

Практическое руководство по разработке печатных плат для высокочастотных схем

Джон АРДИЗОНИ (John ARDIZZONY)
john.ardizzony@analog.com

В статье рассматривается топология высокочастотных плат с практической точки зрения. Основная ее цель — помочь новичкам прочувствовать множество моментов, которые должны быть учтены при разработке печатных плат (ПП) для высокочастотных устройств. Она также будет полезна и для повышения квалификации тех специалистов, у кого был перерыв в разработке плат. Основное внимание уделено способам улучшения характеристик схем, ускорению времени их разработки и внесения изменений.

Рассмотренные вопросы и предлагаемые методики применимы к топологии высокочастотных схем вообще. Когда операционный усилитель (ОУ) работает на высоких частотах, основные характеристики схемы зависят от топологии ПП. Даже при качественном проектировании работа схемы может оказаться посредственной из-за плохо продуманной или неаккуратной печатной платы. Быть уверенным в том, что схема покажет расчетные параметры, можно, только продумав заранее и обращая внимание на основные моменты в течение всего процесса разработки топологии ПП.

Схема

Хорошая схема — это необходимое, но не достаточное условие хорошей топологии. При ее проектировании не стоит скупиться на дополнительную информацию на чертеже, и внимательно отслеживать направление прохождения сигнала. Непрерывность прохождения сигнала слева направо, скорее всего, даст тот же эффект и на печатной плате. Максимум полезной информации в схеме обеспечит оптимальную работу разработчиков, техников, инженеров, которые будут весьма признательны вам, а заказчикам в случае возникновения каких-либо трудностей не придется срочно разыскивать разработчика.

Какую информацию, помимо обычных позиционных обозначений, рассеиваемой мощности и допусков, наносить на схему? Вот несколько советов, как из обычной схемы сделать суперсхему: добавьте формы сигналов, механическую информацию о корпусах или размерах, укажите длину дорожек, площади, где нельзя размещать детали, детали, которые должны быть на верхней стороне ПП; добавьте инструкцию по настройке, диапазоны номиналов элементов, тепловую информа-

цию, линии согласованных импедансов, краткие определения работы схемы и так далее.

Никому не доверяйте

Если вы сами не занимаетесь топологией, выделите достаточно времени, чтобы вместе с разработчиком топологии пройти вдоль и поперек схемы. Намного проще и быстрее уделить внимание топологии вначале, чем впоследствии заниматься бесконечными доработками. Не рассчитывайте, что разработчик топологии умеет читать ваши мысли — вводные и руководство наиболее важны в начале процесса разводки платы. Чем больше информации и участия в процессе разводки, тем лучше получится плата. Укажите разработчику промежуточные этапы, на которых вы хотите ознакомиться с процессом разводки. Эти «контрольные точки» предохраняют плату от далеко зашедших ошибок и минимизируют исправления топологии.

Указания разработчику должны включать: краткое описание функций схемы; эскиз платы, на которой показаны расположения входов и выходов; конструктив (stack up) платы (т. е. толщина платы, количество слоев, подробности сигнальных слоев и сплошных слоев — питания, земли — аналоговой, цифровой, высокочастотной); сигналы, которые должны быть на каждом слое; размещение критичных элементов; точное размещение развязывающих элементов; критичные дорожки; линии с согласованным импедансом; дорожки одинаковой длины; размеры элементов; дорожки вдали (или вблизи) друг от друга; цепи ближе (или дальше) друг от друга; элементы вблизи (или вдали) друг от друга; элементы на верхней и на нижней стороне платы. Никто не обвинит вас в излишке информации, если слишком мало — пожалуются, наоборот — никогда.

Расположение, расположение и еще раз расположение

При размещении схемы на плате важно все: от компоновки отдельных элементов до выбора того, какие цепи должны быть расположены рядом.

Обычно определяется местоположение входов, выходов и питания. Особое внимание следует уделить топологии: расположению критических элементов — как отдельных цепей, так и схемы в целом. Определение местоположения основных компонентов и путей прохождения сигнала с самого начала дает уверенность, что схема будет работать как положено. Это позволяет уменьшить стоимость, решить проблемы и сократить сроки разводки.

Развязка цепей питания

Развязка источника питания на выводах питания усилителя для минимизации шумов является критическим аспектом процесса разработки ПП — как для схем с высокоскоростными ОУ, так и для других высокочастотных схем. Обычно для развязки высокоскоростных ОУ применяется одна из двух конфигураций.

Между шиной питания и землей

Этот метод в большинстве случаев работает лучше и позволяет использовать конденсаторы, параллельно подключенные от выводов питания ОУ напрямую к земле. Обычно достаточно двух, но некоторые схемы выигрывают от нескольких параллельно соединенных конденсаторов.

Параллельное соединение конденсаторов с разной емкостью дает уверенность, что на выводах питания будет низкий импеданс по переменному току в широком диапазоне частот.

