

# Лучшие методы заземления печатных плат высокой мощности и HDI-плат

Крутика РАМЕШ (Kruthika RAMESH)

**Управление большими токами и напряжениями в платах с высокой плотностью компоновки, смешанными и высокочастотными сигналами является одной из основных задач разработчика. Выбор метода заземления зависит от размера и топологии печатных плат, а также от их типа (жесткие, гибкие или гибко-жесткие). В этой статье, публикуемой на основе [1], рассматриваются эффективные способы заземления плат большой мощности и плат с высокой плотностью размещения компонентов.**

## Введение

Разработка и внедрение новых технологий заземления печатных плат, например для специальных заземляющих площадок, переходных отверстий, гальванической изоляции необходимы для проектирования и производства надежных и безопасных электронных устройств. Вопросы заземления наиболее важны для высокомощных печатных плат с большой плотностью монтажа компонентов (HDI), поскольку такие платы в значительной степени подвержены возникновению нежелательных помех, шумов и других угроз, связанных с электричеством.

Выбор метода заземления зависит от размера и топологии печатных плат, а также от их типа (жесткие, гибкие или гибко-жесткие). Управление большими токами и напряжениями в платах с высокой плотностью компоновки и смешанными и высокочастотными сигналами является одной из основных задач разработчика. В этой статье рассматриваются эффективные способы заземления для плат большой мощности и HDI-плат.

## Для чего требуется заземление в печатных платах?

В конструкции печатных плат заземление обеспечивает общий обратный тракт для электрических сигналов и сигналов мощности, а также служит контрольной точкой для измерения напряжения цепи. Эффективное заземление — важнейшее условие безопасной работы печатной платы. Надежная система заземления также является основой оптимальной передачи электроэнергии. Более того, заземление обеспечивает термическую стабильность, защиту, предотвращает электромагнитные помехи и сохраняет целостность сигнала.

Для реализации надежных соединений между компонентами и плоскостями заземления разработчики должны знать и применять современные методы маршрутизации печатных плат.

## Разные типы заземления в конструкциях печатных плат

На рис. 1 показаны заземления разных типов, которые обозначаются специальными значками.

### Заземление через электрод

Это опорная точка на печатной плате, в которой измеряется напряжение сигнала. Она соединяется с внутренней плоскостью заземления. Если дизайн платы подразумевает использование аналоговых и цифровых сигналов, то разработчику необходимо обеспечить отдельные заземляющие тракты для сигнала каждого типа.

### Заземление на корпус/шасси

Такой тип заземления предназначен для создания обратного тракта для электрических сигналов, которые требуется заземлять отдельно от других сигналов.

### Потенциально заземленная точка

Заземление этого типа не соединено с основной заземляющей плоскостью. Пример такого заземления — обеспечение обратной связи операционного усилителя (рис. 2). В схеме за счет резистора  $R_f$  создается глубокая отрицательная обратная связь и, как следствие, особый режим точки  $V_2$ . Эта точка представляет собой заземленную точку, так как ее потенциал равен потенциалу точки  $V_1$  и потенциалу земли. Потенциально заземленные точки могут использоваться для анализа функциональности операционного усилителя. Заметим, что для других схем заземление такого типа не подходит.

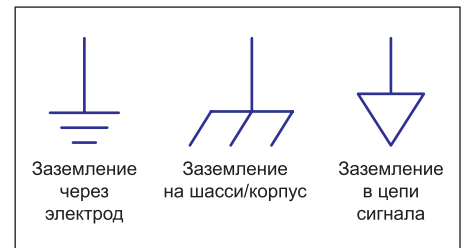


Рис. 1. Обозначения заземлений

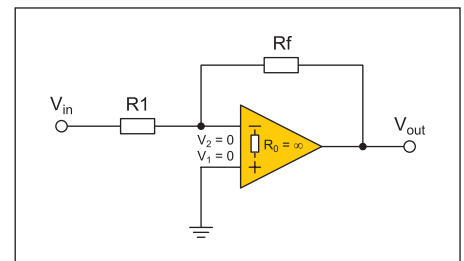


Рис. 2. Потенциально заземленная точка для схемы операционного усилителя:  $V_1$  — точка с потенциалом заземления;  $V_2$  — потенциально заземленная точка

### Непрямое (плавающее) заземление

В изолированных системах непрямое заземление представляет собой контрольный проводник без физического соединения с землей или другими заземленными проводниками. Напряжение на заземляющих контактах и проводниках не определено. Плавающее заземление считается системной ошибкой, хотя в некоторых случаях оно намеренно используется в целях безопасности.

