

## Особенности размещения развязывающего конденсатора и эффективный радиус действия

*С.П. Семенов, С.А. Батин, Д.В. Вертянов, С.П. Тимошенко*

*Национальный исследовательский университет  
«Московский Институт Электронной Техники»*

**Аннотация:** В рамках работы исследовано влияние паразитных параметров развязывающего конденсатора и топологии подключения к шине питания, земли на его эффективный радиус действия. Показана методика расчета эффективного радиуса действия этого конденсатора. Определено смещение резонансной частоты у подключенного развязывающего конденсатора с учетом паразитных параметров топологии.

**Ключевые слова:** система распределения питания, развязывающий конденсатор, частота саморезонанса, частота антирезонанса, эффективный радиус действия, паразитные параметры, топология.

### Введение

Конденсаторы широко используются в современной электронике для обеспечения развязки в системах распределения питания (СРП). Развязка - средство преодоления физических и временных ограничений, имеющих в СРП электронных узлов, с целью снижения уровня коммутационных помех [1].

Основные функции развязки и системы распределения питания следующие:

- подавление помех, генерируемых интегральной микросхемой.
- обеспечение переходных токов, связанных с работой микросхем и поддержкой рабочего напряжения.
- формирование пути возвратных токов сигнала.

На нулевой частоте конденсатор имеет импеданс, который стремится к бесконечности. Импеданс конденсатора снижается с ростом частоты до частоты саморезонанса, это обусловлено его реактивным сопротивлением с емкостной составляющей. После частоты саморезонанса импеданс конденсатора начинает возрастать, это обусловлено реактивным

---

сопротивлением индуктивной составляющей. Конденсаторы размещают так, чтобы токи сигнальных цепей циркулировали в замкнутых контурах, что позволяет защищать остальные части схемы от случайных наводок и, наоборот, подавляет случайные сигналы, наведенные другими цепями схемы [2]. Поскольку конденсатор обеспечивает низкоимпедансный путь для высокочастотных составляющих спектра, в цепях питания он активно применяется для подавления помех и флуктуаций напряжения на выводах питания микросхем. В этом случае его называют развязывающим.

В тоже время конденсатор применяется, как локальный накопитель электрической энергии. Чем больше электрическая емкость и разность потенциалов между обкладками конденсатора, тем большее количество электрической энергии он способен накопить. Накопительный конденсатор сглаживает провалы напряжения в цепи питания при быстрых изменениях токов в нагрузках. Накопительные конденсаторы большой емкости (десятки, сотни и тысячи мкФ) рекомендуется устанавливать рядом с выходами источников электропитания. Нет необходимости устанавливать их близко к микросхемам потребителей, поскольку основное их назначение – не отвод высокочастотных помех в землю, а накопление энергии. Как правило они имеют емкость в десятки и сотни мкФ, низкочастотный резонанс и большой радиус действия. В свою очередь высокочастотные развязывающие конденсаторы, наоборот надо ставить как можно ближе к потребителю. Высокочастотные развязывающие конденсаторы применяются в широком спектре электронных изделий начиная от печатных плат, подложек корпуса микросхем и систем в корпусе до гибких коммутационных плат с внутренним монтажом бескорпусных кристаллов [3], трёхмерных микросборок с различными типами вертикальных соединений [4].

Расчеты количества конденсаторов, необходимых для поддержания целевого импеданса, производятся в частотной области. Для выдерживания целевого импеданса шины питания  $|Z_{target}|$  используют высокочастотные керамические конденсаторы, среди которых есть выбор по классам диэлектрика. Выбор класса диэлектрика во многом определяется необходимостью температурной стабильности.

Керамические конденсаторы класса NPO (Negative Positive Zero) имеют самое низкое эквивалентное последовательное сопротивление ESR (Equivalent Series Resistance) и наилучшие характеристики вольтажа и температуры, но доступны только емкостью до нескольких нФ.

Керамические конденсаторы класс X7R имеют разумные коэффициенты напряжения и температуры, доступны в диапазоне от нескольких нФ до нескольких мкФ. X5R аналогичен X7R, но имеет меньшую надежность, зато больше выбор значений номинала - до 100 мкФ.

Керамические конденсаторы класс Y5V используется для достижения высоких значений емкости, но имеет плохие характеристики напряжения и температуры.

Для фильтрации питания в широком диапазоне частот устанавливают группы конденсаторов разных номиналов и размеров. Это позволяет снизить влияние эквивалентной последовательной индуктивности ESL (Equivalent Series Inductance) у каждого из них на общую амплитудно-частотную характеристику. Выводы конденсаторов имеют важные параметры ESL и ESR, которые определяют их характеристики в области высоких частот.

В процессе проектирования разработчику необходимо провести компоновку компонентов на печатной плате или подложке корпуса микросхемы, так образом чтобы удовлетворять заданным требованиям по питанию и целостности сигналов. Во многом проблематика выдерживания целевого импеданса шины питания зависит от расположения и топологии

---

подключения фильтрующих конденсаторов. Актуальность данной публикации заключается в определении эффективного радиуса действия развязывающего конденсатора на этапе проектирования топологии, что позволит уменьшить вероятность допущения ошибок проектирования в система распределения питания (СРП).

### **Основы системы распределения питания**

Целью системы распределения питания является обеспечение питанием устройств в системе. Каждое устройство или микросхема в системе имеет собственные требования к питанию для своей работы.

Большинство цифровых микросхем CPU (Central Processing Unit), включая все FPGA (Field-Programmable Gate Array), имеют требование, чтобы на всех источниках VCC (Voltage Common Collector) не колебалось более чем на  $\pm 5\%$  от номинального значения VCC (далее по тексту VCC используется в общем смысле для обозначения всевозможных шин питания V<sub>CORE</sub>, V<sub>DDQ</sub>, V<sub>CCIO</sub> и т.д.)

Это требование определяет максимальное количество шума, присутствующего в источнике питания, часто называемое "Ripple Voltage" или пульсацией напряжения. Если в требованиях к микросхеме указано, что VCC должно быть в пределах  $\pm 5\%$  от номинального напряжения, это означает, что пульсация напряжения от пика до пика должна быть не более 10% от номинального VCC. Это предполагает, что номинальное VCC точно соответствует номинальному значению, указанному в техническом описании. Если это не так, то амплитуду пульсации напряжения ( $V_{ripple}$ ) необходимо отрегулировать до значения меньше 10%.

Мощность, потребляемая цифровым устройством, меняется во времени, и эти изменения могут происходить на всем частотном диапазоне работы микросхем. Низкочастотная дисперсия потребляемой мощности

---

обычно является результатом включения или выключения микросхем, или работы каких-либо низкоскоростных интерфейсов в микросхеме. Это может происходить на временных шкалах от миллисекунд до довольно продолжительного времени. Высокочастотная дисперсия потребляемой мощности является результатом отдельных вычислений и событий переключения внутри микросхемы, это происходит в диапазоне тактовой сигнала и в пределах нескольких первых гармониках от тактовой частоты.

Поскольку уровень напряжения VCC для устройства фиксирован, изменение потребности в мощности проявляется как изменение потребности в токе. Система распределения питания должна учитывать и обеспечивать эти изменения в потреблении тока с максимально малым изменением напряжения питания.

