

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ЗАЗЕМЛЕНИЯ

ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Вопросы заземления, несомненно, являются одними из самых сложных при разработке систем. Несмотря на то, что принципы хорошего заземления относительно просты, правильная реализация может оказаться довольно сложной. К сожалению, нет однозначного подхода, гарантирующего хорошие результаты, и есть несколько вещей, которые, если сделать не так, могут вызвать головную боль.

Для линейных схем общий провод (земля) является базой, относительно которой производится отсчет сигналов. К сожалению, земля также является возвратным путем тока при однополярном питании. Неправильная стратегия заземления может существенно ухудшить параметры прецизионной линейной схемы.

Реализация правильного заземления является сложным вопросом для всех аналоговых схем, и его надлежащее исполнение имеет большое значение при разработке печатных плат. К счастью, некоторые реализации хорошего заземления, особенно использование земляных полигонов, являются неотъемлемой частью корректно спроектированных печатных плат. Поскольку этот фактор для аналоговых схем является одним из наиболее значимых, значительная часть статьи сосредоточена на нем.

Другим вопросом реализации заземления, который необходимо учитывать, является отслеживание паразитных напряжений в обратных путях сигналов и питания, которые могут привести к ухудшению характеристик схемы. Эти паразитные напряжения могут быть вызваны воздействием внешних сигналов, общими источниками питания, или чрезмерными импульсными токами, протекающими по общему земляному проводу. Правильная разводка проводников и корректное задание их размеров, дифференциальная передача сигналов и разделение различных земель обеспечивают решение этих вопросов.

Важной темой обсуждения являются методы заземления, которые подходят для схем со смешанными сигналами – аналоговыми и цифровыми. Действительно, только лишь один вопрос качества заземления может и должен влиять на разводку проводников высокоточных систем со смешанными сигналами.

Современным системам обработки обычно требуются аналого-цифровые устройства, такие как АЦП и ЦАП, а также быстродействующие цифровые сигнал-процессоры. При обработке аналоговых сигналов с большим динамическим диапазоном необходимо применение высокоточных АЦП и ЦАП. Использование при разработке высокоскоростных схем хороших решений, включая надлежащую разводку проводников, разделение сигналов и корректное заземление, обеспечивают широкий динамический диапазон с низким уровнем шума в условиях импульсных помех.

Ранее высокоточные низкочастотные схемы, как правило, рассматривались иначе, чем высокоскоростные. Применительно к АЦП и ЦАП, частота выборки (тактовая частота) обычно используется в качестве критерия быстродействия. Однако следующие два примера показывают, что на практике большинство современных микросхем обработки сигналов на самом деле являются достаточно быстродействующими, и, следовательно, должны рассматриваться таковыми для того, чтобы обладать высокими техническими характеристиками. Хотя это, в первую очередь, относится к микросхемам цифровой обработки сигналов, но также верно для АЦП и ЦАП.

Все АЦП, использующие внутреннюю схему выборки-хранения, работают с относительно высокочастотными тактовыми сигналами с малыми длительностями фронтов (как правило, несколько наносекунд). Поэтому они должны рассматриваться как высокоскоростные устройства, хотя их пропускная способность может оказаться низкой. Например, среднескоростные 12-разрядные АЦП последовательного приближения могут работать с тактовой частотой 10 МГц, в то время как частота дискретизации составляет всего лишь 500 кГц.

Для сигма-дельта ($\Sigma\Delta$) АЦП также требуется высокая тактовая частота из-за высокой частоты переборки. Даже многоразрядные (до 24 бит), так называемые низкочастотные промышленные измерительные АЦП (например, серии AD77xx) с пропускной способностью от 10 Гц до 7,5 кГц работают на тактовой частоте 5 МГц и выше.

Решение проблемы еще более усложняется, если принять во внимание то, что ИС со смешанными сигналами обладают аналоговыми и цифровыми выводами, внося дополнительные сложности при разработке. Кроме того, различные ИС со смешанными сигналами имеют различные входные токи для цифровых сигналов. Во многих случаях, для оптимального заземления это требует разных подходов при разработке.

Инженеры-конструкторы цифровых и аналоговых систем, как правило, рассматривают устройства со смешанными сигналами с разных сторон, поэтому целью данной статьи является описание основных подходов к реализации заземления, которые будут работать для большинства устройств со смешанными сигналами, без необходимости знать конкретные детали их внутренней схемы.

Исходя из вышеизложенного, должно быть ясно, что решение проблемы заземления не может быть однозначно. И, к сожалению, невозможно предоставить список всех решений, гарантирующих полный успех. Можно сказать лишь то, что, если не соблюдать определенные правила, то это, вероятно, приведет к трудностям. И то, что, если что-то работает в одном диапазоне частот, не обязательно будет работать в другом. Зачастую, есть и противоречивые требования. Ключом к реализации правильного заземления является понимание, как протекают различные токи.

ЗАЗЕМЛЕНИЕ "ЗВЕЗДОЙ"

Реализация заземления "звездой" основывается на теории, что все напряжения схемы отсчитываются от одной точки, известной как центральная точка звезды. Лучше понять помогает визуальное представление – многочисленные провода радиально отходят из одной точки, схема напоминает звезду. Внешний вид проводников не обязательно должен выглядеть как звезда, центральная точка может располагаться на земляном полигоне, но ключевая особенность этой схемы в том, что все напряжения измеряются и отсчитываются относительно определенной точки, а не в любом месте (например, где можно подключить общий вывод измерительного щупа).

На практике заземление "звездой" реализовать довольно трудно. Например, если при разработке использовать все сигнальные и возвратные пути токов, чтобы минимизировать перекрестные искажения и воздействия, связанные с высоким импедансом сигнальных и земляных проводников, то могут возникнуть проблемы. Когда в схему добавляют питающие напряжения, то либо добавляются нежелательные земляные проводники, либо их токи питания протекают по уже существующим путям, что искажает целостность передаваемых сигналов. Эту проблему часто можно обойти, используя отдельные источники питания (и, таким образом, отделив возвратные токи) для различных частей схемы. Например, отдельные аналоговые и цифровые питания с отдельными землями, соединенными в точке звезды, часто встречаются в схемах со смешанными сигналами.

РАЗДЕЛЕНИЕ АНАЛоговой И ЦИФРОВОЙ ЗЕМЛИ

Не секрет, цифровая схема шумит. Переключение логических элементов приводит к коротким выбросам тока большой амплитуды на шине питания. Логические компоненты обладают помехоустойчивостью порядка сотен милливольт и, как правило, не нуждаются в особой фильтрации напряжения питания. Напротив, аналоговые схемы весьма чувствительны к шуму питающих напряжений и земли. Поэтому имеет смысл отделить аналоговые и цифровые схемы для предотвращения влияния цифровых помех на аналоговые компоненты схемы. Это предполагает разделение как земляных проводников, так и шин питания, что может вызвать неудобство при разработке схем со смешанными сигналами.

Если высокоточная схема со смешанными сигналами должна выдавать максимальные технические характеристики, необходимо разделять аналоговые и цифровые земли и источники питания. То, что аналоговая часть схемы будет питаться от источника +5 В вовсе не означает, что для этого можно использовать источник такого же напряжения, предназначенный для питания устройств, создающих сильные помехи (микропроцессор, динамическое ОЗУ). Аналоговая схема должна обеспечивать все свои точностные параметры, а не просто функционировать. Это различие в цепях питания требует очень пристального внимания при разработке шин питания и земли.

Аналоговые и цифровые земли схемы должны быть объединены в какой-то одной точке, расположение которой должно быть тщательно продумано, чтобы не допустить проникновения цифровых возвратных токов в аналоговую часть схемы.

Многие АЦП и ЦАП имеют отдельные выводы для подключения аналоговой и цифровой земли. В описаниях пользователям часто советуют подключать эти выводы вместе в непосредственной близости друг от друга. На первый взгляд, это вступает в противоречие с рекомендациями по соединению аналоговой и цифровой земли в одной точке (заземление "звездой") у источников питания.