Например, в схеме на рис. 3 разделительный трансформатор используется в источниках питания низкого напряжения (НН) для отделения основного заземления от заземления НН. Таким образом тракт заземляющего тока от основного источника питания исклю-

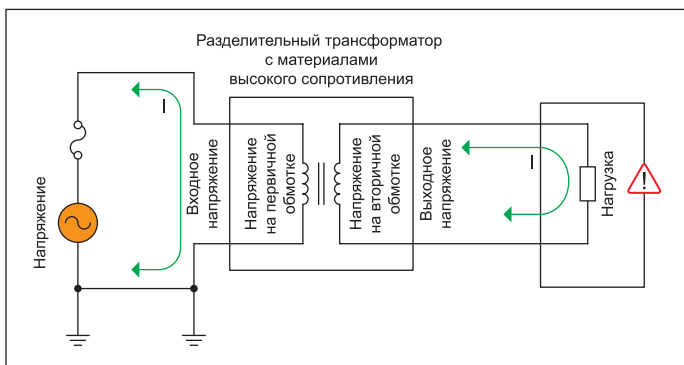


Рис. 3. Плавающее напряжение для безопасной работы разделительного трансформатора

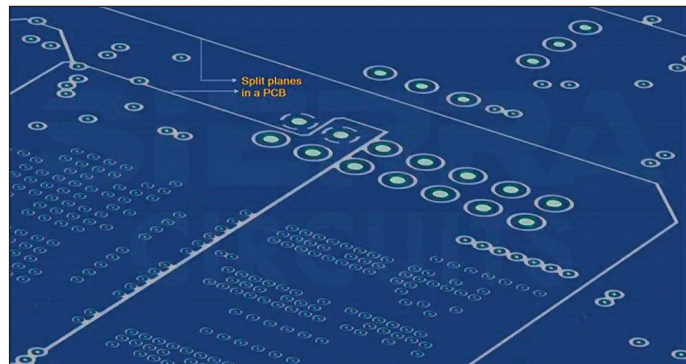


Рис. 5. Отдельные плоскости на печатной плате можно использовать для заземления или маршрутизации силовых схем

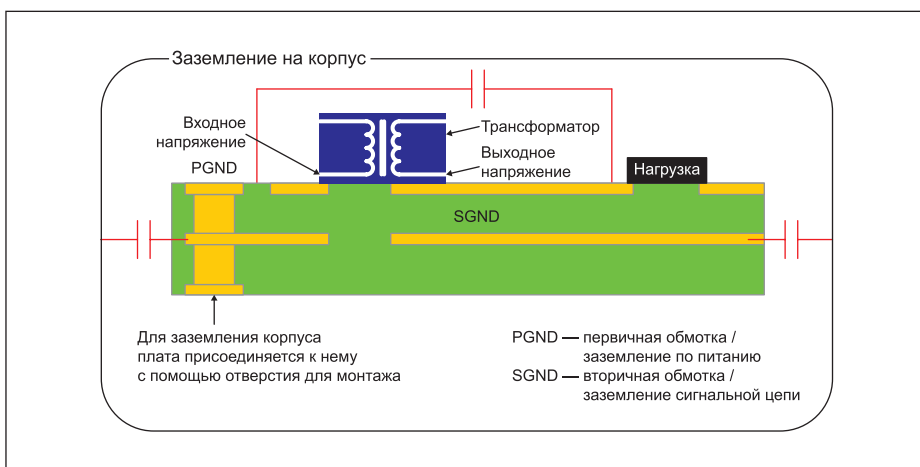


Рис. 4. Заземление на корпус

чается за счет плавающего заземления низкого напряжения. Эта схема обеспечивает электробезопасность всей системы даже при возникновении неисправности на стороне НН.

### Заземление переменного тока

Такой тип заземления представляет собой заземляющие тракты с низким импедансом, которые блокируют обратный постоянный ток, обычно получаемые путем подключения конденсатора к заземляющему слою.

### Заземление на корпус

Заземление формируется при соединении печатной платы с металлическим корпусом шасси. В качестве меры безопасности корпус также напрямую соединен с землей. Кроме того, заземление такого типа может дополняться радиочастотными фильтрами и средствами защиты от электростатического разряда. Недостатком этой системы является паразитная емкость (рис. 4).

### Защитное заземление с помощью обратной цепи

Это физическое соединение с землей, которое действует как безопасная точка возврата избыточного тока. Такое заземление обеспечивает канал для рассеивания нежелательной энергии и защиты цепи, что особенно

необходимо в высоковольтных источниках питания.

## 7 методов заземления в мощных печатных платах и HDI-платах

Рекомендации по заземлению различаются для изолированных и неизолированных силовых цепей. Наилучшее решение для заземления конкретной конструкции печатной платы определяется путем комбинации способов, описанных в этом разделе.

### 1. Специальные плоскости заземления

Заземляющая плоскость (земляной полигон) — медный слой в сборке печатной платы, который обеспечивает обратный тракт для сигналов. Обычно эта плоскость располагается сразу под сигнальным слоем печатной платы, что уменьшает длину тракта. Земляные полигоны обеспечивают маршрутизацию сигнала с контролируемым импедансом в микрополосковой или полосковой конфигурации. В многослойных печатных платах одна из внутренних медных плоскостей может использоваться в качестве заземляющей.

