

# Техника разводки печатных плат

**Из-за существенных отличий аналоговой схемотехники от цифровой, аналоговая часть схемы должна быть отделена от остальной части, а при её разводке должны соблюдаться особые методы и правила. Эффекты, возникающие из-за неидеальности характеристик печатных плат, становятся особенно заметными в высокочастотных аналоговых схемах, но погрешности общего вида, описанные в этой статье, могут оказывать воздействие на качественные характеристики устройств, работающих даже в звуковом диапазоне частот.**

**Целью этой статьи является обсуждение распространённых ошибок, совершаемых разработчиками печатных плат, описание воздействия этих ошибок на качественные показатели и рекомендации по разрешению возникших проблем.**

## ПЕЧАТНАЯ ПЛАТА — КОМПОНЕНТ СХЕМЫ

Лишь в редких случаях печатная плата аналоговой схемы может быть разведена так, чтобы вносимые ею воздействия не оказывали никакого влияния на работу схемы. В то же время, любое такое воздействие может быть минимизировано, так чтобы характеристики аналоговой схемы устройства были такими же, как и характеристики модели и прототипа.

### Макетирование

Разработчики цифровых схем могут скорректировать небольшие ошибки на изготовленной плате, дополнив её перемычками или, наоборот, удаляя лишние проводники, внося изменения в работу программируемых микросхем и т.п., переходя очень скоро к следующей разработке. Для аналоговой схемы дело обстоит не так. Некоторые из распространённых ошибок, обсуждаемых в статье, не могут быть исправлены дополнением перемычек или удалением лишних проводников. Они могут и будут приводить в нерабочее состояние печатную плату целиком.

Для разработчика цифровых схем, использующего такие способы исправления, очень важно прочесть и понять материал, изложенный в этой статье, заблаговременно, до передачи проекта в производство. Немного внимания, уделённого при разработке, и обсуждение возможных вариантов помогут не только предотвратить превращение печатной платы в утильсырьё, но и уменьшить стоимость из-за грубых ошибок в небольшой аналоговой части схемы. Поиск ошибок и их исправление может привести к потерям сотен часов. Макетирование может сократить это время до одного дня или менее. *Макетируйте все свои аналоговые схемы.*

### Источники шума и помех

Шум и помехи являются основными элементами, ограничивающими качественные характеристики схем. Помехи могут как излучаться источниками, так и наводиться на элементы схемы. Аналоговая схема часто располагается на печатной плате вместе с быстродействующими цифровыми компонентами, включая цифровые сигнал-процессоры (DSP).

Высокочастотные логические сигналы создают значительные радиочастотные помехи (RFI). Количество источников излучения шума огромно: ключевые источники питания цифровых систем, мобильные телефоны, радио и телевидение, источники питания ламп дневного света, персональные компьютеры, грозовые разряды и т.д. Даже если аналоговая схема работает в звуковом частотном диапазоне, радиочастотные помехи могут создавать заметный шум в выходном сигнале.

### КАТЕГОРИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Выбор конструкции печатной платы является важным фактором, определяющим механические характеристики при использовании устройства в целом. Для изготовления печатных плат используют-

ся материалы различного уровня качества. Лучше всего для разработчика, если изготовитель печатных плат находится неподалёку. В этом случае легко осуществить контроль удельного сопротивления и диэлектрической постоянной — основных параметров материала печатной платы. К сожалению, этого бывает недостаточно и часто необходимо знание других параметров, таких как воспламеняемость, высокотемпературная стабильность и коэффициент гигроскопичности. Эти параметры может знать только производитель компонентов, используемых при производстве печатных плат.

Слоистые материалы обозначаются индексами FR (flame resistant, сопротивляемость к воспламенению) и G. Материал с индексом FR-1 обладает наибольшей горючестью, а FR-5 — наименьшей. Материалы с индексами G10 и G11 обладают особыми характеристиками. Материалы печатных плат приведены в табл. 1.

Не используйте печатную плату категории FR-1. Есть много примеров таких печатных плат с повреждениями от теплового воздействия мощных компонентов. Печатные платы этой категории более похожи на картон.