Когда ток, потребляемый устройством, изменяется, система распределения питания не может мгновенно отреагировать на это изменение. За короткое время до того, как шина питания среагирует, напряжение на устройстве изменяется. Именно здесь появляется шум источника питания. Существуют две основные причины этого запаздывания в системе распределения питания, соответствующие двум основным компонентам этой системы.

Первый основной компонент системы распрямления питания - источник напряжения. Он отслеживает свое выходное напряжение и благодаря обратной связи корректирует его и регулирует величину подаваемого тока для поддержания постоянного напряжения.

Наиболее распространенные регуляторы напряжения выполняют эту корректировку в течение порядка мс или мкс. Они эффективны для поддержания выходного напряжения для различных случаев на всех частотах от постоянного тока DC (Direct Current) до нескольких сотен кГц. Для всех переходных процессов, которые происходят на частотах выше этого

---

диапазона, существует задержка по времени, прежде чем регулятор напряжения сможет отреагировать. Например, если текущий спрос в токе на микросхеме увеличивается за считанные ns, напряжение на микросхеме потребителе просядет на некоторую величину, пока регулятор напряжения подстраивается под новый, более высокий уровень тока, который он должен обеспечить. Эта задержка может занять от мкс до мс, в течение которых напряжение просядет.

Вторым основным компонентом системы распределения питания являются фильтрующие или развязывающие конденсаторы. В данном случае примечательно, что применяется термин “фильтрация” и “развязка” используются взаимозаменяемо.

Их функция заключается в том, чтобы действовать как локальное хранилище энергии для устройства. Они не могут обеспечить питание постоянного тока, так как в них хранится лишь небольшое количество энергии.

Формула энергии запасенной конденсатором:

$$W = \frac{CU^2}{2} \quad (1)$$

Где:

*C* – емкость развязывающего конденсатора

*U* – напряжение цепи питания

Функция этого локального хранилища энергии – конденсатора заключается в том, чтобы очень быстро реагировать на изменяющиеся потребности в токе. Конденсаторы эффективны для поддержания напряжения питания на частотах от сотен кГц до сотен МГц в диапазоне от мкс до нс. Развязывающие конденсаторы бесполезны для всех событий, происходящих выше или ниже этого диапазона. Например, если токовая потребность в микросхеме увеличивается за несколько пикосекунд,

---

произойдет падение напряжения в микросхеме потребителя на некоторую величину, пока конденсаторы не смогут обеспечить дополнительный заряд для устройства. Если потребность в токе в устройстве изменяется и сохраняет этот новый уровень в течение нескольких мс, схема регулятора напряжения в источнике, работающая параллельно с развязочными конденсаторами, фактически берет их на себя, изменяя свой выход под подачу необходимого тока.

$$C\Delta V = I\Delta t \quad (2)$$

Где:

$C$  – емкость развязывающего конденсатора

$\Delta V$  – изменение напряжения в цепи питания

$I$  – максимальный ток за время  $\Delta t$

На рисунке 1 показаны основные компоненты системы распределения питания [5]: источник питания, индуктивность топологии шины питания, развязывающие конденсаторы и микросхема потребитель – центральный процессор (CPU).

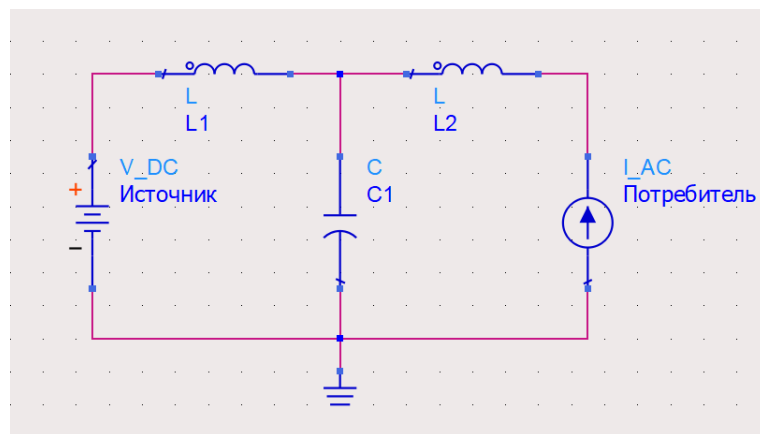


Рис.1. – Эскиз упрощенной схема системы распределения питания

## Роль индуктивности

У конденсаторов и контуров тока есть свойство, которое задерживает резкое изменения тока. Это причина, по которой конденсаторы не могут мгновенно реагировать на переходные процессы и токи, а также на изменения, которые происходят на частотах выше их диапазона рабочей частоты. Это свойство называется индуктивностью.

Индуктивность можно рассматривать как импульс заряда. Когда заряд движется с некоторой скоростью через проводник, это подразумевает некоторое количество тока. Если уровень тока должен измениться, заряд должен двигаться с другой скоростью. Поскольку с этим зарядом связан импульс (сохраненная энергия магнитного поля), требуется некоторое время, чтобы заряд замедлился или ускорился. Чем больше индуктивность, тем больше сопротивление изменению тока, и тем больше времени требуется для изменения уровня тока.

Система распределения питания предназначена для динамического удовлетворения актуальных энергетических запросов нагрузки при минимальном отклике времени на изменения уровня потребления мощности. Когда эти потребности не удовлетворяются, напряжение на источнике питания и на потребителе отличаются. Это проявляется как шум. Поскольку индуктивность замедляет способность развязывающих конденсаторов быстро реагировать на изменяющиеся потребности в токе, ее следует минимизировать.

На Рисунке 1 показаны условные индуктивности между микросхемой CPU и конденсаторами, а также между конденсаторами и источником напряжения. Эти индуктивности возникают как паразитные параметры в самих конденсаторах и топологии печатной платы. Для уменьшения падения напряжения и соблюдения заданного целевого импеданса, важно, чтобы каждая из этих индуктивностей была минимизирована.

---



## Паразитная индуктивность конденсатора

Из различных свойств конденсатора значение емкости часто считается наиболее важным. Однако в области проектирования системы распределения питания на печатной плате свойство паразитной индуктивности ESL (эквивалентная последовательная индуктивность) имеет такое же по важности или даже большее значение.

Единственный фактор, который влияет на паразитную индуктивность больше, чем любой другой это размеры корпуса компонента. Корпус с наименьшими габаритами и типоразмером, как правило, имеют меньшую паразитную индуктивность, чем физически большие конденсаторы. Индуктивность провода зависит от его длины: чем длиннее провод, тем больше его индуктивность. С другой стороны, индуктивность уменьшается при увеличении толщины или ширины провода. Эти принципы применимы и к конденсаторам: длина влияет на их индуктивность аналогично длине проводов, а увеличение площади обкладок уменьшает индуктивность конденсатора.

По этим причинам при выборе развязывающих конденсаторов следует выбирать корпус с наименьшими габаритами и типоразмером для заданного значения. Аналогично, для заданного размера корпуса (по сути, фиксированного значения индуктивности) следует выбирать наибольшее значение емкости, доступное в этом корпусе.