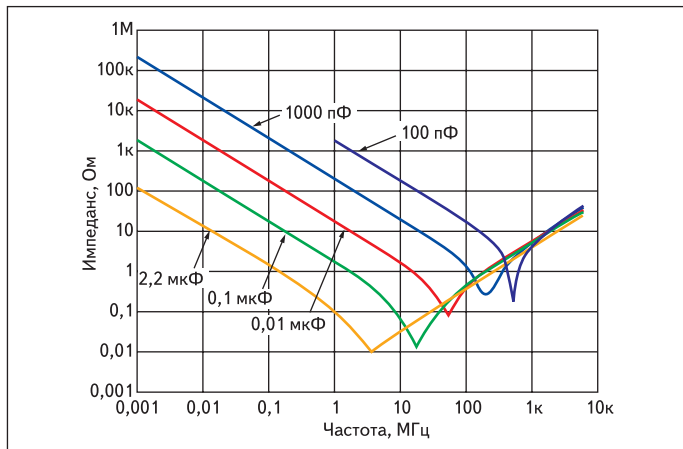


Рис. 1. Зависимость импеданса конденсатора от частоты

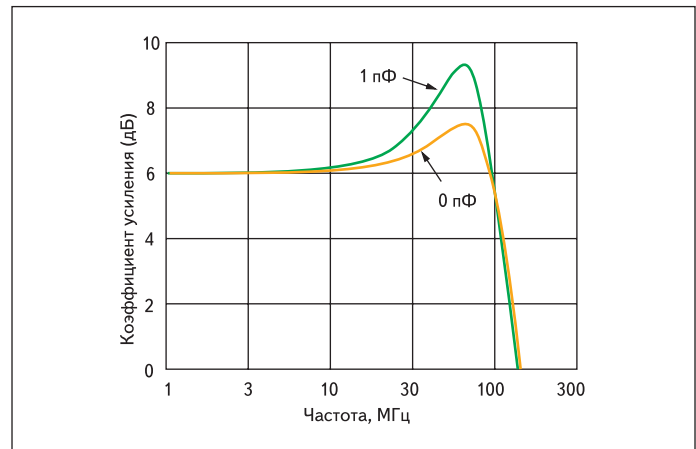


Рис. 4. Дополнительное увеличение пика АЧХ, вызванное паразитной емкостью

Это особенно важно, когда коэффициент влияния нестабильности источника питания (PSR) падает — конденсаторы компенсируют усилителю такое снижение. Обеспечение низкого импеданса пути к земле для многих декад частоты не дает нежелательным помехам попасть в ОУ. На рис. 1 показаны преимущества этого метода. На низших частотах конденсаторы с большой емкостью оказывают малое сопротивление цепи к земле. При частоте собственного резонанса конденсатора качество конденсатора ухудшается, и он становится индуктивностью. Поэтому важно использовать множество конденсаторов: когда частотная характеристика одного падает, другой становится значимым, обеспечивая низкий импеданс по переменному току в диапазоне многих декад частоты.

Непосредственно вблизи выводов питания ОУ конденсатор с меньшей емкостью и меньшими геометрическими размерами следует расположить на той же стороне, что и ОУ — и как можно ближе к усилителю. Сторону земли конденсатора необходимо подсоединить к слою земли с минимальными длинами вывода и дорожки. Соединение должно быть как можно ближе к нагрузке усилителя, чтобы минимизировать помехи между шинами питания и землей. Рис. 2 иллюстрирует эту методику.

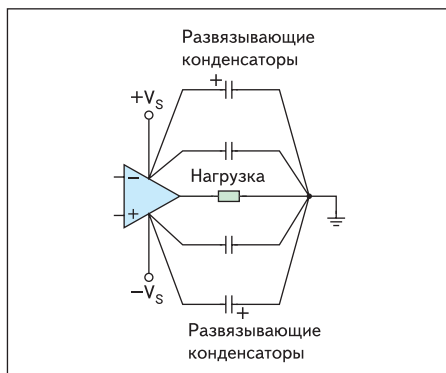


Рис. 2. Подсоединение шин питания к земле параллельными конденсаторами

Этот процесс следует повторить со следующим по емкости конденсатором. Хорошее правило — начинать с конденсатора наименьшей емкости — 0,01 мкФ и далее переходить к оксидному конденсатору емкостью 2,2 мкФ с малым ESR (эквивалентное последовательное сопротивление). Первый из указанных в корпусе 0508 имеет малую последовательную индуктивность и отличные высокочастотные параметры.

Между одной и другой шиной

Альтернативной конфигурацией является использование одного или более конденсаторов, подключенных между положительной и отрицательной шинами питания ОУ. Этот способ используется, когда трудно установить все четыре конденсатора в схему. Недостатком является увеличение размеров конденсаторов, так как напряжение на них удваивается по сравнению с блокировкой каждого источника по отдельности. В этом случае требуется конденсатор с большим напряжением пробоя, что приводит к увеличению его размера. Однако этот вариант

улучшает как PSR, так и характеристики по искажениям.

Так как каждая схема и ее топология имеют различия, то конфигурация, число и емкости конденсаторов определяются конкретными требованиями схемы.