FR-4 часто используется при изготовлении промышленного оборудования, в

**Таблица 1. Материалы печатных плат**

Категория	Компоненты, комментарии
FR-1	бумага, фенольная композиция: прессование и штамповка при комнатной температуре, высокий коэффициент гигроскопичности
FR-2	бумага, фенольная композиция: применим для односторонних печатных плат бытовой техники, невысокий коэффициент гигроскопичности
FR-3	бумага, эпоксидная композиция: разработки с хорошими механическими и электрическими характеристиками
FR-4	стеклоткань, эпоксидная композиция: прекрасные механические и электрические свойства
FR-5	стеклоткань, эпоксидная композиция: высокая прочность при повышенных температурах, отсутствие воспламенения
G10	стеклоткань, эпоксидная композиция: высокие изоляционные свойства, наиболее высокая прочность стеклоткани, низкий коэффициент гигроскопичности
G11	стеклоткань, эпоксидная композиция: высокая прочность на изгиб при повышенных температурах, высокая сопротивляемость растворителям

то время как FR-2 используется в производстве бытовой техники. Эти две категории стандартизованы в промышленности, а печатные платы FR-2 и FR-4 часто подходят для большинства приложений. Но иногда неидеальность характеристик этих категорий заставляет использовать другие материалы. Например, для очень высокочастотных приложений в качестве материала печатных плат используются фторопласт и даже керамика. Однако, чем экзотичнее материал печатной платы, тем выше может быть цена.

При выборе материала печатной платы обращайте особое внимание на его гигроскопичность, поскольку этот параметр может негативно повлиять на характеристики платы — поверхностное сопротивление, утечки, высоковольтные изоляционные свойства (пробои и искрения) и механическую прочность. Также обращайте внимание на рабочую температуру. Участки с высокой температурой могут встречаться в неожиданных местах, например, рядом с большими цифровыми интегральными схемами, переключения которых происходят на высокой частоте. Если такие участки расположены непосредственно под аналоговыми компонентами, повышение температуры может сказаться на изменении характеристик аналоговой схемы.

После того, как материал печатной платы выбран, необходимо определить толщину фольги печатной платы. Этот параметр выбирается в первую очередь исходя из максимальной величины протекающего тока. По возможности, старайтесь избегать применения очень тонкой фольги.

## КОЛИЧЕСТВО СЛОЕВ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

В зависимости от общей сложности схемы и качественных требований разработчик должен определить количество слоёв печатной платы.

### Однослойные печатные платы

Очень простые электронные схемы выполняются на односторонних платах с использованием дешёвых фольгированных материалов (FR-1 или FR-2) и часто имеют много перемычек, напоминая двухсторонние платы. Такой способ создания печатных плат рекомендуется только для низкочастотных схем. По причинам, которые будут описаны ниже, *односторонние печатные платы в большой степени восприимчивы к навод-*

*кам.* Хорошую одностороннюю печатную плату сложно разработать по многим причинам. Тем не менее хорошие платы такого типа встречаются, но при их разработке требуется очень многое обдумывать заранее.

### Двухслойные печатные платы

На следующем уровне стоят двухсторонние печатные платы, которые в большинстве случаев используют в качестве материала подложки FR-4, хотя иногда встречается и FR-2. Применение FR-4 более предпочтительнее, поскольку в печатных платах из этого материала отверстия получаются лучшего качества. Схемы на двухсторонних печатных платах разводятся гораздо легче, т.к. в двух слоях проще осуществить разводку пересекающихся трасс. Однако для аналоговых схем пересечения трасс рекомендуется избегать. Где возможно, нижний слой (bottom) необходимо отводить под полигон земли, а остальные сигналы разводятся в верхнем слое (top). Использование полигона в качестве земляной шины даёт несколько преимуществ:

- общий провод является наиболее часто подключаемым в схеме проводом; поэтому резонно иметь большую поверхность шины общего провода для упрощения разводки;
- увеличивается механическая прочность платы;
- уменьшается сопротивление всех подключений к общему проводу, что, в свою очередь, уменьшает шум и наводки;
- увеличивается распределённая ёмкость для каждой цепи схемы, помогая подавлять излучаемый шум;
- полигон, являющийся экраном, подавляет наводки, излучаемые источниками, расположенными с его стороны.

