# ЭФФЕКТ БЛИЗОСТИ В ПРОВОДНИКАХ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

**СЕРГЕЙ КРАСНОВ**, инженер

***В статье рассматриваются нежелательные явления – поверхностный эффект и эффект близости, которые разработчикам следует учитывать при проектировании печатных плат, а также предлагаются рекомендации по нейтрализации этих эффектов.***

## ВВЕДЕНИЕ

Поверхностный эффект и эффект близости являются проявлениями одного и того же принципа – линии магнитного потока не проникают в идеальный проводник. Разница между этими эффектами в том, что поверхностный эффект представляет собой реакцию на магнитные поля, которые генерируются током в проводнике (см. рис. 1), а эффект близости возникает при протекании тока по рядом расположенным проводникам или слоям. Оба эффекта начинают проявляться на одинаковой частоте.

## ЭФФЕКТ БЛИЗОСТИ

У многослойных печатных плат этот эффект возникает на достаточно низких частотах около 30 МГц. Ниже этого значения напряженность магнитного поля слишком мала, чтобы влиять на протекание тока. На низких частотах обратный ток течет по тракту с наименьшим сопротивлением, заполняя всю площадь поперечного сечения проводника. При возврате к источнику через слои питания или заземления этот ток стремится занять всю медную плоскость. Однако по мере увеличения частоты сигнала напряженность магнитного поля вокруг проводника возрастает, вынуждая обратный ток протекать по цепям с наименьшей индуктивностью. В результате ток течет по узкому тракту непосредственно над или под проводником опорного слоя.

Как видно из рисунка 1, под влиянием магнитного поля ток протекает на небольшой глубине по периметру проводника (эта область показана красным цветом), что увеличивает его кажущееся сопротивление. Данное явление носит название поверхностного эффекта. Под влиянием магнитного поля ток неравномерно распределяется по поверхности двух близко находящихся проводников (см. рис. 1). Так происходит в результате эффекта близости. В результате ток в основном сосредоточен на стороне проводника, обращенной к опорному слою, где наибольшая концентрация тока наблюдается на поверхности непосредственно под проводником.

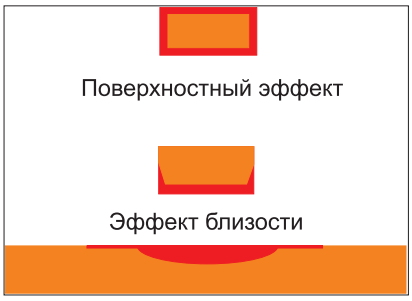


Рис. 1. **Сравнение поверхностного эффекта с эффектом близости**

На рисунке 2 показано, как распределена плотность обратного тока в микрополосковой линии. В асимметричной полосковой конфигурации (см. рис. 3) под действием эффекта близости ток распределяется неравномерно между центральной частью проводника и дальними опорными слоями.

Необходимо точно понимать, куда потечет обратный ток. Особенно важно иметь это представление в случае использования асимметричной полосковой конфигурации, в которой один или два сигнальных слоя находятся между двумя плоскостями.

В первую очередь, следует точно знать, не по какому слою потечет обратный ток, а как он распределится на каждом слое. Кроме того, при наличии разрывов импеданса в тракте обратного тока площадь токового контура увеличивается, возрастает индуктивность и задержка.

Разрыв импеданса возникает из-за сквозных переходных отверстий, через которые осуществляется связь между сигнальными проводниками и опорными слоями с разными потенциалами. Иначе говоря, обратному току прихо-