Однако противоречия в данном случае нет. Обозначения "аналоговая земля" и "цифровая земля" для этих выводов относятся к внутренним частям схемы преобразователя, а не к земле полной схемы, к которой они должны подключаться. Для АЦП эти выводы, как правило, должны

быть объединены и соединены с общей аналоговой землей. Не представляется возможным объединить эти две земли внутри корпуса микросхемы без ухудшения параметров, так как аналоговая часть преобразователя очень восприимчива к импульсным цифровым помехам, протекающим по шине земли. Однако они могут быть соединены между собой снаружи.

Рисунок 1 иллюстрирует этот принцип подключения АЦП к шинам земли. Если эти выводы (AGND и DGND) соединены таким образом, цифровая помехоустойчивость преобразователя несколько снижается на сумму синфазных помех между цифровыми и аналоговыми землями. Однако, поскольку помехоустойчивость для цифровых входов составляет часто сотни или тысячи милливольт, этот фактор едва ли имеет большое значение.

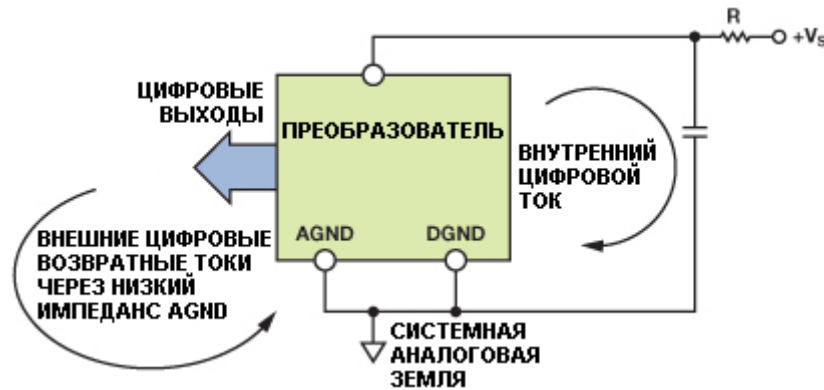


Рисунок 1. Выводы аналоговой (AGND) и цифровой (DGND) земли преобразователя должны быть подключены к системной аналоговой земле

Аналоговая помехоустойчивость снижается только из-за внешних цифровых токов преобразователя, протекающих по шине аналоговой земли. Для снижения этого воздействия токи должны быть достаточно малы, и могут быть минимизированы увеличением сопротивления нагрузки преобразователя. Хороший способ сделать это состоит в использовании на выходе АЦП буферов с низким входным током.

Если цифровое питание преобразователя изолировано от источника небольшим сопротивлением и развязано на аналоговую землю близко размещенным к выводу питания конденсатором 100 нФ, все импульсные цифровые токи преобразователя возвратятся на землю через конденсатор и не возникнут во внешней цепи земли. При низком сопротивлении шины аналоговой земли, а это обязательно должно иметь место для получения приемлемых характеристик системы, дополнительные помехи внешнего цифрового возвратного тока редко представляют собой проблему.

ЗЕМЛЯНЫЕ ПОЛИГОНЫ

При рассмотрении заземления "звездой" упоминалось использование земляных полигонов. Для реализации этого одна сторона двусторонней печатной платы (или один слой многослойной) делается из медного полигона и используется в качестве земли. Смысл этого состоит в том, что большое количество металла будет иметь низкое сопротивление. Из-за большой плоской структуры проводник также будет иметь очень малую индуктивность. Следовательно, существенно уменьшается паразитная разность потенциалов при протекании токов через такой проводник.

Следует заметить, что понятие земляного полигона может быть расширено – полигоны также используются в качестве проводников напряжений питания. Преимущества полигонов питания аналогичны преимуществам земляных – очень низкий импеданс проводника. Схема может иметь более одного полигона питания и более одного земляного.

Полигоны питания и земли помогают решить много проблем, связанных с импедансом проводников. Однако они не являются панацеей от всех бед. Даже непрерывный слой медной фольги имеет ненулевые сопротивление и индуктивность; в некоторых случаях это может привести к ненадлежащему функционированию схемы. При разработке необходимо учитывать, что очень большие токи, протекающие по полигонам, могут привести к возникновению разности потенциалов, достаточной для восприятия чувствительными элементами схемы.

Низкий импеданс и большая площадь земляного полигона имеет решающее значение для всех современных аналоговых схем. Обширный полигон земли выступает не только в качестве возвратного пути с низким импедансом, но и сводит к минимуму собственные электромагнитные

помехи схемы, а также представляет собой экран, снижающий чувствительность схемы к внешним электромагнитным помехам.

Земляные полигоны помогают также передавать высокоскоростные цифровые или аналоговые сигналы с помощью микрополосковых или полосковых линий передачи, где для согласования проводников – неискаженной передачи сигналов – требуется фиксированное волновое сопротивление.

Использование шины в качестве земляного проводника (общего провода) является абсолютно неприемлемым из-за его импеданса на частотах, эквивалентных переключениям логических компонентов. Например, проволока № 22 (американская классификация, диаметр 0,643 мм) обладает индуктивностью около 20 нГн/дюйм. Переходный ток, изменяющийся со скоростью 10 мА/нс, создаст падение напряжения 200 мВ на одном дюйме этого провода:

$$\Delta v = L \frac{\Delta i}{\Delta t} = 20 \text{ нГн} \times \frac{10 \text{ мА}}{\text{нс}} = 200 \text{ мВ} \quad (1)$$

Для сигнала с двухвольтовым размахом это приведет к ошибке около 200 мВ или 10%. Даже для полностью цифровых схем эта ошибка приведет к значительному ухудшению запаса по помехоустойчивости.

На рисунке 2 показан случай, когда цифровой возвратный ток модулирует аналоговый возвратный ток (верхний рисунок). Индуктивность и сопротивление возвратного проводника распределяются между аналоговыми и цифровыми частями схемы, что приводит к взаимодействию и, в результате, к ошибке. Одно из возможных решений – провести путь цифрового возвратного тока непосредственно к точке REF GND, как показано на нижнем рисунке. Это иллюстрирует принцип заземления "звездой", т.е. соединения проводников земли в одной точке схемы. Полностью корректная реализация такого объединения земляных проводников в схеме с несколькими высокочастотными возвратными путями тока, затруднительна. Проводники со значительной длиной обладают существенными паразитными сопротивлениями и индуктивностями, что затрудняет получение низкого импеданса на высоких частотах. На практике, проводники возвратного тока должны выглядеть большими полигонами для получения низкого сопротивления для токов высокой частоты. Без низкого сопротивления полигонов земли это сделать почти невозможно, особенно, на высоких частотах.

Все земляные выводы интегральной схемы должны быть непосредственно подключены к земляному полигону с низким сопротивлением, чтобы минимизировать индуктивность и сопротивление проводников. Для высокоскоростных устройств не рекомендуется подключение микросхем даже через низкопрофильные панельки – дополнительные индуктивности и емкости могут привести к существенному ухудшению технических характеристик устройства. Однако при создании прототипа устройства с использованием микросхем в DIP-корпусах они могут подключаться через качественные разъёмные соединения пистонного типа с подпружиненными позолоченными контактами, создающими хорошие электрическое и механическое соединения. Но даже в этом случае применение пистонов может привести к ухудшению параметров.

