим, что два проводника расположены близко. Любая внешняя помеха, воздействующая на эту пару, добавит одинаковое возмущение на оба проводника.

Если на проводнике 1 напряжение 1 В, а на проводнике 2—1,5 В, то разность составит 0,5 В. Поскольку внешняя помеха одинакова для обоих проводников, допустим 0,1 В, то проводник 1 будет иметь 1,1 В, а проводник 2—1,6 В. При расчете разности она останется

прежней — 0,5 В. Таким образом, шум фактически подавляется.

Именно поэтому высокоскоростные сигналы предпочтительно прокладывать в виде дифференциальных пар.

Используйте переходные отверстия (via) правильно

В многослойных платах переходные отверстия используются для трассировки сигналов. Разработчик должен знать, что каждое переходное отверстие обладает паразитной емкостью и индуктивностью. Поэтому количество переходных отверстий следует по возможности минимизировать, а критические сигнальные дорожки нужно прокладывать на одном слое.

Из-за собственных емкости и индуктивности переходных отверстий возникает несогласование импедансов между отверстием и дорожкой, что приводит к отражениям сигнала. Рекомендуется размещать заземленные переходные отверстия (ground vias) рядом с сигнальными. Это обеспечивает привязку сигналов к соединенным слоям «земли», что уменьшает изменение значения характеристического импеданса и, следовательно, отражений.

Старайтесь не размещать переходные отверстия в дифференциальных парах. Если же это невозможно, то следите, чтобы на обоих проводниках дифференциальных пар находилось одинаковое количество переходных отверстий. Также рекомендуется использовать общую ан-

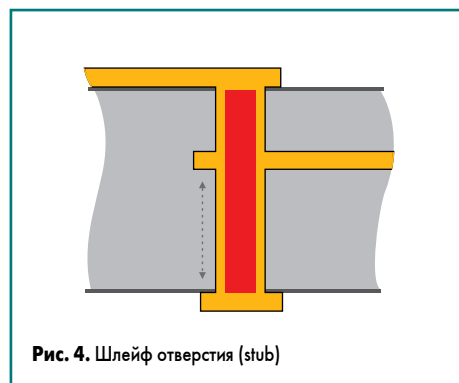


Рис. 4. Шлейф отверстия (stub)

ти-площадку (anti-pad, *вырез в полигоне*) для двух переходных отверстий, чтобы минимизировать паразитную емкость.

Избегайте шлейфов у отверстий (stubs) в чувствительных и высокочастотных цепях

Шлейфы создают отражения, а также могут играть роль антенны с дробной длиной волны (рис. 4).

Используйте экранирующие и шунтирующие дорожки для тактовых сигналов

Для подавления шума, распространяющегося по цепям питания в тактовых схемах, используются развязывающие конденсаторы.

Для защиты тактовых линий от источников ЭМП размещайте экранирующие и шунтирующие дорожки. Если этого не сделать, тактовые сигналы могут создавать проблемы в других частях схемы (рис. 5).

Заземляющие слои (Ground planes)

Заземление с низкой индуктивностью — ключевой элемент для устранения проблем ЭМС при проектировании ПП. Увеличение площади заземления на плате снижает индуктивность контура заземления в системе, что, в свою очередь, уменьшает электромагнитное излучение и перекрестные помехи.

Существует несколько подходов к подключению сигналов к «земле», но какой из них лучший? Прежде чем перейти к описанию оптимальной методики, отметим, что является совершенно недопустимым: *никогда не подключайте компоненты на плате к точкам заземления случайным образом!*

Используйте сплошной заземляющий слой и заземляющие сетки

Используйте сплошной заземляющий слой. Он обеспечивает наименьшее значение индуктивности при возврате тока от нагрузки к источнику. Хотя для «земли» желательно выделять отдельный слой ПП, это не всегда возможно в двухслойных платах. В таких случаях

