

## Как снизить паразитные емкости в сборках печатных плат

По материалам компании  
The Sierra Circuits

Перевод: Сергей ШИХОВ  
sergey@acont.ru

Настоящая статья представляет интерес для тех, кто ранее не сталкивался с проблемами топологии печатных плат. В ней подробно с примерами поясняются причины возникновения паразитных параметров проводников печатной платы.

### Введение

Печатная плата состоит из нескольких параллельно расположенных проводников, разделенных изолятором. Проводящие дорожки вместе с диэлектрическим материалом, который обычно используется для подложек, образуют так называемый виртуальный конденсатор, что приводит к возникновению нежелательной паразитной емкости. Это явление и называется «эффектом паразитной емкости».

Паразитными элементами в печатной плате являются паразитная емкость, сопротивление и индуктивность. Близкое расположение друг к другу дорожек в высокочастотных печатных платах вызывает эффект паразитной емкости, что, в свою очередь, приводит к появлению перекрестных и электромагнитных помех, отрицательно влияющих на целостность сигнала. Разработчики должны учитывать паразитные емкости и индуктивные эффекты при проектировании высокочастотных, высокоскоростных печатных плат и плат со смешанными сигналами.

### Паразитная емкость в печатной плате

Паразитная, или конструктивная, емкость является результатом появления виртуаль-

ного конденсатора между двумя дорожками, разделенными диэлектриком (рис. 1). Этот эффект возникает из-за разности потенциалов, которая образуется в случае, когда токоведущие дорожки проходят в непосредственной близости друг от друга.

Заметим, что такая ситуация наблюдается даже при наличии у проводников соответствующей изоляции. Избежать образования паразитной емкости почти невозможно, поскольку ни одна электрическая цепь не является идеальной, но можно уменьшить ее величину.

### Расчет паразитной емкости

Паразитная емкость является собственным свойством проводников. Ее величина вычисляется по формуле:

$$C = q/v,$$

где  $C$  — емкость, Ф;  $v$  — напряжение, В;  $q$  — заряд, Кл (рис. 2).

В случае постоянного электрического сигнала, который не меняется во времени,  $dv/dt = 0$ , что означает отсутствие изменения потенциала; следовательно,  $i = 0$ . Если в контуре имеется конденсатор,  $dv/dt$  стремится к фиксированному значению, то есть к изменению потенциала, что приводит к протеканию тока. Следовательно,  $i \neq 0$ .

### Расчет емкости проводящих дорожек

Емкость плоского конденсатора  $C$  в единицах пФ определяется выражением:

$$C = 0,0085\epsilon_r S/d,$$

где  $\epsilon_r$  — относительная диэлектрическая проницаемость материала платы;  $S$  — площадь пластины, см<sup>2</sup>;  $d$  — расстояние между пластинами.

### Эффект паразитной емкости

При работе на низких частотах паразитными элементами можно пренебречь, так как они не влияют на функциональность системы. Однако для высокочастотных печатных плат образование паразитной емкости является большой проблемой. Каждая контактная площадка на печатной плате имеет свою паразитную емкость, каждая дорожка — паразитную индуктивность (рис. 3). Контактные площадки также добавляют свое паразитное сопротивление, которое становится причиной возникновения потерь на сопротивление. Этот паразитный эффект может возникать между проводниками и на пустых несмонтированных платах, и в сборках плат, и даже внутри корпусов компонентов, особенно в компонентах для поверхностного монтажа (SMD).

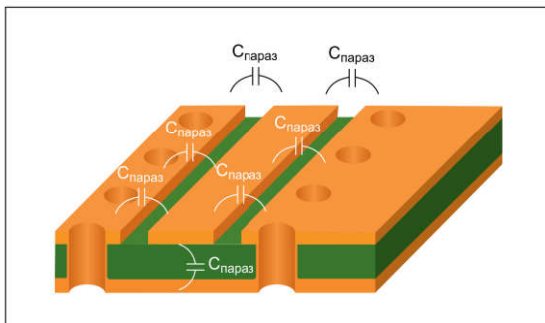


Рис. 1. Близко расположенные проводники печатной платы образуют виртуальный конденсатор, что приводит к возникновению эффекта паразитной емкости

