

Вводная часть от автора перевода

Директива Совета Европейского Сообщества по ЭМС: в мае 1989 года Совет Европейского Сообщества опубликовал Директиву 89/336/ЕЕС, относящуюся к электромагнитной совместимости изделий, продаваемых среди государств-членов Сообщества. Последующая поправка 92/31/ЕЕС обязала соответствовать Директиве изделиям, начиная с 1 января 1996 года. Директива относится к устройствам, которые либо подвержены электромагнитному воздействию, либо сами оказывают такое воздействие, т.е. к изделиям, относящимся к электротехническим или электронным продуктам.

Директива требует, чтобы изделия

- Имели высокую собственную защищенность от излучения других источников,
- Поддерживали интенсивность своего излучения в строго определенных пределах.

Определения:

Электромагнитная совместимость, ЭМС (Electromagnetic compatibility, EMC): способность в процессе функционирования не вносить чрезмерно большой вклад в окружающую обстановку электромагнитным излучением. Когда это условие выполняется, все электронные составляющие совместно работают корректно.

Электромагнитные помехи, ЭМП (Electromagnetic interference, EMI): электромагнитная энергия, излучаемая одним устройством, которая может приводить к нарушению качественных характеристик другого устройства.

Электромагнитная помехоустойчивость, ЭМПУ (Electromagnetic immunity, или susceptibility, EMS): толерантность (устойчивость) к воздействию электромагнитной энергии.

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ С УЧЕТОМ ЭМС:
4 ГЛАВНЫХ ПРАВИЛА**

Проблема правил: чем больше Вы их имеете, тем сложнее выполнить их все.

Расстановки приоритетов их выполнения различны.

Предположим, при создании многослойной печатной платы Вам нужно развести трассу высокочастотного сигнала от аналогового компонента к цифровому. Естественно, что при этом Вы хотите минимизировать вероятность возникновения проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС). Занявшись поиском в интернете, Вы находите три рекомендации, которые, кажется, имеют отношение к Вашей ситуации:

- 1) **Минимизировать длины шин высокочастотных сигналов;**
- 2) **Разделить шины питания и земли между аналоговой и цифровой частями схемы;**
- 3) **Не разрывать полигоны земли высокочастотными проводниками.**

Ваше видение трех возможных вариантов разводки показано на рис.1.

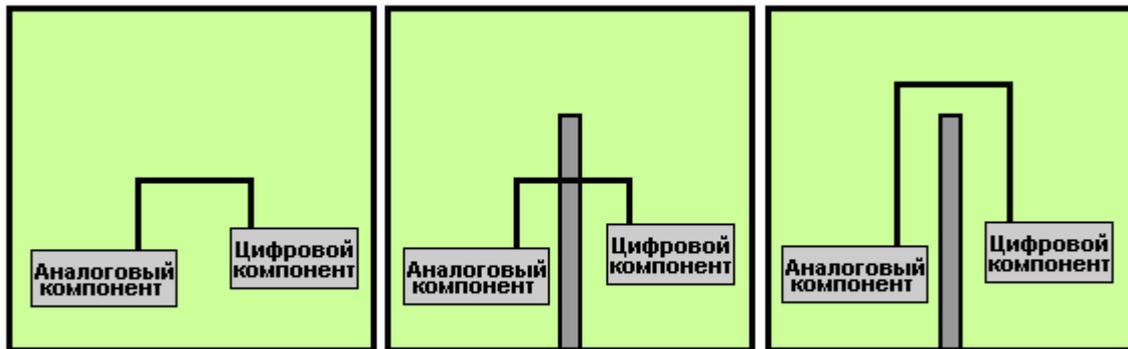


Рис. 1. Три возможных варианта разводки. Только первый вариант не противоречит нашим правилам по ЭМС. Если требуется вырез в полигоне, то третий вариант - лучший

В первом случае трассы разводятся непосредственно между двумя компонентами, и полигон земли остается сплошным. Во втором случае формируется разрыв в полигоне, и трассы проходят поперек этого разрыва. В третьем случае трассы прокладываются вдоль разрыва в полигоне.

В каждом из этих трех случаев происходит нарушение одного из вышеперечисленных правил. Являются ли эти альтернативные случаи одинаково хорошими, поскольку они удовлетворяют двум из

трех правил? Все ли они плохи, поскольку каждый из них нарушает хотя бы одно правило?

Эти вопросы стоят перед разводчиками печатных плат каждый день. Правильность или неправильность выбора стратегии разводки может привести к результатам, при которых плата либо будет удовлетворять всем требованиям по ЭМС, либо будет иметь проблемы с восприимчивостью к внешним сигналам. В этом случае выбор должен быть четким, но мы вернемся к этому позже.

