

## ЗАЗЕМЛЕНИЕ

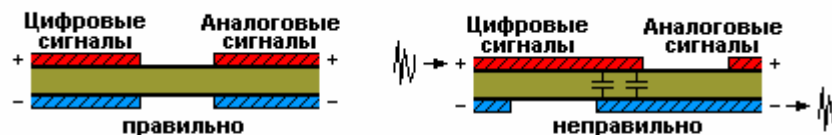
Хорошее заземление - должно планироваться с первого шага дизайнерской разработки.

**Основное правило: разделение земли.** Разделение земли на аналоговую и цифровую части - один из простейших и наиболее эффективных методов подавления шума. Один или более слоев многослойной печатной платы обычно отводится под слой земляных полигонов. Но если есть возможность, то землю аналоговой части лучше не соединять с этими полигонами, чтобы аналоговый возвратный ток не использовал ту же цепь, что и цифровой возвратный ток. Но авторазводчики работают объединяют все земли вместе.

Другие правила формирования земли:

**Шины питания и земли должны находиться под одним потенциалом по переменному току,** что подразумевает использование конденсаторов развязки и распределенной емкости.

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, распределенная емкость между перекрывающимися участками будет создавать связь по переменному току, и наводки от работы цифровых компонентов попадут в аналоговую схему. Такие перекрытия аннулируют изоляцию полигонов.



Размещение полигонов аналоговых и цифровых сигналов

Разделение не означает электрической изоляции аналоговой от цифровой земли (рис. 2). Они должны соединяться вместе в каком-то, желательно одном, низкоимпедансном узле.

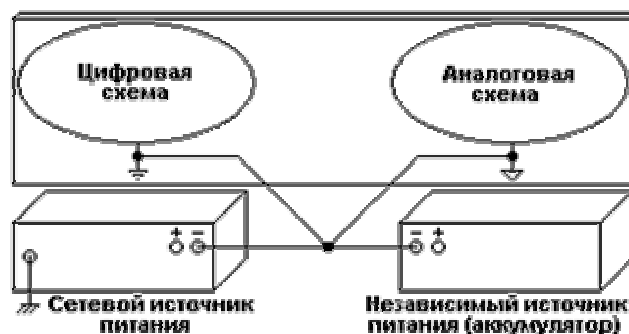


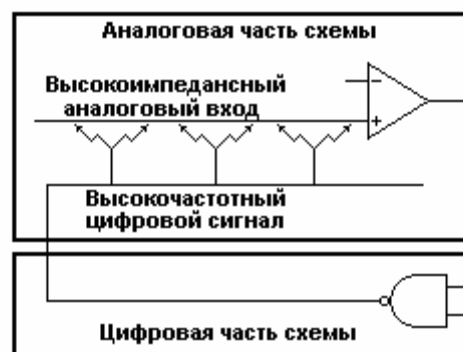
Рис.2. Разделение аналоговой и цифровой земли

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 землей. 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 следует разделять выводы разъемов, предназначенные для передачи возвратных токов - возвратные токи должны объединяться только в точке системной земли. Старение контактов разъемов, а также частая расстыковка их ответных частей приводит к увеличению сопротивления контактов, следовательно, для более надежной работы необходимо использование разъемов с некоторым количеством дополнительных выводов. Сложные цифровые печатные платы имеют много слоев и содержат сотни или тысячи проводников. Добавление еще одного проводника редко создает проблему в отличие от добавляемых дополнительных выводов разъемов. Если это не удастся 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 перекрываться 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).



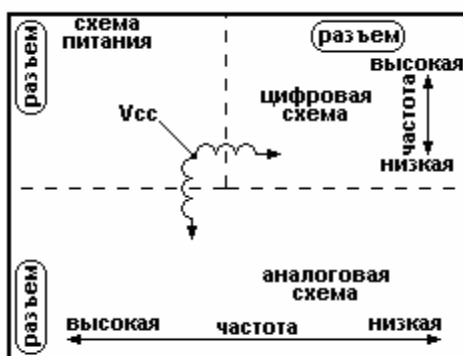
Излучение проводниками печатной платы

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

Хорошей концепцией является размещение аналоговой части схемы вблизи входных/выходных соединений 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 протяженный пленочный конденсатор, на который будут наводиться паразитные сигналы от цифровых компонентов, цифровой земли и цифрового питания, усугубляя проблему.