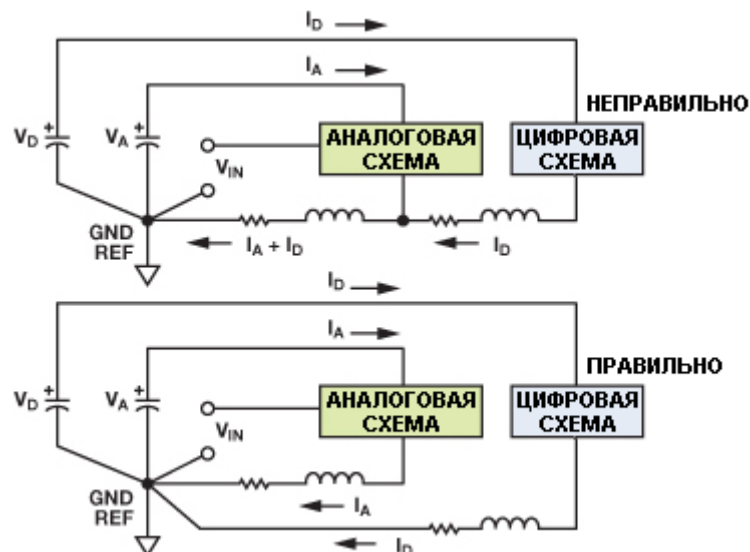


Рисунок 2. Цифровые токи, протекающие по аналоговому возвратному пути, создают напряжения ошибки.

Выводы питания должны быть развязаны на земляной полигон через керамические чип-конденсаторы с малой собственной индуктивностью. Если используются выводные керамические конденсаторы, длина их выводов должна быть не более 1 мм. Керамические развязывающие конденсаторы должны располагаться как можно ближе к выводам питания микросхемы. Для фильтрации питающего напряжения могут потребоваться ферритовые бусины.

Итак, чем больше земли, тем лучше. Земляные полигоны позволяют решить многие проблемы, связанные с импедансом земляных проводников, но не все. Даже цельный слой из медной фольги обладает малыми остаточными сопротивлением и индуктивностью; в некоторых случаях этого может быть достаточно, чтобы препятствовать надлежащему функционированию схемы. На рисунке 3 показана такая ситуация и ее возможное решение.

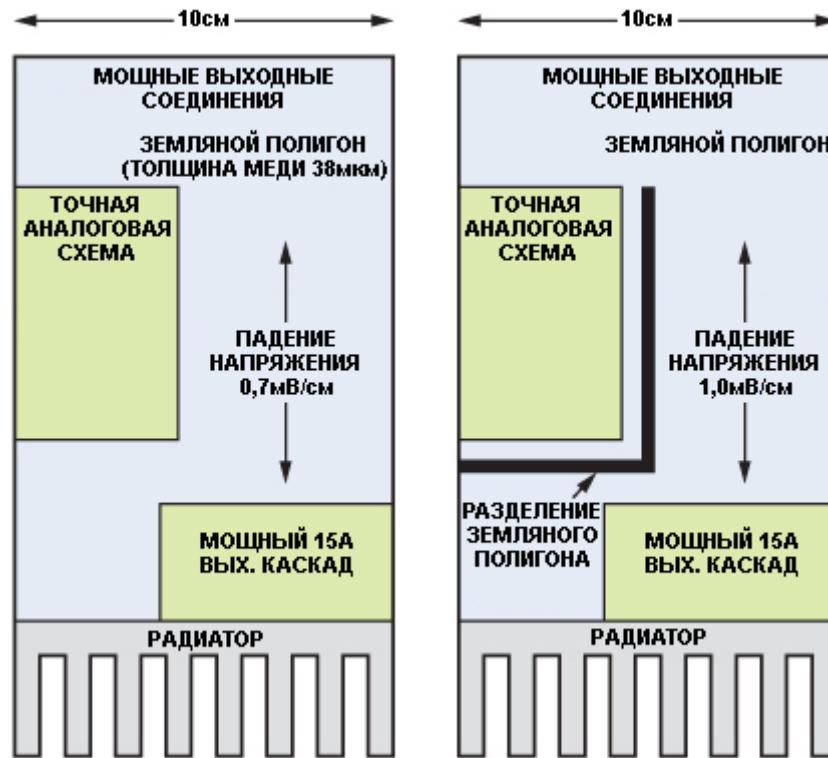


Рисунок 3. Разделение земляного полигона может перенаправить протекание токов.

Из-за конструктивных требований разъем питания располагается на одной стороне платы, а выходной мощный каскад (с током потребления 15 А) должен быть у радиатора на другой стороне. Земляной полигон имеет ширину 100 мм. Если этот полигон выполнен из медной фольги толщиной 38 мкм, то падение напряжения на нем будет составлять 68 мВ/мм, что может вызвать серьезные проблемы для прецизионной аналоговой части схемы. Земляной полигон может быть разделен. При этом большой ток не течет в области прецизионной части схемы, вместо этого он вынужден ее обтекать. Несмотря на то, что градиент падения напряжения на полигоне увеличивается (из-за уменьшения ширины полигона), это может предотвратить влияние возвратных токов мощного выходного каскада на параметры прецизионной части схемы.

Единственное, чего определенно следует избегать в схемах со смешанными сигналами, это перекрытие нескольких земляных полигонов, особенно, если эти полигоны относятся к аналоговым и цифровым землям или питанием. Перекрытие выступает в качестве конденсатора (обкладки – полигоны, диэлектрик – материал печатной платы) и приводит к емкостной связи между ними.

ЗАЗЕМЛЕНИЕ И РАЗВЯЗКА ИС СО СМЕШАННЫМИ СИГНАЛАМИ

Сигналы чувствительных аналоговых компонентов – усилителей и источников опорного напряжения – всегда отсчитываются от аналоговой земли и должны быть развязаны на аналоговый земляной полигон. АЦП и ЦАП (и другие ИС со смешанными сигналами) с низким уровнем цифровых токов следует рассматривать как аналоговые компоненты; их питающие напряжения также должны быть развязаны на аналоговый земляной полигон. На первый взгляд, это может показаться несколько противоречивым, поскольку преобразователь имеет аналоговый и

цифровой интерфейсы и обычно имеет выводы аналоговой (AGND) и цифровой (DGND) земли. Рисунок 4 поможет прояснить эту дилемму.

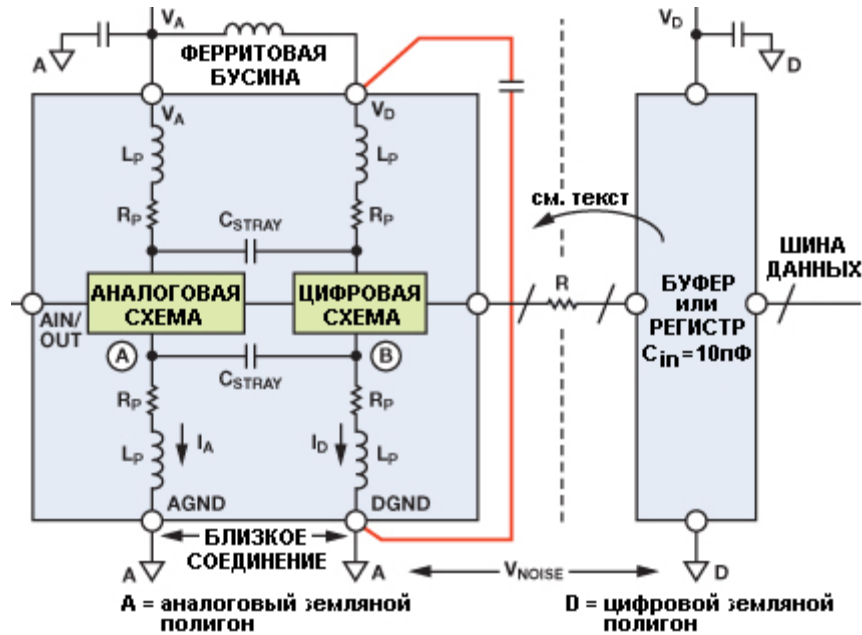


Рисунок 4. Правильное заземление ИС со смешанными сигналами с низкими внутренними цифровыми токами.