Конденсаторы поверхностного монтажа являются самыми компактными из имеющихся конденсаторов, что делает их хорошим выбором для дискретных развязывающих конденсаторов. Для значений от 0,001 мкФ до 2,2 мкФ, обычно используются конденсаторы с диэлектриком типа X7R или X5R. Они имеют низкую паразитную индуктивность и приемлемую температурную характеристику. Для больших значений, таких как 1000  $\mu\text{F}$ , используются танталовые конденсаторы. Они имеют низкую

---

паразитную индуктивность и относительно высокое эквивалентное последовательное сопротивление (ESR), что дает им низкий коэффициент качества  $QF$  (Quality Factor) и, следовательно, очень широкий диапазон эффективных частот. Они также обеспечивают сравнительно высокое значение емкости в небольшом размере корпуса, что снижает затраты на компонентную базу. В случаях, когда танталовые конденсаторы недоступны, можно использовать электролитические конденсаторы с низкой индуктивностью.

Реальный конденсатор имеет характеристики не только емкости  $C$ , но также индуктивности  $ESL$  и сопротивления  $ESR$ . На рисунке 2 показана паразитная модель реального конденсатора. Реальный конденсатор можно рассматривать, как RLC цепь.

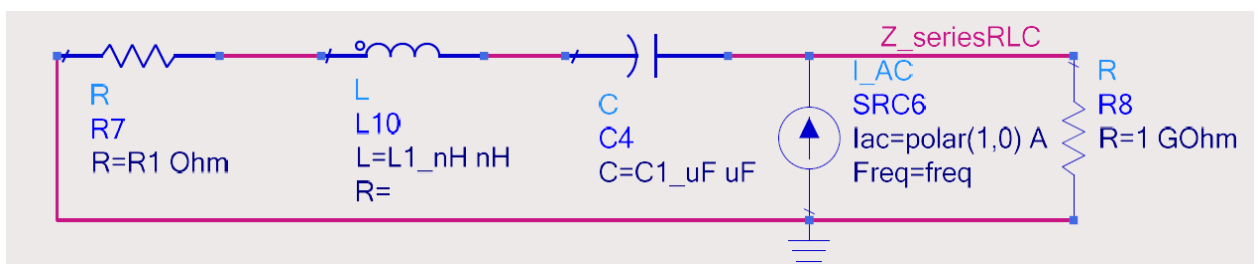


Рис. 2. – Эскиз эквивалентной схемы реального конденсатора с последовательным включением

Ниже на рисунке 3 представлена характеристика импеданса реального конденсатора. На этот график наложены кривые, соответствующие емкости конденсатора и паразитной индуктивности ( $ESL$ ). Эти две кривые объединяются, образуя общую характеристику импеданса RLC-цепи, образованной паразитными элементами конденсатора. Импеданс конденсатора – это мера сопротивления конденсатора пропускаемому через него сигналу на определённой частоте. Он показывает, как сильно конденсатор противодействует прохождению тока через него. Импеданс

включает как активное, так и реактивное сопротивление (ёмкостное  $X_c$  и индуктивное  $X_l$ ), которое зависит от частоты.

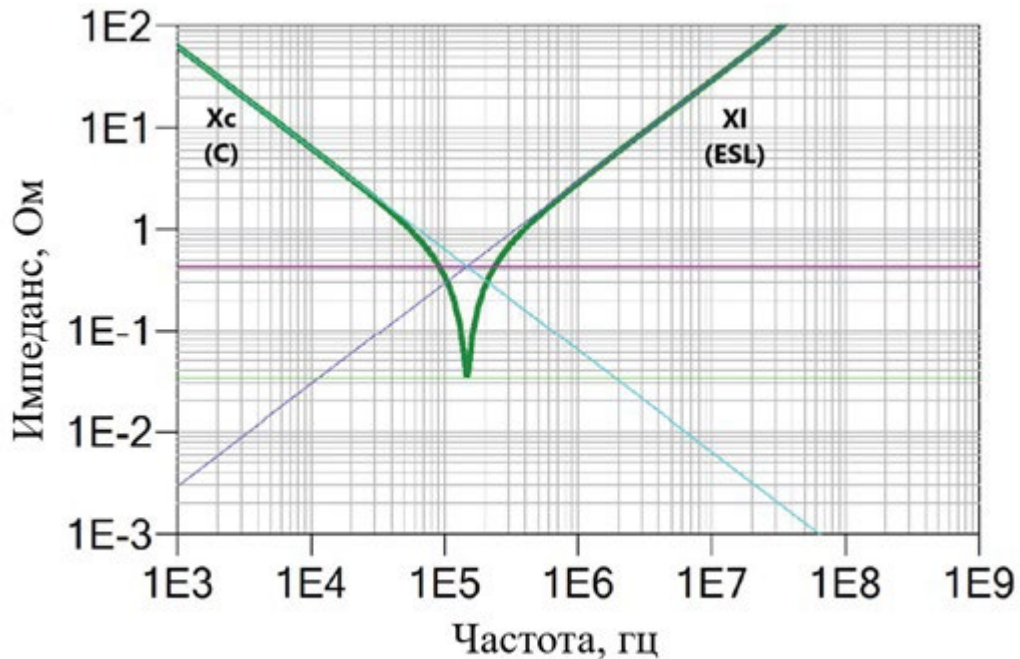


Рис. 3. – Вклад паразитных составляющих конденсатора в общие характеристики импеданса

При увеличении значения емкости кривая емкости  $C$  смещается вниз и влево. При уменьшении паразитной индуктивности  $L$  кривая индуктивности смещается вниз и вправо. Поскольку паразитная индуктивность  $L$  для конденсаторов в конкретном корпусе по существу фиксирована, кривая индуктивности остается фиксированной. При выборе различных значений  $C$  конденсатора в том же корпусе кривая емкости смещается вверх и вниз относительно кривой фиксированной индуктивности. Единственный способ уменьшить общее сопротивление конденсатора для данного корпуса - увеличить значение конденсатора. Единственный способ сместить кривую паразитной индуктивности вниз (снизить общую характеристику сопротивления  $Z$ ) - это подключить дополнительные конденсаторы параллельно.

## Индуктивность подключения

В данном контексте к подключению относятся монтажные контактные площадки под пайку конденсатора, с учетом проводников или полигонов между местом пайки и переходным отверстием.

Переходные отверстия, проводники и контактные площадки конденсатора с учетом монтажа вносят от 300 пГн до 4 нГн индуктивности в зависимости от конкретной геометрии топологии. Поскольку индуктивность токового контура пропорциональна площади контура, который проходит ток, важно минимизировать его размер [6].

Паразитная индуктивность контуров тока в печатной плате имеет два различных источника: подключение конденсатора и топология шины питания и земли в печатной плате или в подложке корпуса микросхемы.

Ниже на рисунке 4 представлен условный токовый контур, который состоит из пути через слой с полигоном питания, вверх через сквозное отверстие проходя через слой с полигоном земли, далее соединение с конденсатором и через сам конденсатор, через соединительный проводник и вниз через сквозное отверстие в полигон земли.