Двухсторонние печатные платы, несмотря на все свои преимущества, не являются лучшими, особенно для мало-сигнальных или высокоскоростных схем. В общем случае, толщина печатной платы, т.е. расстояние между слоями металлизации, равняется 1,5 мм, что слишком много для полной реализации некоторых преимуществ двухслойной печатной платы, приведённых выше. Распределённая ёмкость, например, слишком мала из-за такого большого интервала.

### Многослойные печатные платы

Для ответственных схемотехнических разработок требуются многослойные

печатные платы (МПП). Некоторые причины их применения очевидны:

- такая же удобная, как и для шины общего провода, разводка шин питания; если в качестве шин питания используются полигоны на отдельном слое, то довольно просто с помощью переходных отверстий осуществить подводку питания к каждому элементу схемы;
- сигнальные слои освобождаются от шин питания, что облегчает разводку сигнальных проводников;
- между полигонами земли и питания появляется распределённая ёмкость, которая уменьшает высокочастотный шум.

Кроме этих причин, обусловивших широкое применение многослойных печатных плат, существуют другие, менее очевидные:

- лучшее подавление электромагнитных (EMI) и радиочастотных (RFI) помех благодаря эффекту отражения (image plane effect), известному ещё во времена Маркони. Когда проводник размещается близко к плоской проводящей поверхности, большая часть возвратных высокочастотных токов будет протекать по плоскости непосредственно под проводником. Направление этих токов будет противоположно направлению токов в проводнике. Таким образом, отражение проводника в плоскости создаёт линию передачи сигнала. Поскольку токи в проводнике и в плоскости равны по величине и противоположны по направлению, создаётся некоторое уменьшение излучаемых помех. Эффект отражения эффективно работает только при неразрывных сплошных полигонах (ими могут быть как полигоны земли, так и полигоны питания). Любое нарушение целостности будет приводить к уменьшению подавления помех;
- снижение общей стоимости при мелкосерийном производстве. Несмотря на то, что изготовление многослойных печатных плат обходится дороже, их возможное излучение меньше, чем у одно- и двухслойных плат. Следовательно, в некоторых случаях применение лишь многослойных плат позволит выполнить требования по излучению, поставленные при разработке, и не проводить дополнительных испытаний и тестирований. Применение МПП может снизить уровень излу-

чаемых помех на 20 дБ по сравнению с двухслойными платами.

## Порядок следования слоёв

У неопытных разработчиков часто возникает некоторое замешательство по поводу оптимального порядка следования слоёв печатной платы. Возьмём для примера 4-слойную плату, содержащую два сигнальных слоя и два полигонных слоя — слой земли и слой питания. Какой порядок следования слоёв лучший? Сигнальные слои между полигонами, которые будут служить экранами? Или же сделать полигонные слои внутренними, чтобы уменьшить взаимовлияние сигнальных слоёв?

При решении этого вопроса важно помнить, что часто расположение слоёв не имеет особого значения, поскольку всё равно компоненты располагаются на внешних слоях, а шины, подводящие сигналы к их выводам, порой проходят через все слои. Поэтому любые экранные эффекты представляют собой лишь компромисс. В данном случае лучше позаботиться о создании большой распределённой ёмкости между полигонами питания и земли, расположив их во внутренних слоях.

Другим преимуществом расположения сигнальных слоёв снаружи является доступность сигналов для тестирования, а также возможность модификации связей. Любой, кто хоть раз изменял соединения проводников, располагающихся во внутренних слоях, оценит эту возможность.

Для печатных плат с более чем четырьмя слоями существует общее правило располагать высокоскоростные сигнальные проводники между полигонами земли и питания, а низкочастотным отводить внешние слои.

## ЗАЗЕМЛЕНИЕ

Хорошее заземление — общее требование насыщенной, многоуровневой системы. И оно должно планироваться с первого шага дизайнерской разработки.

### Основное правило: разделение земли

Разделение земли на аналоговую и цифровую части — один из простейших и наиболее эффективных методов подавления шума. Один или более слоёв многослойной печатной платы обычно отводится под слой земляных полигонов. Если разработчик не очень опытен или невнимателен, то земля аналоговой части будет непосредственно соединена с

этими полигонами, т.е. аналоговый возвратный ток будет использовать такую же цепь, что и цифровой возвратный ток. Авторазводчики работают примерно так же и объединяют все земли вместе.