Внутри микросхемы, имеющей аналоговые и цифровые блоки (АЦП и ЦАП, например), земли, как правило, разделяют, чтобы избежать влияния цифровых сигналов на чувствительные аналоговые цепи. На рисунке 4 показана простая модель преобразователя. Разработчик интегральной схемы не может как-то повлиять на величину индуктивности и сопротивления выводов, кроме как принимать их во внимание. Быстро меняющиеся цифровые токи создают помехи в точке В, которые неизбежно будут влиять на точку А аналоговой схемы через паразитные емкости C_{STRAY} . Кроме того, неизбежны паразитные емкости примерно 0,2 пФ между всеми соседними выводами интегральной схемы. Во избежание дополнительной связи, контакты AGND и DGND должны быть соединены с внешним аналоговым земляным полигоном проводниками минимально возможной длины. Любое дополнительное сопротивление по цепи DGND вызовет большой цифровой шум в точке В, который, в свою очередь, будет еще больше воздействовать на аналоговые цепи через паразитные емкости. Непосредственное подключение вывода DGND интегральной схемы к цифровому земляному полигону недопустимо, так как вызовет при этом воздействие напряжения цифровой помехи V_{NOISE} на вывод AGND, что приведет к катастрофическим последствиям.

Обозначение "DGND" говорит нам только то, что этот вывод подключается к внутренней цифровой земле интегральной схемы. Это вовсе не означает, что этот вывод должен быть подключен к цифровой земле системы. Лучше именовать эту цепь внутренним возвратным путем цифровых токов.

Справедливо будет указать, что описанная компоновка заземления может привести некоторое небольшое количество цифровой помехи на аналоговый земляной полигон, но это воздействие достаточно мало и может быть сведено к минимуму при малой нагруженности выходных сигналов и малом коэффициенте разветвления. Минимизация разветвления (что, в свою очередь, означает снижение выходных токов) также сохраняет форму выходных сигналов, уменьшая "звон", минимизирует цифровые токи переключения, и тем самым снижает любые воздействия на аналоговый интерфейс преобразователя. Вывод цифрового питания V_D может быть дополнительно изолирован от аналогового питания путем введения ферритовой бусины с небольшими потерями. Внутренние переходные цифровые токи ИС будут протекать по маленькой петле из вывода V_D через разделительный конденсатор к DGND (этот путь показан на схеме красным цветом). Таким образом, переходных цифровых токов не будет на внешних аналоговых земляных полигонах. Развязывающий конденсатор должен быть установлен как можно ближе к выводам преобразователя, чтобы свести к минимуму воздействие паразитных индуктивностей. Конденсатор (керамического типа) должен быть с малой собственной индуктивностью и емкостью, как правило, от 0,01 до 0,1 мкФ.

Повторяя снова, ни одна концепция построения схемы заземления не подходит целиком для всех приложений. Однако понимание возможных решений может свести проблемы к минимуму.

ЦИФРОВЫЕ ВЫХОДНЫЕ СИГНАЛЫ АЦП

Буферизация выходных сигналов АЦП (рис. 4) для изолирования его аналоговой части от цифровых помех всегда является хорошим решением. Буфер при этом также служит для уменьшения нагрузки выходов преобразователя и действует как щит Фарадея, разделяя выходные сигналы и шину данных (рис. 5). Хотя многие преобразователи обладают размещенными на кристалле входными/выходными регистрами с тремя состояниями, и их использование уменьшает воздействие на чувствительные аналоговые части, применение дополнительного буфера для большей изоляции не помешает.

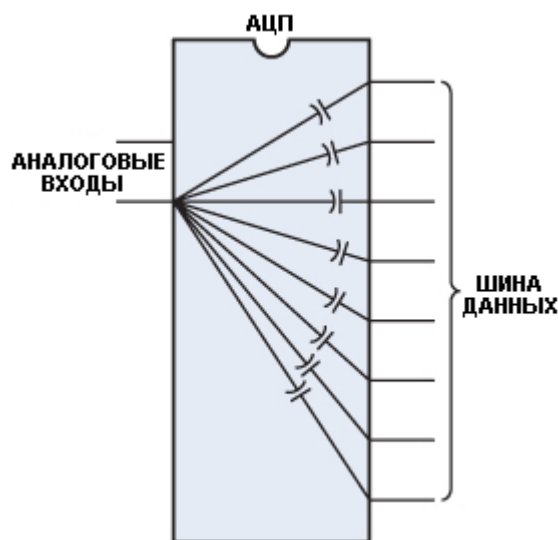


Рисунок 5. Использование буфера на выходе высокоскоростного АЦП уменьшает влияние цифровых помех на аналоговые части преобразователя

Резисторы R (рис. 4) между выходом АЦП и входом буферного регистра помогают минимизировать цифровые переходные токи, которые могут повлиять на характеристики преобразователя. Они уменьшают емкостную связь выходных драйверов и входов. Кроме того, каждый резистор и входная емкость буферного регистра действует как фильтр низких частот и, следовательно, увеличивает длительность фронтов выходного сигнала, уменьшая паразитные воздействия.

Типичный КМОП элемент, в сочетании с емкостями проводника печатной платы и переходного отверстия, создаст нагрузку около 10 пФ. Выходной сигнал со скоростью нарастания фронтов 1 В/нс индуцирует 10 мА динамического тока в отсутствие изолирующего резистора:

$$\Delta i = C \frac{\Delta v}{\Delta t} = 10 \text{ пФ} \times \frac{1 \text{ В}}{\text{нс}} = 10 \text{ мА} \quad (2)$$

Последовательный резистор 500 Ом увеличит время нарастания и спада до 11 нс и, следовательно, уменьшит переходные токи:

$$t_r = 2,2 \times t = 2,2 \times R \times C = 2,2 \times 500 \times 10 \text{ пФ} = 11 \text{ нс} \quad (3)$$

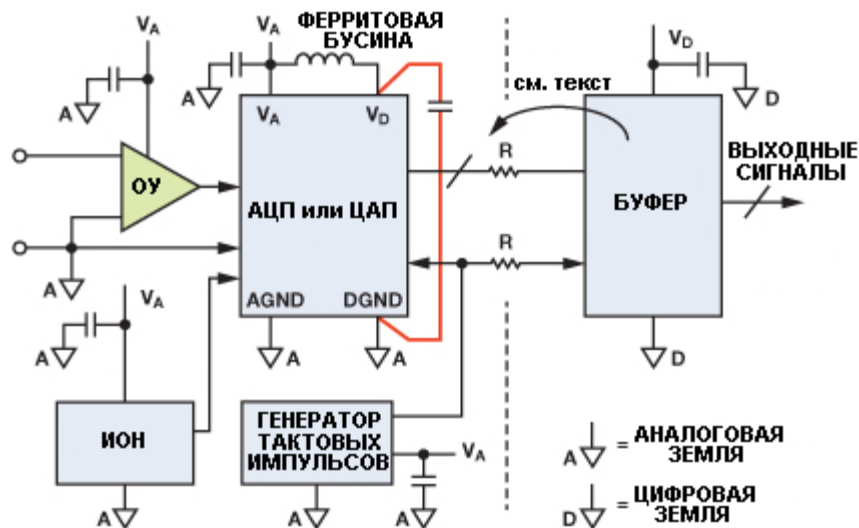


Рисунок 6. Заземление и развязка

Следует избегать применения ТТЛ буферов или регистров – это может существенно увеличить токи переключения из-за большей входной емкости.

Буферный регистр и другие цифровые схемы должны быть заземлены и развязаны на полигон цифровой земли. Следует отметить, что любые помехи между аналоговой и цифровой землями ухудшают параметры интерфейсной части преобразователя. Однако, поскольку помехоустойчивость для цифровых сигналов составляет сотни или тысячи милливольт, это не имеет большого значения. Полигон аналоговой земли, как правило, не обладает очень большими шумами, но если помехи на полигоне цифровой земли превышают несколько сотен милливольт, то должны быть приняты меры по уменьшению импеданса цифровой земли. Ни в коем случае напряжение между двумя земляными полигонами не должно превышать 300 мВ; в противном случае интегральные схемы могут быть повреждены.