Наличие отдельных слоев заземления для участков высокого и низкого напряжения (рис. 5) может уменьшить перекрестные помехи. Заземляющие плоскости должны быть

подключены к источнику питания отдельно. Кроме того, земляные полигоны большого размера помогают управлять тепловым режимом в случае высоких токов: действуя как радиаторы, они позволяют равномерно распределять тепло по всей плате.

Рекомендации по проектированию плат с заземляющими плоскостями.

- Земляные полигоны должны быть однородными и покрывать максимальную возможную площадь печатной платы. Это позволяет минимизировать падение напряжений и улучшить целостность сигнала.
- Плоскость заземления должна располагаться сразу под сигнальным слоем платы, чтобы уменьшить обратный тракт сигнала. Это помогает снизить количество токопроводящих контактных колец и контуров заземления.
- Следует предусмотреть наличие отдельных заземлений для входного переменного, нерегулируемого и регулируемого постоянного тока, чтобы обеспечить хорошую электрическую изоляцию.
- Цепи возврата тока следует сгруппировать таким образом, чтобы каждая группа была обеспечена отдельным заземлением. Это позволит изолировать помехи от токов одних цепей от других.
- Корректная маршрутизация цепей (без пересечений) поможет избежать возникновения перекрестных помех.
- В случае, когда сигнал меняет свое опорное заземление, применяется сшивающий конденсатор. Для получения однородного слоя заземления используются медные заливки (рис. 6), которые в дальнейшем соединяются при помощи переходных отверстий.
- В соответствии с «общей стратегией заземления» свободное пространство на печатной плате должно быть покрыто медными заливками.
- Поскольку слои питания могут вызвать помехи, они должны располагаться как можно дальше от краев печатной платы. По краям платы, даже на силовых плоскостях, следует использовать земляные полигоны, действующие как экран (рис. 7).

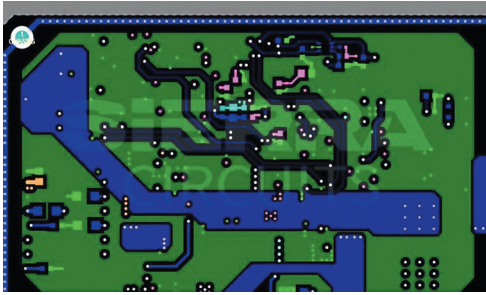


Рис. 6. Медная заливка в свободном пространстве печатной платы для образования общей линии заземления (зеленого цвета)

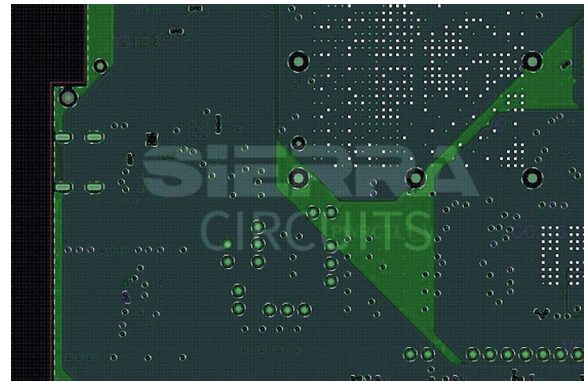


Рис. 7. Земляной полигон (зеленый) на краю платы



Рис. 8. Устранение заземляющего контура в плоскости заземления шасси

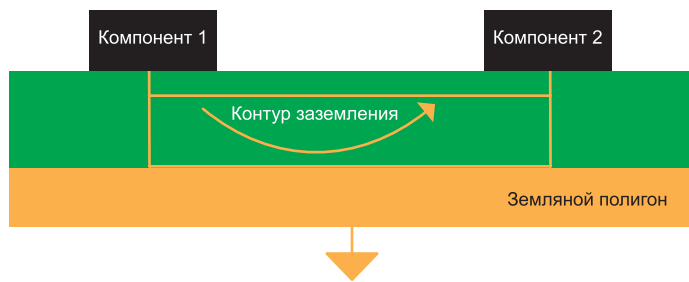


Рис. 9. Контур заземления, образованный двумя дорожками, соединенными с земляным полигоном

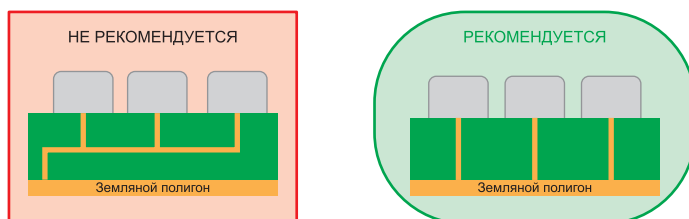


Рис. 10. Рекомендуемые методы заземления печатных плат для соединения компонентов

При заземлении на корпус необходимо спроектировать специальный пустой проем на слое заземления, который присоединится к корпусу (рис. 8). Это позволит избежать образования петли заземления. Заземление переменного тока можно обеспечить с помощью конденсатора. Если конструкция платы такова, что все сигнальные токи и токи питания возвращаются в одну точку, такой точкой может стать вывод корпуса устройства.