Проблема соблюдения правил состоит в том, что, чем больше их, тем менее вероятно, что Вы квалифицировано исполните все из них. По этой причине важно правильно расположить по приоритетам рекомендации по разводке печатной платы. В университете Миссури-Ролла для старших студентов и аспирантов мы преподаем курс электромагнитной совместимости. Каждый год студентам предлагается решить различные дизайнерские задачи, в которых требуется разместить компоненты и вручную развести простые печатные платы. При этом студенты знакомы с понятиями паразитных индуктивностей и емкостей и теорией антенн. Их обеспечивают списком из 40 рекомендаций по ЭМС, каждая из которых подробно обсуждается в группе. Однако, качество расстановки компонентов и разводки первых плат неизменно располагается в уровнях от "приемлемого" до

"ужасного". В многих случаях, первые решения хуже тех, которые разрабатывались бы без учета рекомендаций.

Проблемы уменьшаются после расположения рекомендаций по приоритетам. Рекомендации к конструктивному исполнению полезны в том случае, если они хороши поняты и если они составляют часть полной стратегии. После того, как дизайнеры научатся располагать рекомендации по приоритетам и понимать, как эти рекомендации должны использоваться, они могут квалифицировано проектировать хорошие печатные платы.

Далее приведены четыре главных правила по ЭМС, основанные на общих особенностях изделий электроники. Во многих случаях, дизайнеры печатных плат преднамеренно нарушают одно из этих правил в попытках выполнить более важные.

Правило 1. Минимизируйте путь сигнала тока

Это простое правило присутствует в почти каждом списке рекомендаций ЭМС, но часто оно либо игнорируется, либо значение его приуменьшается в пользу других рекомендаций.

Часто дизайнер печатных плат даже не задумывается о том, где протекают сигнальные токи и предпочитает думать о сигналах в величинах напряжения, а должен бы думать в величинах тока.

Есть две аксиомы, которые должен знать каждый дизайнер печатных плат:

- **сигнальные токи всегда возвращаются к своему источнику, т.е. путь тока представляет собой петлю**
- **сигнальные токи всегда используют путь с минимальным импедансом**

На частотах несколько мегагерц и выше путь сигнала относительно просто определить потому, что путь с минимальным импедансом есть, в общем случае, путь с минимальной индуктивностью. На рис. 2 показаны два компонента на печатной плате. Сигнал частотой 50 МГц распространяется по проводнику над полигоном от компонента А к компоненту Б.

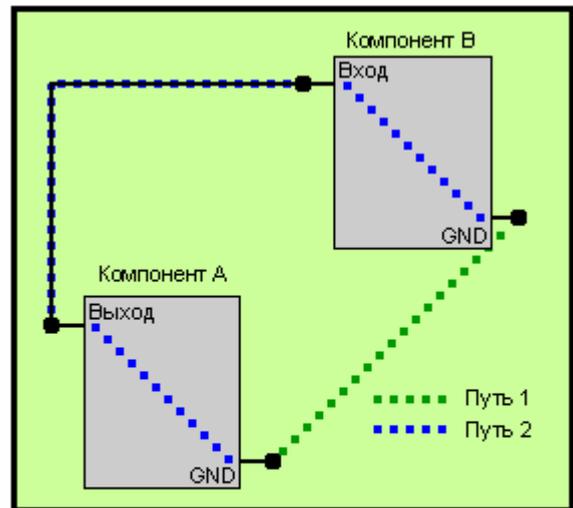


Рис. 2. **Высокочастотные токи выбирают путь с наименьшей индуктивностью, либо путь с минимальной областью петли. Таким образом, большая часть возвратного тока будет протекать по пути 2 непосредственно под сигнальным проводником**

Мы знаем, что такой же по величине сигнал должен распространяться обратно от компонента Б к компоненту А. Предположим, что этот ток (назовем его возвратным) протекает от вывода компонента Б, обозначенного GND, к выводу компонента А, обозначенного также GND.

Поскольку обеспечена целостность (неразрывность) полигона, и выводы, обозначенные как GND, обоих компонентов расположены близко друг от друга то, это склоняет к заключению, что ток выберет самый короткий путь между ними (путь 1). Однако, это не правильно. Высокочастотные токи выбирают путь наименьшей индуктивности (или путь с минимальной областью петли, путь наименьшего витка). Большая часть сигнального возвратного тока течет по полигону по узкому пути прямо под трассой сигнала (путь 2).