Также весьма желательно применение отдельных источников питания для аналоговых и цифровых частей схемы. Для питания АЦП и ЦАП должно использоваться аналоговое питание. Если преобразователь имеет вывод цифрового питания (V_D), он должен быть подключен, либо к отдельному источнику аналогового питания, либо через фильтр, как показано на рисунке 6. Все выводы питания преобразователя должны быть развязаны на полигон аналоговой земли; все выводы питания логических элементов – на полигон цифровой земли (рис. 6). Если напряжение цифрового питания достаточно чистое, то его можно использовать и для питания аналоговых схем, но в этом случае надо быть очень осторожными.

В некоторых случаях может оказаться невозможным подключение источника цифрового питания V_D к аналоговым частям схемы. Некоторые высокоскоростные микросхемы требуют для аналоговой части напряжение питания от +5 В и выше, а цифровой интерфейс рассчитан на напряжение +3,3 В или менее. В этом случае питание интерфейса должно быть развязано на аналоговую землю. Кроме того, целесообразно подключить в цепь цифрового питания преобразователя ферритовую бусину, которая соединит вывод V_D с напряжением аналогового питания.

Схема формирования тактовых импульсов преобразователя должна рассматриваться, как аналоговая схема, и также должна быть заземлена и хорошо развязана на полигон аналоговой земли. Фазовый шум тактовых импульсов (jitter) уменьшает отношение сигнал/шум (SNR, signal-to-noise ratio) схемы; этот вопрос будет обсуждаться далее.

СООБРАЖЕНИЯ ПО ПОВОДУ ТАКОВЫХ ИМПУЛЬСОВ

В высококачественных импульсных схемах в качестве формирователей тактовых импульсов АЦП или ЦАП должны использоваться кварцевые генераторы с низким фазовым шумом, так как джиттер приводит к модуляции аналогового входного/выходного сигналов, увеличивает общий шум и искажает форму сигнала. Генератор тактовых импульсов должен быть изолирован от помех цифровых схем и развязан на аналоговую землю.

Приблизительная оценка от влияния фазового шума тактовых импульсов АЦП на отношение сигнал/шум приведена в уравнении 4:

$$\text{SNR} = 20 \log_{10} \left[\frac{1}{2\pi f t_j} \right] \quad (4)$$

где f – частота аналогового входного сигнала.

Уравнение показывает, что для идеального АЦП с бесконечной дискретизацией единственным источником шума является джиттер тактового сигнала t_j . Например, если $t_j = 50$ пс (RMS) и $f = 100$ кГц, то $\text{SNR} = 90$ дБ, что соответствует примерно 15-разрядному динамическому диапазону.

Следует отметить, что t_j в приведенном примере на самом деле корень из суммы квадратов значений джиттера внешнего тактового сигнала и внутреннего джиттера АЦП (дрожание апертуры). В большинстве высококачественных АЦП дрожание апертуры незначительно по сравнению с фазовым шумом тактовых импульсов.

Поскольку уменьшение отношения сигнал/шум в первую очередь связано с фазовым шумом тактовых импульсов, должны быть приняты меры, чтобы сделать этот шум минимально возможным. Это означает применение высокостабильного кварцевого генератора. Есть несколько производителей кварцевых генераторов с низким уровнем фазового шума (менее 5 пс) с КМОП-совместимыми выходными сигналами.

В идеальном случае, в схемах с разделенными землями генератор тактовых импульсов должен быть подключен к полигону аналоговой земли. Однако некоторые ограничения могут не позволить сделать это. Во многих случаях тактовый сигнал преобразователя должен быть воспроизведен из более высокочастотного тактового сигнала, который генерируется относительно цифровой земли. Он должен пройти от своего источника до АЦП или ЦАП, которые работают относительно аналоговой земли. Отсутствие эквивалентности потенциалов двух земель приводит к дополнительному фазовому шуму, что может привести к ухудшению отношения сигнал/шум и послужить причиной появления нежелательных гармоник.

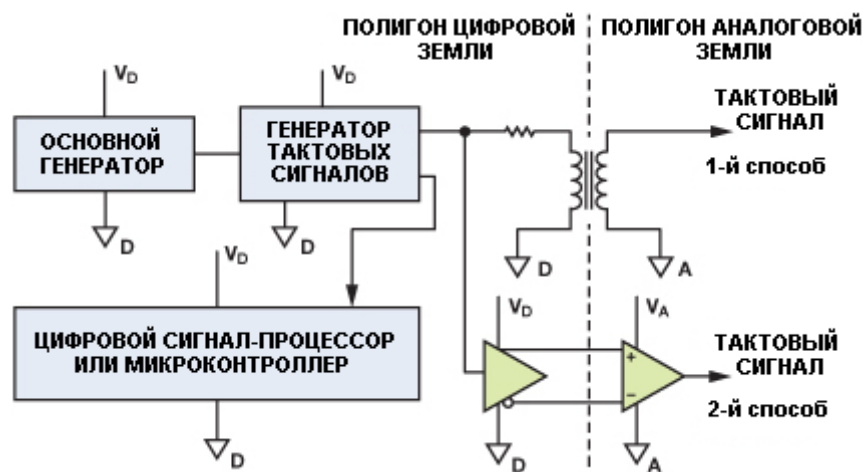


Рисунок 7. Разделение тактового сигнала между цифровой и аналоговой частями схемы.

ЗАЗЕМЛЕНИЕ В СХЕМАХ СО СМЕШАННЫМИ СИГНАЛАМИ

В большинстве спецификаций АЦП, ЦАП и других устройств со смешанными сигналами рассматриваются вопросы правильного заземления по отношению к одной, оценочной печатной плате, изготовленной, как правило, производителем самого устройства. Это вносит некоторую путаницу при попытке применить предложенные решения к многоплатным системам или схемам с несколькими АЦП или ЦАП. Как правило, рекомендуется разделять на печатной плате полигоны аналоговой и цифровой земли, с последующим соединением выводов AGND и DGND преобразователя в одной точке (рис. 8). По существу, это создает соединение земли «звездой» для устройств со смешанными сигналами. Все грязные цифровые токи протекают от источника цифрового питания через полигон цифровой земли; при этом обеспечивается их изоляция от чувствительной аналоговой части платы. Соединение "звездой" образуется там, где полигоны аналоговой и цифровой земли объединяются вместе в одной точке.

Хотя этот подход обычно работает в простой системе с одной печатной платой и одним АЦП/ЦАП, он не является оптимальным для многоплатных систем со смешанными сигналами. В системах с несколькими АЦП или ЦАП, расположенными на различных печатных платах (или даже

на одной), аналоговая и цифровая земли оказываются соединенными в нескольких точках, создавая контуры заземления и делая невозможным соединение "звездой" в одной точке. По этим причинам, этот подход не рекомендуется для многоплатных систем; решения, описанные ранее, могут использоваться для схем со смешанными сигналами с малыми цифровыми токами.