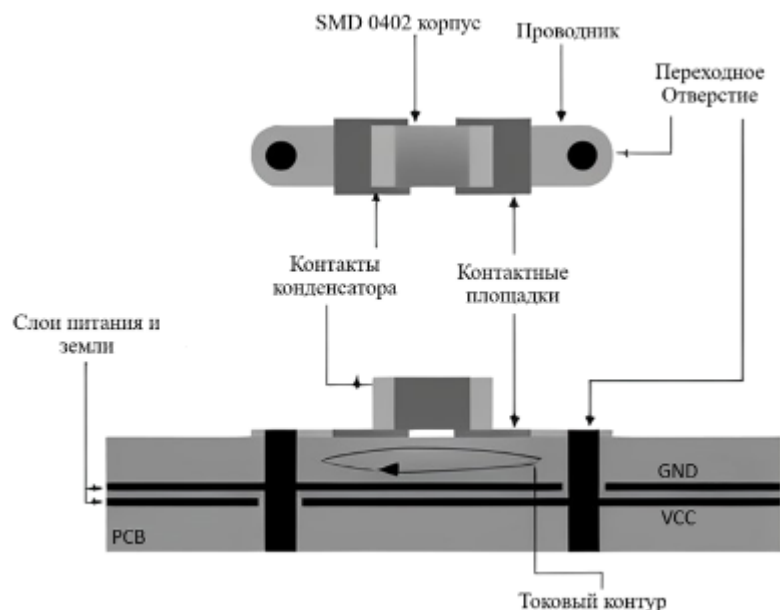


Рис. 4. – Вид в сечении на токовый контур развязывающего конденсатора

Проводники, которые соединяют цепи земли и питания следует укорачивать, в таком случае, площадь петли контура токов минимизируется и индуктивность уменьшается. Аналогично, уменьшая длину переходного отверстия, через которое протекает ток, площадь петли минимизируется, а индуктивность уменьшается.

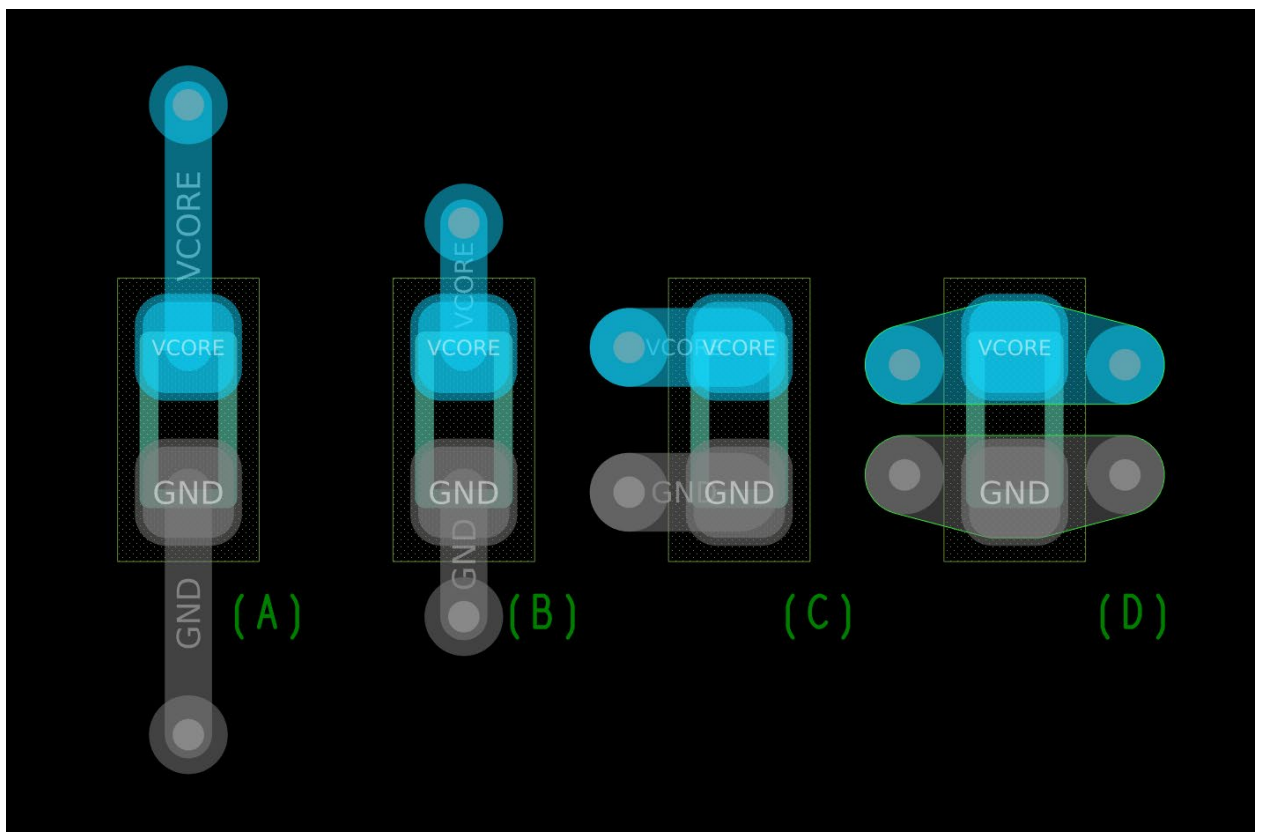


Рис. 5 – Варианты подключения чип-конденсатора с типоразмером 0402: длинный сегмент соединительного проводника (А), ПО в непосредственной близости от КП (В), ширина проводников соответствует диаметру КП у ПО (С), удвоенное количество ПО с подключением через полигоны (D).

Наличие и длина соединительного проводника оказывают большое влияние на паразитную индуктивность подключения. По возможности не должно быть длинных соединительных проводников (рисунок 5А). Переходное отверстие должно быть максимально близко к контактной

площадке (рисунок 5B). Кроме того, соединительная дорожка должна быть сделана как можно шире. Дальнейшие улучшения подключения могут быть внесены путем размещения переходных отверстий сбоку от площадок конденсатора (рисунок 5C) или удвоения количества переходных отверстий с применением полигонов (рисунок 5D). Так же уменьшая расстояние между переходными отверстиями питания и земли, уменьшается индуктивность соединения конденсатора. В настоящее время очень немногие заводы производства печатных плат допускают размещение переходных отверстий в контактной площадке VIP (VIA in Pad), это является наилучшим решением по уменьшению паразитной индуктивности подключения, но требует дополнительных затрат на производство печатной платы. Расположение нескольких переходных отверстий в одной контактной площадке актуально при использовании конденсаторов со сверхнизкой индуктивностью, таких как конденсаторы с обратным соотношением сторон (AVX LCC). Добавление нескольких переходных отверстий в цепь питания и земли, уменьшает общую эквивалентную индуктивность, так как несколько переходных отверстий (ПО) в одной цепи является параллельным соединением индуктивностей. Чем меньше общая индуктивность, тем меньше падение напряжения в шине цепи питания, так как уменьшается электродвижущая сила самоиндукции.

$$U(t) = -L \frac{dI}{dt} \quad (3)$$

Где:

$L$  – индуктивность контура токов,

$dI/dt$  – скорость изменения тока во времени.

Пытаясь разместить большое количество компонентов в небольшую область, инженеры-топологи по разводке печатных плат решают разделить

---

переходные отверстия между несколькими конденсаторами. Этот подход не рекомендуется использовать ни при каких обстоятельствах. Подключение конденсатора (проводники и переходные отверстия) обычно вносит примерно то же или даже больше индуктивности, чем собственная паразитная индуктивность конденсатора. Если второй конденсатор подключен к переходным отверстиям существующего конденсатора, это только улучшит систему распределения питания на очень небольшую величину. Лучше уменьшить общее количество конденсаторов и поддерживать соотношение земель к переходным отверстиям один к одному.

### **Индуктивность полигонов**

Силовые и заземляющие полигоны печатной платы имеют некоторую величину индуктивности, связанную с ними. Геометрия этих плоскостей определяет их индуктивность.