Паразитные реактивности

Паразитные реактивности — это скрытые емкости и индуктивности, действующие в высокочастотных цепях. Сюда относятся индуктивности, образованные выводами элементов и длинными дорожками; емкости между контактными площадками и землей, слоем питания и дорожками; взаимодействия через переходные отверстия и много других факторов. На рис. 3а — типичная схема неинвертирующего ОУ. Однако если принять во внимание паразитные элементы, эта же схема будет выглядеть как на рис. 3б.

В высокочастотных схемах они влияют на характеристики схемы, даже будучи небольшими. Иногда хватает нескольких десятых долей пикофарады. Пример: только 1 пФ

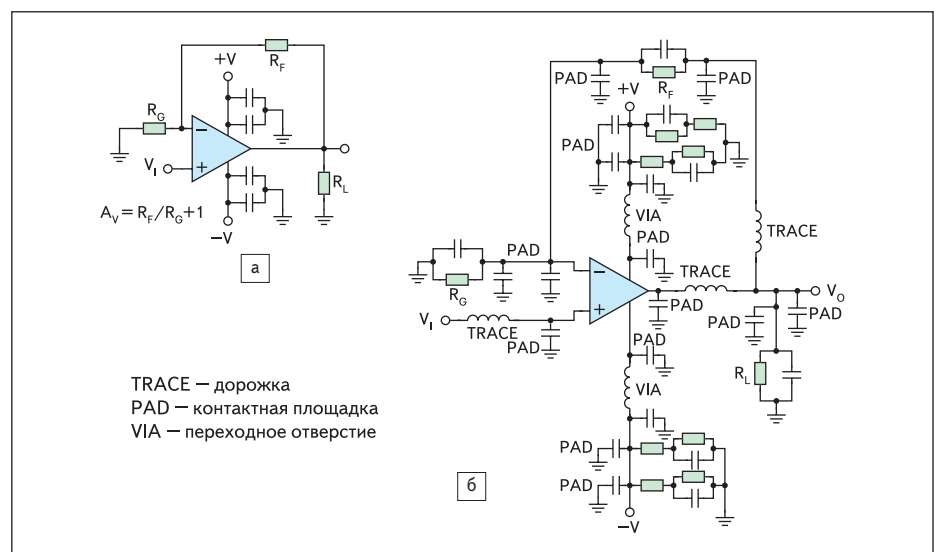


Рис. 3. Типичная схема на ОУ: а) проект; б) с учетом паразитных элементов

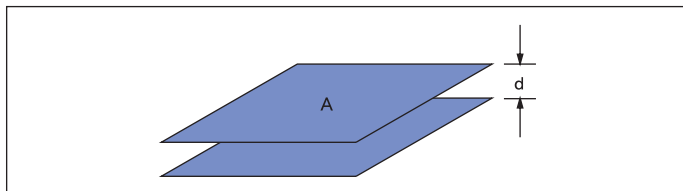


Рис. 5. Емкость плоскопараллельного конденсатора

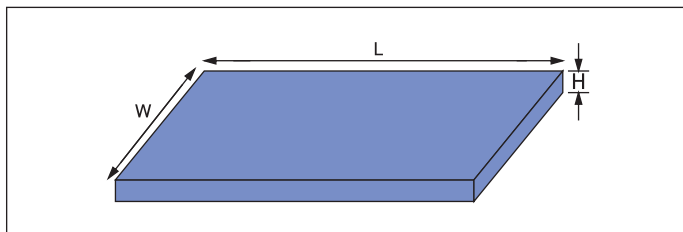


Рис. 6. Индуктивность дорожки

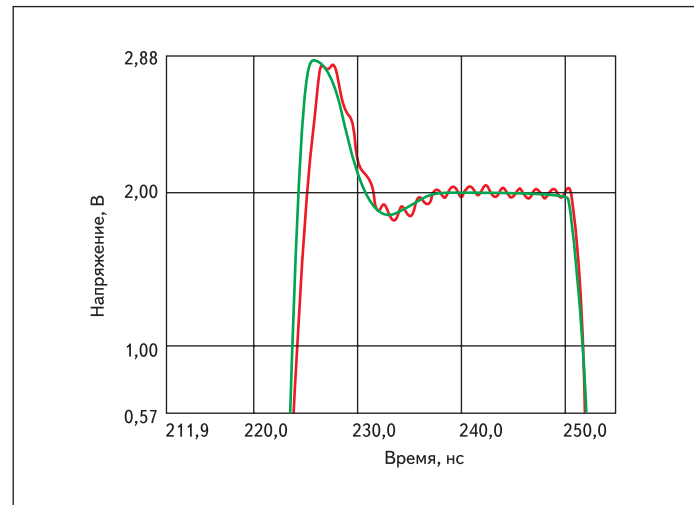


Рис. 7. Отклик на импульс без слоя и со слоем земли

дополнительной паразитной емкости, присутствующей на инвертирующем входе, может вызвать подъем полюса частотной характеристики на 2 дБ (рис. 4) и далее — нестабильность схемы и колебания.