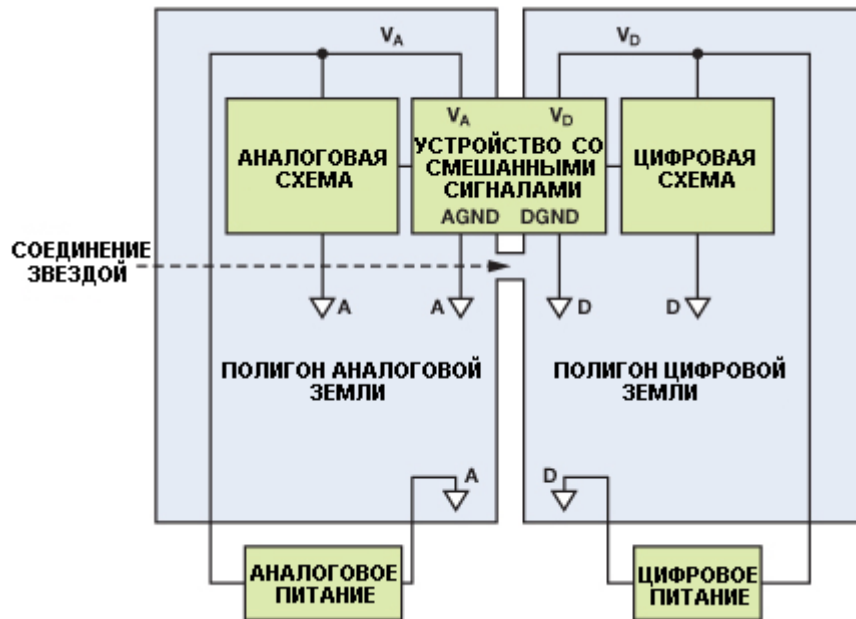


Рисунок 8. Заземление интегральных схем со смешанными сигналами для одноплатного варианта

ЗАЗЕМЛЕНИЕ В ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ СХЕМАХ

Земляной полигон часто выступает в качестве наилучшего возвратного пути силовых и сигнальных токов, обеспечивая при этом опорный уровень для преобразователей, источников образцового напряжения и других компонентов. Однако использование даже обширного полигона порой не обеспечивает высокого качества заземления для переменного тока.

Простая схема (рис. 9) на двухслойной печатной плате имеет источник постоянного и переменного токов, расположенный в верхнем слое платы и подключенный к переходным отверстиям Via 1 и Via 2 через U-образный медный проводник. Оба отверстия соединены с земляным полигоном в нижнем слое. В идеальном случае импеданс соединений в верхнем слое и импеданс возвратного пути между отверстиями в нижнем слое будут равны нулю. Напряжение на выводах источника тока также будет равно нулю.

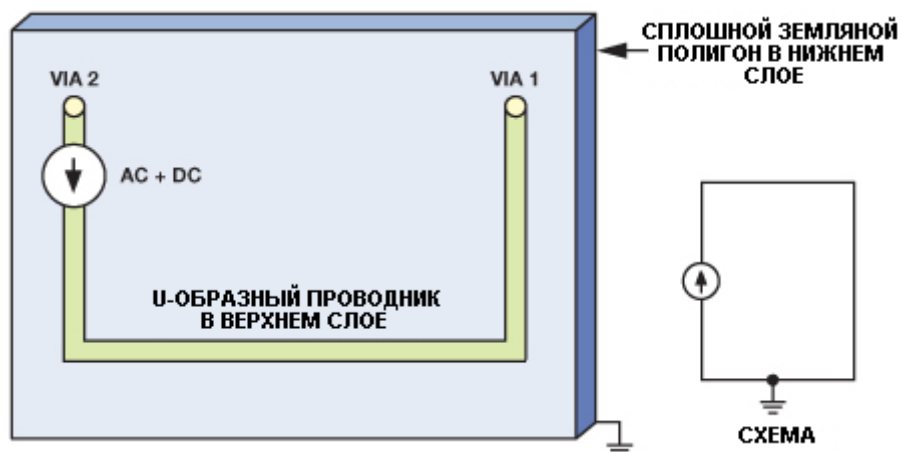


Рисунок 9. Схема и топология платы источника тока с U-образным проводником и путем возвратного тока по земляному полигону

Эта простая схема вряд ли покажет основные тонкости. Но понимание того, как протекает ток по земляному полигону между отверстиями, покажет, как может быть уменьшен высокочастотный шум.

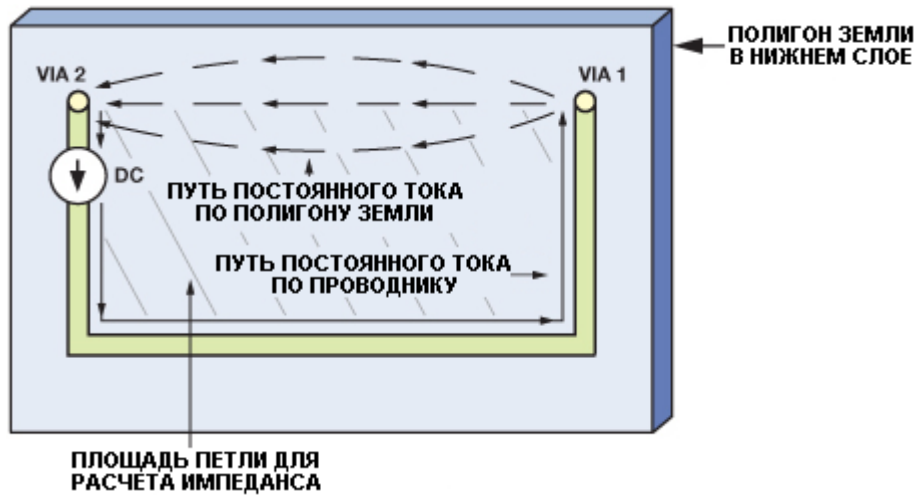


Рисунок 10. Протекание постоянного тока

Протекание постоянного тока в полигоне земли происходит, как показано на рисунке 10, по пути наименьшего сопротивления от отверстия Via 1 до отверстия Via 2. Некоторое небольшое размытие пути происходит лишь на значительном расстоянии. Переменный ток протекает по иному пути, который, в свою очередь, зависит от индуктивности – U-образный проводник представляет собой одновитковую катушку.

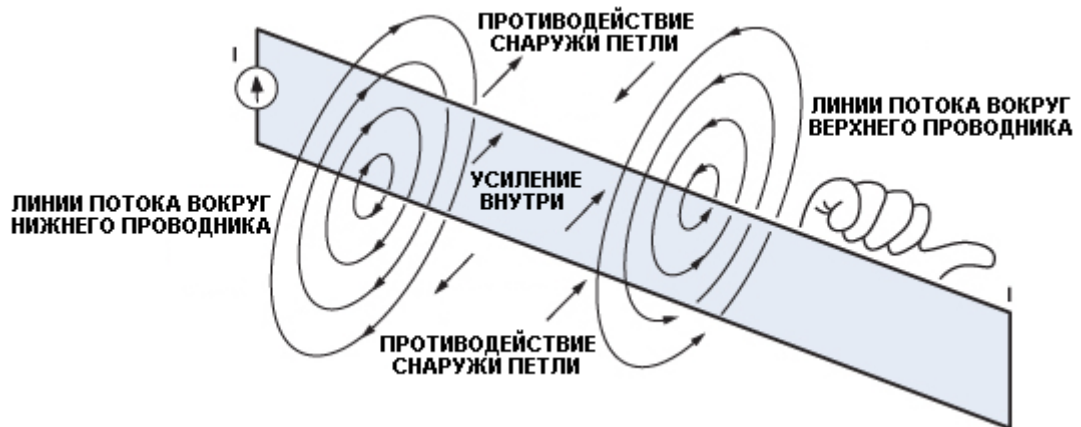


Рисунок 11. Линии магнитного поля в витке (правило правой руки)

Индуктивность пропорциональна площади петли, по которой протекает ток; взаимосвязь иллюстрируется на рисунке 11 – правило правой руки и линии потока магнитного поля. Внутри петли протекающий ток создает магнитное поле, силовые линии которого от нижнего и верхнего проводников усиливают друг друга. Однако снаружи петли направление линий поля противоположно и поле частично ослабляется. Таким образом, поле главным образом ограничивается контуром петли. Чем больше размеры петли, тем больше индуктивность и больше ее реактивное сопротивление ($X_L = j\omega L$), и, следовательно, большим будет падение напряжения на заданной частоте.