Поскольку силовые и заземляющие полигоны по определению являются плоской структурой, ток не просто течет через них в одном направлении. Он имеет тенденцию распространяться по мере перемещения из одной точки в другую, в соответствии со свойством, аналогичным скин-эффекту.

Индуктивность распространения действует как любая другая индуктивность – оказывает сопротивление изменению величины тока в проводнике. В таком случае проводником является полигон питания. Эту величину следует максимально уменьшить, поскольку она замедляет способность конденсаторов реагировать на переходные токи в устройстве. Поскольку линейные размеры полигона обычно являются тем, что тополог задает исходя из особенности конструкции печатной платы, единственным контролируемым фактором остается значение индуктивности распространения.

---

Это в первую очередь определяется толщиной диэлектрика, разделяющего силовой полигон от связанным с ним полигоном земли. В высокочастотных системах распределения мощности, силовые и земляные слои работают парами. Их индуктивности не существуют независимо друг от друга.

Расстояние и диэлектрическая проницаемость материала между слоями питания и земли определяет индуктивность. Чем меньше расстояние (чем тоньше диэлектрик), тем ниже индуктивность распространения. В таблице 1 представлены приблизительные значения индуктивности распространения для различной толщины диэлектрика FR4.

Таблица 1. Значения емкостей и индуктивностей для разных толщин FR4 между слоями питания и земли.

Толщина диэлектрика (мил, мкм)	Индуктивность (пГн)	Емкость (пФ/дюйм <sup>2</sup> , пФ/см <sup>2</sup> )
4, 102	130	225, 35
2, 51	65	450, 70
1, 25	32	900, 140

Поскольку более близкое расстояние приводит к снижению индуктивности распространения, лучше всего, где это возможно, размещать плоскости VCC непосредственно рядом с плоскостями GND в стеке. Обращенные друг к другу плоскости VCC и GND иногда называют «сэндвичами». Хотя использование сэндвичей VCC – GND не было необходимым в прошлом для более ранних изделий ЭВМ, высокие скорости и большие потребляемые мощности требуют этого.

Помимо обеспечения низко индуктивного пути токовых контуров, расположение по соседству слоев питания и земли также обеспечивает



некоторую высокочастотную развязывающую емкость. По мере увеличения площади полигонов и уменьшения толщины диэлектрика между слоями питания и заземления значение этой емкости увеличивается. В то же время, поскольку паразитная индуктивность этой емкости уменьшается, ее эффективная центральная частота полосы частот увеличивается. Емкость на квадратный дюйм или см приведена в Таблице 1.

Только этой распределенной емкостью может быть недостаточной для того, чтобы обеспечить целевой импеданс в шине питания, однако она может быть дополнением к уменьшению индуктивности токовых контуров и улучшить электромагнитную обстановку между компонентами на электронном модуле.

### **Индуктивность структуры печатной платы**

Порядок и место размещение слоев VCC и GND в структуре печатной платы оказывает значительное влияние на паразитные индуктивности путей тока питания. По этой причине проектировщикам печатных плат необходимо учитывать порядок слоев на ранних этапах цикла проектирования, размещая высокоприоритетные источники питания в верхней половине стека, а низкоприоритетные - в нижней половине стека [7, 8].

Источники питания с высоким переходным током должны иметь свои связанные полигоны VCC близко к верхнему слою TOP (сторона CPU) структуры печатной платы, чтобы уменьшить расстояние в вертикальном направлении, которое проходят токи через переходные отверстия VCC и GND, прежде чем достигнут слои VCC и GND. Как упоминалось в ранее, каждый слой VCC должен иметь слой GND, прилегающую к нему в структуре печатной платы, чтобы уменьшить индуктивность. Поскольку высокочастотные токи тесно связаны из-за скин-эффекта, слой полигона GND смежный со слоем полигоном VCC, несет в себе большую часть тока,

---

комплементарного току в распространяющемся в слоях VCC. По этой причине соседние слои VCC и GND рассматриваются как пара.

Не все пары слоев VCC и GND могут располагаться в верхней половине стека печатной платы. Так как производственные ограничения обычно требуют, чтобы стек печатной платы был симметричным относительно центра с учетом толщины диэлектрика и процентном заполнении меди на слоях, тополог печатной платы должен определить, какие пары слоев VCC и GND имеют высокий приоритет или несут высокочастотную энергию, а какие пары имеют низкий приоритет или несут низкочастотную энергию.

### **Частота саморезонанса конденсатора**

Каждый конденсатор имеет узкую полосу частот, где он наиболее эффективен как развязывающий конденсатор. За пределами этой полосы он вносит некоторый вклад в систему распределения питания, но в целом он намного меньше. Частотные полосы некоторых конденсаторов шире, чем других. ESR конденсатора определяет добротность (Q) конденсатора, которая определяет ширину эффективной полосы частот. Танталовые конденсаторы обычно имеют очень широкую эффективную полосу, в то время как керамические конденсаторы поверхностного монтажа X7R и X5R с их более низким ESR обычно имеют очень узкую эффективную полосу частот.

Резонансная частота, связанная с этими паразитными параметрами RLC конденсатора, называется резонансной частотой конденсатора. Для определения резонансной частоты RLC-цепи используется формула Томпсона:

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4)$$

Где:

*L* – индуктивность корпуса конденсатора,

---

$C$  – емкость конденсатора,

$\pi$  – математическая постоянная, равная отношению длины окружности к её диаметру.

В качестве альтернативы расчетам можно выполнить симуляцию SPICE модели или S-параметров в среде моделирования. Частота на которой возникает минимальное значение импеданса, является резонансной частотой. Так же частоту саморезонанса конденсатора возможно найти из графика импеданса, который есть в документе с техническими характеристиками (Datasheet) на компонент.

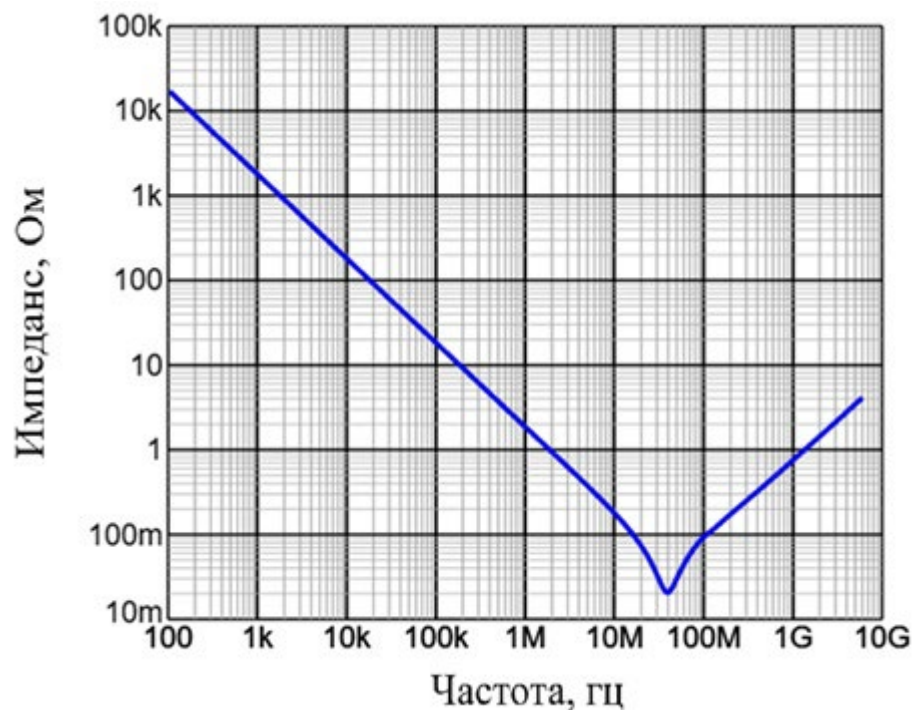


Рис. 6 – Импеданс конденсатора с частотой саморезонанса на 38 МГц

Важно различать собственную резонансную частоту конденсатора и эффективную резонансную частоту установленного конденсатора, когда он является частью системы. Это разница между учетом только паразитной индуктивности конденсатора и учетом индуктивности подключения - переходных отверстий, полигонов и соединительных проводников, лежащих