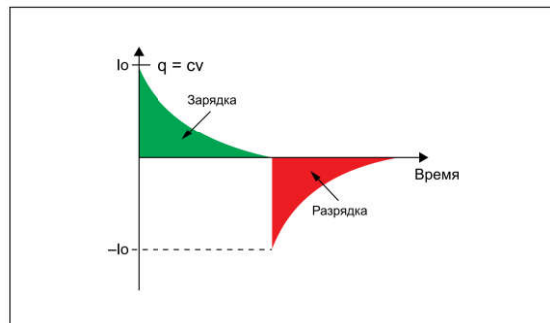


Рис. 2. Цикл зарядки-разрядки в конденсаторе

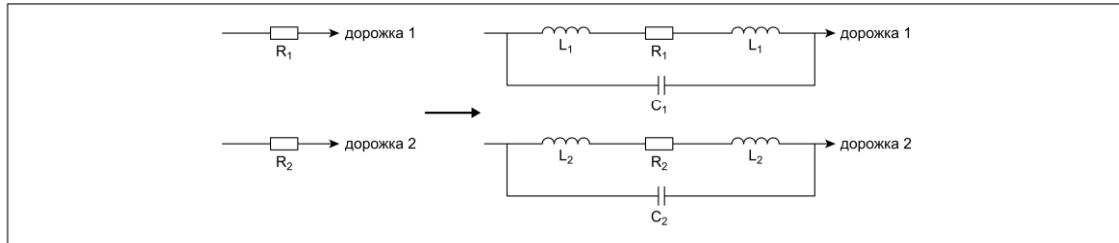


Рис. 3. Моделирование паразитных элементов печатных плат на высоких частотах

Поскольку собственные пластины конденсатора имеют разность потенциалов, существует вероятность протекания через них тока. Неважно, накапливаются ли заряды между обкладками конденсатора; ток не потечет, пока не появится разность потенциалов. При ее увеличении соответственно уменьшается поток электронов по заданному тракту прохождения сигнала к нагрузке. Это отрицательно влияет на его целостность.

#### Различие между конструктивной и паразитной емкостями

Термин «конструктивная емкость» (stray capacitance) часто используется как синоним паразитной емкости (parasitic capacitance). Однако термин «паразитная емкость» обозначает то, что ее наличие препятствует работе схемы, тогда как словосочетание «конструктивная емкость» объясняет, как именно вводится нежелательная емкость.

#### Конструктивная емкость

Конструктивная емкость не всегда возникает из-за виртуальной емкости, образованной между двумя проводниками печатной платы. На ее появление влияет также окружающая среда и конструкция платы.

#### Паразитное сопротивление в печатной плате

Паразитное сопротивление представляет собой последовательное сопротивление проводников тракта или параллельное сопротивление (шунт) между проводящими элементами.

#### Паразитная индуктивность в печатной плате

Паразитная индуктивность также возникает по длине проводящей дорожки; при этом электрическая энергия может накапливаться и рассеиваться, как в дросселе. Все проводники имеют собственную индуктивность, но на высоких частотах следует учитывать индуктивность даже относительно коротких отрезков провода или дорожек печатной платы.

$$\text{Индуктивность провода} = 0,0002L \left[ \ln \left( \frac{2L}{R} - 0,75 \right) \right], \text{ мкГн,}$$

где  $R$  — радиус провода, а  $L$  — его длина.

#### Индуктивность дорожки печатной платы

Индуктивность дорожки (трассы) растет с увеличением ее длины в отсутствие слоя заземления:

$$\text{Индуктивность дорожки} = 0,0002L \left[ \ln \frac{2L}{W+H} + 0,2235 \frac{W+H}{L} + 0,5 \right], \text{ мкГн,}$$

где  $W$  — ширина дорожки;  $L$  — ее длина;  $H$  — толщина.

Например, паразитная индуктивность дорожки длиной 2,54 см на неинвертирующем входе высокоскоростного операционного усилителя равна 29 нГн. И этого достаточно, чтобы инициировать низкочастотные колебания (рис. 4). Паразитную индуктивность можно уменьшить с помощью заземляющего слоя.

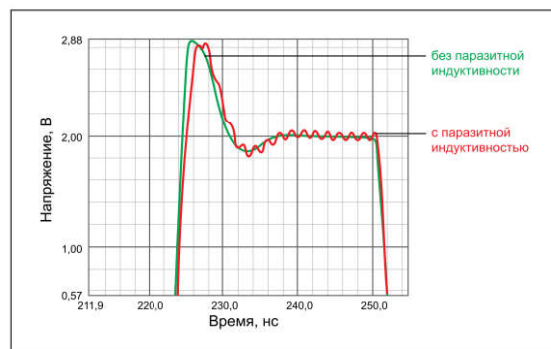


Рис. 4. Паразитная индуктивность приводит к низкочастотным колебаниям на выходе операционного усилителя

#### Причина образования паразитной емкости

На высоких частотах на протекание тока в печатной плате влияет паразитная емкость, так как работа конденсаторов с ростом частоты становится похожей на поведение проводника:

$$Z_C = 1/(2\pi fC).$$

Конденсатор функционирует как резистор с очень малым номиналом (близким к короткому замыканию), что приводит к увеличению протекающего по линии тока.