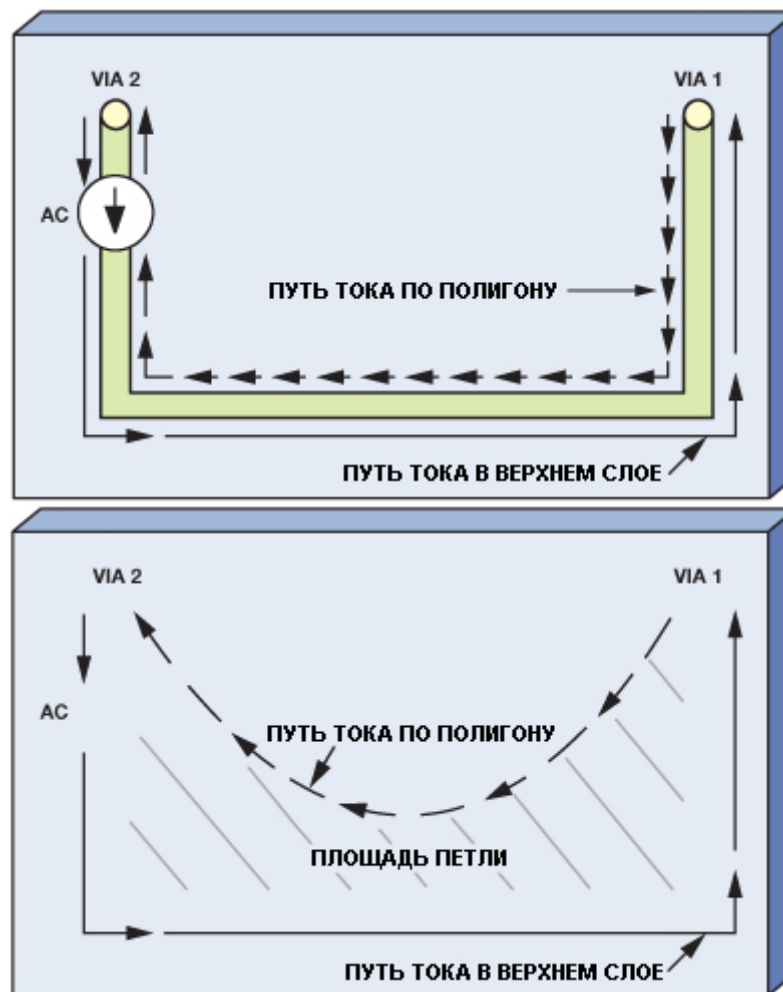


Рисунок 12. Путь переменного тока по полигону земли в отсутствие и при наличии сопротивления

Какой путь по полигону земли выберет протекающий ток? Естественно, путь с самым низким импедансом. Учитывая контур, образованный U-образным проводником и полигоном, и пренебрегая сопротивлением, переменный ток высокой частоты будет следовать по пути с наименьшей индуктивностью, т.е. по пути с наименьшей площадью петли.

В приведенном примере, петля с наименьшей площадью очевидна и образована U-образным проводником в верхнем слое и частью полигона непосредственно под проводником в нижнем слое. Таким образом, путь постоянного тока (рис. 10) – кратчайший путь – различается с путем переменного тока (рис. 12) – наименьшая площадь петли – прямо под U-образным проводником. На практике сопротивление полигона на низких и средних частотах заставляет протекать ток где-то между кратчайшим путем и U-образным проводником. На частотах ниже 1 МГц обратный путь тока по полигону располагается почти под проводником.

НАРУШЕНИЕ ЦЕЛОСТНОСТИ ПОЛИГОНОВ

Везде, где есть разрыв полигона, т.е. нарушение его целостности, возвратный ток, протекающий по полигону, должен обтекать этот разрыв, протекать вокруг него. В результате, возрастает индуктивность и повышается чувствительность схемы к внешним воздействиям. Эта ситуация показана на рисунке 13, где проводники А и В должны пересекаться друг с другом.

В высокочастотных схемах такое пересечение необходимо делать либо через дополнительный слой печатной платы, либо с помощью отрезка провода. В первом случае полигон земли выступает в роли экрана между сигнальными проводниками. Кроме того, применение многослойных печатных плат увеличивает количество вариантов разводки.

Использование печатных плат, по крайней мере, с одним непрерывным полигоном земли является одним из самых удачных решений для высококачественных схем со смешанными сигналами. Часто сопротивление такого полигона достаточно низкое, что позволяет использовать один полигон для аналоговой и цифровой частей платы. Однако возможность объединения земель

зависит от необходимой точности и требуемого диапазона частот, а также уровня цифровых помех, присутствующих в системе.

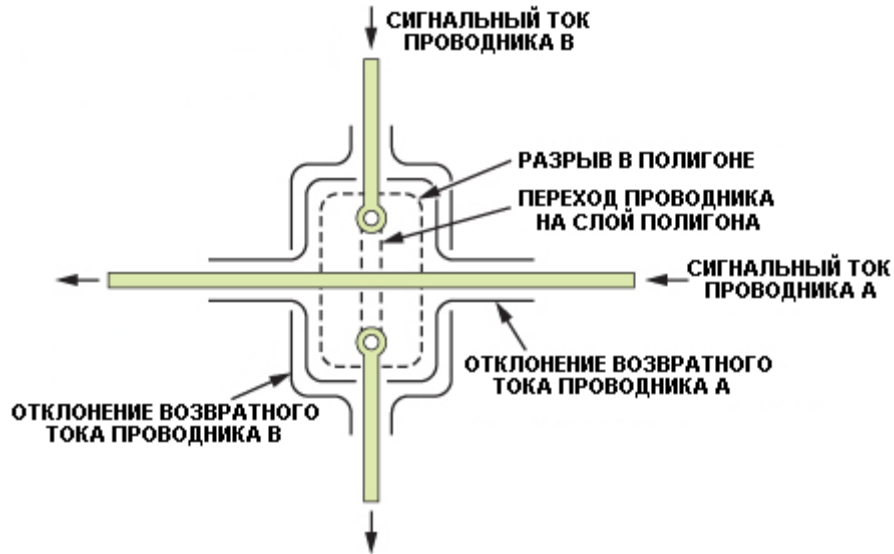


Рисунок 13. Разрывы в полигонах земли увеличивают паразитные индуктивности и повышают чувствительность к внешним воздействиям

В некоторых других случаях меньшая область полигона земли оказывается более приемлемой. Высокочастотные усилители с токовой обратной связью очень чувствительны к величине емкости на инвертирующем входе – сравнительно большая емкость на землю, подключенного к нему проводника, может вызвать проблемы. Поэтому границы земляного полигона должны быть удалены от входов, как показано на рисунке 14, на котором приведена рекомендуемая разводка высокоскоростного усилителя с токовой обратной связью AD8001. Эффект от даже небольшой емкости на входе усилителя, выражающийся в появлении "звона" в выходном сигнале, показан на рисунке 15.

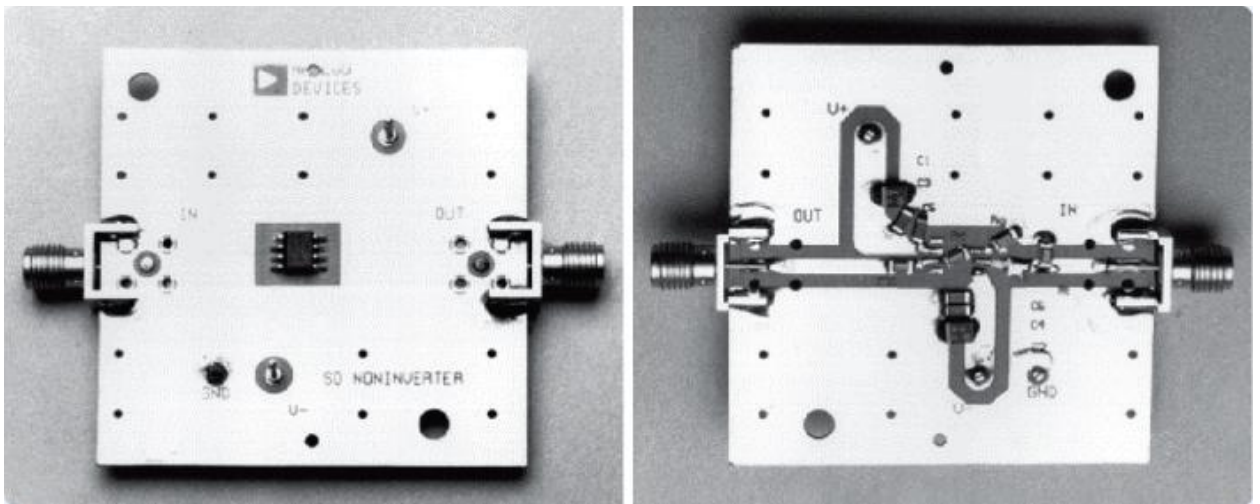


Рисунок 14. Демонстрационная плата с ОУ AD8001AR (верхний и нижний слой)