Несколько основных формул могут помочь в расчете паразитных элементов. Уравнение 1 — формула для емкости конденсатора с параллельными обкладками (рис. 5).

$$C = kA/11,3d, \quad (1)$$

где C — емкость; A — площадь обкладки в см^2 ; k — относительная диэлектрическая проницаемость материала платы; и d — расстояние между обкладками в см.

Следует рассмотреть также и индуктивность полоски проводника, возникающей из-за чрезмерной длины дорожки и недостатка земляного слоя. Уравнение 2 дает формулу индуктивности дорожки (рис. 6):

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

где W — ширина дорожки; L — ее длина; и H — толщина. Все размеры — в миллиметрах.

Осциллограмма на рис. 7 показывает влияние дорожки длиной 2,54 см на неинвертирующем входе высокоскоростного ОУ. Эквивалентная паразитная индуктивность равна 29 нГн, ее достаточно, чтобы вызвать устойчивые колебания небольшого уровня, которые сохраняются все время отклика на импульс. На рисунке также видно, как использование слоя земли смягчает влияние паразитной индуктивности.

Еще один источник паразитных реактивностей — переходные отверстия; они могут содержать как индуктивность, так и емкость.

Уравнение 3 дает формулу для расчета паразитной индуктивности (рис. 8).

$$L = 2T [\ln(4T/d) + 1] \text{нГн}, \quad (3)$$

где T — толщина платы и d — диаметр переходного отверстия в сантиметрах.

Уравнение 4 показывает, как рассчитать паразитную емкость переходного отверстия:

$$C = \frac{0,55\epsilon_r TD}{D_2 - D_1} \text{пФ}, \quad (4)$$

где ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость материала платы; T — толщина платы; D_1 — диаметр контактной площадки, окружающей переходное отверстие; D_2 — диаметр круга, удаленного из слоя земли. Все размеры в сантиметрах. Одно переходное отверстие на плате толщиной 0,157 см может добавить 1,2 нГн индуктивности и 0,5 пФ емкости. Поэтому для минимизации паразитных элементов при разводке платы надо быть внимательным.

Слой земли

Здесь мы коснемся отдельных ключевых моментов этого вопроса. Перечень ссылок на данную тему приводится в конце статьи.

Слой земли действует как общий опорный потенциал, обеспечивает экранирование, позволяет отводить тепло и уменьшает паразитную индуктивность (однако увеличивает паразитную емкость). Хотя существует много преимуществ использования слоя земли, есть ряд важных ограничений, и при его реализации следует проявлять осторожность.

В идеале один слой ПП должен служить как слой земли. Наилучшие результаты получаются, если его целостность не нарушена. Не старайтесь удалить часть слоя земли, чтобы проводить по нему сигналы. Он уменьшает индуктивность дорожек, удаляя магнитное поле между собой и проводником. Если

участок слоя земли под дорожкой удален, дорожка получает нежелательные паразитные индуктивности под или над ним.

Так как слой земли обычно имеет большую площадь и поперечное сечение, его сопротивление сохраняется минимальным. На низких частотах ток протекает по пути наименьшего сопротивления, но на высоких частотах — по пути наименьшего сопротивления. Тем не менее есть исключения, и иногда меньший слой заземления работает лучше. Это касается и высокоскоростных ОУ, если удалить часть земли под входными и выходными контактными площадками.

Паразитная емкость, вводимая слоем земли на входе, добавляется к входной емкости ОУ, снижает запас по фазе и может стать причиной нестабильности. Как мы видели при рассмотрении паразитных реактивностей, 1 пФ емкости на входе ОУ может вызвать

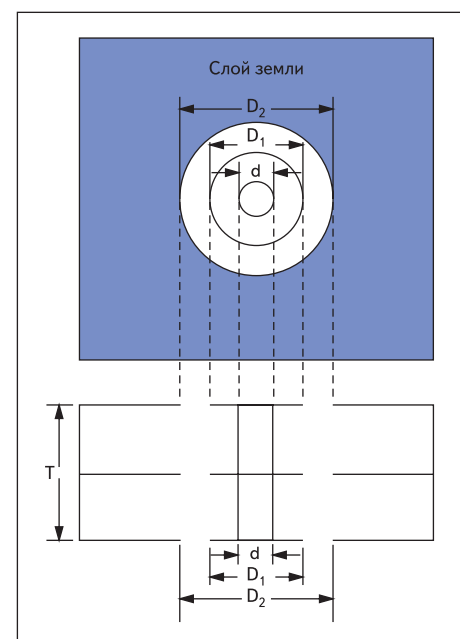


Рис. 8. Размеры переходного отверстия

появление значительного пика частотной характеристики. Емкостная нагрузка на выходе — в том числе из-за паразитных емкостей — создает полюс в цепи обратной связи. Это также может уменьшить запас по фазе и привести к нестабильности.

Аналоговые и цифровые цепи, включая их землю и подложки, по возможности, должны быть разделены. Крутые фронты импульсов создают пики тока, текущие по слою земли и создающие помехи, ухудшая аналоговые параметры схемы.