На высоких частотах паразитная емкость может вызвать большие проблемы, поскольку на бесконечной частоте конденсатор работает как провод. Следовательно, он может случайно соединить опорную плоскость любой печатной платы с корпусом.

Из-за паразитной емкости могут возникать перекрестные помехи и шумы, нежелательная обратная связь с выхода и формироваться резонансные контуры. Необходимо учитывать общую конструкцию печатной платы и ее топологию. Хорошая компоновка требует особой осторожности при размещении проводящих элементов рядом друг с другом.

К паразитным элементам относятся индуктивности, образованные выводами корпуса, длинными дорожками, контактными площадками, а также взаимодействием контактных площадок с конденсаторами контактной площадки, переходными отверстиями и т. д. Паразитные элементы следует считать угрозой для функциональной работы схемы. Они нежелательны, неизбежны, но контролируемы.

В качестве примера рассмотрим типичную схему неинвертирующего операционного усилителя (рис. 5а). На рис. 5б показана паразитная емкость на его инвертирующем входе.

В высокоскоростных схемах достаточно нескольких десятков пФ, чтобы повлиять на характеристики и функциональность схемы. Например, паразитная емкость величиной в 1 пФ на инвертирующем

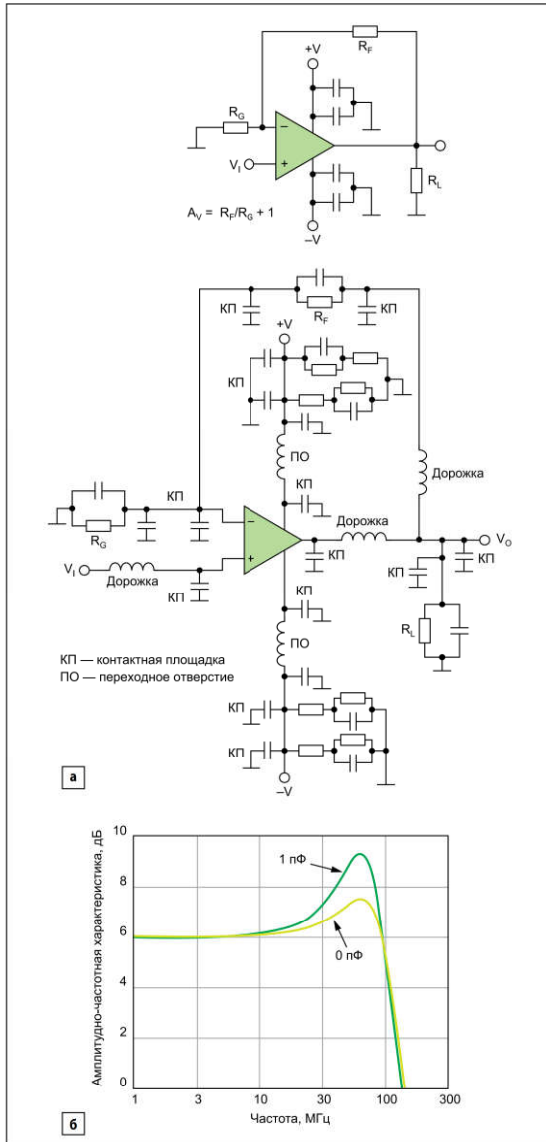


Рис. 5. а) схема неинвертирующего ОУ с паразитными элементами; б) паразитная емкость на его инвертирующем входе

входе может вызвать в частотной области 2-дБ пика. Если же паразитная емкость превышает 1 пФ, то это может вызвать неустойчивость и колебания сигнала.

Переходные отверстия также имеют свойство работать как паразитные элементы, становясь причиной возникновения паразитной емкости или паразитной индуктивности (рис. 6).

Паразитная индуктивность переходного отверстия в нГн определяется выражением:

$$L = 2T(\ln(4T/d)+1),$$

где  $T$  — толщина диэлектрика;  $d$  — диаметр отверстия, см.

