

Разводка питания и развязка по питанию для печатных плат

Хорошие способы развязки позволяют сократить количество развязывающих конденсаторов. Главным является правильный выбор конденсаторов и грамотная разводка.

1. ТОКИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ЛОГИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ

Не секрет, что при смене логических состояний у большинства цифровых устройств возникает большой бросок тока, который следует сразу за фронтом тактового сигнала (рис. 1).

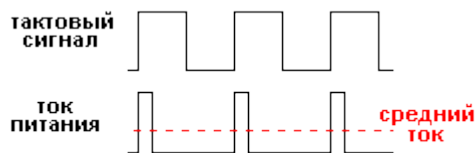


Рис.1. Мгновенный ток цифровой схемы

Например, схеме, работающей на частоте 100 МГц и потребляющей в среднем около 4 А, реально может потребоваться 20 А тока в течение первых нескольких наносекунд тактовой последовательности. (Причина возникновения больших токов при смене логических состояний рассмотрена в статье Б. Картера ["Техника разводки печатных плат"](#))

Очевидно, что питание этой схемы от 20-амперного источника увеличит размеры и стоимость изделия. Менее очевидно, что паразитные последовательные индуктивности соединительных проводов, проводников печатной платы и выводов компонентов могут сделать невозможным быструю ответную реакцию мощного источника питания на мгновенные изменения тока. С другой стороны, недостаточная нагрузочная способность источника будет приводить к возникновению нестабильных падений напряжений на шинах питания и земли. Это явление обычно проявляется как высокочастотный шум.

2. ПРИМЕНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ В КАЧЕСТВЕ ЭЛЕМЕНТОВ РАЗВЯЗКИ ПИТАНИЯ

Применение развязывающих конденсаторов позволяет распределить рабочий ток между потребителями, используя низкоимпедансные (т.е. низкоиндуктивные для токов ВЧ) пути прохождения тока. Практически это означает, что развязывающие конденсаторы непосредственно обслуживают цифровые компоненты, в то время как источник питания занимается их перезарядом. Ключом к созданию работоспособной и удачной схемы развязки является правильный выбор применяемых конденсаторов и правильная разводка цепей их подключения.

Использование конденсаторов в качестве элементов развязки требует понимания основ их работы. На рисунке 2а показан идеальный конденсатор - емкость для накопления и хранения заряда и для освобождения от него. На рисунке 3 приведена частотная зависимость импеданса идеального конденсатора - монотонное уменьшение значения при увеличении частоты. Поскольку основной шум цифровых систем является высокочастотным шумом (>50 МГц), уменьшение импеданса на высоких частотах хорошо соответствует задаче развязки цепей питания.

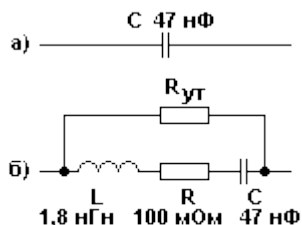


Рис.2. Идеальный (а) и реальный (б) конденсатор

К сожалению, поведение реального конденсатора не такое простое; его модель показана на рисунке 2б. Физическое устройство реального конденсатора включает в себя эквивалентное последовательное сопротивление (ESR) и эквивалентную последовательную индуктивность (ESL). К тому же, реальный конденсатор обладает сопротивлением утечки. Сумма этих паразитных эффектов приводит к изменению характера частотной зависимости импеданса (рис. 3).