### Пример хорошего размещения компонентов

На рисунке 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 на благоприятный исход, поскольку обеспечено хорошее размещение компонентов и следование правилам разделения цепей.



Пример хорошего размещения компонентов на плате

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.

Необходимо учитывать то, что цифровые элементы преобразователя могут ухудшать качественные характеристики схемы, принося 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 на аналоговую землю.

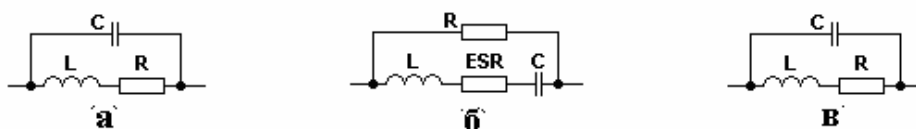
## ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАССИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Для правильной работы аналоговых схем весьма важен правильный выбор пассивных компонентов. Дизайнерскую разработку следует начинать 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. И не надо заблуждаться, что это касается только высокоскоростных аналоговых схем. 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, конденсаторов и индуктивностей могут быть представлены эквивалентными схемами, приведенными на рисунке .



Эквивалентные схемы резистора (а), конденсатора (б) и индуктивности (в)

### Печатная плата

Сама печатная плата обладает характеристиками рассмотренных выше пассивных компонентов, правда, не столь очевидными.

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

Печатная плата восприимчива к излучению, поскольку проводники и выводы компонентов образуют своеобразные антенны.

### 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:

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

Формула для расчета индуктивности проводника печатной платы выглядит следующим образом:

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

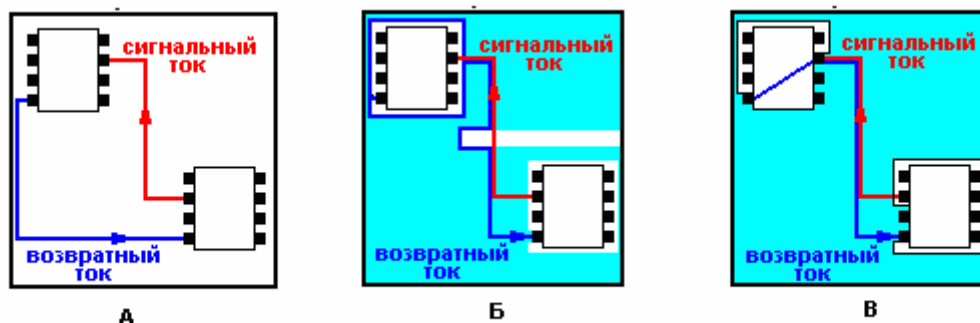
X – длина проводника  
W – ширина проводника  
H – толщина проводника

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



### Образование петли и щелевой антенны при некорректной разводке

Рассмотрим три случая:

Вариант А - пример скверного дизайна. В нем 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 равно половине длины волны принимаемого излучения. Однако, следует не забывать, что даже при  $1/20$  от длины волны петлевая антенна все еще остается достаточно эффективной.

Вариант Б лучше варианта А, но здесь присутствует разрыв в полигоне, вероятно, для создания определенного 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 поворачивают 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 рассогласованию характеристик линии передачи, особенно распределенной емкости и собственной индуктивности трассы. Довольно часто необходимо повернуть на печатной плате трассу на  $90^\circ$ . Многие современные САД-пакеты позволяют сглаживать углы проведенных трасс или проводить трассы в виде дуги. На

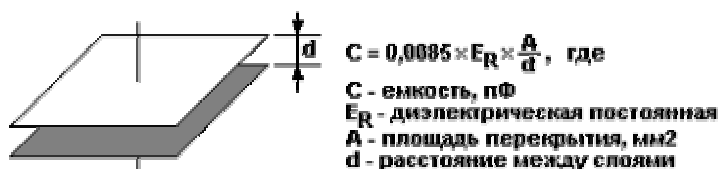
рисунке 9 показаны два шага улучшения формы угла. Только последний пример поддерживает постоянной ширину трассы и минимизирует отражения.