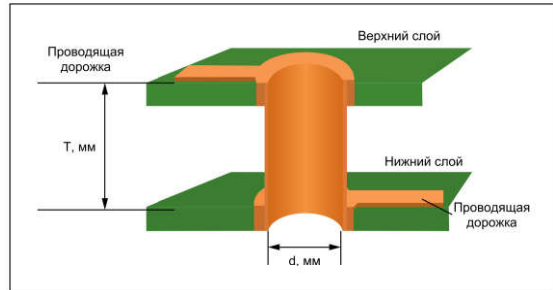


Рис. 6. Переходные отверстия становятся причиной возникновения паразитной емкости или паразитной индуктивности

Паразитная емкость переходного отверстия в пФ определяется выражением:

$$C = (0,55\epsilon_r T D_1)/(D_2 - D_1),$$

где  $\epsilon_r$  — относительная проницаемость материала платы;  $T$  — ее толщина;  $D_1$  — диаметр площадки, окружающей переходное отверстие;  $D_2$  — диаметр зазора в заземляющей плоскости.

Заметим, что индуктивность переходных отверстий в сочетании с паразитной емкостью может образовывать резонансные цепи. Собственная индуктивность переходного отверстия настолько мала, что эти резонансы находятся в гигагерцевом диапазоне. Однако индуктивность растет из-за последовательного подключения одного переходного отверстия к другому, что снижает резонансную частоту всего контура. Следовательно, нельзя размещать несколько переходных отверстий на критической трассе высокоскоростной цепи.

Другая проблема в том, что переходные отверстия являются физическими отверстиями в заземляющих плоскостях, и их некорректное расположение может привести к образованию контуров заземления. Во избежание этого в случае аналоговой разводки рекомендуется прокладывать все сигнальные дорожки на верхнем слое платы.

### Уменьшение паразитной емкости в трассировке

В электронных схемах конденсаторы блокируют низкочастотные сигналы и сигналы постоянного тока, но пропускают высокочастотные сигналы. Это свойство конденсаторов является причиной возникновения паразитной емкости в высокоскоростных цепях. Кроме того, паразитная емкость может вызвать электромагнитные помехи или шум, которые распространяются по проводам и кабелям или передаются на соседние дорожки. Как правило, устранить такую паразитную емкость невозможно. Тем не менее существуют эффективные способы уменьшить ее на этапе разводки печатной платы. Рекомендуется следующее.

- **Избегать параллельной маршрутизации.** Поскольку между двумя проводниками при параллельной разводке величина площади максимальна, между ними появляется максимальная емкость.
- **Обеспечить изоляцию канавками (путем удаления заземляющих слоев).** Плоскости питания, считающиеся заземлением переменного тока, ведут себя в точности, как земля. Следовательно, слои питания так же необходимо удалить, как и слои заземления вблизи проводника. Эта техника называется изоляцией канавками (moating).
- **Использовать экран Фарадея или защитное кольцо.** Экран Фарадея действует как экранирующая пластина, которая помещается между двумя дорожками для минимизации емкостных эффектов.
- **Увеличить расстояния между соседними дорожками.** Емкость уменьшается с расстоянием между проводниками. Зазор должен в 2–3 раза превышать ширину проводника.



- **Избегать чрезмерного использования переходных отверстий.** Слишком большое количество переходных отверстий может увеличить емкость. Чтобы сократить влияние металлизированных отверстий, следует уменьшить контактные ободки вокруг переходных отверстий на слоях, где нет связей. Таким образом минимизируется количество переходных отверстий, например, от BGA-компонентов.
- **Тщательное разделять компоненты.** Тщательное разделение компонентов и проводов, предохранительных колец, плоскостей питания, плоскостей заземления, экранирования между выходом и входом, а также правильное согласование линий передач позволяют уменьшить паразитную емкость.
- **Использовать диэлектрический материал с низкой диэлектрической проницаемостью.** При неизменных значениях остальных параметров более высокая диэлектрическая проницаемость материала увеличивает паразитную емкость.
- **Располагать сигнальный слой между двумя заземляющими плоскостями или между заземляющей плоскостью и плоскостью питания.** Например, на 4-слойной плате можно разместить слой питания внизу и проложить отдельные критичные дорожки между слоями питания и заземления. Это предотвратит проникновение электромагнитных помех от сигналов в одном слое в другой сигнальный слой.
- **Определять оптимальную толщину слоя.** Более тонкие слои уменьшают площадь контура и паразитную индуктивность, но увеличивают паразитную емкость. Для определения оптимальной толщины слоя рекомендуется использовать средства моделирования.
- **Согласовывать импеданс.** В высокоскоростных цифровых печатных платах передача данных осуществляется через несколько линий со скоростью в десятки Гбит/с, что приводит к рассогласованию импедансов из-за паразитной емкости и индуктивности. Любое рассогласование, вызванное паразитными помехами, влечет за собой возникновение отражений в линии. В конечном итоге возрастают временной джиттер и коэффициент ошибок в битах. Импеданс должен быть согласован по всем сигнальным линиям, по которым передаются высокоскоростные данные.

