

Как (не)надо развязывать высокоскоростные операционные усилители

Bruce Carter

High Performance Linear Products

Аннотация

Развязка выводов питания высокоскоростных операционных усилителей – критически важный для работы схемы и, при этом, самый плохо понимаемый аспект проектирования. Ему редко уделяют должное внимание, притом даже, что это довольно просто. Данный документ показывает подводные камни процесса развязки питания и предлагает некоторые правильные подходы.

Введение

Развязка высокоскоростных устройств делается обычно без должной заботы. Проектировщики так торопятся включить прототип, что хватают горсть конденсаторов номиналом $0.1 \mu\text{F}$ или $0.01 \mu\text{F}$ из лабораторной кассы и считают, что дело сделано. Они думают, что они хорошие инженеры, которые решают проблемы высокочастотных наводок, заваливая их конденсаторами (и деньгами). Они размещают обязательные конденсаторы так, словно платят вменённый налог правительству.

Развязка питания требует, как минимум, столько же внимания, сколько требует расчёт фильтра или коэффициента усиления. Правильная методика фильтрации питания не сложнее любой другой проектной задачи. Разработчику нужна дисциплина и время, чтобы сделать всё, как положено. Хороший инженер должен бороться с искушением взять случайные конденсаторы из кассы или из первой попавшейся катушки в производственной зоне.

Если конденсатор используется для развязки питания, он включается, как шунтирующий элемент, чтобы отводить радиочастотную энергию из конкретной точки схемы на землю, минуя вывод питания. В идеале импеданс подключённого к земле конденсатора должен быть настолько низким, насколько возможно для частоты, требующей подавления. Очень важно знать частоты, создающие помехи, и выбирать для их подавления правильные конденсаторы.

Знай свой конденсатор!

Не все конденсаторы созданы равными. Конденсаторы из кассы номиналом $0.1 \mu\text{F}$ или $0.01 \mu\text{F}$ могут быть, а могут и не быть тем, что ожидается. Большая часть лабораторных остатков лишена этикеток с данными о производителе, точности, типе диэлектрика или частотных характеристиках. На высоких частотах работа конденсатора может заметно отличаться от низкоимпедансного высокочастотного шунтирования, как того хотел бы разработчик.

Импеданс конденсатора и его последовательный резонанс

Заблуждение номер 1: множество разработчиков считает, что ёмкость конденсатора не зависит от частоты. Это не так. Указываемое значение ёмкости нормируется при частоте, выбираемой производителем. Это значение почти постоянно при низких частотах, но может измениться более чем на порядок на высоких.

Из-за наличия паразитной индуктивности у конденсатора есть частота последовательного резонанса. Существует также и параллельный резонанс, который будет рассмотрен позднее. По мере приближения рабочей частоты к частоте последовательного резонанса значение ёмкости конденсатора растёт. В результате эффективное значение ёмкости становится больше номинального значения.

Нетрудно понять причины последовательного резонанса конденсатора – его высокочастотная модель содержит индуктивные компоненты:

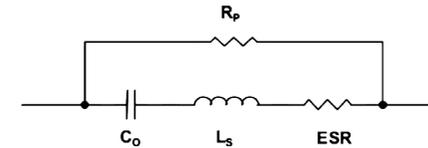


Рисунок 1. Высокочастотная модель конденсатора

где:

C_0 – номинальное значение ёмкости, нормируемое на частоте, задаваемой изготовителем;

L_s – эквивалентная последовательная индуктивность;

ESR – эквивалентное последовательное сопротивление;

R_p – параллельное сопротивление (утечки).