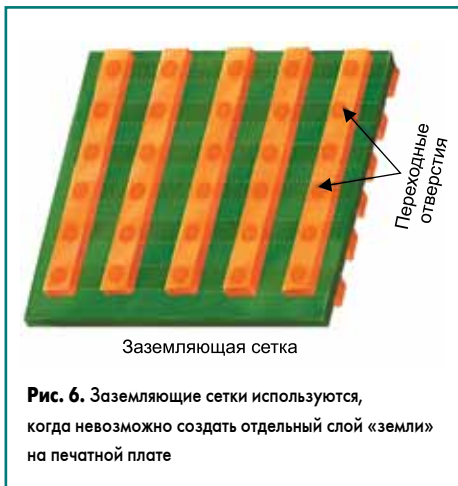


Рис. 6. Заземляющие сетки используются, когда невозможно создать отдельный слой «земли» на печатной плате

рекомендуется применять заземляющие сетки, в которых индуктивность зависит от расстояния между проводниками сетки (рис. 6).

Избегайте длинных обратных путей

Согласно закону Фарадея, важное значение имеет то, как сигнальный ток возвращается через системную «землю». Возвратный ток всегда следует по пути с наименьшим импедансом. Импеданс на любой заданной частоте описывается формулой $Z(\omega) = R + j\omega L$. На низких частотах импеданс определяется в основном активным сопротивлением (R).

На высоких частотах реактивная составляющая ($j\omega L$) становится более значимой, чем сопротивление, что заставляет возвратный ток следовать по пути с наименьшей индуктивностью контура.

Таким образом, необходимо обеспечивать самые короткие пути возврата и минимальную площадь контура тока (рис. 7).

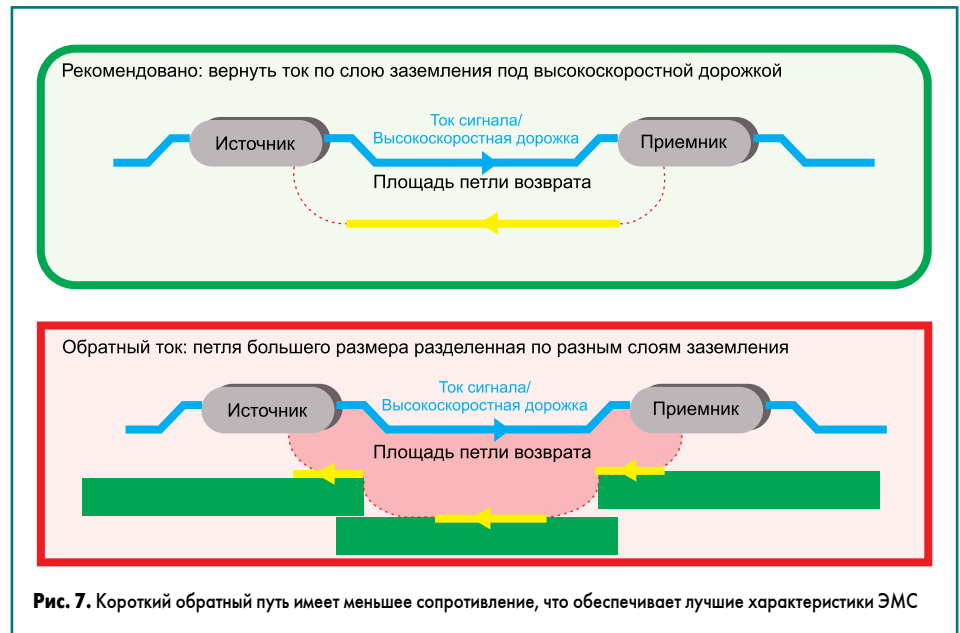


Рис. 7. Короткий обратный путь имеет меньшее сопротивление, что обеспечивает лучшие характеристики ЭМС

Рекомендуется подключать заземление компонента непосредственно к заземляющей плоскости. Это позволит уменьшить паразитные контуры заземления (рис. 8).

Использование клетки Фарадея или экранирующего кольца для изоляции от помех

Клетка Фарадея создается добавлением заземления на край печатной платы. Цель — не допустить выхода сигнала за пределы этой границы. Такой подход позволяет ограничивать излучение и сдерживать помехи в заданных пределах (рис. 9).