Рис.9. Сглаживание углов проводников

## ПАРАЗИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

Между проводниками печатной платы, находящимися на разных слоях, возникает емкостная связь, когда они пересекаются. Иногда это может создать проблему. Проводники, находящиеся друг над другом на смежных слоях, создают длинный пленочный конденсатор. Емкость такого конденсатора рассчитывается по формуле, приведенной на рисунке 10.



$$C = 0,0085 \times \epsilon_R \times \frac{A}{d}, \text{ где}$$

$C$  - емкость, пФ

$\epsilon_R$  - диэлектрическая постоянная

$A$  - площадь перекрытия, мм<sup>2</sup>

$d$  - расстояние между слоями

Рис.10. Расчет межслойной емкости

Например, печатная плата может обладать следующими параметрами: - 4 слоя; сигнальный и слой полигона земли - смежные, - межслойный интервал - 0,2 мм, - ширина проводника - 0,75 мм, - длина проводника - 7,5 мм. Типовое значение диэлектрической постоянной  $\epsilon_R$  для FR-4 равняется 4.5.

Подставив все значения в формулу, получим значение емкости между этими двумя шинами, равное 1,1 пФ. Даже такая, казалось бы, небольшая емкость для некоторых приложений является недопустимой. Рисунок 11 иллюстрирует эффект от емкости в 1 пФ, возникающий при подключении ее к инвертирующему входу высокочастотного операционного усилителя.

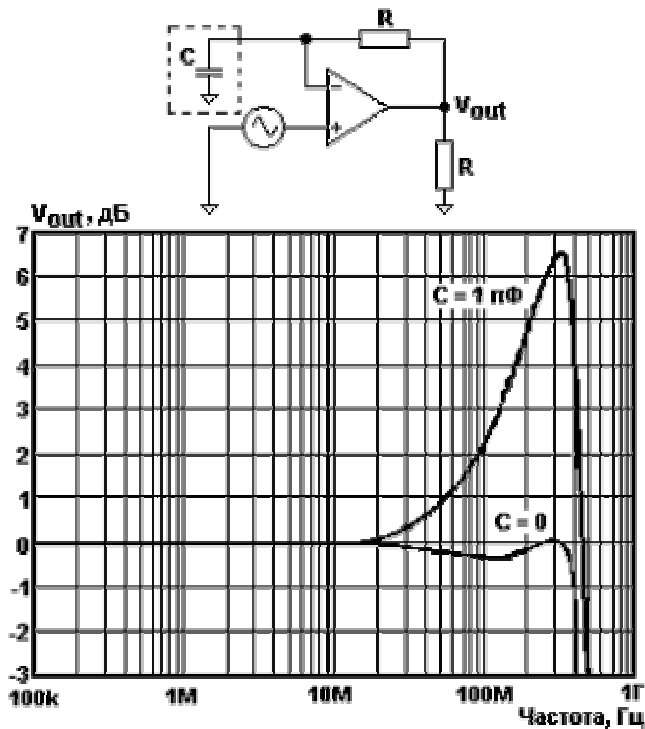


Рис.11. Эффект от емкости на инвертирующем входе операционного усилителя

Видно, что происходит удвоение амплитуды выходного сигнала на частотах, близких к верхнему пределу частотного диапазона ОУ. Это, в свою очередь, может привести к генерации, особенно на рабочих частотах антенны (выше 180 МГц).

Этот эффект порождает многочисленные проблемы, для решения которых, тем не менее, существует много способов. Самый очевидный из них - уменьшение длины проводников. Другой способ - уменьшение их ширины. Нет причины применения проводника такой ширины для подводки сигнала к инвертирующему входу, т.к. по этому проводнику протекает очень небольшой ток. Уменьшение длины трассы до 2,5 мм, а ширины до 0,2 мм приведет к уменьшению емкости до 0,1 пФ, а такая емкость уже не приведет к столь значительному подъему частотной характеристики. Еще один способ решения - удаление части полигона под инвертирующим входом и проводником, подходящим к нему.