Эффективная ёмкость C_E – результат взаимодействия конденсатора и паразитной последовательной индуктивности L_s . Эквивалентное последовательное сопротивление ESR и сопротивление утечки R_p , показанные на рисунке 1, заметного влияния на эффективную ёмкость не оказывают, но влияют на Q (добротность) последовательного резонанса конденсатора. Эффективная ёмкость C_E определяется как:

$$C_E = \frac{C_0}{1 - (2\pi F_0)^2 L_s C_0}$$

Частота последовательного резонанса F_{SR} определяется как:

$$F_{SR} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C_0}}$$

Q – добротность (острота пика на АЧХ) резонансного контура – можно получить из следующего соотношения:

$$Q = \frac{|X_C - X_L|}{ESR \parallel R_p}$$

На частоте последовательного резонанса величины реактивного сопротивления C_0 и L_s равны и противоположны по знаку, а результирующее реактивное сопротивление равно нулю. На частоте собственного последовательного резонанса общий импеданс будет равен $ESR \parallel R_p$. Ёмкость на частоте последовательного резонанса не определена, а развязывающий конденсатор имеет самый низкий импеданс, который обычно измеряется в миллиомах (МОм). На частотах ниже частоты последовательного резонанса импеданс определяется ёмкостью, а выше – индуктивностью. По мере удаления от частоты резонанса импеданс конденсатора стремительно увеличивается и описывается формулой:

$$Z_C = \sqrt{(ESR \parallel R_p)^2 + (X_L - X_C)^2}$$

Рисунок 2 показывает частотную зависимость импеданса двух типичных конденсаторов.

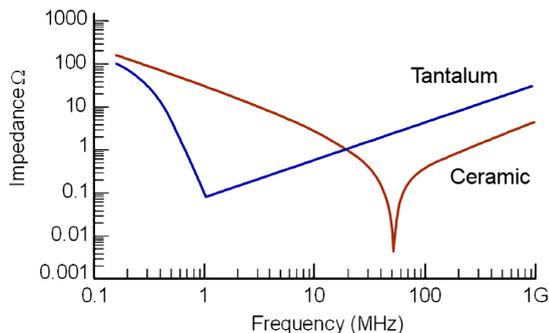


Рисунок 2. Типовые частоты последовательного резонанса конденсаторов

эффективно фильтровать питание системы, в которой присутствует множество частот. Для подавления различных частот следует запараллеливать разные конденсаторы.

Выше частоты последовательного резонанса конденсатор превращается в индуктивность, имеющую высокий импеданс на ВЧ-гармониках, которая будет противоречить самой идее фильтрующих конденсаторов. Это основная причина нежелательности установки «стандартных» конденсаторов ёмкостью 0.1 μF или 0.01 μF конденсаторов (с неизвестной датой производства) на печатную плату. Они убаюкивают разработчика, давая мнимое ощущение защищённости и уверенность, что вся работа по фильтрации питания сделана, в то время как компонент лишь занимает место на плате.

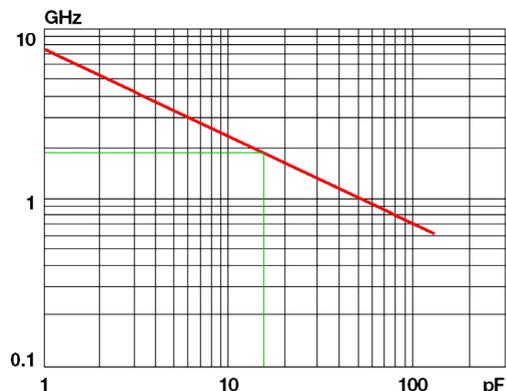


Рисунок 3. Выбор развязывающих конденсаторов

начает, что малейшая ошибка в частоте последовательного резонанса может менять коэффициент ослабления на порядки.

Для выбора конденсатора, подавляющего конкретную частоту, следует провести линию от интересующего значения на шкале частот до пересечения с графиком, после чего опустить её на шкалу значений ёмкости. В соответствии с графиком на рисунке 3 для подавления частоты 1.9 GHz правильным номиналом будет 15 pF.

Это значение не имеет ничего общего с бездумно выбираемыми ёмкостями 0.01 μF или 1000 pF и демонстрирует другое заблуждение.

Частота последовательного резонанса относительно низка и для разработчика высокочастотных схем является сигналом, предупреждающим о необходимости тщательного выбора развязывающих конденсаторов. Ниже следуют несколько рекомендаций.

Увеличить подавление нежелательной частоты можно, выбрав конденсатор с соответствующей ей частотой последовательного резонанса.