Размещайте высокоскоростные и низкоскоростные цепи ближе к заземляющим полигонам

Всегда заземляйте незанятые медные области (copper fill)

«Плавающие» (floating) медные участки всегда должны быть заземлены. В противном случае они могут работать как антенны, вызывая проблемы с ЭМС.

Учитывайте наличие нескольких источников питания

Если схема требует более одного источника питания, следует разделять их заземляющими полигонами. Однако в однослойных печатных платах реализовать несколько слоев «земли» невозможно. Эту проблему можно решить, проложив силовые и «земляные» проводники для каждого источника отдельно от других. Это также позволит избежать объединения помех одного источника питания другому.

Будьте внимательны при работе с разрывами (split apertures) в полигонах

Длинные отверстия и широкие переходные отверстия в силовых и заземляющих полигонах создают разрывы (split apertures), которые формируют неоднородные области. Эта неоднородность увеличивает импеданс силовых и заземляющих слоев.

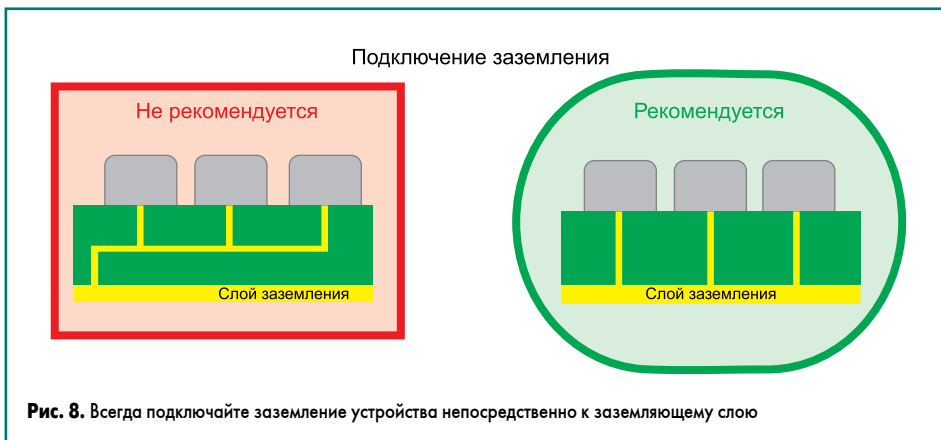


Рис. 8. Всегда подключайте заземление устройства непосредственно к заземляющему слою

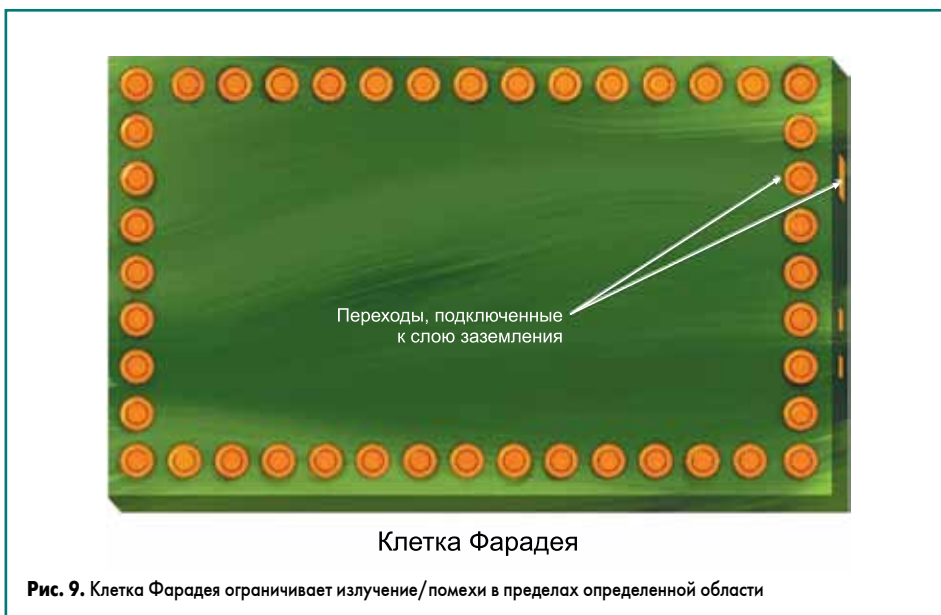


Рис. 9. Клетка Фарадея ограничивает излучение/помехи в пределах определенной области