Если полигон был сделан по какой-либо причине с вырезом, как показано на рисунке 3, то

вырез 1 будет иметь небольшое влияние на целостность сигнала и на излучение. Другой же вырез 2, может приводить к значительным проблемам; он вступает в противоречие с рекомендацией 2. Область петли увеличивается значительно; обратные токи настолько интенсивны, что текут вдоль границы разрыва.

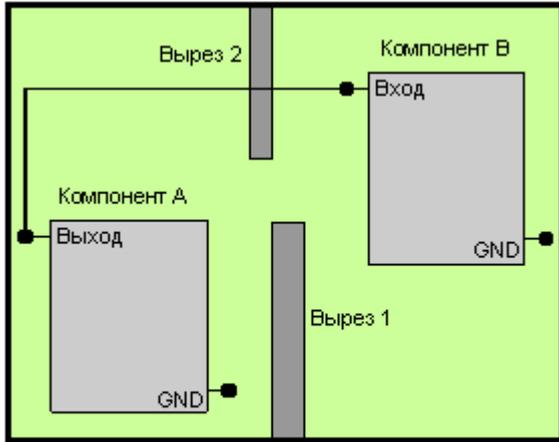


Рис. 3. Область петли возвратного тока, протекающего вокруг выреза 2, значительно увеличивается, когда этот ток сильно возрастает

На низких частотах (в общем случае, кГц и ниже), путь наименьшего импеданса стремится быть путем с наименьшей частотой сигнала. Для печатной платы со сплошными полигонами возвратных токов, сопротивление полигонов стремится рассеять ток так, чтобы протекающий между двумя отдаленными точками ток мог распространяться по большей площади платы, как показано на рисунке 4.

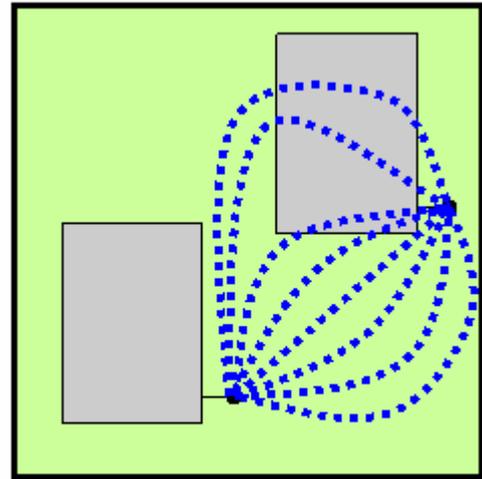


Рис. 4. Сопротивление полигонов стремится рассеять возвратный ток на низких частотах (кГц и ниже)

На плате со смешанными сигналами, с низкочастотными аналоговыми и цифровыми компонентами, это может создавать проблему. Рисунок 5 иллюстрирует, как хорошо расположенный разрыв в земляном полигоне может исправить ситуацию, зафиксировав низкочастотные возвратные токи, текущие по полигону, в специально отведенной для этого области.

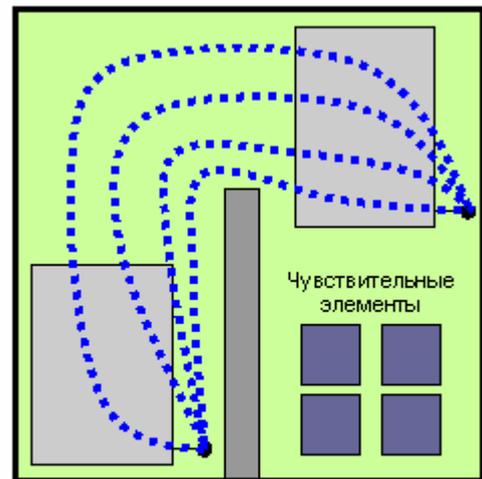


Рис. 5. Хорошо расположенный вырез в полигоне защищает чувствительные элементы схемы от низкочастотных возвратных токов

Правило 2. Не расчленяйте полигон возвратного сигнала

Это правильно. Мы только продемонстрировали Вам превосходный пример в ситуации, где формирование разрыва в полигоне возвратного сигнального тока было правильным решением. Однако, как типичные ЭМС-инженеры, мы советуем Вам никогда не делать этого. Почему? Потому что много разработок хорошо понимающих людей, с которыми мы столкнулись, были результатом непреднамеренно нарушенного Правила 1 и создания разрывов в полигонах возвратных сигналов. Более того, часто разрыв был неэффективным и ненужным.