Конденсатор, используемый для соединения полигона заземления и обычного заземления на печатной плате, обеспечивает изоляцию сигналов постоянного тока и предоставляет обходной путь для высокочастотных шумовых сигналов. Необходимо выбирать конденсаторы с высоким напряжением и низким эквивалентным последовательным сопротивлением (ESR). Если обратный ток цепи меньше, плоскость шасси замыкается непосредственно на плоскость заземления. В случае очень высокого обратного тока необходимо изолировать плоскости шасси с помощью конденсаторов.

## 2. Заземляющие дорожки для предотвращения петли заземления

Заземляющие контуры (петли) возникают из-за множественных обратных трактов тока, вызванных разницей потенциалов по всей цепи. Чтобы поддерживать одинаковое напряжение заземления на всей плате, контакты заземления разъемов и компонентов подключаются отдельно к соответствующей заземляющей области с помощью переходных отверстий или коротких дорожек (рис. 9).

Эта структура называется многоточечным заземлением и используется преимущественно в высокочастотных печатных платах. При использовании такой конструкции следует избегать размещения дорожек между заземляющими контактами, так как они создают контур заземления, который, в свою очередь, становится причиной возникновения помех

и шумов (рис. 10). Кроме того, необходимо убедиться в отсутствии неподсоединенных (открытых) проводников, поскольку они могут действовать как антенна.

При использовании технологии с несколькими точками заземления для монтируемых в отверстия компонентов следует применять теплоотводящие контактные площадки. Такие контактные площадки не только обеспечат достаточное количество металла для протекания тока, но и поспособствуют аккумуляции тепла, необходимого для пайки при сборке.

#### Заземление по схеме «звезда» обеспечивает индивидуальные тракты обратного тока

Любая электронная система с одной или несколькими печатными платами должна быть оснащена одной точкой, в которой сходятся все заземления. Такой точкой может быть выделенный заземляющий слой на печатной плате или шасси.

В низкочастотных конструкциях имеется одна точка, в которой все заземления связаны вместе. Как правило, такая схема называется заземлением по принципу звезды. Пример такого заземления — источники питания высокого напряжения (рис. 11).

На схеме рис. 11 показаны три линии, которым необходимо заземление: возврат входной мощности, заземление в цепи сигнала и возврат высокого напряжения. Для обеспечения оптимальной производительности всей системы каждая линия должна оснащаться отдельным возвратным трактом для предотвращения нежелательных помех и смешивания сигналов. Кроме того, данный метод заземления позволяет контролировать ширину трасс для каждого отдельного пути в зависимости от требований к токнесущей способности.

При проектировании платы следует учитывать, что размещение чувствительных дорожек (для тактовых и других цифровых сигналов) рядом с проводниками питания может спровоцировать возникновение шумов. Внутренние проводники могут быть уже внешних, так как они не подвержены внешнему вмешательству. В высоковольтных печатных платах следует всегда использовать широкие заземляющие проводники, чтобы предотвратить перегрев и свести к минимуму импеданс заземления. А в платах высокого напряжения необходимо проконтролировать зазоры между проводниками и обеспечить достаточный тракт утечки, чтобы не образовался электрический пробой цепи.

Если конструкция печатной платы не предусматривает наличие эксклюзивных заземляющих плоскостей, ширина сигнальных проводников должна быть наименьшей (6–8 мил), а ширина силовых и заземляющих дорожек — 15–25 мил. Заметим, что ширина проводника должна быть пропорциональна протекающему по ней току.

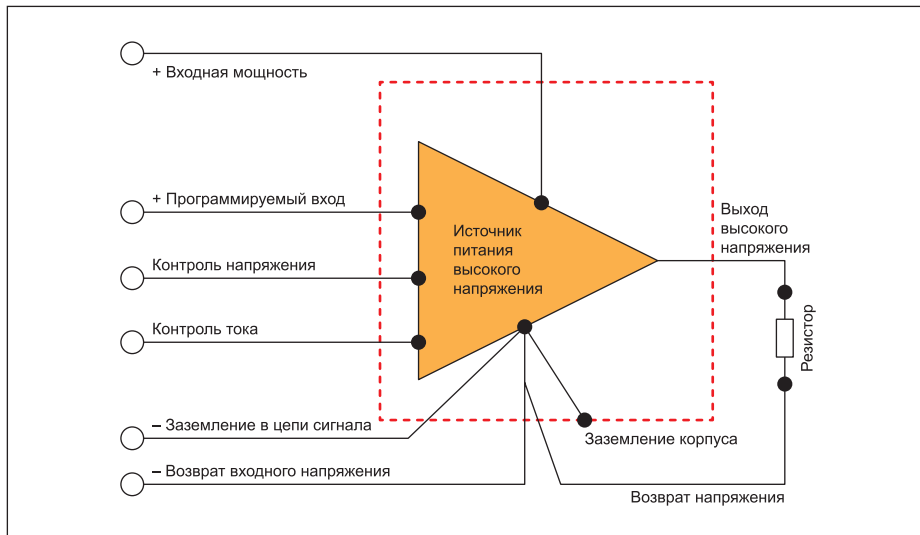


Рис. 11. Заземление в виде звезды в источнике питания высокого напряжения (ВН)