На высоких частотах следует обратить внимание на явление, называемое скин-эффектом. Он заставляет ток протекать по внешней поверхности проводника, как бы делая его уже и увеличивая сопротивление по сравнению с значением проводника на постоянном токе. Хотя рассмотрение скин-эффекта не входит в задачи этой статьи, приведем приблизительное выражение для расчета глубины скин-слоя в меди (в см):

$$\text{Глубина скин-слоя} = 6,61/\sqrt{f(\text{Гц})}. \quad (5)$$

Для снижения скин-эффекта может быть полезным покрытие из металлов, снижающих возможность его появления.

Корпуса

ОУ, как правило, предлагаются в разных типах корпусов. Выбор корпуса может повлиять на высокочастотные параметры усилителя, главными причинами чего являются упомянутые ранее паразитные реактивности и пути разводки сигнала. Здесь обратим внимание на подвод к усилителю входных и выходных сигналов и питания.

Рис. 9 иллюстрирует разницу в разводке ОУ в корпусе SOIC и в корпусе SOT-23. Каждый из них требует соблюдения определенных условий. Обратимся к рис. 9а: внимательное изучение пути обратной связи наводит на мысль, что существует несколько вариантов ее разводки. Первостепенное значение имеет минимальная длина дорожек. Их паразитная индуктивность может вызвать звоны и перегрузку. На рис. 9а, б путь обратной связи пролегает вокруг усилителя. На рис. 9в показан альтернативный подход — разводка обратной связи под корпусом SOIC, который минимизирует длину дорожек. У каждого варианта есть свои нюансы. Первый может привести к чрезмерной длине дорожек и увеличению последовательной индуктивности. Во втором используются переходные отверстия, которые добавляют паразитную емкость и индуктивность. При разводке платы влияние этих реактивностей должно быть принято во внимание.

Топология платы с корпусом SOT-23 почти идеальна: минимальная длина дорожек обратной связи, минимальное использование переходных отверстий; нагрузка и развязывающий конденсатор подключены к земле короткими дорожками к одной точке; развя-