между ним и микросхемой потребителем. Собственная резонансная частота конденсатора  $F_{RSELF}$  (значение, указанное в техническом описании конденсатора) значительно выше его эффективной установленной резонансной частоты в системе  $F_{RIS}$ . Поскольку важны характеристики установленного конденсатора, именно установленная резонансная частота используется при оценке конденсатора, как части системы распределения питания.

Источниками паразитной индуктивности являются собственная индуктивность конденсатора, индуктивность контактных площадок печатной платы и соединительных проводников, индуктивность переходных отверстий и индуктивность полигонов слоя питания. Переходные отверстия пересекают всю плату на пути микросхеме потребителю, когда конденсаторы установлены на нижней стороне платы. Переходные отверстия вносят индуктивность в диапазоне от 300 пГн до 1500 пГн на плате с толщиной 1,52мм (60 мил), переходные отверстия на более толстых платах имеют более высокую индуктивность. Паразитная индуктивность подключения конденсатора, обозначается  $L_{MOUNT}$ . Для определения общей паразитной индуктивности конденсатора в системе  $L_{IS}$ , паразитная индуктивность конденсатора  $L_{SELF}$  добавляется к паразитной индуктивности монтажа  $L_{MOUNT}$ :

$$L_{IS} = L_{SELF} + L_{MOUNT} \quad (5)$$

Где:

$L_{SELF}$  – эквивалентная последовательная индуктивность конденсатора,

$L_{MOUNT}$  – индуктивность подключения.

---

*Пример:*

X7R керамический чип-конденсатор (параметры из datasheet)

$$C = 0,01 \text{ мкФ}$$

$$L_{\text{SELF}} = 0,9 \text{ нГн}$$

$$F_{\text{RSELF}} = 53 \text{ MHz}$$

$$L_{\text{MOUNT}} = 0,8 \text{ нГн}$$

Чтобы определить полную внутрисистемную паразитную индуктивность ( $L_{IS}$ ), необходимо добавить паразитную индуктивность подключения:

$$L_{IS} = L_{\text{SELF}} + L_{\text{MOUNT}} = 0,9 \text{ нГн} + 0,8 \text{ нГн} = 1,7 \text{ нГн}$$

Подставляем значения из примера в формулу (3):

$$F_{\text{RIS}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_{\text{SELF}} + L_{\text{MOUNT}})C}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{IS}C}}$$

$$F_{\text{RIS}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(1,7 * 10^{-9} \text{ Гн}) * (1 * 10^{-8} \text{ Ф})}} = 3,8 * 10^7 \text{ Гц} = 38 \text{ МГц}$$

$F_{\text{RIS}}$  – резонансная частота установленного конденсатора: 38 МГц

Поскольку развязывающий конденсатор эффективен только в узкой полосе частот вокруг его резонансной частоты, важно учитывать резонансную частоту при выборе набора конденсаторов для построения развязывающей сети шины питания.

## Конденсаторный антирезонанс

Одной из распространенных проблем, связанных с конденсаторами в шине питания процессора, являются антирезонансные выбросы в совокупном импедансе. Эти выбросы могут быть вызваны плохими комбинациями устройств хранения энергии в системе распределения питания (дискретные конденсаторы, паразитные индуктивности, силовые и земляные полигоны). Если межплоскостная емкость силовых и земляных полигонов имеет особенно низкий импеданс  $|Z|$  с высоким коэффициентом добротности, точка пересечения между высокочастотными дискретными конденсаторами и этой емкостью плоскости может демонстрировать высокоимпедансный антирезонансный пик. Если микросхема центрального процессора имеет высокий переходный ток на этой частоте (выступая в качестве стимула), возникает большое шумовое напряжение. Систему распределения питания можно улучшить, только снизив импеданс антирезонансного выброса. Чтобы смягчить эту проблему, необходимо изменить либо характеристики высокочастотных дискретных конденсаторов, либо характеристики плоскостей питания и заземления.

## Размещение конденсаторов

В случаях, когда полигон питания выполнен не прямоугольником во всем слое питания, а отдельным полигоном в виде многоугольника с изгибами, устанавливайте конденсаторы в местах изгибов такого полигона. Если речь идет о монтаже конденсаторов под BGA корпусами FPGA или CPU и микроконтроллеров, рекомендуется располагать их равномерно по периметру и при возможности по центру. Благодаря такой установке конденсаторов, добавляются узлы в существующие токовые контура, разбивая их на более мелкие. Таким образом, кратно повышается частота возможного резонанса и переносится спектр помехи в область более высоких

---

частот, где ее влияние будет менее критично. По своей сути конденсаторы должны быть расположены близко к микросхеме потребителю для выполнения функции развязки. Для этого требования есть две основные причины.

Во-первых, увеличенное расстояние между микросхемой и развязывающим конденсатором увеличивает расстояние, пройденное током в цепях питания и земли, следовательно, растет индуктивность пути тока между устройством и конденсатором. Поскольку индуктивность этого пути (контур, по которому ток идет от стороны VCC конденсатора к выводу VCC CPU и от вывода GND (VSS) микросхемы потребителя к контакту GND конденсатора), пропорциональна площади контура, уменьшение его индуктивности является вопросом уменьшения площади контура. Сокращение расстояния между микросхемой и развязывающим конденсатором(ами) уменьшает индуктивность, что приводит к менее затрудненному переходному току. Из-за размеров печатных плат эта причина, как правило, менее важна с точки зрения размещения, чем вторая причина.

Вторая причина связана с фазовым соотношением между источником шума CPU и установленным конденсатором. Их фазовое соотношение определяет эффективность конденсатора. Чтобы конденсатор был эффективен в обеспечении переходного тока на определенной частоте (например, оптимальной частоте для этого конденсатора), он должен находиться в пределах определенной доли длины волны, связанной с резонансной частотой установленного конденсатора. Размещение конденсатора определяет длину соединений линии передачи (обычно, пара полигонов питания и земли с переходными отверстиями) между конденсатором и микросхемой. Задержка распространения в таком соединении является существенным фактором.

---

Шум от микросхемы потребителя попадает в определенные частотные диапазоны, и различные размеры развязывающих конденсаторов обеспечивают перекрытие различных частотных диапазонов. По этой причине размещение конденсаторов определяется на основе эффективной частоты каждого конденсатора.

Когда микросхема работает и активно потребляет динамически изменяющийся ток, это вызывает небольшое локальное возмущение в напряжении системы распределения питания. Чтобы развязывающий конденсатор противодействовал этому, конденсатор должен сначала увидеть изменение в разнице напряжений.

Существует задержка по времени между началом возмущения на силовых выводах микросхемы и началом обнаружения этого возмущения конденсатором.