Если переработке подвергается ранее разработанная печатная плата с единым земляным полигоном, объединяющим аналоговую и цифровую земли, то необходимо сначала физически разделить земли на плате (после этой операции работа платы становится практически невозможной). После этого производятся все подключения к аналоговому земляному полигону компонентов аналоговой схемы (формируется аналоговая земля) и к цифровому земляному полигону компонентов цифровой схемы (формируется цифровая земля). И лишь после этого в источнике производится объединение цифровой и аналоговой земли.

Другие правила формирования земли:

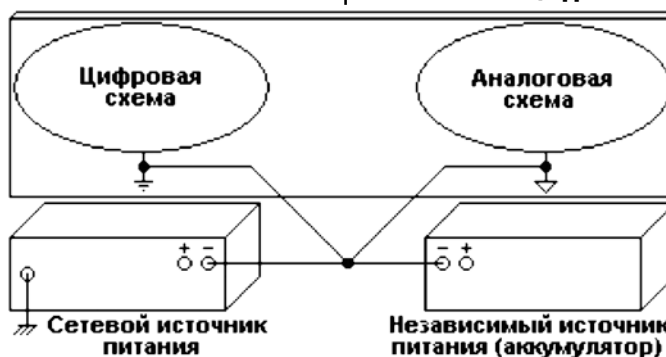
- Шины питания и земли должны находиться под одним потенциалом по переменному току, что подразумевает использование конденсаторов развязки и распределённой ёмкости.
- Не допускайте перекрытий аналоговых и цифровых полигонов (рис. 1). Располагайте шины и полигоны аналогового питания над полигоном аналоговой земли (аналогично для шин цифрового питания). Если в каком-либо месте существует перекрытие аналогового и цифрового полигона, распределённая ёмкость между перекрывающимися участками будет создавать связь по переменному току, и наводки от работы цифровых компонентов попадут в аналоговую схему. Такие перекрытия аннулируют изоляцию полигонов.
- Разделение не означает электрической изоляции аналоговой земли от цифровой (рис. 2). Они должны соединяться вместе в каком-то, желательно одном, низкоимпедансном узле. Правильная, с точки зрения

земли, система имеет только одну землю, которая является выводом заземления для систем с питанием от сетевого переменного напряжения или общим выводом для систем с питанием от постоянного напряжения (например аккумулятора). Все сигнальные токи и токи питания в этой схеме должны возвращаться к этой земле в одну точку, которая будет служить системной землёй. Такой точкой может быть вывод корпуса устройства. Важно понимать, что при подсоединении общего вывода схемы к нескольким точкам корпуса могут образовываться земляные контуры. Создание единственной общей точки объединения земель является одним из наиболее трудных аспектов системного дизайна.

- По возможности разделяйте выводы разъёмов, предназначенные для передачи возвратных токов — возвратные токи должны объединяться только в точке системной земли. Старение контактов разъёмов, а также частая расстыковка их ответных частей приводит к увеличению сопротивления контактов, следовательно, для более надёжной работы необходимо использование разъёмов с некоторым количеством дополнительных выводов. Сложные цифровые печатные платы имеют много слоёв и содержат сотни или тысячи проводников. Добавление ещё одного проводника редко создаёт проблему в отличие от добавляемых дополнительных выводов разъёмов



**Рисунок 1** Размещение полигонов аналоговых и цифровых сигналов



**Рисунок 2** Разделение аналоговой и цифровой земли

мов. Если это не удаётся сделать, то необходимо создавать два проводника возвратного тока для каждой силовой цепи на плате, соблюдая особые меры предосторожности.

- Важно отделять шины цифровых сигналов от мест на печатной плате, где расположены аналоговые компоненты схемы. Это предполагает изоляцию (экранирование) полигонами, создание коротких трасс аналоговых сигналов и внимательное размещение пассивных компонентов при наличии рядом расположенных шин высокоскоростных цифровых и ответственных аналоговых сигналов. Шины цифровых сигналов должны разводиться вокруг участков с аналоговыми компонентами и не перекрываются с шинами и полигонами аналоговой земли и аналогового питания. Если этого не делать, то разработка будет содержать новый непредусмотренный элемент — антенну, излучение которой будет воздействовать на высокоимпедансные аналоговые компоненты и проводники (рис. 3).