Ширину проводников печатной платы невозможно бесконечно уменьшить. Предельная ширина определяется как технологическим процессом, так и толщиной фольги. Если два проводника проходят близко друг к другу, то между ними образуется емкостная и индуктивная связь (рис. 12).

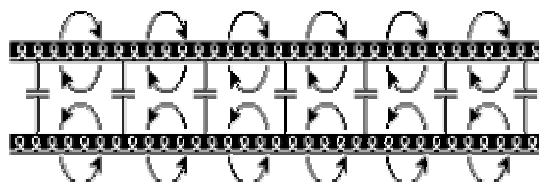


Рис.12. Взаимосвязь между параллельными сигнальными проводниками

Зависимости, описывающие эти паразитные эффекты, достаточно сложны, и они приводятся в литературе, посвященной линиям передачи и полосковым линиям.



Сигнальные проводники не должны разводиться параллельно друг другу, исключая случаи разводки дифференциальных или микрополосковых линий. Зазор между проводниками должен быть минимум в три раза больше ширины проводников.

Емкость между трассами в аналоговых схемах может создать затруднения при больших сопротивлениях резисторов (несколько МОм). Относительно большая емкостная связь между инвертирующим и неинвертирующим входами операционного усилителя легко может привести к самовозбуждению схемы.

Всякий раз, когда при разводке печатной платы появляется необходимость в создании переходного отверстия, т.е. межслойного соединения (рис. 13), необходимо помнить, что при этом возникает также паразитная индуктивность. При диаметре отверстия после металлизации  $d$  и длине канала  $h$  индуктивность можно вычислить по следующей приближенной формуле:

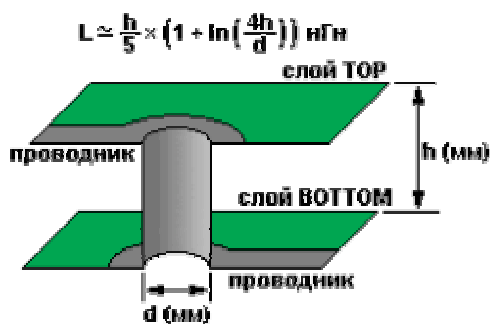


Рис.13. Индуктивность переходного отверстия

Например, при  $d=0,4$  мм и  $h=1,5$  мм (достаточно распространенные величины) индуктивность отверстия равна 1,1 нГн.

Имейте в виду, что индуктивность отверстия вместе с такой же паразитной емкостью формируют резонансный контур, что может сказаться при работе на высоких частотах. Собственная индуктивность отверстия достаточно мала, и резонансная частота находится где-то в гигагерцовом диапазоне, но если сигнал в течение своего пути вынужден проходить через несколько переходных отверстий, то их индуктивности складываются (последовательное соединение), а резонансная частота понижается. Вывод: ***старайтесь избежать большого числа переходных отверстий при разводке ответственных высокочастотных проводников аналоговых схем.***

Другое негативное явление: при большом количестве переходных отверстий в полигоне земли могут создаваться петлевые участки. Наилучшая аналоговая разводка - все сигнальные проводники располагаются на одном слое печатной платы.

Кроме рассмотренных выше паразитных эффектов существуют еще такие, которые связаны с недостаточно чистой поверхностью платы.

Помните, что, если в схеме присутствуют большие сопротивления, то особое внимание следует уделить очистке платы. На заключительных операциях изготовления печатной платы должны удаляться остатки флюса и

загрязнений. В последнее время при монтаже печатных плат достаточно часто применяются водорастворимые флюсы. Являясь менее вредными, они легко удаляются водой. Но при этом отмывка платы недостаточно чистой водой может привести к дополнительным загрязнениям, которые ухудшают электрические характеристики. Следовательно, очень важно производить отмывку печатной платы с высокоимпедансной схемой свежей дистиллированной водой.

## РАЗВЯЗКА СИГНАЛОВ

Как уже отмечалось, помехи могут проникать в аналоговую часть схемы через цепи питания. Для уменьшения таких помех применяются развязывающие (блокировочные) конденсаторы, уменьшающие локальный импеданс шин питания.

Если необходимо развести печатную плату, на которой имеются и аналоговая, и цифровая части, то необходимо иметь хотя бы небольшое представление об электрических характеристиках логических элементов.