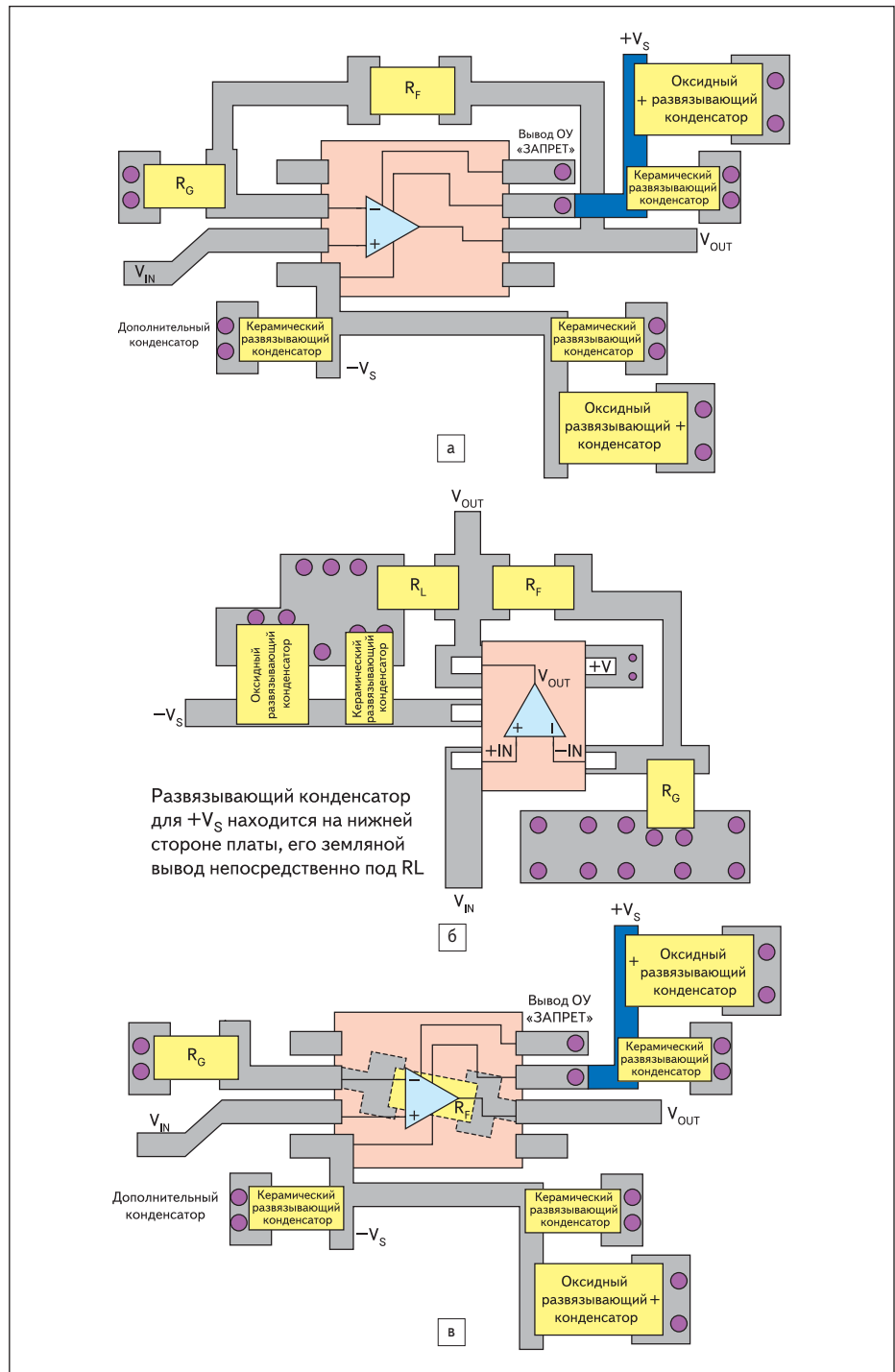


Рис. 9. Отличия топологии схем с ОУ: а) корпус SOIC; б) корпус SOT-23; в) корпус SOIC с резистором R_F с нижней стороны платы

зывающий конденсатор положительного напряжения, не показанный на рис. 9б, размещен прямо под конденсатором отрицательного напряжения на нижней стороне платы.

Цоколевка усилителя с малым уровнем искажений

Новая цоколевка для уменьшения искажений, примененная в некоторых ОУ компании Analog Devices (например, AD8045), помогает ликвидировать обе упомянутых выше проблемы и улучшает характеристики

в двух других важных областях. Цоколевка с малым уровнем искажений LFSP, показан-