Почти все сигналы тактовых частот являются достаточно высокочастотными, поэтому даже небольшие ёмкости между трассами и полигонами могут создавать значительные связи. Необходимо помнить, что не только основная тактовая частота может вызывать проблему, но и её высшие гармоники.

- Хорошей концепцией является размещение аналоговой части схемы как можно ближе к входным/выходным соединениям платы. Разработчики цифровых печатных плат, использующие мощные интегральные схемы, часто склонны разводить шины шириной 1 мм и длиной несколько сантиметров для соединения аналоговых компонентов, полагая, что малое сопротивление трассы поможет избавиться от наводок. То, что при этом получается, представляет собой протяжённый плёночный конденса-

тор, на который будут наводиться паразитные сигналы от цифровых компонентов, цифровой земли и цифрового питания, усугубляя проблему.

### Пример хорошего размещения компонентов

На рис. 4 показан возможный вариант размещения всех компонентов на плате, включая источник питания. Здесь используются три отделенных друг от друга и изолированных полигона земли/питания: один для источника, один для цифровой схемы и один для аналоговой. Цепи земли и питания аналоговой и цифровой частей объединяются только в источнике питания. Высокочастотный шум отфильтровывается в цепях питания дросселями. В этом примере высокочастотные сигналы аналоговой и цифровой частей отнесены друг от друга. Такой дизайн имеет очень высокую вероятность благоприятного исхода, поскольку обеспечено хорошее размещение компонентов и следование правилам разделения цепей.

Имеется лишь один случай, когда необходимо объединение аналоговых и цифровых сигналов над областью полигона аналоговой земли. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи размещаются в корпусах с выводами аналоговой и цифровой земли. Принимая во внимание предыдущие рассуждения, можно предположить, что вывод цифровой земли и вывод аналоговой земли должны быть подключены к шинам цифровой и аналоговой земли соответственно. Однако в данном случае это не верно.

Названия выводов (аналоговый или цифровой) относятся лишь к внутренней структуре преобразователя, к его внутренним соединениям. В схеме эти выводы должны быть подключены к шине аналоговой земли. Соединение может быть выполнено и внутри интегральной схемы, однако получить низкое сопротивление такого соединения довольно сложно из-за топологических ограничений. Поэтому при использовании преобра-

зователей предполагается внешнее соединение выводов аналоговой и цифровой земли. Если этого не сделать, то параметры микросхемы будут значительно хуже приведённых в спецификации.

Необходимо учитывать то, что цифровые элементы преобразователя могут ухудшать качественные характеристики схемы, привнося цифровые помехи в цепи аналоговой земли и аналогового питания. При разработке преобразователей учитывается это негативное воздействие так, чтобы цифровая часть потребляла как можно меньше мощности. При этом помехи от переключений логических элементов уменьшаются. Если цифровые выводы преобразователя не сильно нагружены, то внутренние переключения обычно не вызывают особых проблем. При разработке печатной платы, содержащей АЦП или ЦАП, необходимо должным образом отнестись к развязке цифрового питания преобразователя от аналоговой земли.

### ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАССИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Для правильной работы аналоговых схем весьма важен правильный выбор пассивных компонентов. Начиная те дизайнерскую разработку с внимательного рассмотрения высокочастотных характеристик пассивных компонентов и предварительного размещения и компоновки их на эскизе платы.

Большое число разработчиков совершенно игнорируют частотные ограничения пассивных компонентов при использовании в аналоговой схемотехнике. Эти компоненты имеют ограниченные частотные диапазоны и их работа вне специфицированной частотной области может привести к непредсказуемым результатам. Кто-то может подумать, что это обсуждение касается только высокоскоростных аналоговых схем. Однако, это далеко не так — высокочастотные сигналы достаточно сильно воздействуют на пассивные компоненты низкочастотных схем посредством излучения или прямой связи по проводникам. Например, простой низкочастотный фильтр на операционном усилителе может легко превращаться в высокочастотный фильтр при воздействии на его вход высокой частоты.