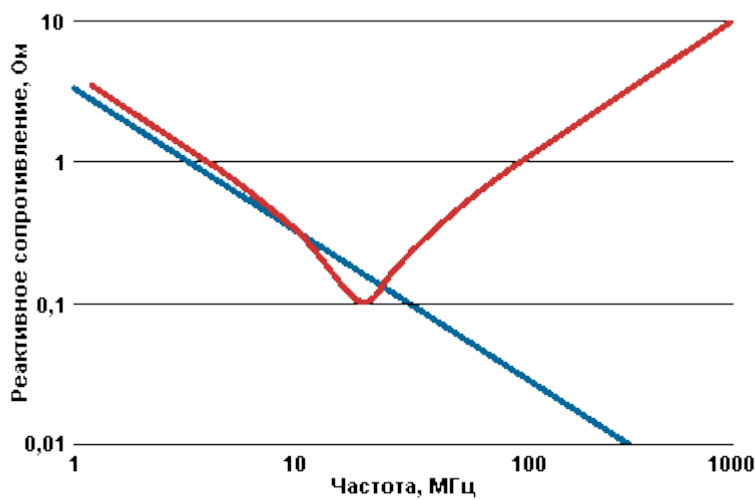


Рис.3. Зависимость импеданса от частоты для идеального и реального конденсатора

Низшая точка импедансной зависимости известна как частота собственного резонанса. Разработчики часто пытаются подобрать конденсаторы с собственной резонансной частотой, находящейся близко от рабочей частоты системы. Однако, параметры реальных конденсаторов делают этот подбор нецелесообразным при тактовой частоте, превышающей 100 МГц. Важное правило, которое следует помнить: развязывающие конденсаторы допустимо использовать на частотах более низких, чем частота их собственного резонанса, до тех пор, пока их импеданс на этих частотах остается достаточно низким.

Падение напряжения на эквивалентном последовательном сопротивлении конденсатора пропорционально протекающему через него току. Поскольку важным является поддержание питающего напряжения стабильным, желательным является использование в цепях развязки конденсаторов с малым ESR (т.е. с меньшим, чем 200 мОм). Эквивалентная последовательная индуктивность определяет скорость реагирования конденсатора на изменения тока - конденсаторы с более низким значением ESL будут реагировать более быстро на изменения протекающего тока, что очень важно для цепей высокочастотной развязки. Несмотря на то, что, как параметр ESR более широко описан и изучен, ESL, наверное, более важен. Все конденсаторы для поверхностного монтажа, приведенные в таблице 1, обладают достаточно низкими значениями ESL.

Эквивалентное сопротивление и индуктивность конденсаторов		
Типоразмер	ESL min (нГн)	ESL max (нГн)
0402	0,54	1,90
0603	0,54	1,95
0805	0,70	1,94
1206	1,37	2,26
1210	0,61	1,55
1812	0,91	2,25
с радиальными выводами	6,0	15,0
с осевыми выводами	12,0	20,0

Конденсаторы с материалом типа I в качестве диэлектрика не ухудшают свои характеристики от времени и воздействия температуры, но малое значение диэлектрической постоянной делает их использование в качестве компонентов развязки неэффективным. Конденсаторы с материалом II типа (т.е. X7R) являются более хорошим выбором из-за хорошей долговременной стабильности (10% потерь в течение 10 лет), температурных характеристик и высокого значения диэлектрической постоянной. Материал типа III обладает наивысшим значением диэлектрической постоянной и плохими температурными показателями (от 50 до 75% потерь при работе на предельных температурах) и плохой долговременной стабильностью (20% потерь в течение 10 лет). Среди популярных диэлектриков многослойная керамика и синтетика обладают небольшими эквивалентными последовательными индуктивностью и сопротивлением. Керамические конденсаторы более легко доставаемы. Танталовые

конденсаторы часто используются как общие элементы развязки по низкой частоте, однако они не подходят для локальной развязки.

В таблице 1 показаны типичные значения ESL для различных типов корпусов конденсаторов. Типоразмер является определяющим элементом эквивалентной последовательной индуктивности - обычно конденсатор меньшего размера обладает меньшим значением ESL при таком же значении емкости. Конденсаторы с большими значениями ESL не годятся для использования в качестве элементов развязки.