По одному из мнений, аналоговый возвратный сигнальный ток должен всегда изолироваться от цифрового возвратного сигнального тока. Эта идея возникла, когда аналоговые и цифровые схемы работали на килогерцовых частотах. Например, в платах, которые использовались для цифровой звукозаписи, часто возникали шумовые проблемы из-за влияния низкочастотных цифровых сигнальных токов, распространяющихся под областью платы, где были расположены чувствительные аналоговые усилители. Некоторое время назад, аудиодизайнеры пытались избежать этой проблемы разделением

полигонов возвратных токов для управления путями возврата и удалением цепей аналоговых токов от цифровых.

Нашим студентам предлагается решить конструкторскую задачу, требующую защитить чувствительные аналоговые компоненты (обычно усилители звуковой частоты или генераторы с фазовой синхронизацией) от цифровой части схемы посредством разделения полигона возвратного сигнального тока таким способом, при котором токи НЧ были бы изолированы, а токи ВЧ не формировали бы помех. Обычно бывает не очевидно, как это может быть выполнено, и достаточно часто разрывы в полигонах создают проблемы большие, чем решают.

Подобная ситуация возникает при разводке шин автомобильного или авиационного радиоэлектронного оборудования. В таком оборудовании возвратные токи цифровой схемы часто изолируются от общего корпуса для того, чтобы защитить цифровые схемы от повреждения большими токами НЧ, которые могут течь по металлической конструкции транспортного средства. Фильтрация электромагнитных помех и защита от переходных процессов обычно требуют соединений на корпус, в то время как сигнал должен передаваться относительно цифровой шины возвратного сигнала.

Когда цепь корпуса и полигоны цифровых возвратных токов совместно используют одну и ту же шину, они выглядят как единый полигон с разрывом. Это иногда создает замешательство относительно того, к какой земле должен быть подсоединен какой-нибудь отдельный компонент. В этой ситуации обычно хорошей идеей является

Правило 3. Не располагайте высокоскоростные схемы между разъемами

Это - одна из наиболее общих проблем среди конструкций плат, которые мы пересмотрели и оценили в нашей лаборатории. В простых платах, которые не должны были иметь никаких сбоев при всех требованиях ЭМС безо всяких дополнительных затрат и усилий, хорошая экранировка и фильтрование сводились на нет, потому что было нарушено это простое правило.

Почему размещение разъемов так важно? При частоте ниже нескольких сотен мегагерц, длина волны - порядка метра или более. Проводники на плате - возможные антенны - имеют относительно малую электрическую длину и поэтому работают неэффективно. Однако, кабели или другие устройства, соединенные с платой, могут быть достаточно эффективными антеннами.

Сигнальные токи, текущие по проводникам и возвращающиеся через сплошные полигоны создают малые падения напряжений между любыми двумя точками полигона. Эти напряжения пропорциональны протекающему по полигону току.

проводка шины корпуса и цифрового возвратного сигнала отдельными шинами. Полигон цифрового возвратного сигнала должен быть цельным и занимать область под всеми цифровыми компонентами, трассами и разъемами. Соединение с корпусом должно быть ограничено областью платы около разъемов.

Несомненно, существуют такие ситуации, когда хорошо расположенный разрыв в полигоне возвратного тока требуется. Однако, самый надежный метод - **один сплошной полигон для всех возвратных сигнальных токов**. В случаях, когда отдельный низкочастотный сигнал восприимчив к наводкам (способен смешиваться с другими сигналами платы), используется трассировка на отдельном слое для возврата этого тока к источнику. Вообще, **никогда не используйте разбиение или вырезку в полигоне возвратного сигнального тока**. Если же Вы все-таки убеждены, что вырез в полигоне необходим для решения проблемы низкочастотной развязки, посоветуйтесь с экспертом. Не полагайтесь на рекомендации к конструктивному исполнению или на приложения и не пробуйте реализовать схему, которая работала у кого-то в другой подобной конструкции.

Теперь, когда мы знакомы с двумя главными правилами ЭМС, мы готовы повторно обратиться к проблеме на рис. 1. Который из альтернативных вариантов лучший? Первый - единственный, который не противоречит правилам. Если по каким-то причинам (вне дизайнерского желания), разрыв в земляном полигоне потребовался, то третий вариант разводки более приемлем. Трассировка вдоль разрыва минимизирует область сигнальной токовой петли.

Когда все разъемы размещены с одного края платы, падение напряжения незначительно.

Однако, высокоскоростные элементы схем, размещенные между разъемами, могут легко создавать разность потенциалов между разъемами до нескольких милливольт и более. Эти напряжения могут наводить токи возбуждения на подключенные кабели, увеличивая их излучение.