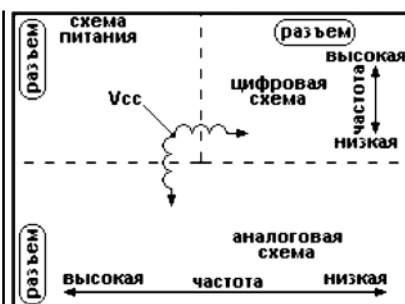
### Резисторы

Высокочастотные характеристики резисторов могут быть представлены эквивалентной схемой (рис. 5).

Обычно применяются резисторы трёх типов: 1) проволочные, 2) углеродные ком-



**Рисунок 3** Излучение проводниками печатной платы



**Рисунок 4** Пример хорошего размещения компонентов на плате

позитные и 3) плёночные. Не надо иметь много воображения, чтобы понять, как проволочный резистор может превращаться в индуктивность, поскольку он представляет собой катушку с проводом из высокоомного металла. Большинство разработчиков электронных устройств не имеют понятия о внутренней структуре плёночных резисторов, которые также представляют собой катушку, правда, из металлической пленки. Поэтому плёночные резисторы также обладают индуктивностью, которая меньше, чем у проволочных резисторов. Плёночные резисторы с сопротивлением не более 2 кОм можно свободно использовать в высокочастотных схемах. Выводы резисторов параллельны друг другу, поэтому между ними существует заметная ёмкостная связь. Для резисторов с большим сопротивлением межвыводная ёмкость будет уменьшать полный импеданс на высоких частотах.

## Конденсаторы

Высокочастотные характеристики конденсаторов могут быть представлены эквивалентной схемой, приведённой на рис. 6.

Конденсаторы в аналоговых схемах используются в качестве элементов развязки и фильтрующих компонентов. Для идеального конденсатора реактивное сопротивление определяется по следующей формуле:

$$x_c = \frac{1}{(2\pi fC)},$$

где  $x_c$  — реактивное сопротивление, Ом;  $f$  — частота, МГц;  $C$  — ёмкость, мкФ.

Следовательно, электролитический конденсатор ёмкостью 10 мкФ будет обладать сопротивлением 1,6 Ом на частоте 10 кГц и 160 мкОм на частоте 100 МГц. Так ли это?

В действительности, никто никогда не видел электролитического конденсатора с реактивным сопротивлением 160 мкОм. Обкладки плёночных и электролитических конденсаторов представляют собой свитые слои фольги, которые создают паразитную индуктивность. Эффект собственной индуктивности у керамических конденсаторов значительно меньше, что позволяет использовать их при работе на высоких частотах. Кроме этого, конденсаторы обладают током утечки между обкладками, который эквивалентен включённому параллельно их выводам резистору, добавляющему своё паразитное воздействие к воздействию последовательно включенного сопротивления выводов и обкладок. К тому же, электролит не является идеальным проводником. Все эти сопротивления складываясь создают эквивалентное

последовательное сопротивление (ESR). Конденсаторы, используемые в качестве развязок, должны обладать малым ESR, поскольку последовательное сопротивление ограничивает эффективность подавления пульсаций и помех. Повышение рабочей температуры довольно значительно увеличивает эквивалентное последовательное сопротивление и может привести к ухудшению характеристик конденсатора. Поэтому, если предполагается использование алюминиевого электролитического конденсатора при повышенной рабочей температуре, то необходимо использовать конденсаторы соответствующего типа (105°C).

Выводы конденсатора также вносят свой вклад в увеличение паразитной индуктивности. Для малых значений ёмкости важно оставлять длину выводов короткой. Сочетание паразитных индуктивности и ёмкости может создать резонансный контур. Полагая, что выводы имеют индуктивность порядка 8 нГн на один сантиметр длины, конденсатор ёмкостью 0,01 мкФ с выводами длиной по одному сантиметру будет иметь резонансную частоту около 12,5 МГц. Этот эффект известен инженерам, которые десятилетия назад разрабатывали электронные вакуумные приборы. Тот, кто восстанавливает антикварные радиоприёмники и не знает об этом эффекте, сталкивается с множеством проблем.

При использовании электролитических конденсаторов необходимо следить за правильным подключением. Положительный вывод должен быть подключён к более положительному постоянному потенциалу. Неправильное подключение приводит к протеканию через электролитический конденсатор постоянного тока, что может вывести из строя не только сам конденсатор, но и часть схемы.