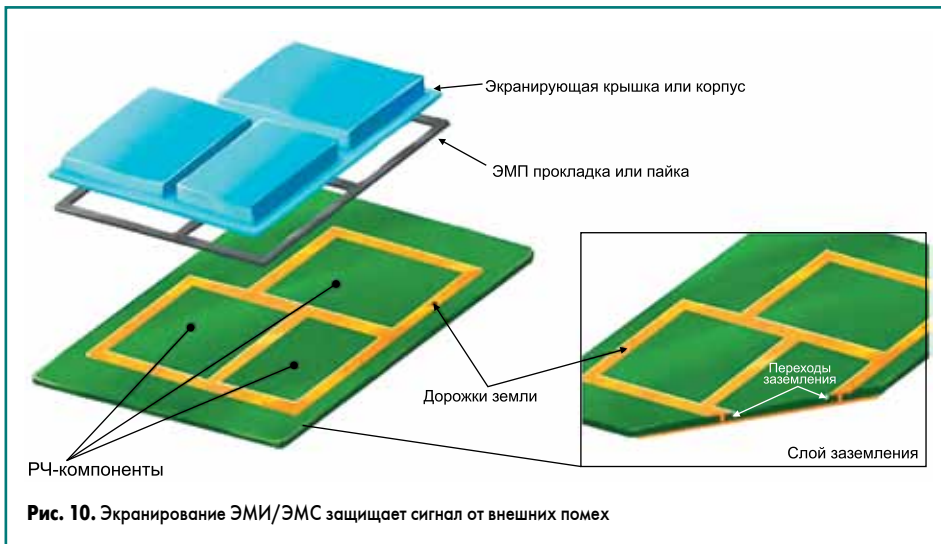


Рис. 10. Экранирование ЭМИ/ЭМС защищает сигнал от внешних помех

Экранирование

Экранирование — это механический метод, использующий проводящие или магнитные материалы (а также их комбинацию) для подавления ЭМП в системе. Механический экран представляет собой замкнутый проводящий корпус, соединенный с «землей», который способен существенно уменьшить эффективный

размер антенных контуров, поглощая и отражая часть их излучения.

Экран может покрывать всю систему или ее часть, в зависимости от требований. Экранирование для обеспечения ЭМС защищает передачу сигналов от внешних помех и предотвращает потерю информации (рис. 10).

Слой	Тип	Толщина	Толщина (вес) меди
Верх (L1)	soldermask	0,5	
	signal	1,9	1,5
Слой 2	Prepreg	2,7	
	GROUND Ядро	1,2	1,0
Слой 3	signal	1,2	1,0
	Prepreg	5	
Слой 4	GROUND Ядро	1,2	1,0
	Prepreg	4	
Слой 5	signal	1,2	1,0
	Prepreg	12	
Слой 6	GROUND/POWER Ядро	2,4	2,0
	Prepreg	3	
Слой 7	GROUND/POWER Ядро	2,4	2,0
	Prepreg	12	
Слой 8	signal	1,2	1,0
	Prepreg	4	
Слой 9	GROUND Ядро	1,2	1,0
	Prepreg	5	
Слой 10	signal	1,2	1,0
	Prepreg	4	
Слой 11	GROUND Ядро	1,2	1,0
	Prepreg	2,7	
Низ (L12)	signal	1,9	1,0
	soldermask	0,5	

Стек собран на основе ядер. Ядро — это тонкий слой диэлектрика, покрытый медью с обеих сторон. Сверху и снизу на ядро нанесен prepreg, который также является диэлектрическим материалом. Поверх preprega размещена медная фольга

Рис. 11. Характеристики ЭМС печатной платы также зависят от расположения ее слоев

Отдельно следует упомянуть об экранировании кабелей. Кабели, передающие аналоговые и цифровые сигналы, становятся источником серьезных проблем с ЭМП из-за своей паразитной емкости и индуктивности. Помехи можно подавить с помощью экранирования таких кабелей и заземления экрана с обоих концов.