Типовой выходной каскад логического элемента содержит два транзистора, последовательно соединенные между собой, а также между цепями питания и земли (рис. 14).

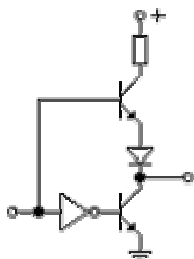


Рис.14. Структура выходного каскада логического элемента

Эти транзисторы в идеальном случае работают строго в противофазе, т.е. когда один из них открыт, то в этот же момент времени второй закрыт, формируя на выходе либо сигнал логической единицы, либо логического нуля. В установившемся логическом состоянии потребляемая мощность логического элемента невелика.

Ситуация кардинально меняется, когда выходной каскад переключается из одного логического состояния в другое. В этом случае в течение короткого промежутка времени оба транзистора могут быть открыты одновременно, а ток питания выходного каскада сильно увеличивается, поскольку уменьшается сопротивление участка пути тока от шины питания до шины земли через два последовательно соединенных транзистора. Потребляемая мощность скачкообразно возрастает, а затем также убывает, что приводит к локальному изменению напряжения питания и возникновению резкого, кратковременного изменения тока. Такие изменения тока приводят к излучению радиочастотной энергии. Даже на сравнительно простой печатной плате может быть десятки или сотни рассмотренных выходных каскадов логических элементов, поэтому суммарный эффект от их одновременной работы может быть очень большим.

Невозможно точно предсказать диапазон частот, в котором будут находиться эти выбросы тока, поскольку частота их возникновения зависит от множества причин, в том числе и от задержки распространения переключений транзисторов логического элемента. Задержка, в свою очередь, также зависит от множества случайных причин, возникающих в процессе производства. Шум от переключений имеет широкополосное распределение гармонических составляющих во всем диапазоне. Для подавления цифрового шума существует несколько способов, применение которых зависит от спектрального распределения шума.

В таблице 2 представлены максимальные рабочие частоты для распространенных типов конденсаторов.

Таблица 2

Тип	Максимальная частота
алюминиевый электролитический	100 кГц
танталовый электролитический	1 МГц
слюдяной	500 МГц
керамический	1 ГГц

Из таблицы очевидно, что танталовые электролитические конденсаторы применяются для частот ниже 1 МГц, на более высоких частотах должны применяться керамические конденсаторы. Необходимо не забывать, что конденсаторы имеют собственный резонанс и их неправильный выбор может не только не помочь, но и усугубить проблему. На рисунке 15 показаны типовые собственные резонансы двух конденсаторов общего применения - 10 мкФ танталового электролитического и 0,01 мкФ керамического.

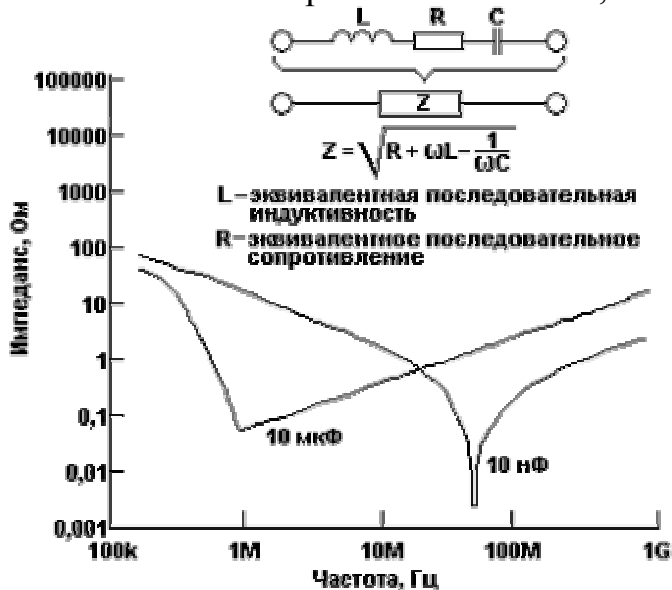


Рис.15. Собственный резонанс конденсатора

Реальные характеристики могут отличаться у различных производителей и даже от партии к партии у одного производителя. *Важно понимать, что*

*для эффективной работы конденсатора подавляемые им частоты должны находиться в более низком диапазоне, чем частота собственного резонанса. В противном случае характер реактивного сопротивления будет индуктивным, а конденсатор перестанет эффективно работать.*

Не стоит заблуждаться относительно того, что один 0,1 мкФ конденсатор будет подавлять все частоты. Небольшие конденсаторы (10 нФ и менее) могут работать более эффективно на более высоких частотах.