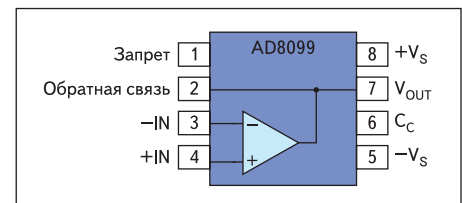


Рис. 10. ОУ с цоколевкой для малых искажений

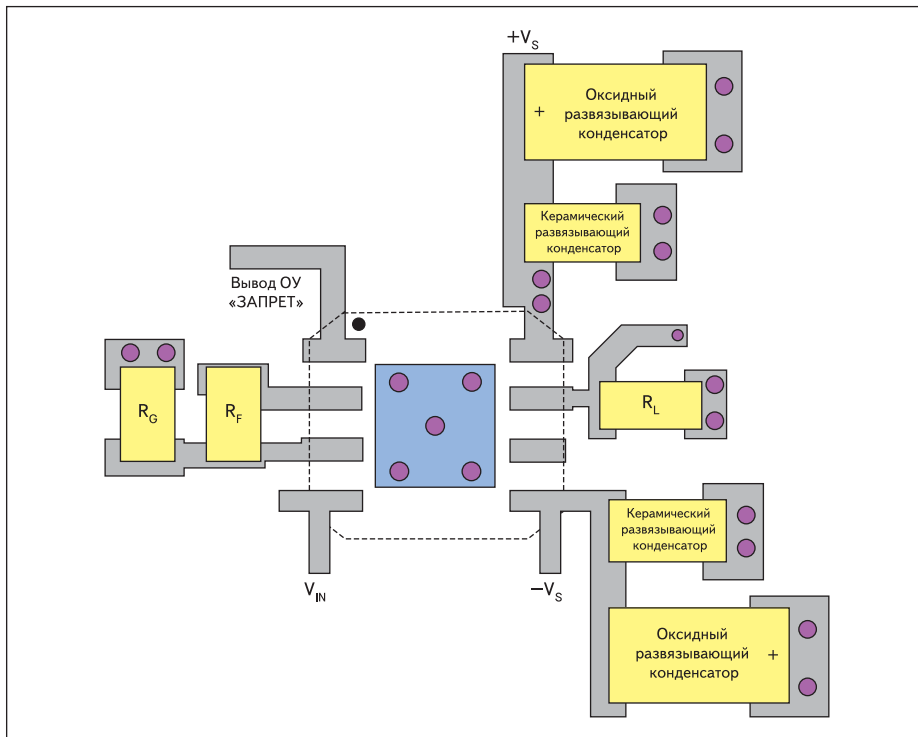


Рис. 11. Топология ПП для ОУ с малыми искажениями AD8045

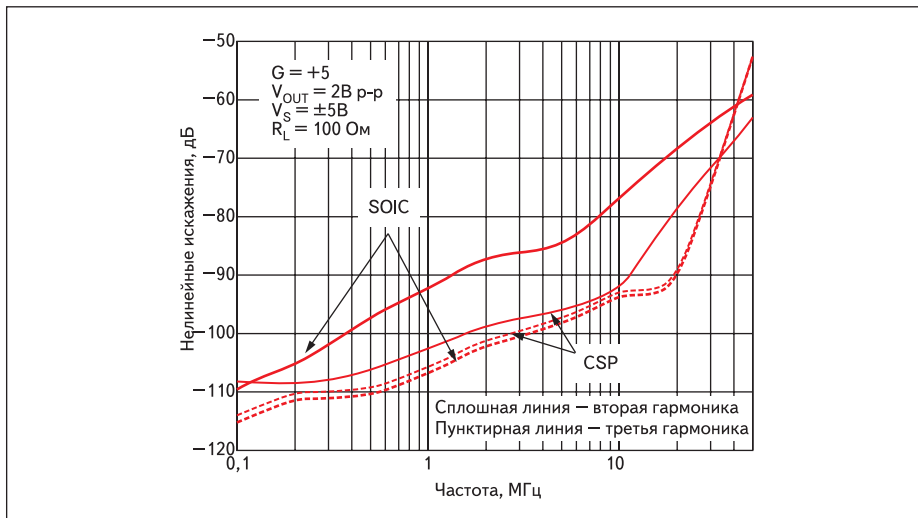


Рис. 12. Сравнение искажений ОУ AD8099 в разных корпусах — SOIC и LFCSP

ная на рис. 10, получена из традиционной для ОУ цоколевки, поворотом ее против часовой стрелки на один вывод и добавлением второго выходного вывода, предназначенного для цепи обратной связи.

Цоколевка для малых искажений допускает короткое соединение между выходом (выводом, предназначенным для обратной связи) и инвертирующим входом, как показано на рис. 11. Это значительно упрощает топологию и придает ей рациональную форму.

Вторым преимуществом корпуса является ослабление второй гармонической нелинейных искажений. Одной из причин ее возникновения является связь между неинвертирующим входом и выводом отрицательного напряже-

ния питания. Цоколевка для малых искажений корпуса LFCSP ликвидирует эту связь и значительно ослабляет вторую гармонику; в некоторых случаях ее снижение может быть до 14 дБ. На рис. 12 показана разница в искажениях ОУ AD8099 в корпусе SOIC и в корпусе LFCSP.

Этот корпус имеет еще одно преимущество — в рассеянии мощности. У корпуса открытая подложка микросхемы, которая снижает его тепловое сопротивление, улучшая θ_{JA} примерно на 40%. В этом случае микросхема работает при пониженных температурах, что повышает ее надежность.

В настоящее время в новых корпусах для малых искажений доступны три высокосо-

ростных ОУ Analog Devices: AD8045, AD8099 и AD8000.

Разводка и экранирование

На печатных платах электронных схем могут одновременно присутствовать самые различные сигналы — аналоговые и цифровые, с высоким и низким напряжением, большим и малым током — от постоянного тока до гигагерцовых частот. Не дать им интерферировать друг с другом — трудная задача.

Важно заранее продумать план обработки сигналов на плате, отметить, какие из них чувствительны, и определить шаги для сохранения их неприкосновенности. Слои земли, кроме предоставления опорного потенциала для электрических сигналов, можно также использовать и для экранирования. Когда требуется изолировать сигналы, первым делом следует обеспечить достаточное расстояние между дорожками сигналов. Рассмотрим несколько практических мер:

- Минимизирование длины параллельных линий и предотвращение близкого соседства между сигнальными дорожками на одном и том же слое уменьшит индуктивную связь.
- Минимизирование длины дорожек на смежных слоях предотвратит емкостную связь.
- Сигнальные дорожки, требующие особой изоляции, должны проходить на разных слоях и, если их невозможно разнести подальше, — перпендикулярно друг другу, между ними следует проложить слой земли. Перпендикулярная разводка минимизирует емкостную связь, а земля образует электрический экран. Эта методика используется при формировании линий с согласованным импедансом (волновым сопротивлением).

Высокочастотные (ВЧ) сигналы обычно проводят по линиям с согласованным импедансом. То есть волновое сопротивление дорожки обеспечивается равным, например 50 Ом (типичное для ВЧ-схем). Два широко применяемых типа согласованных линий — микрополосковые и полосковые — могут дать одинаковые результаты, но имеют разные реализации.

Микрополосковая согласованная линия, показанная на рис. 13, может проходить на любой стороне платы; она использует слой земли, лежащий непосредственно под ней, в качестве плоскости базового заземления.

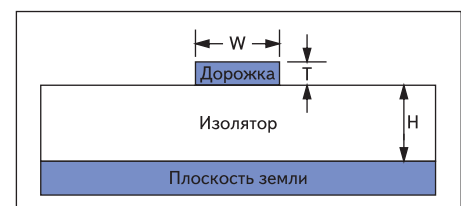


Рис. 13. Микрополосковая линия передачи

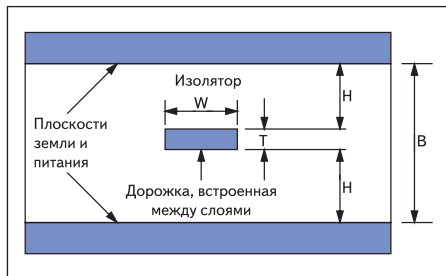


Рис. 14. Полосковая согласованная линия

Для расчета характеристического волнового сопротивления линии на плате FR4 можно воспользоваться следующей формулой:

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1,41}} \ln \left[\frac{5,98H}{(0,8W + T)} \right], \quad (6)$$

где H — расстояние от плоскости земли до дорожки; W — ширина дорожки; T — толщина дорожки; все размеры в миллах (1 мил = 10^{-3} дюйма). ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость материала платы.