Плата, у которой выполняются все технические требования, когда разъемы расположены у одного края, может стать кошмаром для инженера по ЭМС, если хотя бы один разъем с подключенным кабелем расположен у противоположной стороны платы. Изделия, которые обнаруживают этот тип проблемы (кабели передающие напряжения, индуцированные через целостный полигон), особенно трудно привести в нормальное состояние. Часто при этом требуется достаточно хорошая экранировка. Во многих случаях, эта экранировка была бы совсем не нужна, если бы разъемы располагались у одной стороны или в углу платы.

Правило 4. Переходное время управляющего сигнала

Плата, работающая на тактовой частоте 100 МГц, никогда не должна соответствовать требованиям при работе на частоте 2 ГГц. Хорошо сформированный цифровой сигнал будет иметь большую мощность на низших гармониках и не так много мощности на высших. Управляя переходным временем сигнала, можно управлять мощностью сигнала на высших гармониках, что предпочтительно для ЭМС. Чрезмерно большое переходное время может приводить к нарушению целостности сигнала и к тепловым проблемам. В процессе разработки и дизайна должен быть достигнут компромисс между этими конкурирующими необходимыми условиями. Переходное время, равняющееся приблизительно 20% от периода сигнала, приводит к приемлемой форме сигнала, уменьшая проблемы, возникающие из-за перекрестных помех и излучения. В зависимости от применения, переходное время может быть более или менее, чем 20% от периода сигнала; однако, это время не должно быть неконтролируемым.

Имеется три основных способа изменения фронтов цифровых сигналов:

- **использование цифровых микросхем серии, быстродействие которой совпадает с требуемым быстродействием,**
- **размещение резистора или индуктивности на феррите последовательно с выходным сигналом, и**
- **размещение конденсатора параллельно с выходным сигналом.**

Первый способ часто является самым простым и наиболее действенным. Использование резистора или феррита предоставляет дизайнеру большую возможность управления переходным процессом и меньше воздействует на изменения, которые происходят в логических семействах спустя некоторое время. Преимущество использования конденсатора для управления это то, что он может быть легко удален, если в нем нет необходимости. Однако, необходимо помнить, что конденсаторы увеличивают ток источника ВЧ сигнала.

Обратите внимание на то, что пробовать фильтровать однопроводный сигнал в пути возвратного тока - это всегда плохая идея. Например, никогда не разводите низкочастотную

трассу через разрыв в полигоне возвратного сигнала, пытаюсь отфильтровать высокочастотный шум. После рассмотрения первых двух правил, это должно быть очевидно. Однако, платы, использующие эту неверную стратегию, иногда выявляются в нашей лаборатории.

Вообще говоря, в процессе дизайна конструкции и разводки платы необходимо расставить приоритеты для выполнения правил ЭМС. Эти правила не должны быть предметом компромисса в попытках следования другим рекомендациям ЭМС. Однако, имеется несколько дополнительных, заслуживающих внимания рекомендаций. Например, важно обеспечить адекватное разделение шины питания, делать проводники ввода-вывода короткими и предусматривать фильтрацию выходных сигналов.

Хорошей идеей также является тщательный выбор активных устройств. Не все совместимые по выводам полупроводниковые компоненты эквивалентны с точки зрения шума. Два устройства с одинаковыми техническими параметрами, но сделанные различными фирмами-изготовителями, могут значительно отличаться по шуму, который они создают на входных и выходных выводах, а также на выводах питания. Это особенно справедливо для микросхем с высокой степенью интеграции, таких как микропроцессоры и большие специализированные интегральные схемы (ASIC). Хорошей идеей является оценка компонентов от различных продавцов всякий раз, когда это возможно.

И, наконец, пересмотрите еще раз ваш дизайн. Даже если вы - опытный разводчик печатных плат и эксперт по ЭМС, хорошо иметь кого-то, кто хорошо осведомлен относительно анализа ЭМС и знаком с конструированием печатных плат. Пусть он критически рассмотрит Ваш дизайн.

Чьим же советам Вы можете верить? Доверяйте любому, чьи рекомендации четко помогают Вам выполнить четыре главных правила. Немного дополнительного внимания во время дизайна поможет сохранить много времени, денег и усилий, которые были бы потрачены впустую в попытках заставить правильно работать неуступчивое изделие.

Комментарии автора перевода

Журнал Printed Circuit Design & Manufacture является относительно новым периодическим изданием, в котором рассматриваются

теоретические и практические вопросы по разработке электронных схем.

Статья очень хорошая от начала до конца и нужная.