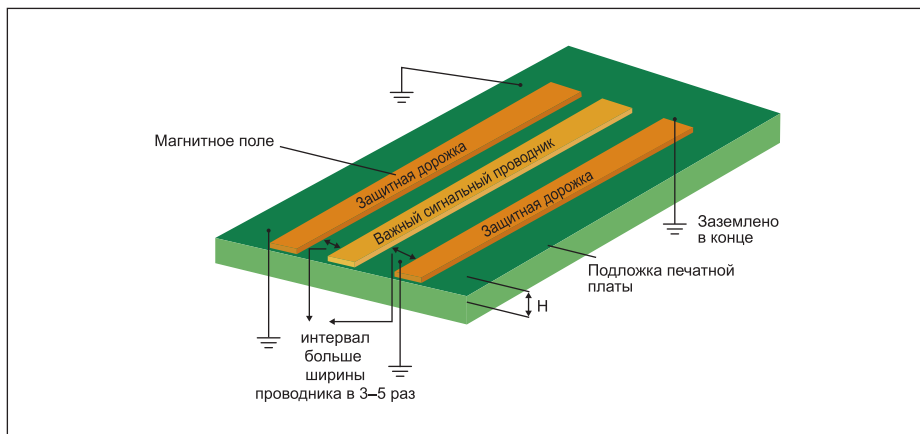


Рис. 12. Защитные дорожки для чувствительных сигналов

Программа для проектирования таких дорожек должна отвечать следующим требованиям:

- IPC-2152 (определение допустимых токов печатных плат);
- возможность вычислений 3-в-1 для определения превышения температуры над окружающей средой, ширины проводников и максимального тока трассы;
- наличие опций вычисления сопротивления, падения напряжения и потерь мощности;
- поддержка внутренних и внешних слоев печатной платы.

#### Защитные дорожки для уменьшения перекрестных помех

Для уменьшения перекрестных помех часто используются специальные защитные дорожки, которые устанавливаются с обеих сторон чувствительного сигнала и заземляются с обоих концов (рис. 12).

Однако для плат с высокой плотностью размещения элементов технология защитных дорожек не подходит, так как требует достаточно большого пространства на плате. Кроме того, лучше не применять эту

технология для трасс с контролируемым импедансом. В свою очередь, при использовании защитных дорожек следует помнить, что промежуток между ними и сигнальными проводниками должен превышать их ширину не меньше чем в 3–5 раз, чтобы избежать воздействия на импеданс.

#### 3. Гальваническая развязка с отдельными участками высокого и низкого напряжения

В случае высоковольтных приложений используется гальваническая развязка, позволяющая предотвратить утечку тока, которая может привести к поражению им оператора или к повреждению других частей платы. Этот метод также применяется, когда у двух участков печатной платы имеются разные потенциалы заземления, но при этом между ними должен передаваться сигнал. Развязка позволяет избежать нежелательной связи переменного и постоянного тока между двумя частями платы.

Эта технология применяется также для разрыва контуров заземления с целью поддержания целостности связи. При этом по-



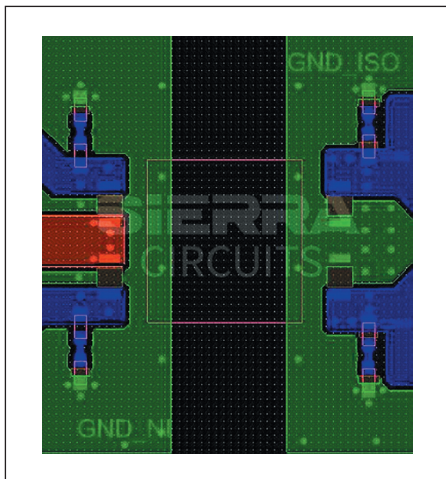


Рис. 13. Изоляция с помощью трансформаторов в разводке печатной платы

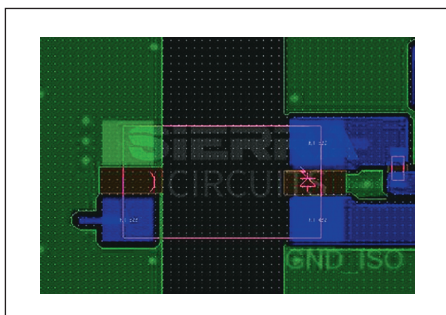


Рис. 14. Изоляция с использованием оптоэлектронных соединительных устройств в разводке печатной платы

вышающие или понижающие трансформаторы используются вместе с предохранителями и конденсаторами (рис. 13), а обмен информацией между изолированными участками обеспечивается с помощью оптонов (рис. 14), датчиков Холла или реле.

Например, если входное питание поступает от трехпроводной однофазной сети переменного тока с большими токами, трансформатор используется для понижения напряже-

ния. Заземление, подключенное к вторичной обмотке трансформатора и другим частям печатной платы, называется вторичным заземлением (SGND). Гальваническая изоляция развязывает питание платы на физическом уровне.