Не следует ожидать, что единственный конденсатор будет эффективно фильтровать питание системы, в которой присутствует множество частот.

Для подавления различных частот следует запараллеливать разные конденсаторы.

Выше частоты последовательного резонанса конденсатор превращается в индуктивность, имеющую высокий импеданс на ВЧ-гармониках, которая будет противоречить самой идее фильтрующих конденсаторов. Это основная причина нежелательности установки «стандартных» конденсаторов ёмкостью 0.1 μF или 0.01 μF конденсаторов (с неизвестной датой производства) на печатную плату. Они убаюкивают разработчика, давая мнимое ощущение защищённости и уверенность, что вся работа по фильтрации питания сделана, в то время как компонент лишь занимает место на плате.

Большинство производителей публикуют параметры последовательного резонанса своих конденсаторов в виде графика зависимости ёмкости от частоты. Множество линий, встречающихся иногда на графиках, относятся к различным размерам корпусов.

Очень важно понимать, что у СВЧ-конденсаторов добротность (Q) может измеряться сотнями. Это означает, что малейшая ошибка в частоте последовательного резонанса может менять коэффициент ослабления на порядки.

Для выбора конденсатора, подавляющего конкретную частоту, следует провести линию от интересующего значения на шкале частот до пересечения с графиком, после чего опустить её на шкалу значений ёмкости. В соответствии с графиком на рисунке 3 для подавления частоты 1.9 GHz правильным номиналом будет 15 pF.

Это значение не имеет ничего общего с бездумно выбираемыми ёмкостями 0.01 μF или 1000 pF и демонстрирует другое заблуждение.

Заблуждение номер 2: Большинство разработчиков думает, что при подозрении на плохую развязку питания увеличение номинала конденсатора улучшит подавление. Истина находится в прямо противоположном направлении. При подозрениях на недостаточность фильтрации на высоких частотах следует уменьшать номинал конденсатора (а ещё лучше разобраться на досуге с частотой последовательного резонанса).

Правильная развязка высокочастотных операционных усилителей не сложнее создания набора высокочастотных конденсаторов и выбора нужных значений по графику.

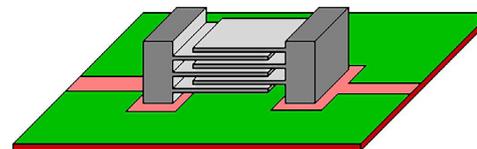
Если в схеме присутствует более одной частоты (или более одной полосы частот), для корректной развязки может потребоваться несколько конденсаторов, каждый из которых предназначен для подавления своей частоты.

Параллельный резонанс

У конденсаторов есть также частота параллельного резонанса, определяемая его конструкцией и способом монтажа на плату. Есть только одна частота последовательного резонанса, но бесконечный ряд частот параллельного резонанса. В грубом приближении первая частота параллельного резонанса приблизительно в два раза выше, чем частота последовательного.

В то время как на частоте последовательного резонанса импеданс конденсатора минимален, на частотах параллельного резонанса он максимален. Таким образом, если последовательный резонанс можно использовать, то на частоте параллельного резонанса конденсатор совершенно бесполезен.

Механизм возникновения параллельного резонанса прост. На рисунке 4 показан разрез конденсатора на печатной плате.



4. Конденсатор на печатной плате

Конденсатор представляет собой набор параллельных пластин. Собираясь вместе эти пластины образуют эффективную ёмкость C_E , а на высоких частотах, где на проводимость начинает заметно влиять скин-эффект, появляется паразитная межпластинная ёмкость. Вдобавок, из-за того, что большинство конденсаторов монтируется на печатную плату горизонтально, существует паразитная ёмкость между горизонтальными пластинами и слоями земли и питания.

Для высоких частот эквивалентная модель модифицируется с учётом эффектов параллельного резонанса:

Для высоких частот эквивалентная модель модифицируется с учётом эффектов параллельного резонанса:

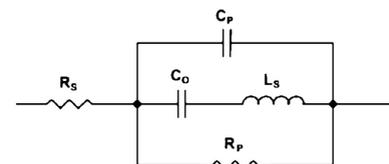


Рисунок 5. Высокочастотная модель конденсатора

Элемент C_p представляет на схеме суммарный вклад каждой пары пластина-полигон конденсатора и печатной платы. Амплитудно-частотная характеристика данной схемы представлена на рисунке 6. Резонансы видны в виде локальных провалов.