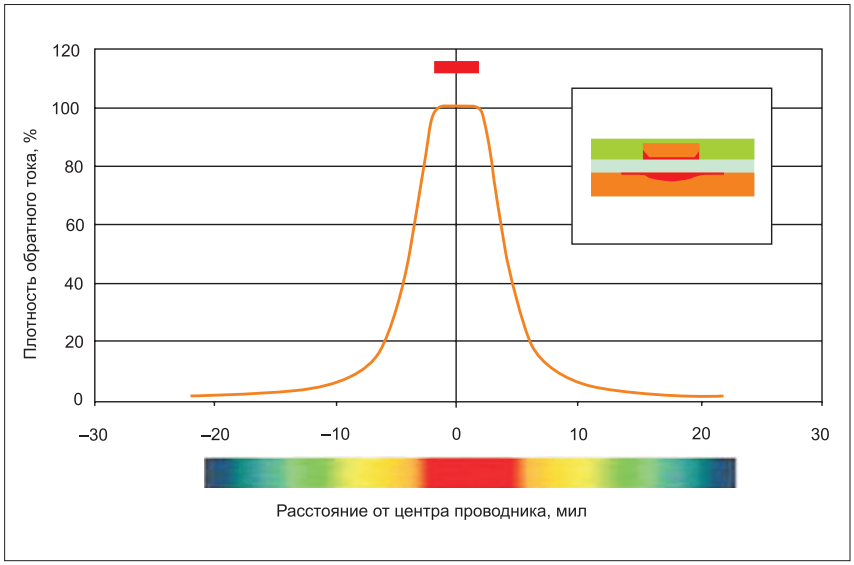


Рис. 2. **Плотность обратного тока в микрополосковой линии**

## На заметку

- На низких частотах обратный ток выбирает тракт с наименьшим сопротивлением, заполняя всю площадь поперечного сечения проводника.
- По мере увеличения частоты сигнала напряженность магнитного поля вокруг проводника возрастает, вынуждая обратный ток протекать по цепям с наименьшей индуктивностью.
- Высокочастотный ток течет по тракту с малой площадью сечения непосредственно над или под проводником опорного слоя.
- Под влиянием магнитного поля ток протекает на небольшой глубине по периметру проводника. Это явление носит название поверхностного эффекта.
- При эффекте близости ток под влиянием магнитного поля неравномерно распределяется по поверхности двух близко находящихся проводников.
- Необходимо точно знать путь, по которому потечет обратный ток.
- При наличии разрывов импеданса в тракте обратного тока площадь токового контура увеличивается, возрастает индуктивность и задержка.
- Если опорные слои имеют одинаковый потенциал по постоянному току, их можно соединить методом сшивания, расположив рядом с сигнальным переходным отверстием массив переходных отверстий, позволяющих уменьшить тракт для обратного тока.
- Если у опорных слоев – разные потенциалы по постоянному току, между слоями устанавливаются развязывающие конденсаторы, чтобы обеспечить протекание обратного тока.
- Установка двух развязывающих конденсаторов между слоями питания является намного лучшим решением, т. к. оно позволяет исключить передачу шума от одного источника питания другому.
- Уравнение для расчета распределения тока позволяет определить направление, в котором течет обратный ток.
- Уравнение для распределения тока позволяет также оценить величину перекрестной помехи.

дится «перепрыгивать» через границу между слоями, чтобы замкнуть токовый контур, что увеличивает его индуктивность и ухудшает качество сигнала. При протекании обратного тока возникает режим резонанса в параллельно расположенных слоях, что приводит к сильным электромагнитным помехам из-за краевых эффектов.

Если опорные слои имеют одинаковый потенциал по постоянному току, их можно соединить методом сшивания, расположив рядом с сигнальным переходным отверстием массив переходных отверстий, обеспечивающих более короткий тракт для обратного тока. Если же у опорных слоев – разные потенциалы по постоянному току, между ними устанавливаются развязывающие конденсаторы (см. рис. 4а). Однако в результате такого соединения может возникнуть шум по переменному току между источниками питания. Способ использования двух развязывающих конденсаторов, представленный на рисунке 4б, является намного лучшим решением, т. к. оно позволяет исключить передачу шума от одного источника питания другому. И хотя площадь токового контура в этом случае немного больше, между слоями обеспечивается дополнительная развязка, что уменьшает импеданс схемы разводки питания. Кроме того, некоторая часть обратного тока, замыкая контур, протекает через межслойную емкость.

### Уравнения для распределения тока

Распределение тока в трех базовых конфигурациях показано на рисунке 5. Распределение тока J(D) в случае сплошной микрополосковой линии определяется следующим образом:

$$J(D) = \frac{1}{1+(d/h)^2}, \quad (1)$$

где h – высота проводника над/под слоем, мил; d – расстояние по горизонтали от центра проводника, мил.

Однако в случае полосковой конфигурации необходимо учитывать соотношение между высотой слоя над проводником h1 и высотой слоя под проводником h2. В этом случае высота h для верхней части слоя определяется следующим образом:

$$h = h1 \cdot \left(1 - \frac{h1}{h1+h2}\right). \quad (2)$$

Высота h для нижней части слоя определяется следующим соотношением:

$$h = h1 \cdot \left(\frac{h1}{h1+h2}\right). \quad (3)$$

Эти уравнения легко экстраполируются на случай использования двойной полосковой линии путем добавления высоты соответствующих диэлектрических слоев к каждой плоскости. В результате выражение (h1 + h2) из двух предыдущих уравнений заменяется выражением (h1 + h2 + h3). Соответствующее распределение тока мы уже видели на рисунке 3.