Если необходимо сохранить изоляцию постоянного тока в системе питания, гальваническую развязку следует реализовать так, как показано на рис. 15. Заземляющая плоскость соединяется с заземлением только на входе (первичная сторона). Металлизированные отверстия используются для установки соединения между шасси и печатной платой. На выходе (вторичная сторона) металлизированные отверстия соединяются только с шасси, но не с заземлением печатной платы.

Следует соединить PGND и SGND с конденсатором класса Y, чтобы предотвратить шумовое излучение и обеспечить гальваническую развязку для больших значений постоянного тока и равномерный потенциал заземления для переменного тока. Развязка искусственно ограничивает передачу энергии из одной цепи в другую, что предупреждает повреждение компонентов цепи или поражение электрическим током людей, прикасающихся к оборудованию, у которого электрический контакт с цепью.

Фильтр электромагнитных помех может также использоваться на изолированном главном (первичном) входе, направляя любой низкий шум на заземление. Высокочастотные дифференциальные или синфазные шумы, возникающие от вторичной обмотки, допустимо направлять на заземление через первичную сторону. Возникающие на входном/выходном раземе разряды электростатического электричества заземляются сначала через SGND, а затем по тому же тракту направляются на системное заземление.

#### 4. Отдельные аналоговые и цифровые участки для предотвращения помех

Когда аналоговая и цифровая секции изолированы друг от друга, их заземление

можно соединить в одной точке с помощью заземляющих сеток, резисторов с нулевым сопротивлением или ферритовых колец. Альтернативой этому методу служит размещение возвратного тракта питания между двумя плоскостями таким образом, чтобы обратные токи от каждого сегмента не попадали в другую плоскость (рис. 16).

Компоненты смешанных сигналов, например АЦП, могут размещаться между секциями. Заземление устройств со смешанными сигналами должно производиться через общую точку заземления, с которой цифровые сигналы передаются на другие части печатной платы.

#### 5. Сетки (решетки) переходных отверстий для слоя заземления

Переходные отверстия обеспечивают прямой доступ к заземлению из любой точки на плате (рис. 17). Идея в том, чтобы возвратные тракты сигнала были максимально короткими для уменьшения контуров заземления. Заземление этого типа очень удобно для многослойных печатных плат высокой плотности с четырьмя и более слоями.

Формирование соединений методом сшивания переходных отверстий укорачивает возвратные тракты тока от устройств нагрузки к источнику питания. Во избежание резонанса расстояние между заземляющими переходными отверстиями и соответствующим проводником должно составлять  $1/8$  (или меньше) от длины волны. Такая конструкция обеспечивает защиту важных компонентов благодаря переносу тепла к специальным тепловым площадкам. Заметим, что плоскости питания, находящиеся близко к краю платы, оказывают влияние на другие слои. Этого можно избежать, если создать экран (клетку Фарадея) путем сшивания переходных отверстий с шагом 50–100 мил по краям (рис. 18, 19).

Для того чтобы прочность платы не ухудшилась, необходимо уделять особое внимание физической стабильности ее краев и тщательно подбирать расстояние между переходными отверстиями.

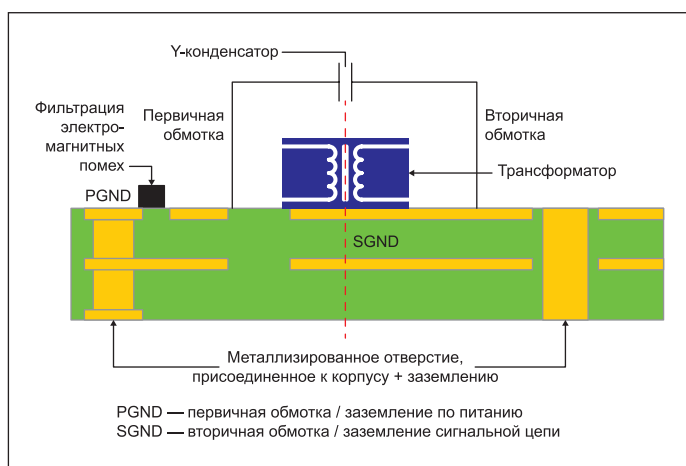


Рис. 15. Гальваническая развязка как метод заземления для высокомощных печатных плат