лов на графике, размах которых определяется импедансом источника и нагрузки. Размерность вертикальной шкалы пропущена намеренно, как как она очень сильно меняется от нагрузки. Нули графика указывают на частоты резонансов.

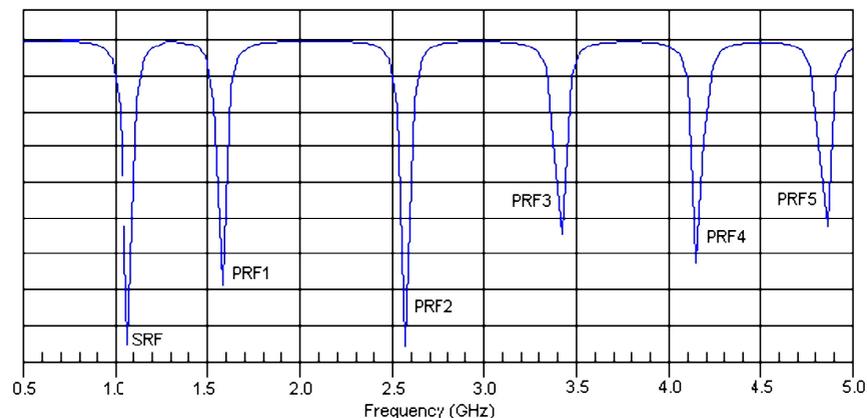


Рисунок 6. АЧХ конденсатора

Первая частота параллельного резонанса (F_{PR1}) располагается очень близко к частоте последовательного резонанса (F_{SR}), что для разработчика является указанием на тот неприятный факт, что допуск номинала конденсатора легко может поменять ослабляющие свойства на частоте F_{SR} на нечто совершенно противоположное при частоте F_{PR1} . От F_{PR1} необходимо избавляться!

К счастью, исключить F_{PR1} и все нечётные резонансы очень легко. Для этого достаточно монтировать конденсатор боковой стороной, разворачивая его внутренние пластины перпендикулярно печатной плате*.

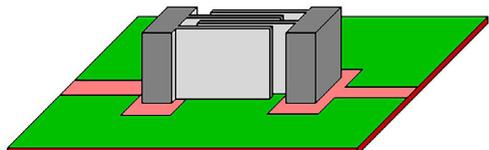


Рисунок 7. Конденсатор, смонтированный вертикально

Этот приём исключает паразитные ёмкости между пластинами конденсатора и слоями питания печатной платы. Итоговый спектр показывает, что F_{PR1} и все нечётные резонансы исчезли.

АЧХ показывает, что теперь конденсатор пригоден для использования в гораздо большем диапазоне частот выше F_{SR} , несмотря на преимущественно индуктивный импеданс в этой области. Первая область высокого импеданса появляется на частоте F_{PR2} , то есть почти в 2.5 раза выше чем частота F_{SR} .

АЧХ показывает, что теперь конденсатор пригоден для использования в

некоторых производителях высокочастотных конденсаторов такие, как Johanson, предоставляют программное обеспечение, вычисляющее частоты собственных резонансов их изделий. Такой инструмент может серьёзно облегчить проектирование развязки питания или любых других высокочастотных устройств, чувствительных к характеристикам конденсаторов.

Монтаж конденсаторов указанным способом запускает процесс переобучения монтажного и контролирующего персонала, которому необходимо изменить взгляд на высокочастотные схемы.