Полосковая согласованная линия (рис. 14) использует два слоя плоскости земли и находящуюся между ними сигнальную дорожку. Этот способ использует больше дорожек, требует большего количества слоев, чувствителен к изменениям толщины изолятора и стоит дороже, поэтому он обычно применяется только в устройствах с повышенными требованиями.

Уравнение для расчета характеристического волнового сопротивления полосковой линии:

$$Z_0(\text{Ом}) = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left[\frac{1,9(B)}{(0,8W + T)} \right]. \quad (7)$$

Защитные кольца — другой широко применяемый в схемах с ОУ вид экранирования. Они предназначены для предотвращения попадания паразитных токов в чувствительные узлы схемы. Их принцип действия прост — полное окружение чувствительного узла за-

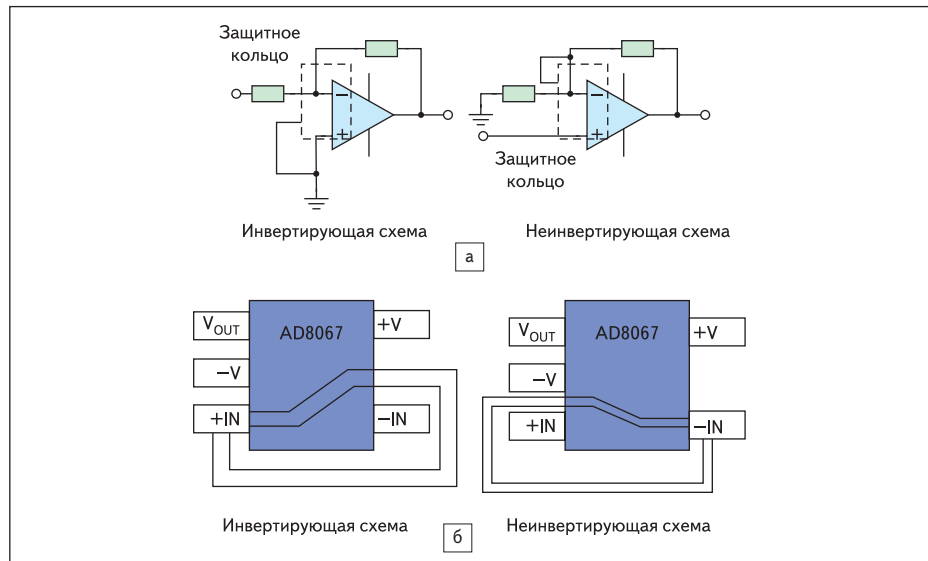


Рис. 15. Защитные кольца:

а) инвертирующая и неинвертирующая схема; б) реализация обоих вариантов в корпусе SOT-23-5

щитным проводником, на котором поддерживается или на который подается (через малый импеданс) такой же потенциал, как и у чувствительного узла, и, таким образом, в защитное кольцо стекают паразитные токи, не попадая в чувствительный узел. На рис. 15а показаны схемы защитных колец для инвертирующего и неинвертирующего включения ОУ. На рис. 15б показана типичная реализация обоих вариантов защитных колец для ОУ в корпусе SOT-23-5.

Существует много других вариантов экранирования и разводки. Для получения дополнительной информации по этим и другим темам, упомянутым выше, читателю предлагается ознакомиться с нижеприведенными ссылками.

Заключение

Для успешного проектирования приборов на высокоскоростных ОУ важна разумная топология печатных плат. Ее основой является хорошая схема, важно также тесное сотрудничество инженера-схемотехника и разработ-

чика печатной платы, особенно при размещении элементов и их соединении. ■

Литература

1. Ardizzoni J. Keep High-Speed Circuit-Board Layout on Track // EE Times, May 23, 2005.
2. Brokaw P. An IC Amplifier User's Guide to Decoupling, Grounding, and Making Things Go Right for a Change // Analog Devices Application Note AN-202.
3. Brokaw P., Barrow J. Grounding for Low- and High-Frequency Circuits // Analog Devices Application Note AN-345.
4. Buxton J. Careful Design Tames High-Speed Op Amps // Analog Devices Application Note AN-257.
5. DiSanto G. Proper PC-Board Layout Improves Dynamic Range // EDN, November 11, 2004.
6. Grant D., Wurcer S. Avoiding Passive-Component Pitfalls // Analog Devices Application Note AN-348.
7. Johnson H. W., Graham M. High-Speed Digital Design, a Handbook of Black Magic. Prentice Hall, 1993.
8. Jung W., ed., Op Amp Applications Handbook // Elsevier-Newnes, 2005.