Компоновка слоев печатной платы

Эффективность ЭМС печатной платы также зависит от расположения ее слоев. В случае печатной платы с двумя или более слоями один целый слой следует использовать в качестве заземления. Для четырехслойной платы силовой слой следует размещать под слоем заземления.

Предпочтительная структура слоев для четырехслойной платы выглядит так:

- первый сигнальный;
- «земля»;
- питание;
- второй сигнальный.

Согласованные по импедансу дорожки должны по возможности располагаться на первом сигнальном слое.

Ниже даны некоторые рекомендации по компоновке слоев платы с точки зрения эффективности ЭМС:

1. Если используется двухслойная плата и невозможно выделить целый слой под «землю», следует использовать заземляющие сетки.
2. Если отдельный силовой слой не используется, то «земляные» проводники должны быть проложены параллельно силовым, чтобы обеспечить «чистое» питание.
3. При количестве слоев более четырех рекомендуется использовать следующее чередование: сигнальный слой → «земля»/питание → сигнальный слой → «земля»/питание → сигнальный слой → «земля»/питание → сигнальный слой. То есть использовать чередующиеся сигнальные слои и слои «земли»/питания. При этом количество слоев должно быть четным (рис. 11).

Использование выделенных «земляных» полигонов, заземляющих переходных отверстий и гальванической развязки относится к числу лучших методик заземления в ПП для предотвращения проблем с ЭМП.

Разделение чувствительных компонентов

Для создания конструкции, отвечающей требованиям ЭМС, компоненты печатной платы необходимо группировать в соответствии с типами обрабатываемых сигналов: аналоговые, цифровые, цепи питания, низкоскоростные, высокоскоростные сигналы и т. д. (рис. 12). Сигнальные проводники каждой группы компонентов должны оставаться в своей выделенной зоне.

Целесообразно использовать фильтр всякий раз, когда сигнал должен передаваться из одной подсистемы в другую.

Выводные компоненты, обладающие более высокой индуктивностью, могут генерировать резонансную частоту свыше 100 МГц.

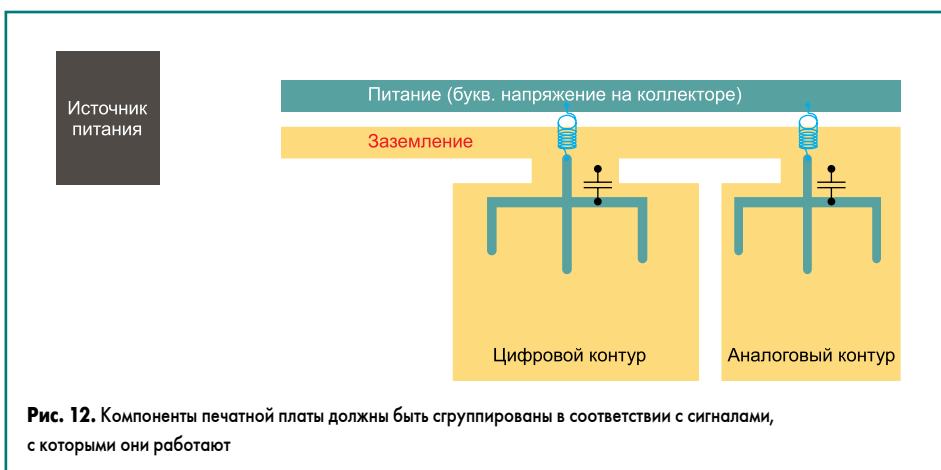


Рис. 12. Компоненты печатной платы должны быть сгруппированы в соответствии с сигналами, с которыми они работают

Не рекомендуется применять большое количество компонентов для сквозного монтажа (в отверстия), так как они создают чрезмерный шум. Напротив, малые физические размеры SMD-компонентов способствуют более эффективному подавлению шумов.