В общем случае, правильной стратегией является поиск конденсатора с наибольшей емкостью при наименьших габаритных размерах (это верно лишь с точки зрения ESL, но не всегда правильно с точки зрения другого важнейшего параметра конденсаторов - диэлектрической абсорбции - прим. переводчика). Однако при таком выборе необходимо быть внимательным. Высота корпуса конденсатора в достаточно значительной мере оказывает влияние на ESL. Для перекрывающихся диапазонов ESL в таблице 1 возможен выбор корпуса с меньшим посадочным местом на печатной плате. Однако значение ESL может оказаться большим. Поэтому при выборе типа конденсатора необходимо руководствоваться параметрами производителя для определения лучшего компромиссного варианта.

3. ИНДУКТИВНОСТЬ ПРОВОДНИКА

При разводке компонентов и цепей основным препятствием хорошей развязки является индуктивность. С весьма грубыми приближениями можно считать, что индуктивность трассы с волновым сопротивлением 50 Ом на материале FR-4 будет составлять около 9 пГн на каждые 0,025 мм длины. Индуктивность одиночного переходного отверстия примерно равняется 500 пГн и зависит от геометрической конфигурации.

Индуктивность пропорциональна длине, поэтому важно минимизировать длину проводника между выводами компонента и развязывающего конденсатора. Индуктивность обратно пропорциональна ширине трассы, поэтому широкие проводники более предпочтительны, чем узкие. Помните, что путь тока всегда представляет собой петлю, и эта петля должна быть минимизирована. Уменьшение расстояния между выводом питания компонента и выводом конденсатора может и не уменьшить общую индуктивность. Как правильно расположить конденсатор? Ближе к выводу питания компонента? Или ближе к выводу земли? Или посередине между этими выводами? Некоторые источники рекомендуют располагать конденсатор вблизи от вывода, наиболее удаленного от полигона питания или земли.

4. ВАРИАНТЫ РАЗВОДКИ КОНДЕНСАТОРОВ РАЗВЯЗКИ

Хорошая разводка чрезвычайно важна для эффективной работы цепей развязки. Как видно из таблицы 1, конденсаторы со значением эффективной последовательной индуктивности менее 1 нГн вполне доступны. Добавление всего лишь 2 нГн утроит значение ESL конденсатора. Рисунок 4 демонстрирует изменение частоты собственного резонанса и увеличение интегрального реактивного сопротивления при добавлении индуктивности проводника в 2 нГн к собственной индуктивности (0,8 нГн) конденсатора емкостью 4,7 нФ.

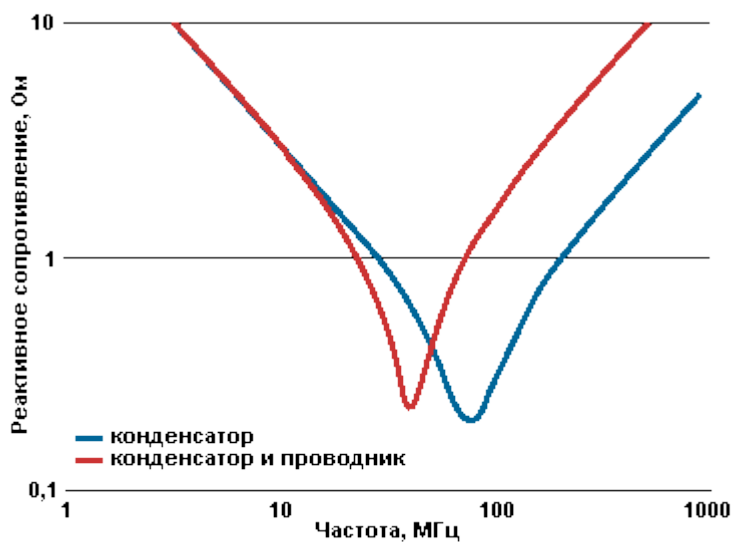


Рис.4. Воздействие индуктивности проводника на характеристики конденсатора

На рисунке 5 показано несколько методов размещения и подключения конденсатора развязки. Для упрощения на схемах показаны лишь выводы конденсатора и вывод питания активного компонента. Соединению между выводом конденсатора и общим выводом питания компонента также должно быть уделено значительное внимание.