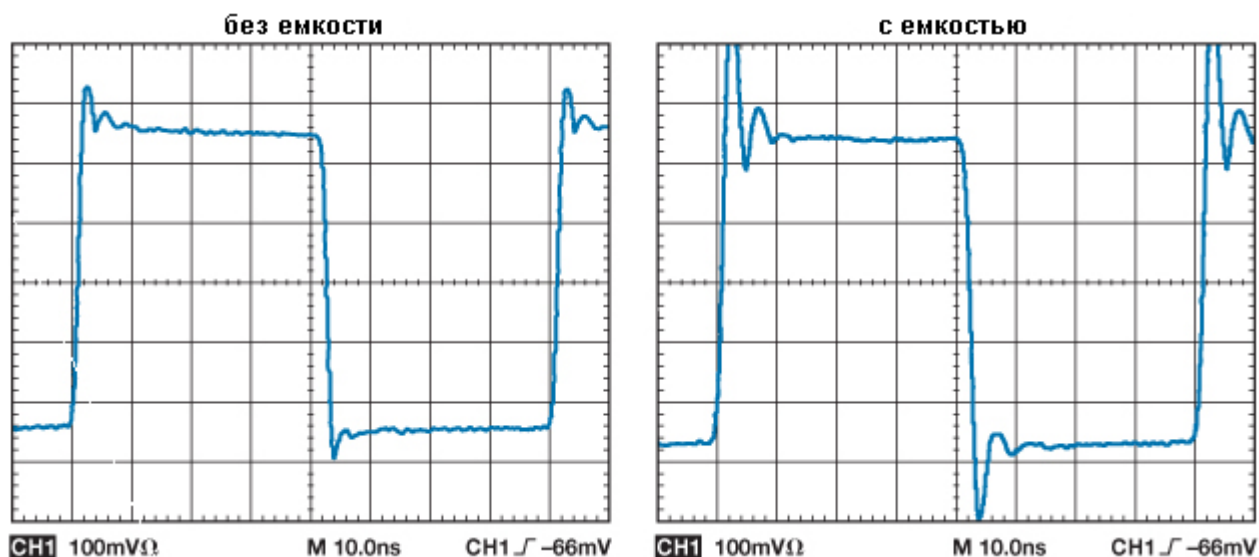


Рисунок 15. Эффект от влияния паразитной емкости 10 пФ на инвертирующий вход ОУ AD8001

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Не существует единственного способа заземления, гарантирующего 100% оптимальные характеристики. В данной статье рассмотрены некоторые возможные варианты для устройств со смешанными сигналами. При разработке печатных плат полезно использовать сразу несколько возможных способов разводки.

Обязательно, чтобы, по крайней мере, один слой печатной платы был отведен под полигон земли. В первоначальном варианте платы (макете) необходимо обеспечить непересекающиеся полигоны аналоговой и цифровой земли. Тем не менее, в нескольких местах должны быть предусмотрены площадки для установки, при необходимости, диодов Шоттки, включенных встречно-параллельно, или ферритовых бусин. Также необходимо предусмотреть возможность объединения полигонов аналоговой и цифровой земли с помощью перемычек.

Выводы устройств со смешанными сигналами, обозначенные как AGND, должны быть всегда подключены к полигону аналоговой земли. Исключением является применение цифровых сигнал-процессоров с внутренней фазовой автоподстройкой частоты (PLL), таких как ADSP-21160 из семейства SHARC. Хотя общий вывод для PLL обозначен AGND, но он должен быть подключен непосредственно к цифровой земле микросхемы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Материал, изложенный в этой статье, был подготовлен с помощью многих специалистов, в том числе James Bryant, Mike Byrne, Walt Jung, Walt Kester, Ray Stata и инженерно-технического персонала из Analog Devices.

ССЫЛКИ

- 1) Barrow, Jeff. "Avoiding Ground Problems in High Speed Circuits". RF Design, July 1989.
- 2) Barrow, Jeff. "Reducing Ground Bounce in DC-to-DC Converters – Some Grounding Essentials". Analog Dialogue. Vol. 41, No. 2, pp. 3-7, 2007.
- 3) Bleaney, B & B.I. Electricity and Magnetism. Oxford at the Clarendon Press, 1957: pp. 23, 24, and 52.
- 4) Brokaw, Paul. AN-202 Application Note. An IC Amplifier User's Guide to Decoupling, Grounding and Making Things Go Right for a Change. Analog Devices, 2000.
- 5) Brokaw, Paul and Jeff Barrow. AN-345 Application Note. Grounding for Low- and High-Frequency Circuits. Analog Devices.
- 6) The Data Conversion Handbook. Edited by Walt Kester. Newnes, 2005. ISBN 0-7506-7841-0.
- 7) Johnson, Howard W. and Martin Graham. High-Speed Digital Design. PTR Prentice Hall, 1993. ISBN: 0133957241.
- 8) Kester, Walt. "A Grounding Philosophy for Mixed-Signal Systems". Electronic Design Analog Applications Issue, June 23, 1997: pp. 29.
- 9) Kester, Walt and James Bryant. "Grounding in High Speed Systems". High Speed Design Techniques. Analog Devices, 1996: Chapter 7, pp. 7-27.

- 10) Linear Circuit Design Handbook. Edited by Hank Zumbahlen. Newnes, February 2008. ISBN 978-0-7506-8703-4.
- 11) Montrose, Mark. EMC and the Printed Circuit Board. IEEE Press, 1999 (IEEE Order Number PC5756).
- 12) Morrison, Ralph. Grounding and Shielding Techniques. 4th Edition. John Wiley & Sons, Inc., 1998. ISBN: 0471245186.
- 13) Morrison, Ralph. Solving Interference Problems in Electronics. John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- 14) Motchenbacher, C. D. and J. A. Connelly. Low Noise Electronic System Design. John Wiley & Sons, Inc., 1993.
- 15) Op Amp Applications Handbook. Edited by Walt Jung. Newnes, 2005. ISBN 0-7506-7844-5.
- 16) Ott, Henry W. Noise Reduction Techniques in Electronic Systems. 2nd Edition. John Wiley & Sons, Inc., 1988. ISBN: 0-471-85068-3.
- 17) Rempfer, William C. "Get All the Fast ADC Bits You Pay For". Electronic Design. Special Analog Issue, June 24, 1996: pp. 44.
- 18) Rich, Alan. "Shielding and Guarding". Analog Dialogue. Vol. 17, No. 1, pp. 8, 1983.
- 19) Sauerwald, Mark. "Keeping Analog Signals Pure in a Hostile Digital World". Electronic Design. Special Analog Issue, June 24, 1996: pp. 57.

Автор



Louis "Hank" Zumbahlen работал в ADI с 1989 года, первоначально в качестве инженера в области приложений. За последние несколько лет он был связан с обучением и развитием в качестве старшего инженера. Ранее он занимал аналогичную должность в Signetics (Philips) и работал в качестве инженера-конструктора в ряде компаний, в первую очередь в проведении испытаний и измерений. Имеет степень бакалавра Университета штата Иллинойс. Является автором Linear Circuit Design Handbook (Newnes-Elsevier 2008).