Таким образом использование компонентов для поверхностного монтажа (SMD) вместо выводных компонентов поможет минимизировать риски возникновения проблем ЭМП/ЭМС. SMD-компоненты отличаются меньшей индуктивностью по сравнению с выводными, что снижает энергию излучения радиочастот. Кроме того, SMD позволяют достичь более высокой плотности компоновки благодаря возможности близкого размещения компонентов.

Развязывающий конденсатор

Когда интегральные схемы работают, они коммутируют ток на высокой частоте, что приводит к появлению шума переключений в силовых шинах и дорожках, подсоединенных к ИМС. Этот шум, если его не подавить, приводит к появлению электромагнитного излучения и, как следствие, к ЭМП.

Способом снижения шума в силовой цепи является размещение развязывающих конденсаторов как можно ближе к выводам питания ИМС и подключение их непосредственно к заземляющим полигонам (рис. 13). Использование силовых слоев вместо силовых дорожек также помогает снизить шум в цепях питания.

Контроль импеданса при проектировании линий передачи

Когда схема работает на высокой скорости, очень важным становится согласование импеданса между источником и приемником. Если импеданс не согласован и не контролируется надлежащим образом, это может вызвать отражения сигнала и высокочастотный звон.

Избыточная RF-энергия, генерируемая из-за звона и отражений, будет излучаться и/или наводиться на другие части схемы, создавая проблемы ЭМП. Для подавления этих нежелательных эффектов применяются схемы согласования линий (Signal termination, терминаторы).

Терминаторы подавляют отражения и звон за счет контроля импеданса, а также могут замедлить крутые фронты нарастания и спада сигналов (рис. 14). Импеданс дорожек также зависит от материалов печатной платы.

Тестирование ЭМП/ЭМС в проекте печатной платы

Электромагнитные излучения электронной системы измеряются с помощью различных методов моделирования. Компьютерное моделирование часто рассматривается как основной подход к анализу ЭМС.

Моделирование выполняется методами интегрирования для получения точных измерений ключевых параметров. Для тестирования электромагнитных излучений в электронной системе рекомендуется:

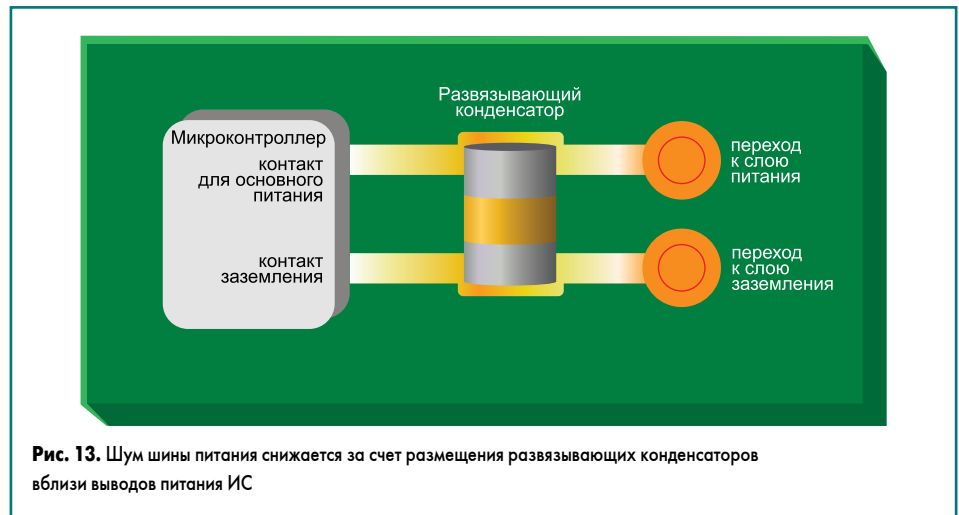


Рис. 13. Шум шины питания снижается за счет размещения развязывающих конденсаторов вблизи выводов питания ИС