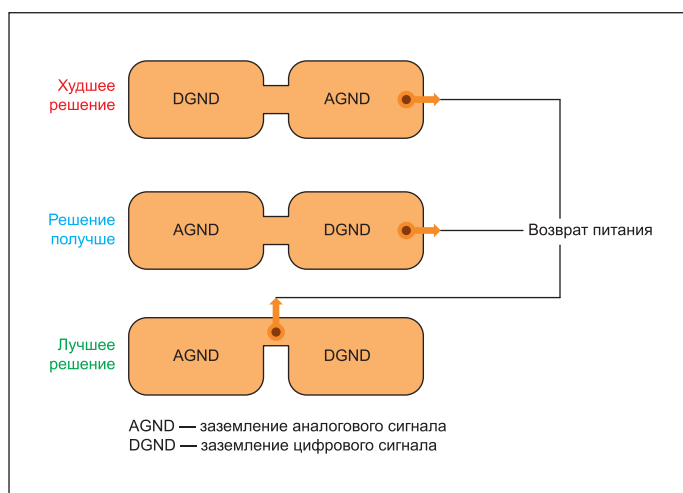


Рис. 16. Технологии заземления в комбинированных схемах

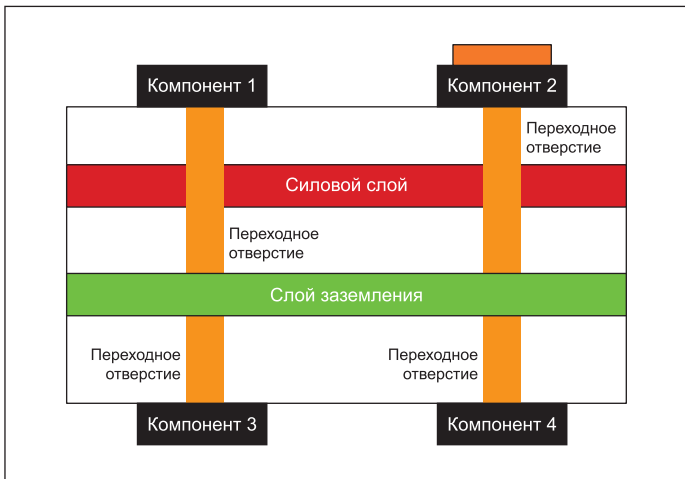


Рис. 17. Компоненты, напрямую подключенные к плоскости заземления с помощью переходных отверстий на плате HDI

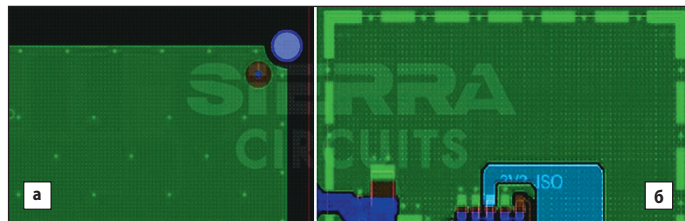


Рис. 18. а) заземленные переходные отверстия по краям платы; б) отпечаток экрана Фарадея с использованием заземляющих переходных отверстий

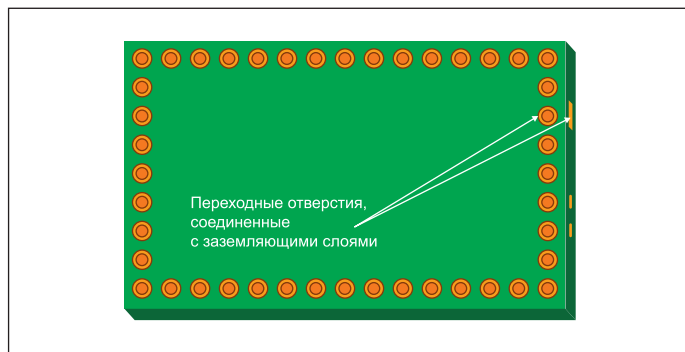


Рис. 19. Клетка Фарадея по краям платы

Заземляющие сетки должны обеспечивать подходящие опорные плоскости для трасс (рис. 20). Если нет возможности создать общую заземляющую плоскость, можно использовать заземляющую сетку, которая соединяется с переходными отверстиями, расположенными через соответствующие интервалы. Заземляющие сетки применяются также в гибких печатных платах, поскольку обычные земляные полигоны в таких платах могут оказывать влияние на их гибкость. Часто полосы заземляющей сетки располагаются под углом 45°; эта технология называется штриховкой.

Технология, в которой переходные отверстия для заземляющей сетки располагаются по краям, образуя внешнюю границу, может использоваться в случае особых требований к конструкции, например для высокочастотных печатных платах, которые содержат микрополосковые линии и копланарные дорожки импеданса. Если конструкция платы подразумевает наличие дорожек от ВЧ-разъемов, необходимо предусмотреть полоски заземления по обеим сторонам дорожки с соответствующим интервалом и переходными отверстиями (рис. 21).

Программа для проектирования таких плат должна отвечать следующим требованиям:

- возможность использования двумерных численных решений уравнений Максвелла для линий передачи на печатных платах;
- поддержка 82 моделей импеданса на основе геометрии трассы и соответствующих опорных плоскостей;
- возможность вычисления оптимальной ширины трассы для заданного значения импеданса;
- определение общих вносимых, диэлектрических и проводниковых потерь.

**6. Установка обходных и развязывающих конденсаторов для предотвращения ошибок заземления**

Когда шина питания распределяется между несколькими компонентами платы, активные компоненты могут создавать опасные явления и помехи, например, звон или дребезг земли.