Эта задержка по времени равна расстоянию от силовых выводов микросхемы до конденсатора, деленному на скорость распространения электромагнитной волны через диэлектрик FR4 (Огнестойкий эпоксидный стеклотекстолит [9] - композитный материал, состоящий из тканого стекловолокна со связующим из эпоксидной смолы). Существует еще одна задержка приблизительно такой же длительности для возвратного тока между микросхемой и конденсатором в обратную сторону.

Поэтому для любого переходного тока, требуемого микросхемой, есть задержка прохождения тока туда и обратно к конденсатору, прежде чем на микросхеме будет видно какое-либо улучшение по питанию.

В случаях размещения развязывающего конденсатора с расстоянием до потребителя, с превышением одной четверти длины волны от резонансной частоты установленного конденсатора, энергия, передаваемая в микросхему будет меньше теоретически возможного максимума.



При расстоянии менее четверти длины волны, энергия, передаваемая в микросхему, будет расти и стремиться к теоретическому максимуму в 100% - при нулевом расстоянии. Эффективная передача энергии от конденсатора к микросхеме требует размещения конденсатора на расстоянии, равном доле четверти длины волны от резонансной частоты установленного конденсатора. Эта доля должна быть небольшой, поскольку конденсатор также эффективен на частотах, немного превышающих его резонансную частоту с учетом топологии и монтажа, где соответствующая длина волны короче.

В практических приложениях хорошей целью является одна десятая от четверти длины волны [10], что по сути является эффективным радиусом действия конденсатора. Это приводит к размещению конденсатора в пределах одной сороковой длины волны от силовых выводов, которые он развязывает. Длина волны соответствует  $F_{RIS}$ , установленной резонансной частоте конденсатора.

*Пример:*

0,001 мкФ X7R керамический чип-конденсатора с типоразмером 0402

Определим  $L_{IS}$  индуктивность установленного конденсатора с учетом топологии по формуле (5)

$$L_{IS} = L_{SELF} + L_{MOUNT} = 1,6 \text{ нГн}$$

Найдем частоту резонанса подставив полную индуктивность в формулу (4)

$$F_{RIS} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{IS}C}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(1.6 * 10^{-9} \text{ Гн}) * (0.001 * 10^{-6} \text{ Ф})}} = 125,8 \text{ МГц}$$

Уравнение 6 вычисляет длину волны  $\lambda$  на основе установленной частоты саморезонанса системы  $F_{RIS}$  и скорости распространения энергии  $V_{PROP}$  в диэлектрике FR4.

$$\lambda = \frac{V_{PROP}}{F_{RIS}} \quad (6)$$

Где:

$V_{PROP}$  – скорость распространения электромагнитной волны в диэлектрике,

$F_{RIS}$  – частота резонанса системы.

$$V_{PROP} = \frac{c}{\sqrt{D_k}} \quad (7)$$

Где:

$D_k$  – относительная диэлектрическая проницаемость,

$c$  – абсолютная величина скорости распространения электромагнитных волн в вакууме.

Определим скорость распространения по формуле (7)

$$V_{PROP} = \frac{299\,792\,458 \text{ м/с}}{\sqrt{3.9}} \approx 150\,000\,000 \text{ м/с} \approx 150 \text{ мкм/пс}$$

Электромагнитная волна проходит за 1 пс порядка 150 мкм в среде диэлектрика состоящего из типового стеклотекстолита FR-4.

Найдем длину волны частоты саморезонанса установленного конденсатора с учетом скорости распространения электромагнитной волны по формуле (6).

$$\lambda = \frac{V_{PROP}}{F_{RIS}} = \frac{150 * 10^6 \text{ м/с}}{125,8 * 10^6 \text{ Гц}} = 1,19 \text{ м}$$

Уравнение 8 определяет эффективный радиус действия конденсатора.

$$R_{PLACE} = \frac{\lambda}{40} \quad (8)$$

Где:

$\lambda$  – длина волны от частоты саморезонанса с учетом полной индуктивности.

Определим эффективный радиус действия конденсатора с учетом топологии установленного конденсатора по формуле (8).

$$R_{PLACE} = \frac{\lambda}{40} = \frac{1,19 \text{ м}}{40} \approx 30 \text{ мм}$$

В этом примере эффективная частота, равная резонансной частоте, может быть определена с помощью формулы Томпсона, где  $L_{IS}$  является полной внутрисистемной паразитной индуктивностью. Эта эффективная частота равна 125,8 МГц. Используя скорость распространения электромагнитной волны в FR4 приблизительно равной 0.15 мм за пс, находится длина волны 1,19 м, вычисляется с использованием Уравнения 6. Как вычислено в Уравнении 8, одна сороковая длины волны составляет 30 мм. Эффективный радиус действия  $R_{PLACE}$  чип-конденсатора с типоразмером 0402 находится в пределах 30 мм, поэтому его необходимо разместить не далее этого значения от контактов питания микросхемы, которые он развязывает.

Все остальные размеры конденсаторов следуют тому же принципу. Разместить развязывающий конденсатор в радиусе 30 мм от выводов питания микросхемы потребителя вполне возможно. Иногда не требуется размещать конденсаторы непосредственно под микросхемой на противоположной стороне печатной платы. Допустимо устанавливать конденсаторы по периферии платы устройства, при условии соблюдения эффективного

радиуса действия конденсатора. Как правило конденсаторы 0,001 мкФ являются одними из самых маленьких в цепи питания.

Для более крупных конденсаторов эффективный радиус действия расширяется по мере снижения резонансной частоты. Например, конденсатор 4,7 мкФ можно разместить почти в любом месте печатной платы, при условии широких полигонов питания так как его эффективный радиус действия 2,49 м. Этот радиус как правило больше, чем ширина и длина у печатных плат. Такая большая длина волны соответствует резонансной частоте 1,56 МГц.

Для интерактивной оценки эффективного радиуса действия развязывающего конденсатора в проекте топологии печатных плат, могут быть применены специальные инструменты в среде системы автоматизированного проектирования [11].