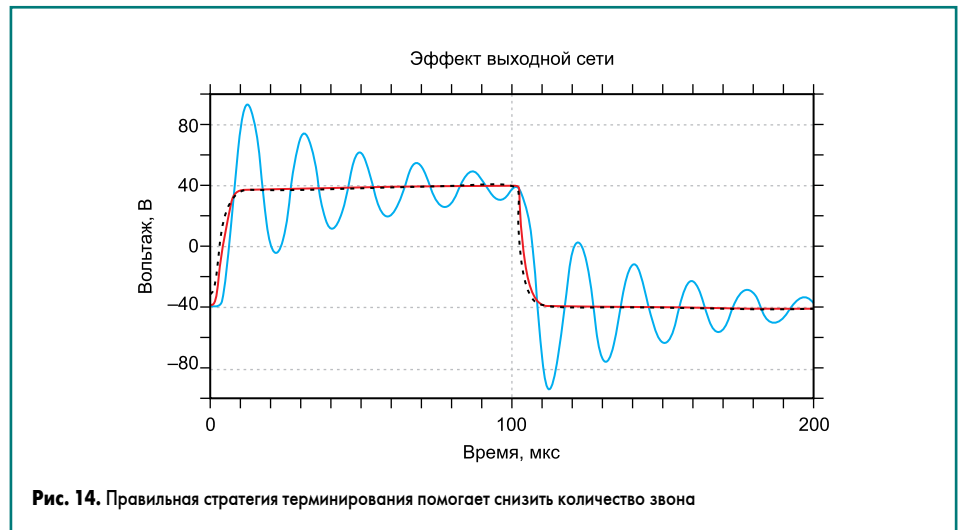


Рис. 14. Правильная стратегия терминирования помогает снизить количество звона

1. Применять моделирование по методу конечных разностей во временной области (FDTD) для измерения частотной характеристики синфазного тока в условиях высокого напряжения.
2. Оценивать синфазный ток с учетом таких факторов, как импеданс антенны токового типа и постоянная распределенной цепи.
3. Учитывать влияние электрической связи между силовым и заземляющим слоями на величину синфазного тока.

Соответствие стандартам ЭМС/ЭМП (CISPR, раздел 15 FCC)

Цель стандартов ЭМС/ЭМП — обеспечить взаимную совместимость электрических и электронных систем, расположенных рядом, для их бесперебойной работы. Стандарты CISPR применимы ко всем продуктам, системам и установкам.

Они были введены в соответствии с правилами Раздела 15 Федеральной комиссии по связи (FCC) США и предписаниями Международного специального комитета по радиопомехам (CISPR).