### Измерение паразитной емкости методом TDR

Какой смысл использовать рефлектометр временной области (TDR) для оценки индуктивности или емкости, если можно воспользоваться измерителями индуктивности, емкости и сопротивления (LCR-метрами) с отличным разрешением? Дело в том, что TDR-рефлектометр осуществляет измерения параметров не отдельных, а физически включенных в схему устройств и линий передачи, позволяя учесть влияние на них окружения. Давайте посмотрим на конкретном примере, как TDR-рефлектометр измеряет величины, которые трудно оценить с помощью LCR-метра (рис. 7).

#### Пример использования рефлектометра

Рассмотрим печатную плату с длинной узкой дорожкой, которая проложена над плоскостью заземления, образуя микрополосковую линию. Проводящая дорожка идет от верхнего слоя печатной платы к нижнему через переходное отверстие. Переходное отверстие проходит заземляющий слой через небольшой разрыв. Теперь предположим, что переходное отверстие добавляет емкость к заземлению. В данном случае это дискретная емкость между верхней и нижней линиями передачи. Требуется измерить емкость относительно земли между двумя линиями передачи.

LCR-измеритель предоставляет информацию об общей емкости между заземлением и узлом «дорожка – переходное отверстие – дорожка». Поскольку измерить отдельно емкость переходного отверстия и емкость дорожки невозможно, емкости дорожки удаляются с платы. Таким образом, можно измерить емкость между переходным отверстием и землей. Очевидно, что это значение нельзя считать

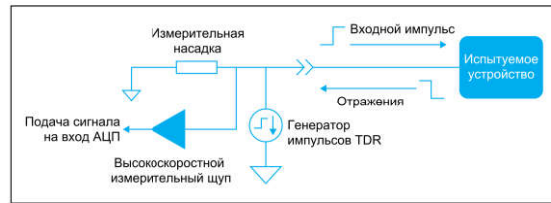


Рис. 7. Структурная схема тестирования методом TDR-рефлектометрии

корректным, поскольку в измерение не включено значение емкости дорожек.

TDR-рефлектометр запускает ступенчатый сигнал по дорожке печатной платы и оценивает величину отражения от неоднородности в области переходного отверстия. Величина «избыточной» емкости, вызванной переходным отверстием, рассчитывается путем интегрирования и масштабирования отраженного сигнала. Такой метод позволяет получить корректное значение емкости для всей модели.

Несоответствие между двумя измерениями возникает из-за того, что LCR-измеритель определяет общую емкость переходного отверстия, тогда как TDR-рефлектометр — избыточную емкость переходного отверстия. Если бы последовательная индуктивность переходного отверстия была равна нулю, его общая емкость считалась бы такой же, что и его избыточная емкость. Поскольку последовательная индуктивность переходного отверстия не равна нулю, необходимо рассматривать всю структуру переходного отверстия, включая его последовательную индуктивность и шунтирующую емкость.

Учитывая, что переходное отверстие обладает внутренней емкостью, можно упростить модель, исключив последовательную индуктивность и включив только избыточную емкость, измеренную с помощью TDR-рефлектометра вместо общей емкости. Для этого сначала моделируется узел «дорожка – переходное отверстие – дорожка», чтобы оценить влияние переходных отверстий на сигналы, распространяющиеся по дорожкам. Далее TDR-рефлектометр распространяет входной импульс по дорожке для измерения. Таким образом, обеспечивается прямое измерение искомой величины.

### Выводы

К сожалению, полностью устранить паразитные элементы не представляется возможным. Тем не менее, известно несколько простых вариантов топологии печатной платы, которые позволяют уменьшить влияние паразитной емкости. Корректный выбор компонентов также предотвращает проблемы с сигналом, возникающие из-за образования паразитных емкости и индуктивности. Точные проектные и производственные решения позволяют управлять этими эффектами. ■

### Литература

1. How to Reduce Parasitic Capacitance in PCB Layout // <https://www.protoexpress.com/blog/how-to-reduce-parasitic-capacitance-pcb-layout/>



#### Комментарий Сергея ШИХОВА, директора по управлению проектами, А-КОНТРАКТ

На функционирование реального устройства, в отличие от идеального, влияет множество нежелательных факторов, к которым относятся паразитные емкости, индуктивности, сопротивления. Поскольку их наличие обусловлено физическими причинами, полностью избавиться от этих факторов невозможно, однако учитывать и контролировать — можно и нужно.