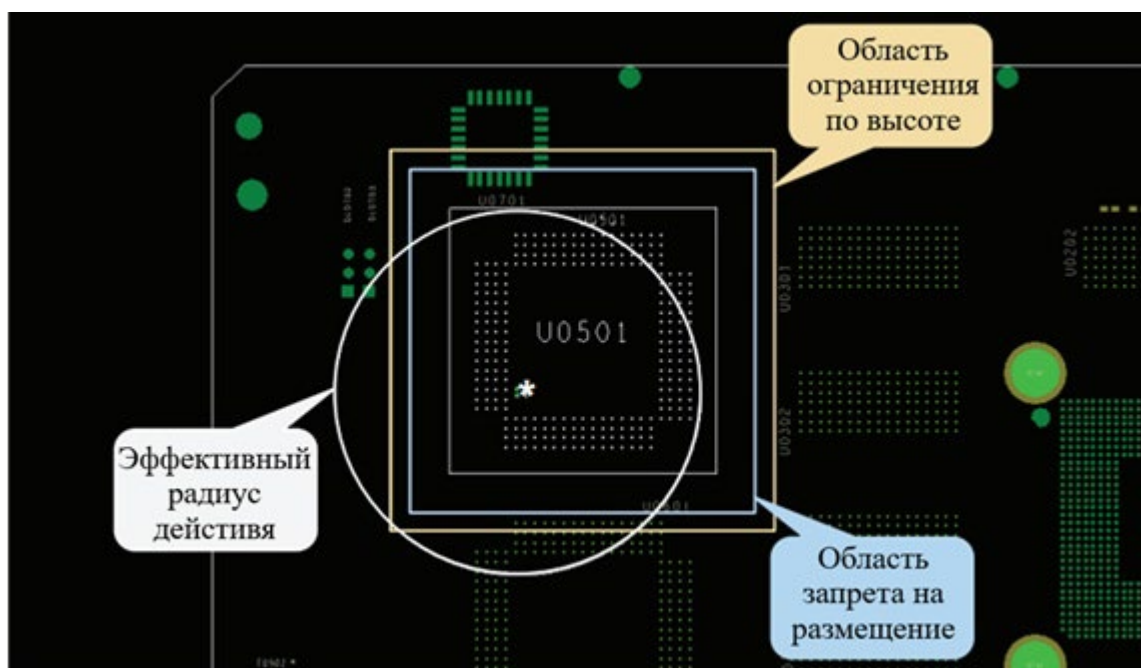


Рис. 7 – Эффективный радиус действия развязывающего конденсатора

Возможность автоматизации процесса получения эффективного радиуса действия развязывающего конденсатора, уменьшает вероятность

допущения ошибок при проектировании шины питания в электронном модуле, позволяет интерактивно определить наиболее оптимальное место расположения конденсатора на поверхности печатной платы с учетом особенностей топологии.

### **Заключение**

Исследование влияний паразитных параметров развязывающего конденсатора и топологии его подключения к шине питания и земли, раскрывает причины, по которым необходимо уделять пристальное внимание месту его размещения, уменьшать индуктивность подключения.

Понимание действительных значений эффективного радиуса действия развязывающего конденсатора в процессе проектирования печатной платы или подложки корпуса микросхемы, повышает вероятность удовлетворения заданным требованиям по целевому импедансу на шине питания с применением наименьшего количества компонентов, так как во многом проблематика выдерживания целевого импеданса шины питания зависит от расположения и топологии подключения фильтрующих конденсаторов.

Определение частоты саморезонанса установленного конденсатора, дает возможность осуществлять размещение конденсаторов оптимально, что в целом должно способствовать уменьшению импеданса шин питания в частотной области. Так как развязывающий конденсатор является важным элементом в системе распределения питания, предназначенный для поддержания целевого импеданса в заданной частотной области. Он также обеспечивает передачу энергии к отдельным выводам цепи питания и изменяет путь протекания высокочастотных токов через развязку, подавляя помехи и флуктуации напряжения, генерируемые микросхемой потребителем. На радиус действия подключенного развязывающего конденсатора, эффективность и частоту его работы влияют непосредственно его паразитные параметры и топология печатного узла.

---

## Литература

1. Кечиев Л.Н., Чермошенцев С.Ф., Нисан А.В. Проектирование системы распределения питания печатных узлов электронной аппаратуры // Грифон. – Серия «Библиотека ЭМС». – 2016. – 37 с.
2. Лунд П., Петров Г.В., Логунов Л.А. Прецизионные печатные платы. Конструирование и производство // Перевод на русский язык, Энергоатомиздат. – 1983. – 116 с.
3. Тимошенко С.П., Тихонов К.С., Титов А.Ю., Петров В.С. Разработка технологий внутреннего монтажа бескорпусных кристаллов на гибкие коммутационные платы // Инженерный вестник Дона. 2012. № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/982](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/982).
4. Вертянов Д.В., Беляков И.А., Соловьев И.А., Гладкова С.И. Моделирование термомеханических нагрузок в трёхмерных микросборках с различными типами вертикальных соединений // Инженерный вестник Дона. 2022. № 11. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8024](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8024).
5. Popovich M. Performance Power Distribution Networks with On-Chip Decoupling Capacitors for Nanoscale Integrated Circuits. – University of Rochester. Rochester. New York. 2007. – 370 p.
6. Knighten James L., Archambeault Bruce, Fan Jun, Selli Giuseppe, Rajagopal Abhilash, Connor Samuel, Drewniak James L. PDN Design Strategies: IV. Sources of PDN Noise – IEEE Newsletter. 2007. – pp. 54–64.
7. PCB Stackup Design Considerations for Altera FPGAs. AN-613-1.0. – 2010. – 26 p.
8. Медведев А.М. Печатные платы. Конструкции и материалы. – М.: Техносфера. 2005. – 304 с.
9. Медведев А.М., Мылов Г.В., Дорожжин И.В. Материалы компонентов радиоэлектронных средств. Печатные платы // Учебное пособие РГРТУ. – 2023. – 68 с.

10. Mark Alexander. Power Distribution System (PDS) Design: Using Bypass/Decoupling Capacitors – Signal Integrity, 2005. – pp. 42–51.
11. Brim Brad, Nagle Dennis. How a Team-Based Approach to PCB Power Integrity Analysis Yields Better Results. 2017. – 7p.

### References

1. Kechiev L.N., Chermoshencev S.F., Nisan A.V. Proektirovanie sistemy raspredeleniya pitaniya pechatnyh uzlov jelektronnoj apparatury [Design of a power distribution system for printed circuit boards of electronic equipment]. Grifon, Seriya «Biblioteka JeMS». 2016. 37 p.
2. Lund P., Petrov G.V., Logunov L.A. Precizionnye pechatnye platy. Konstruirovaniye i proizvodstvo [Precision Printed Circuit Boards. Design and Manufacturing]. Perevod na russkij jazyk, Jenergoatomizdat. 1983. 116p.
3. Timoshenkov S.P., Tikhonov K.S., Titov A.Yu., Petrov V.S. Inzhenernyy vestnik Dona. 2012. № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/982](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2012/982).
4. Vertyanov D.V., Belyakov I.A., Solovyov I.A., Gladkova S.I. Inzhenernyy vestnik Dona. 2022. № 11. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8024](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n11y2022/8024).
5. Popovich M. Performance Power Distribution Networks with On-Chip Decoupling Capacitors for Nanoscale Integrated Circuits. University of Rochester. Rochester. New York. 2007. 370 p.
6. Knighten James L., Archambeault Bruce, Fan Jun, Selli Giuseppe, Rajagopal Abhilash, Connor Samuel, Drewniak James L. PDN Design Strategies: IV. Sources of PDN Noise – IEEE Newsletter. 2007. pp. 54–64.
7. PCB Stackup Design Considerations for Altera FPGAs. AN-613-1.0, 2010. 26 p.
8. Medvedev A.M. Pечатные платы. Konstrukcii i materialy. [Printed circuit boards. Designs and materials]. M.: Tehnosfera. 2005. 304 p.



9. Medvedev A.M., Mylov G.V., Dorozhzhin I.V. Materialy komponentov radioelektronnyh sredstv. Pechatnye platy [Materials of components of radio-electronic means. Printed circuit boards]. Uchebnoe posobie RGRTU. 2023. 68 p.

10. Mark Alexander. Power Distribution System (PDS) Design: Using Bypass/Decoupling Capacitors – Signal Integrity. 2005. pp. 42–51.

11. Brim Brad, Nagle Dennis. How a Team-Based Approach to PCB Power Integrity Analysis Yields Better Results. 2017. 7p.

**Дата поступления: 17.12.2024**

**Дата публикации: 2.02.2025**