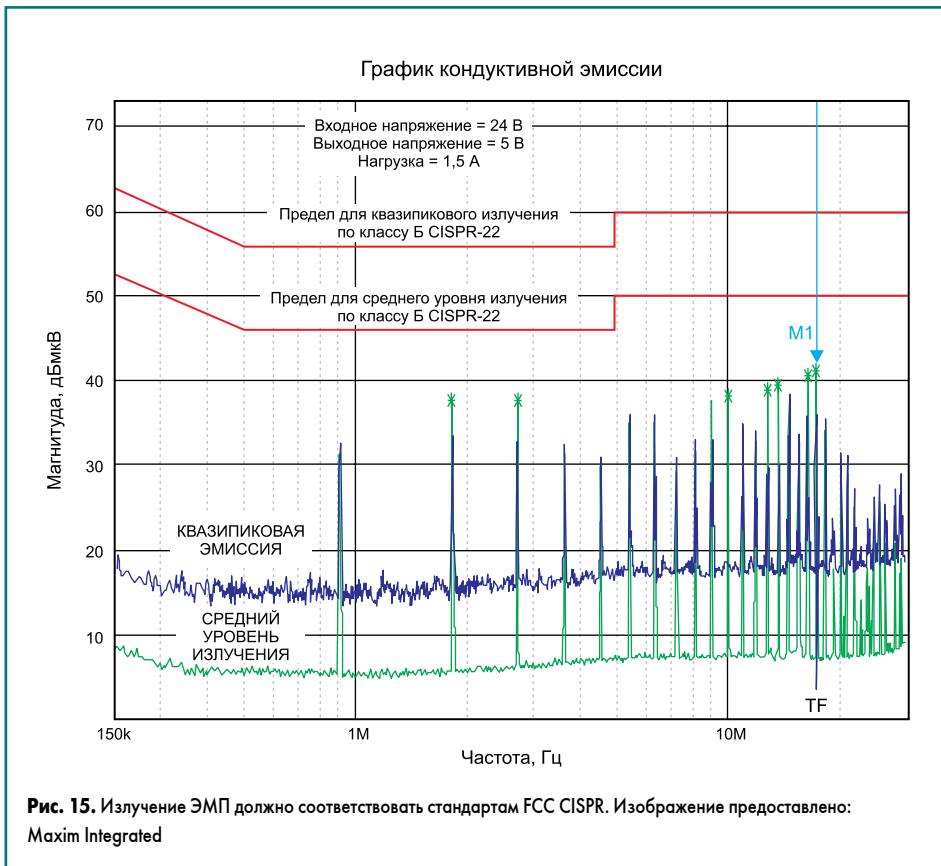
Эти стандарты определяют допустимые пределы для кондуктивных и излучаемых помех, а также их классификацию по типам окружающей среды: бытовая, коммерческая, легкая промышленная и промышленная.

Для соответствия требованиям ЭМС устройство должно быть протестировано на кондуктивные и излучаемые эмиссии, а также на устойчивость к кондуктивным и излучаемым помехам. Пример одного из таких тестов представлен на графике рис. 15, где указаны предельные значения, при этом уровни излучения устройства должны находиться в установленных пределах.

Заключение

Электронная схема состоит из множества компонентов, расположенных в определенном порядке. Если компоновка выполнена некорректно, это может вызвать различные проблемы ЭМП/ЭМС. Конструкция печатной платы существенно влияет на характеристики любого компонента, который на ней размещается, на ЭМС и уровень создаваемых помех.

При проектировании ПП необходимо учитывать влияние каждого компонента на ЭМП/ЭМС. Хорошие показатели ЭМС достигаются только за счет правильных методов проектирования, при этом разработчик должен либо устранить источник помех, либо защитить схему от его негативного воздействия. В конечном счете цель заключается в сохранении расчетной функциональности платы при обеспечении максимальной ЭМС. Электромагнитная совместимость любой



электронной схемы связана с генерацией, распространением и приемом электромагнитного шума.

Отдельно следует обратить внимание на то, что обеспечение ЭМС за счет точного про-

ектирования печатных плат не увеличивает стоимость конечного продукта, а потому рекомендуется обязательно уделять этому моменту внимание на начальной стадии производства.



**Комментирует
Сергей ШИХОВ,
директор
по управлению
проектами,
«А-КОНТРАКТ»:**

Электромагнитная совместимость и меры, необходимые для ее обеспечения, — один из важных факторов, которые следует учитывать при разработке проекта печатной платы на самой ранней стадии. Для понимания и осознанного применения приемов проектирования, необходимых для ЭМС, по большому счету достаточно базового курса физики. Главное, чтобы сигнал от источника дошел до нагрузки в максимальной целостности, без существенного рассеяния и отражения. Если вся мощность доходит до цели, помеху создавать нечему. Остается только защититься от внешних помех.

Приведенные в статье примеры с телевизорами, радиоприемниками, мобильными телефонами и оборудованием самолетов, безусловно, вызывают легкую усмешку, но, тем не менее, учет паразитных электромагнитных излучений (как генерируемых устройством, так и внешних) жизненно необходим.

Хотелось бы прояснить момент с «сетчатыми» полигонами «земли» на внешних слоях. С точки зрения ЭМС это не имеет никакого смысла: сетки применялись для улучшения адгезии паяльной маски. При текущем уровне технологий данное ухищрение бессмысленно. Но — не забываем про баланс меди.