В редких случаях разность потенциалов по постоянному току между двумя точками в схеме может менять свой знак. Это требует применения неполярных электролитических конденсаторов, внутренняя структура которых эквивалентна двум полярным конденсаторам, соединённым последовательно.

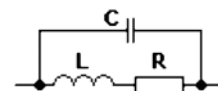
## Индуктивности

Высокочастотные характеристики индуктивностей могут быть представлены эквивалентной схемой, приведённой на рис. 7.

Реактивное сопротивление индуктивности описывается следующей формулой:

$$x_l = 2\pi fL,$$

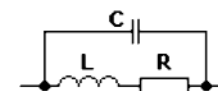
где  $x_l$  — реактивное сопротивление, Ом;  $f$  — частота, МГц;  $L$  — индуктивность, Гн.



**Рисунок 5** Эквивалентная схема резистора



**Рисунок 6** Эквивалентная схема конденсатора



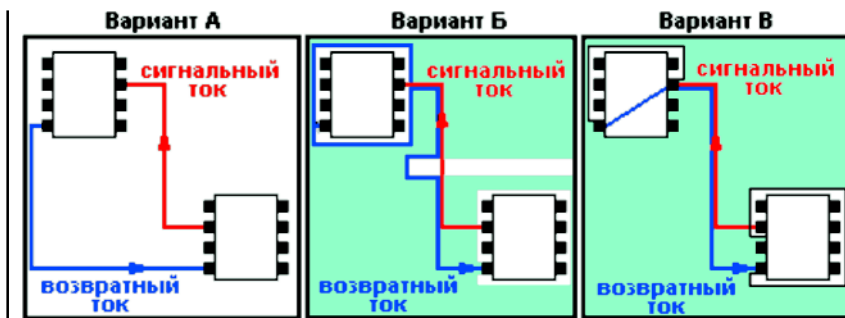
**Рисунок 7** Эквивалентная схема индуктивности

Следовательно, индуктивность 10 мГн будет обладать реактивным сопротивлением 628 Ом на частоте 10 кГц, а на частоте 100 МГц — сопротивлением 6,28 МОм. Верно?

В действительности, не существует индуктивности с реактивным сопротивлением 6,28 МОм. Природу возникновения паразитного сопротивления легко понять — витки катушки выполнены из провода, обладающего некоторым сопротивлением на единицу длины. Паразитная ёмкость воспринимается труднее до тех пор, пока не принять во внимание то, что следующий виток катушки расположен вплотную к предыдущему, и между близко расположенными проводниками возникает ёмкостная связь. Паразитная ёмкость ограничивает верхнюю рабочую частоту. Небольшие проволочные индуктивности начинают становиться неэффективными в диапазоне 10...100 МГц.

## Печатная плата

Сама печатная плата обладает характеристиками рассмотренных выше



**Рисунок 8** Образование петли и щелевой антенны при некорректной разводке

пассивных компонентов, правда, не столь очевидными.

Рисунок проводников на печатной плате может быть как источником, так и приёмником помех. Хорошая разводка проводников уменьшает чувствительность аналоговой схемы к излучению источников.

Печатная плата восприимчива к излучению, поскольку проводники и выводы компонентов образуют своеобразные антенны. Теория антенн представляет собой достаточно сложный предмет для изучения и не рассматривается в этой статье. Тем не менее, некоторые основы здесь приводятся.

### Немного из теории антенн

Одним из основных типов антенн является штырь или прямой проводник. Такая антенна работает, потому что прямой проводник обладает паразитной индуктивностью и поэтому может концентрировать и улавливать излучение от внешних источников. Полный импеданс прямого проводника имеет резистивную (активную) и индуктивную (реактивную) составляющие:

$$Z = R + j\omega L.$$

На постоянном токе или низких частотах преобладает активная составляющая. При повышении частоты реактивная составляющая становится всё более и более значимой. В диапазоне от 1 до 10 кГц индуктивная составляющая начинает оказывать влияние, и проводник более не является низкоомным соединителем, а скорее выступает как катушка индуктивности.