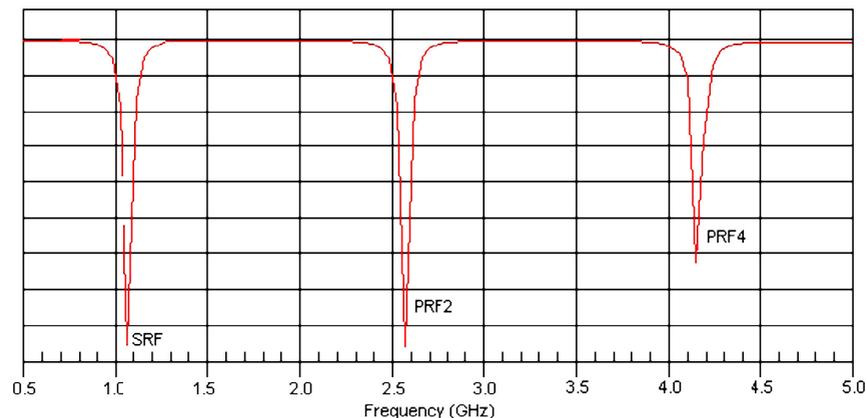


Рисунок 8. АЧХ конденсатора, смонтированного вертикально

ТИПЫ КОНДЕНСАТОРНЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Так же, как внутреннее устройство и ориентация пластин конденсатора влияет на частоты резонансов, применяемый диэлектрик меняет характеристики конденсатора. Диэлектрик – материал, изолирующий пластины, и его свойства влияют на качество конденсатора. Следующие данные взяты у одного из производителей:

Таблица 1. Характеристики диэлектриков

Тип диэлектрика	Характеристика	Класс EIA	Температурный коэффициент	Диапазон
NPO или COG	Очень стабильные	I	± 30 PPM	-55 to +125 °C
X7R	Так себе	II	$\pm 15\%$	-55 to +125 °C
Z5U		III	+22/-56%	+10 to +85 °C
Y5V		III	+22/-82%	-30 to +85 °C

Обычные лабораторные каски полны конденсаторами с диэлектриком X7R или хуже, так как они дешевле, чем требуемые NPO (называемые также COG). Используемые для развязки конденсаторы номиналом 0.1 μF или 0.01 μF являются реликтами эпохи дискретных цифровых микросхем. У автора имеются несколько примеров цифровых конструкций образца 60-х годов прошлого века с дисковыми керамическими конденсаторами номиналом 0.1 μF , выстроенных ровными рядами между цифровых микросхем. Красующаяся на каждом конденсаторе точность $\pm 20/-80\%$ указывает на диэлектрик типа Y5V. Частота, на которой работали эти платы, не превышала нескольких мегагерц. С тех пор рабочие частоты как цифровых, так и аналоговых схем, увеличились в тысячи раз, но их питание продолжают фильтровать конденсаторы 0.1 μF Y5V. Пришло время для изменения подхода к проектированию развязки питания. И самым правильным действием будет перенос остатков этих якобы развязочных конденсаторов в мусорную корзину. Фильтрация питания высокочастотных цепей требует использования NPO/COG конденсаторов.

Цена NPO/COG конденсаторов быстро растёт с ростом значения ёмкости, но, к счастью, большие значения ёмкости требуются редко.

* Возможно, что именно для этого чип-конденсаторы, в отличие от чип-резисторов, имеют металлизацию на боковых сторонах.

А КАК НАСЧЁТ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИХ КОНДЕНСАТОРОВ?

Как вы, возможно, заметили, нигде в ходе предыдущего обсуждения ничего не говорилось об электролитических конденсаторах. На то есть серьёзная причина. Электролитические конденсаторы независимо от того, алюминиевые они или танталовые, являются очень низкочастотными компонентами. Частоты их собственного резонанса ограничены диапазоном 100 kHz – 1 MHz, и, соответственно, такие конденсаторы не подходят для высокочастотной фильтрации. Основное их предназначение – подавление шума переключения источников питания, который находится в указанном диапазоне.

Электролитические конденсаторы часто можно видеть в цифровых устройствах, которые столь же часто запитываются от импульсных источников питания. Большие цифровые системы часто потребляют многие ватты мощности и предъявляют к источникам питания повышенные требования. Импульсные источники компактны, легки, эффективны и, соответственно, имеют большую мощность в малом объёме при умеренном тепловыделении. А их недостатками являются пульсации и шум. Пульсации – следствие переменного напряжения силовой сети*, а шум – следствие работы входной части источника питания, занимающейся весьма шумным преобразованием переменного напряжения в постоянное*.