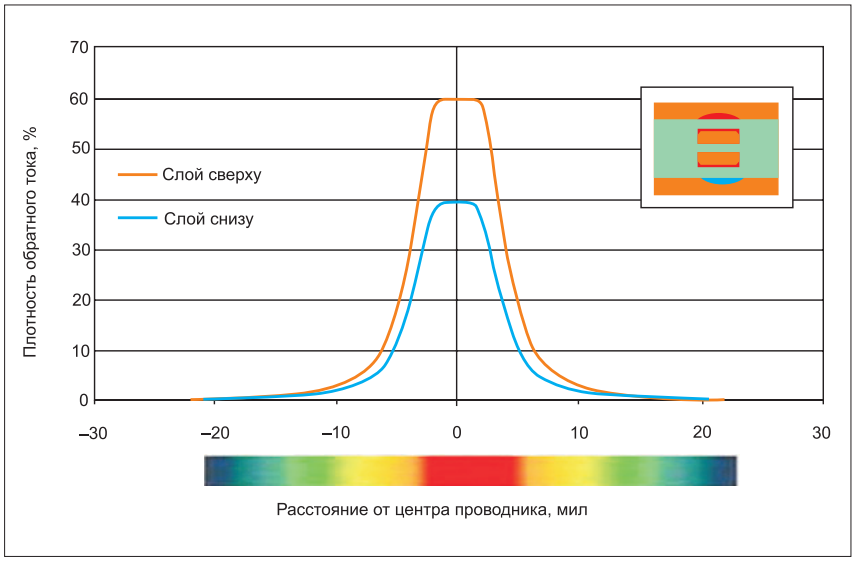


Рис. 3. **Распределение плотности тока в случае двойной асимметричной полосковой линии**

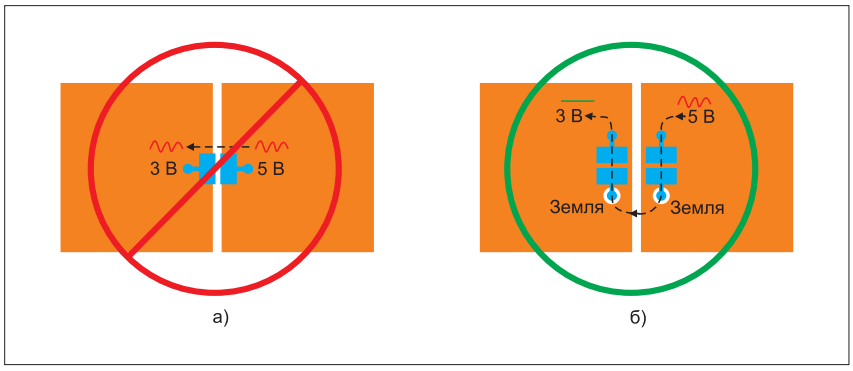


Рис. 4. **а) пример неправильно установленного развязывающего конденсатора между двумя слоями питания; б) удаление шума в тракте обратного тока между разделенными слоями питания**

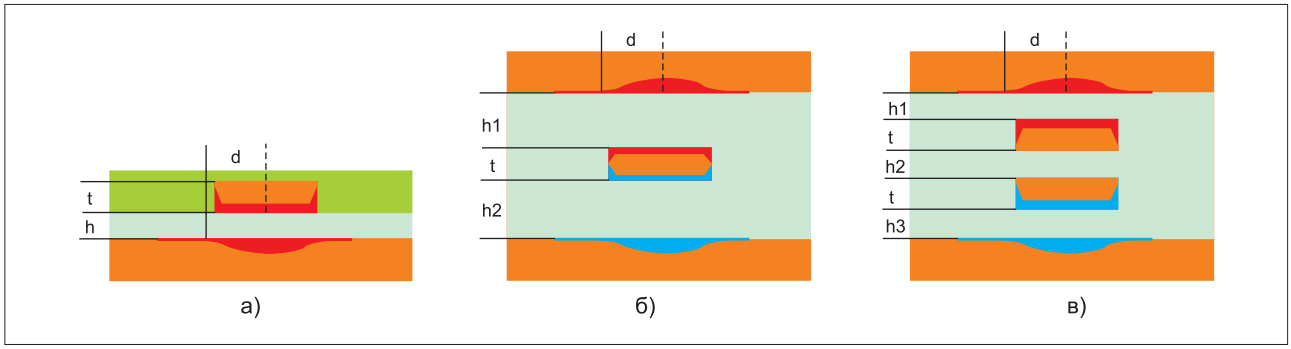


Рис. 5. **а) микрополосковая; б) полосковая; в) сдвоенная полосковая конфигурации**

Говоря точнее, в полосковых конфигурациях проводник толщиной t полностью погружен в слой препрега, благодаря чему проводник расположен ближе к опорному слою, а его импеданс – меньше. Следовательно, приведенное выше уравнение немного усложняется из-за растекания эпоксидной основы препрега. Однако если известно, какой материал используется как основа, а какой – в качестве препрега, высоту препрега можно считать равной t.

Уравнение для распределения тока позволяет также оценить величину перекрестной помехи (ПП). Эта помеха в случае микрополосковой линии определяется следующим образом:

$$ПП = \frac{k}{1+(d/h)^2}.$$

Перекрестная помеха выражается как отношение шумового напряжения к амплитуде управляющего сигнала. Постоянная k зависит от времени нарастания фронта и длины взаимодействующих участков проводников.

## ВЫВОДЫ

При моделировании проводника, находящегося над сплошной плоскостью, видно, что максимальная плотность тока больше на той стороне опорной плоскости, которая обращена к проводнику. Тот же принцип действует в отношении параллельных участков двух установленных рядом проводников: максимальный ток сосредоточен на двух обращенных друг к другу поверхностях. Эффект близости является следствием общего правила, в соответствии с которым высокочастотный ток сосредотачивается вблизи своего обратного тракта.