### **Развязка питания ИС**

Развязка питания интегральных схем с целью подавления высокочастотного шума состоит в применении одного или нескольких конденсаторов, подключенных между выводами питания и земли. Важно, чтобы проводники, соединяющие выводы с конденсаторами, были короткими. Если это не так, то собственная индуктивность проводников будет играть заметную роль и сводить на нет выгоды от применения развязывающих конденсаторов.

Развязывающий конденсатор должен быть подключен к каждому корпусу микросхемы, независимо от того, сколько операционных усилителей находится внутри корпуса - 1, 2 или 4. Если ОУ питается двухполярным питанием, то, само собой разумеется, что развязывающие конденсаторы должны располагаться у каждого вывода питания. Значение емкости должно быть тщательно выбрано в зависимости от типа шума и помех, присутствующих в схеме.

В особо сложных случаях может появиться необходимость добавления индуктивности, включенной последовательно с выводом питания. Индуктивность должна располагаться до, а не после конденсаторов.

Другим, более дешевым способом является замена индуктивности резистором с малым сопротивлением (10...100 Ом). При этом вместе с развязывающим конденсатором резистор образует низкочастотный фильтр. Этот способ уменьшает диапазон питания операционного усилителя, который к тому же становится более зависимым от потребляемой мощности.

Обычно для подавления низкочастотных помех в цепях питания бывает достаточно применить один или несколько алюминиевых или танталовых электролитических конденсаторов у входного разъема питания. Дополнительный керамический конденсатор будет подавлять высокочастотные помехи от других плат.

### **РАЗВЯЗКА ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ**

Множество шумовых проблем является результатом непосредственного соединения входных и выходных выводов. В результате высокочастотных ограничений пассивных компонентов реакция схемы на воздействие высокочастотного шума может быть достаточно непредсказуемой.

В ситуации, когда частотный диапазон наведенного шума в значительной степени отличается от частотного диапазона работы схемы, решение просто и очевидно - размещение пассивного RC-фильтра для

подавления высокочастотных помех. Однако, при применении пассивного фильтра надо быть осторожным: его характеристики (из-за неидеальности частотных характеристик пассивных компонентов) утрачивают свои свойства на частотах, в 100...1000 раз превышающих частоту среза ( $f_{3db}$ ). При использовании последовательно соединенных фильтров, настроенных на разные частотные диапазоны, более высокочастотный фильтр должен быть ближайшим к источнику помех. Индуктивности на ферритовых кольцах также могут применяться для подавления шума; они сохраняют индуктивный характер сопротивления до некоторой определенной частоты, а выше их сопротивление становится активным.

Наводки на аналоговую схему могут быть настолько большими, что избавиться (или, по крайней мере, уменьшить) от них возможно только с помощью применения экранов. Для эффективной работы они должны быть тщательно спроектированы так, чтобы частоты, создающие наибольшие проблемы, не смогли попасть в схему. Это означает, что экран не должен иметь отверстия или вырезы с размерами, большими, чем  $1/20$  длины волны экранируемого излучения. Хорошая идея отводить достаточное место под предполагаемый экран с самого начала проектирования печатной платы. При использовании экрана можно дополнительно использовать ферритовые кольца (или бусинки) для всех подключений к схеме.

### **КОРПУСА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ**

Типы корпусов операционных усилителей включают в себя, в основном, DIP (*dual-in-line*) и SO (*small-outline*). Вместе с уменьшением размера корпуса уменьшается и шаг выводов, что позволяет применять меньшие по размеру пассивные компоненты. Уменьшение размеров схемы в целом уменьшает паразитные индуктивности и позволяет работать на более высоких частотах. Однако это приводит также к возникновению более сильных перекрестных помех из-за увеличения емкостной связи между компонентами и проводниками.