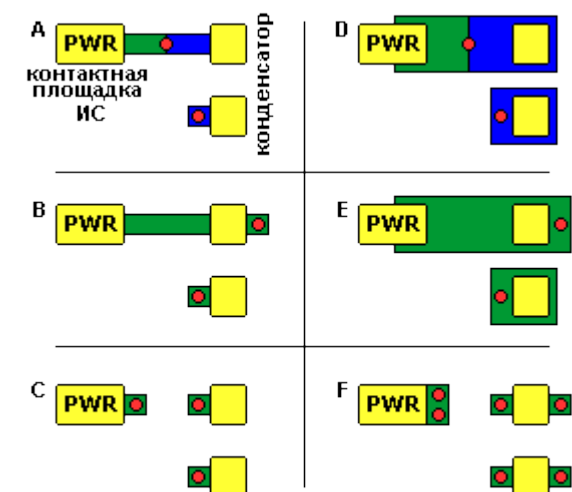


Рис.5. Варианты подсоединения развязывающего конденсатора

На рисунке 5А показана наиболее часто встречающаяся конфигурация разводки. Вывод питания компонента подключен коротким проводником к шине питания во внутреннем слое через переходное отверстие. Конденсатор развязки, расположенный на другой стороне платы, подключен к этому же переходному отверстию. Несмотря на то, что такой подход часто обуславливается простотой разводки, он позволяет эффективно работать цепям развязки и экономит пространство разводки. Два одиночных отверстия добавляют в цепь развязки около 1 нГн паразитной индуктивности.

Если конденсатор расположен на расстоянии 50 мил (1,27 мм) от вывода компонента, то добавляемая индуктивность в лучшем случае составит около 0,9 нГн. При более удаленном размещении конденсатора от активного компонента проводники будут более длинными, а паразитная индуктивность будет иметь большее значение.

Вариант В представляет собой значительное улучшение варианта А с размещением конденсатора развязки и активного компонента на одной стороне печатной платы. Конденсатор подключен после паразитной индуктивности переходного отверстия. При достаточно коротких проводниках схема развязки вносит дополнительно менее 1 нГн паразитной индуктивности.

Вариант D представляет собой развитие варианта А - для уменьшения собственной индуктивности и увеличения распределенной емкости проводники сделаны шире, что также улучшает характеристики цепи развязки.

Вариант Е - модификация варианта В с более широкими проводниками и более хорошими характеристиками.

На первый взгляд кажется, что вариант С совершенно не подходит для разводки цепей развязки, поскольку нет проводников, напрямую подключающих активный компонент к конденсатору развязки; фактически они оба подключены через отверстия к полигонам питания и земли, которые расположены во внутренних слоях. При четырех отверстиях к цепям развязки добавится минимум 2 нГн паразитной индуктивности. Однако очень широкие проводники питания и земли практически не будут добавлять индуктивности при не очень большой длине. Такой вариант разводки пригоден, когда конденсатор развязки не может быть размещен достаточно близко к активному компоненту.

Вариант F - улучшение варианта С добавлением дополнительных параллельных отверстий. Такое добавление приводит к уменьшению паразитной индуктивности переходных отверстий в два раза, позволяет улучшить качественные характеристики схемы и должно использоваться всякий раз, когда позволяет место.

5. ПРИМЕНЕНИЕ СОСТАВНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Поскольку емкости при параллельном соединении суммируются, а результирующая индуктивность уменьшается, то параллельное соединение двух небольших конденсаторов с одинаковыми значениями емкости может привести к качественному выигрышу, по сравнению с применением одного большого конденсатора. Конечным результатом будет такая же емкость развязки и меньшая паразитная эквивалентная последовательная индуктивность.

На практике обычно избегают использования конденсаторов с разными значениями емкостей для создания локальной развязки. Составные конденсаторы с разными емкостями обладают частотной зависимостью импеданса, складывающейся из частотных зависимостей импедансов отдельных конденсаторов. Пример показан на рисунке 6.