Частоты, на которых используются электролитические конденсаторы, находятся ниже 1 MHz. Если разработчик уверен в их наличии, то электролитические конденсаторы необходимы, в противном случае нужды в них нет. Хорошим примером является сотовый телефон. Во время работы он питается от батареи, а во время зарядки – от линейного источника. Если внутри телефона нет DC–DC преобразователей, то нет и необходимости подавлять шумы их переключения. Если преобразователь всё же используется, то он может работать на частоте большей, чем 1 MHz, на которой электролитические конденсаторы не работают. А вот если телефон работает рядом с радиопередатчиком АМ диапазона, электролитический конденсатор может быть необходим для подавления наводимых через гарнитуру радиочастотных помех. Для выбора правильной стратегии фильтрации необходим анализ конструкции и условий использования.

Texas Instruments ставит электролитические конденсаторы на отладочные платы, так как есть шанс, что они будут запитываться от импульсного источника, либо работать рядом с АМ радиостанцией. Большая часть лабораторного оборудования хорошо экранирована от радиочастотных наводок, а большинство лабораторных источников питания – линейные. Таким образом наличие электролитических конденсаторов не-обходимостью не является.

Есть несколько причин для отказа от электролитических конденсаторов:

- Большинство электролитических конденсаторов поставляются производителями напрямую и имеют большие сроки поставки.
- Электролитические конденсаторы – крупные компоненты, что приводит к удлинению печатных проводников рядом с ними, в то время как высокочастотное конструирование требует всемерного укорочения проводников для уменьшения паразитных ёмкостей и индуктивностей. Чтобы не приходилось искривлять лишний раз проводники на печатной плате, на ней следует оставить только абсолютно необходимые компоненты. В первую очередь следует удалять крупные компоненты, к коим относятся электролитические конденсаторы.
- Контактные площадки, требуемые для удержания электролитических конденсаторов, нарушают ширину и расположение дорожек и переходных отверстий, открывая возможности для проникновения радиочастотных наводок в устройство в точке расположения конденсатора.

* Так в тексте.

КАК НАДО РАСПОЛАГАТЬ ФИЛЬТРУЮЩИЕ КОНДЕНСАТОРЫ НА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ

После того, как правильный конденсатор был выбран, его следует правильно разместить на плате, в противном случае все усилия по выбору будут напрасны.

ИНДУКТИВНОСТЬ ПРОВОДНИКОВ

Производители полупроводниковых компонентов частично ответственны за плохо совместимые с высокими частотами приёмы проектирования. Рассмотрим корпус DIP-14. Вывод питания располагается в противоположном углу корпуса по диагонали от вывода земли. Существует очень мало способов подключения фильтрующего конденсатора.

- Конденсатор ставится рядом с выводом питания. В результате удлиняется земляной проводник, а доступ к левой стороне корпуса ограничивается одним слоем платы.
- Конденсатор ставится рядом с выводом земли. В результате удлиняется провод питания и ограничивается доступ к правой стороне корпуса.

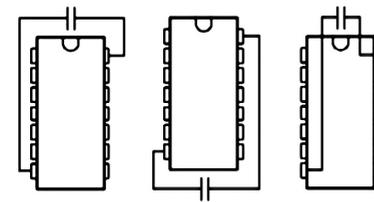


Рисунок 9. Традиционные способы подключения развязочных конденсаторов

- Соединения, проводимые под микросхемой, открывают доступ к обеим сторонам корпуса, но блокируют область под микросхемой и не влияют на длину соединения.

- Конденсатор может быть помещён на обратную сторону платы (не показано). У такого варианта самые короткие соединения, получаемые за счёт отказа от ортогональной разводки. И, всё равно, общая длина трасс превышает сантиметр.

Вне всяких сомнений, самой неприятной проблемой большой длины соединений является индуктивность проводников. Индуктивность проводника на печатной плате может быть приблизительно рассчитана по формуле:

$$L = 2x \cdot \left(\ln \left(\frac{2x}{w+h} \right) + 0.2235 \left(\frac{w+h}{x} \right) + 0.5 \right), \text{ nH}$$

где:

- x – длина проводника в сантиметрах;
- w – ширина проводника в сантиметрах;
- h – высота проводника в сантиметрах.