### **ОБЪЕМНЫЙ И ПОВЕРХНОСТНЫЙ МОНТАЖ**

При размещении операционных усилителей в корпусах типа DIP и пассивных компонентов с проволочными выводами требуется наличие на печатной плате переходных отверстий для их монтажа. Такие компоненты в настоящее время используются, когда нет особых требований к размерам печатной платы; обычно они стоят дешевле, но стоимость печатной платы в процессе изготовления возрастает из-за сверловки дополнительных отверстий под выводы компонентов.

Кроме того, при использовании навесных компонентов увеличиваются размеры платы и длины проводников, что не позволяет работать схеме на высоких частотах. Переходные отверстия обладают собственной индуктивностью, что также накладывает ограничения на динамические характеристики схемы. Поэтому навесные компоненты не рекомендуются

применять для реализации высокочастотных схем или для аналоговых схем, размещенных поблизости с высокоскоростными логическими схемами.

Некоторые разработчики, пытаясь уменьшить длину проводников, размещают резисторы вертикально. С первого взгляда может показаться что, это сокращает длину трассы. Однако при этом увеличивается путь прохождения тока по резистору, а сам резистор представляет собой петлю (виток индуктивности). Излучающая и принимающая способность возрастает многократно.

При поверхностном монтаже не требуется размещения отверстия под каждый вывод компонента. Однако возникают проблемы при тестировании схемы, и приходится использовать переходные отверстия в качестве контрольных точек, особенно при применении компонентов малого типоразмера.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Помните следующие основные моменты и постоянно соблюдайте их при проектировании и разводке аналоговых схем.

### **Общие:**

*думайте о печатной плате как о компоненте электрической схемы; имейте представление и понимание об источниках шума и помех; моделируйте и макетируйте схемы.*

### **Печатная плата:**

*используйте печатные платы только из качественного материала (например, FR-4);*

*схемы, выполненные на многослойных печатных платах, на 20 дБ менее восприимчивее к внешним помехам, чем схемы, выполненные на двухслойных платах;*

*используйте разделенные, неперекрывающиеся полигоны для различных земель и питаний;*

*располагайте полигоны земли и питания на внутренних слоях печатной платы.*

### **Компоненты:**

*осознавайте частотные ограничения, вносимые пассивными компонентами и проводниками платы;*

*старайтесь избегать вертикального размещения пассивных компонентов в высокоскоростных схемах;*

*для высокочастотных схем используйте компоненты, предназначенные для поверхностного монтажа;*

*проводники должны быть чем короче, тем лучше;*

*если требуется большая длина проводника, то уменьшайте его ширину;*

*неиспользуемые выводы активных компонентов должны быть правильно подключены.*

**Разводка:**

- размещайте аналоговую схему вблизи разъема питания;*
- никогда не разводите проводники, передающие логические сигналы, через аналоговую область платы, и наоборот;*
- проводники, подходящие к инвертирующему входу ОУ, делайте короткими;*
- удостоверьтесь, что проводники инвертирующего и неинвертирующего входов ОУ не располагаются параллельно друг другу на большом протяжении;*
- старайтесь избегать применения лишних переходных отверстий, т.к. их собственная индуктивность может привести к возникновению дополнительных проблем;*
- не разводите проводники под прямыми углами и сглаживайте вершины углов, если это возможно.*

**Развязка:**

- используйте правильные типы конденсаторов для подавления помех в цепях питания;*
- для подавления низкочастотных помех и шумов используйте танталовые конденсаторы у входного разъема питания;*
- для подавления высокочастотных помех и шумов используйте керамические конденсаторы у входного разъема питания;*
- используйте керамические конденсаторы у каждого вывода питания микросхемы; если необходимо, используйте несколько конденсаторов для разных частотных диапазонов;*
- если в схеме происходит возбуждение, то необходимо использовать конденсаторы с меньшим значением емкости, а не большим;*
- в трудных случаях в цепях питания используйте последовательно включенные резисторы малого сопротивления или индуктивности;*
- развязывающие конденсаторы аналогового питания должны подключаться только к аналоговой земле, а не к цифровой.*