Явление дребезга возникает, когда напряжение разных точек заземления на плате колеблется. Большинство методов решения этой проблемы предполагает установку блокировочного конденсатора в схему. Это позволяет эффективно блокировать скачки напряжения и шумы источника питания. Блокировочные конденсаторы устанавливаются рядом с выводом питания каждого устройства на плате и присоединяются отдельно к заземлению с помощью коротких дорожек или переходных отверстий. Необходимо избегать последовательного подключения заземления, так как это увеличивает индуктивность.

Разделительные конденсаторы используются параллельно источнику питания для отделения входящих сигналов переменного тока от сигналов постоянного тока и подключаются между контактами питания и заземлением. Однако нередко ситуации, когда дорожки идеально не подходят для соединения заземления и конденсатора. Разделительные конденсаторы сглаживают колебания, создаваемые

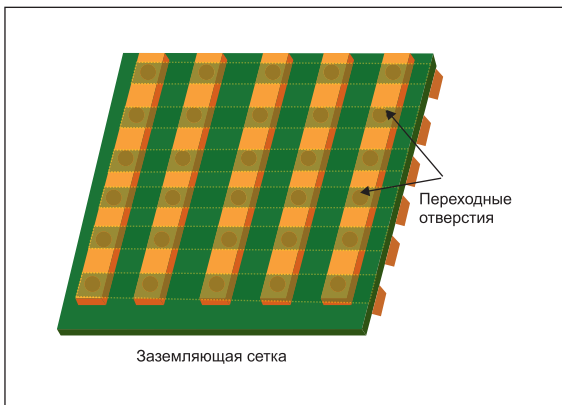


Рис. 20. Использование заземляющих сеток из-за ограничений по слоям печатной платы

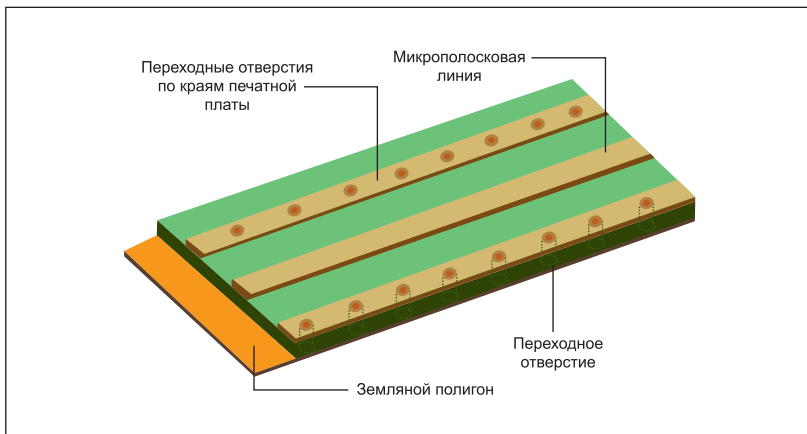


Рис. 21. Расположение переходных отверстий по краям

напряжением питания, уменьшая шум и электромагнитные помехи, а также отфильтровывают любые возникающие пики и защищают микросхемы в цепи. Установка разделительных конденсаторов рядом с контактом источника питания гарантирует, что микросхема будет получать питание независимо от колебаний напряжения.

### **7. Заземляющие провода и устройства защиты от грозовых разрядов для безопасной эксплуатации**

Высоковольтные и силовоточные системы можно сделать безопасными с помощью:

- заземляющих проводов, которые обеспечивают низкоимпедансные тракты для обратных токов в высокомоощных платах;
- устройств и технологий защиты от перенапряжений и грозовых разрядов. Эти устройства предназначены для отведения скачков напряжения от электрических компонентов и распределения их по земле. В таких случаях плоскостью заземления может стать медная труба внутри здания или земля. Разрядники с воздушным зазором, газоразрядные трубки и силовые изоляторы — оборудование, которое применяется для защиты от электростатического разряда. Защиту от коротких замыканий, перегрузок по току и напряжению обеспечивают предохранители. При выборе устройства защиты необходимо основываться на номинальной отключающей способности, номинального напряжения системы и способа монтажа.

Платы высокого напряжения, силовоточные и высокоплотные печатные платы требуют хорошо структурированной системы заземления для обеспечения надежности. Без надлежащего заземления кон-

струкция платы может подвергаться воздействию электромагнитных помех и других шумов, поэтому перед разработкой и производством таких плат следует рассмотреть все методы и технологии заземления и выбрать наиболее подходящий. ■

### **Литература**

1. Ramesh K. Best PCB Grounding Techniques for High-Power and HDI Designs // <https://www.protoexpress.com>

### **Комментарий эксперта**



#### **Сергей ШИХОВ, директор по управлению проектами, А-КОНТРАКТ**

Целостность сигналов, электромагнитная совместимость (как устойчивость к помехам, так и минимизация генерации собственных помех), электробезопасность неразрывно связаны с характеристиками заземления. Самое лучшее схемотехническое решение может оказаться неработоспособным, если не уделить должного внимания вопросу обеспечения корректного тракта возвратного тока. Рекомендации, приведенные в этой статье, помогут избежать многих ошибок при разработке электронных устройств.