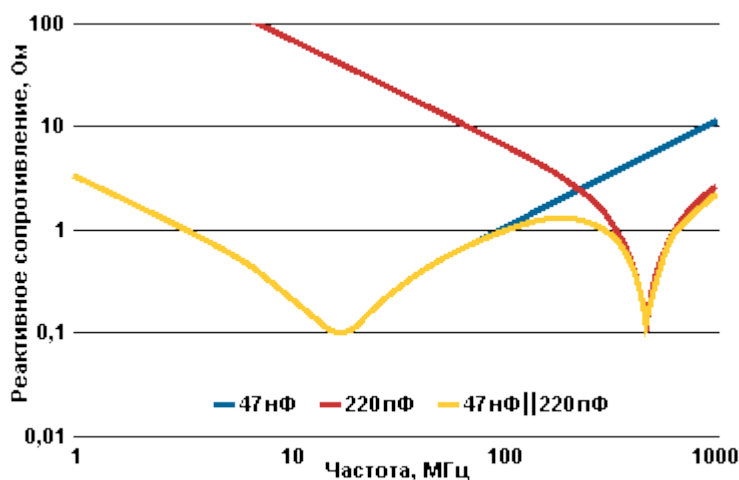


Рис.6. Ожидаемый результат объединения конденсаторов с разными значениями емкости – уменьшение импеданса

Конденсатор емкостью 47 нФ используется для развязки низких частот, а конденсатор емкостью 150 пФ - для высоких. На первый взгляд, можно предположить, что параллельное соединение этих конденсаторов позволит улучшить импедансную характеристику.

К сожалению, это не так. Такое соединение может породить существенные проблемы на частотах, находящихся между собственными резонансными частотами конденсаторов. На рисунке 7 видно, что комбинация двух конденсаторов создает антирезонансный пик (а, следовательно, повышенное сопротивление) на суммарной частотной характеристике.

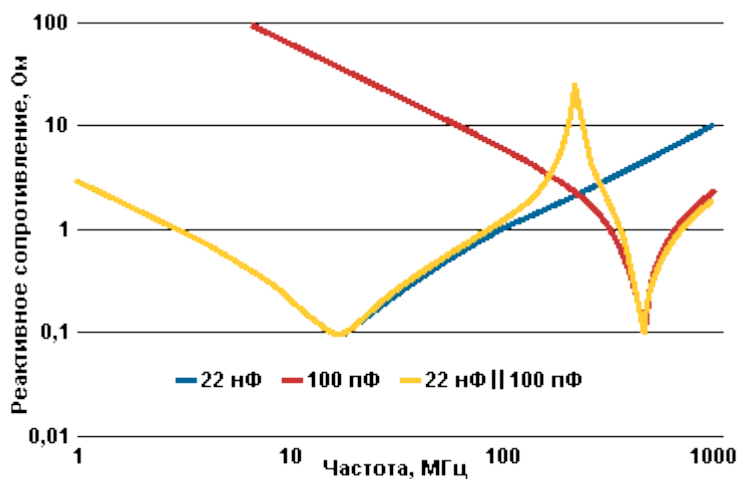


Рис.7. Фактический результат объединения конденсаторов с разными значениями емкости – резонансный пик

Источник данной проблемы легко определяется при рассмотрении эквивалентной схемы, показанной на рисунке 8. Результатом соединения паразитных компонентов конденсаторов является классический резонансный контур.

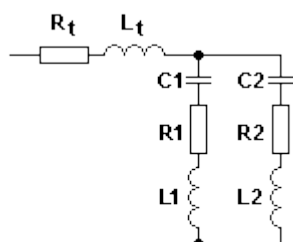


Рис.8. Параллельное соединение конденсаторов – образование резонансного контура

Тем не менее, составные конденсаторы, используемые в качестве элементов развязки, достаточно широко используются в прецизионных схемах. В этом случае к выбору конденсаторов необходимо подходить с большой тщательностью, моделируя схемы, включающие все паразитные компоненты.

Joe Thompson
Decoupling Strategies for PCBs
PCD&M, October 2003

Благодарим сайт elart.narod.ru за предоставленный перевод