Формула для расчёта индуктивности проводника печатной платы выглядит следующим образом:

$$L = 0,0002X \cdot \left[ \ln\left(\frac{2X}{W+H}\right) + 0,2235\left(\frac{W+H}{X}\right) + 0,5 \right] \text{ (мкГн)},$$

где  $X$  — длина проводника;  $W$  — ширина проводника;  $H$  — толщина проводника.

Обычно трассы на печатной плате обладают значениями от 6 до 12 нГн на сантиметр длины. Например, 10-см про-

водник обладает сопротивлением 57 мОм и индуктивностью 8 нГн на см. На частоте 100 кГц реактивное сопротивление становится равным 50 мОм, а на более высоких частотах проводник будет представлять собой скорее индуктивность, чем активное сопротивление.

Правило штыревой антенны гласит, что она начинает ощутимо взаимодействовать с полем при своей длине около  $1/20$  от длины волны, а максимальное взаимодействие происходит при длине штыря, равной  $1/4$  от длины волны. Поэтому 10-см проводник из примера в предыдущем параграфе начнёт становиться довольно хорошей антенной на частотах выше 150 МГц. Необходимо помнить, что несмотря на то, что генератор тактовой частоты цифровой схемы может и не работать на частоте выше 150 МГц, в его сигнале всегда присутствуют высшие гармоники. Если на печатной плате присутствуют компоненты со штыревыми выводами значительной длины, то такие выводы также могут служить антеннами.

Другой основной тип антенн — петлевые антенны. Индуктивность прямого проводника сильно увеличивается, когда он изгибается и становится частью дуги. Увеличивающаяся индуктивность понижает частоту, на которой начинает происходить взаимодействие антенны с линиями поля.

Опытные дизайнеры печатных плат, достаточно хорошо разбирающиеся в теории петлевых антенн, знают, что нельзя создавать петли для критичных сигналов. Некоторые разработчики, однако, не задумываются об этом, и проводники возвратного и сигнального тока в их схемах представляют собой петли. Создание петлевых антенн легко показать на примере (рис. 8). Кроме того, здесь показано и создание щелевой антенны.

Рассмотрим три случая.

Вариант А — пример скверного дизайна. В нём вовсе не используется полигон аналоговой земли. Петлевой контур формируется земляным и сигнальным проводником. При прохождении



тока возникают электрическое и перпендикулярное ему магнитное поля. Эти поля образуют основу петлевой антенны. Правило петлевой антенны гласит, что для наибольшей эффективности длина каждого проводника должна быть равна половине длины волны принимаемого излучения. Однако, следует не забывать, что даже при  $1/20$  от длины волны петлевая антенна всё ещё остаётся достаточно эффективной.

Вариант Б лучше варианта А, но здесь присутствует разрыв в полигоне, вероятно, для создания определённого места для разводки сигнальных проводников. Пути сигнального и возвратного токов образуют щелевую антенну. Другие петли образуются в вырезах вокруг микросхем.

Вариант В — пример лучшего дизайна. Пути сигнального и возвратного тока совпадают, сводя на нет эффективность петлевой антенны. Заметьте, что в этом варианте также присутствуют вырезы вокруг микросхем, но они отделены от пути возвратного тока.

Теория отражения и согласования сигналов находится близко к теории антенн.

Когда проводник печатной платы поворачивает на угол  $90^\circ$ , может возникнуть отражение сигнала. Это происходит, главным образом, из-за изменения ширины пути прохождения тока. В вершине угла ширина трассы увеличивается в 1,414 раза, что приводит к несогласованию характеристик линии передачи, особенно распределённой ёмкости и собственной индуктивности трассы. Довольно часто необходимо повернуть на печатной плате трассу на  $90^\circ$ . Многие современные САД-пакеты позволяют сглаживать углы проведённых трасс или проводить трассы в виде дуги. На рис. 9 показаны два шага улучшения формы угла. Только последний пример поддерживает постоянной ширину трассы и минимизирует отражения.

Совет для опытных разводчиков печатных плат: оставляйте процедуру сглаживания на последний этап работ перед созданием каплеобразных выводов и заливкой полигонов. Иначе САД-пакет будет производить сглаживание дольше из-за более сложных вычислений.

Продолжение следует

www.chip-news.ru