Индуктивность проводника почти не зависит от высоты трассы по сравнению с её шириной, но и ширина должна сильно измениться для заметного изменения индуктивности. Основное же воздействие вносит длина. Обычные печатные проводники имеют погонную индуктивность в пределах 6..12нН на сантиметр.

Это очень плохое известие для разработчика высокочастотных устройств. Например, предположим:

- сотовый телефон, в котором требуется фильтровать частоту 1.9 GHz;
- погонная индуктивность проводника 6 нН/см;
- длина печатных проводников до конденсатора 1.5 см;
- конденсатор ёмкостью 30pF с эффективной ёмкостью (C_E) 27.77 pF и паразитной индуктивностью (L_C) 0.23 нН.

Первым делом, используем модель для частоты последовательного резонанса и

вычислим частоту последовательного резонанса (F_{SR}) конденсатора, которая оказывается равной 1.92 GHz, что идеально для сотовых телефонов. Но подождите! Последовательно с конденсатором добавляется индуктивность. Если 9 nH добавить к паразитной индуктивности конденсатора (L_S), то частота последовательного резонанса становится равной 314 MHz. Такой вариант разводки печатной платы совершенно неприемлим. Мораль ясна: индуктивности проводников следует избегать любой ценой, так как она изменяет частоту последовательного резонанса конденсатора.

Приведённый пример слегка утрирован. Очень немногие разработчики будут всерьёз рассматривать использование микросхемы в корпусе DIP-14 в сотовом телефоне. Современные микросхемы предназначены для поверхностного монтажа и у многих выводы питания расположены в более удобных местах. У перехода на поверхностный монтаж есть дополнительный плюс – уменьшение геометрических размеров соединений. Но одно только уменьшение размеров проблему не решает. Индуктивность печатных проводников столь велика, что трассы практически любой длины портят тщательный выбор конденсатора. К счастью, большинство печатных плат для высоких частот сейчас делается многослойными с отдельными слоями земли и питания. Переходные отверстия на слои питания следует располагать как можно ближе к контактной площадке конденсатора. Наилучшим вариантом было бы совмещать переходное отверстие с площадкой.

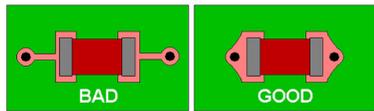


Рисунок 10. Варианты переходных отверстий

Даже пара лишних миллиметров, как показано в плохом (BAD) примере на рисунке 10, добавляет 1.2 nH к паразитной индуктивности (L_S) конденсатора. Печатные проводники, используемые для подключения развязывающего конденсатора, просто не позволяют ему работать!

Самое лучшее, что может делать разработчик, это всемерно уменьшать длину соединения, смещая переходное отверстие ближе к компоненту и увеличивая ширину трассы насколько возможно.

Индуктивность переходных отверстий

Вместе с переходным отверстием на плате появляется паразитная индуктивность. Индуктивность (L) переходного отверстия диаметром (d) и высотой (h) может быть посчитана по приблизительной формуле:

$$L \approx \frac{h}{5} \cdot \left(1 + \ln \left(\frac{4h}{d} \right) \right), \text{ nH}$$

Например, отверстие диаметром 0.4 mm сквозь плату толщиной 1.5 mm имеет индуктивность 1.1 nH. Это ещё одна отвратительная новость для разработчиков высокочастотных схем.

Есть три способа борьбы с индуктивностью переходных отверстий:

- многие изготовители печатных плат предлагают прожиг переходных отверстий лазером, что позволяет создавать микроотверстия диаметром от 0.15 mm и менее, вплоть до 0.025 mm;
- слепые переходные отверстия имеют меньшую высоту и, соответственно, индуктивность;
- параллельное расположение нескольких отверстий (индуктивностей) уменьшает результирующую индуктивность.

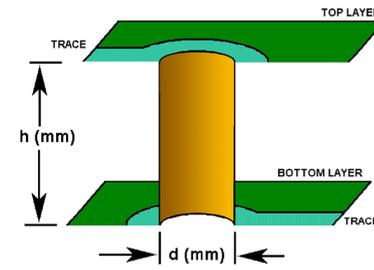


Рисунок 11. Переходное отверстие в разрезе

Данный факт может существенно уменьшить стоимость печатной платы, потому что диаметр 0.15 mm является нижним пределом общеупотребительной технологии сверления и позволяет отказаться от лазерного прожига и специальных методов металлизации отверстий диаметром 0.025 mm.

Альтернативный подход

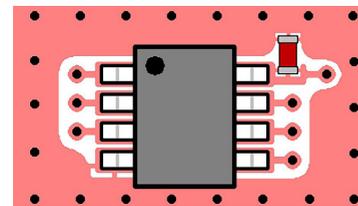


Рисунок 12. Разводка печатной платы с использованием техники, применяемой в радиочастотных устройствах

Если предыдущий пример изменить на два слепых микроотверстия диаметром 0.025 mm высотой $h = 0.15$ mm (соседние слои десятислойной печатной платы), то индуктивность переходного соединения уменьшится до 0.063 nH.

Высота отверстия – основной параметр, влияющий на результат, поэтому слепое отверстие предпочтительнее микроотверстия. Одно слепое микроотверстие диаметром 0.15 mm и высотой $h = 0.15$ mm (соседние слои десятислойной платы) имеет индуктивность 0.072 nH.

Если по каким-либо причинам лазерная технология неприемлива, можно воспользоваться приёмами, применяемыми для подавления паразитной индуктивности при разработке радиочастотных устройств. Эти приёмы не обязательно подавляют индуктивность, но они перемещают её туда, где она не оказывает влияния на параметры устройства.

В примере на рисунке 12 используются некоторые приёмы, которые могут смутить случайного наблюдателя:

- Используется многослойная плата с внутренними слоями земли и питания.
- Многочисленные переходные отверстия по периметру схемы идут на слой земли. Паразитные индуктивности переходных отверстий включаются параллельно, что уменьшает общую величину паразитной индуктивности.
- Сигнальные выводы подключены к компонентам на обратной стороне платы через переходные отверстия. Небольшие схемы, возможно, уместятся на верхней стороне.
- Земляной слой подключается к микросхеме и развязывающему конденсатору в верхнем слое через термобарьер. Термобарьер действует, как проводник, и добавляет индуктивности, но он необходим по технологии пайки.
- Питание подключается через переходное отверстие, но отверстие и его паразитная индуктивность проявляется до конденсатора, который подключён прямо к контактной площадке микросхемы. Таким образом паразитная индуктивность переходного отверстия и проводника не влияют на частоту собственного резонанса конденсатора. На самом деле, эта индуктивность даже помогает, увеличивая импеданс вывода питания на высоких частотах.
- Конденсатор следует монтировать вертикально (боковой стороной вниз).
- Конденсатор подключается к выводу микросхемы через термобарьер.
- Отдельные слои питания и земли добавляют в схему распределённую ёмкость, улучшая подавление широкополосного шума.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развязка питания схем на высокоскоростных операционных усилителях требует совсем немного дополнительной работы. Конденсаторы следует выбирать в соответствии с их характеристиками на высоких частотах, включая частоту собственного резонанса. Монтировать их следует боковой стороной вниз, чтобы исключить ёмкость паразитной связи с платой. Переходные отверстия и печатные проводники следует использовать с осторожностью, так как они добавляют к паразитной индуктивности конденсатора собственную паразитную индуктивность.

ВИБЛИОГРАФИЯ

0. Оригинальная публикация.
1. Capacitors in Bypass Applications, Richard Fiore, American Technical Ceramics, www.atceramics.com
2. Effective Capacitance vs Frequency, Richard Fiore, American Technical Ceramics, www.atceramics.com
3. Decoupling Basics, Arch Martin, AVX Corporation
4. SRF & FPR for RF Capacitors, Johansen Technology
5. Ask The Applications Engineer, James Bryant, Analog Devices