

# Как определить импеданс цепи в печатных платах

Милан ЙОГЕНДРАППА  
(Milan YOGENDRAPPA)  
Перевод: Сергей Шихов  
sergey@aconr.ru

Прохождение сигнала по печатной плате, обмен энергией между электронными компонентами на плате и отсутствие нежелательных утечек сигналов являются ключевыми параметрами, определяющими эффективность ее функционирования. Существенное влияние на них оказывает такой фактор как полное сопротивление, или импеданс. Эта статья посвящена вопросам определения импеданса цепи в печатных платах.

## Импеданс цепи

Существует несколько методов определения импеданса цепи, но все они могут давать некорректные результаты, если не учитывать паразитные элементы.

Импеданс — это характеристика цепи по переменному току, которая может меняться в зависимости от рабочей частоты. Обычно он представлен следующим выражением:

$$Z = R - j/\omega C + j\omega L,$$

где  $\omega = 2\pi f$ .

## Разница между импедансом и сопротивлением

Основное различие между сопротивлением и импедансом заключается в том, что сопротивление противодействует протеканию как постоянного, так и переменного тока, тогда как импеданс — только переменного. Импеданс не имеет значения в цепи постоянного тока.

Некоторые ключевые различия между сопротивлением и импедансом приведены в таблице.

## Согласование импеданса и обеспечение целостности сигнала

На высоких частотах проводящие дорожки платы действуют как линии передачи с опре-

деленными значениями импеданса в каждой точке. Согласование импеданса гарантирует, что он останется постоянным в каждой точке трассы. Колебания импеданса в линии передачи приводят к отражению сигнала, а значит — к ухудшению его целостности. Контролируемый импеданс обеспечивает прохождение сигнала на печатной плате без ослабления.

## Факторы, влияющие на контролируемый импеданс

Импеданс проводящей дорожки определяется ее физическими размерами (шириной и толщиной), диэлектрической проницаемостью и расстоянием до контрольной плоскости (толщиной диэлектрика) материала платы. Его величина обычно находится в диапазоне 25–125 Ом. На импеданс печатной платы влияют следующие факторы (рис. 1):

- ширина  $W$  и толщина  $T$  медной сигнальной дорожки (сверху и снизу);
- толщина  $H$  материала сердечника или препрега по обе стороны от медной дорожки;
- диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_r$  материала сердечника и препрега;
- расстояние от других медных объектов.

Контролировать величину импеданса необходимо для высокоскоростных приложений, например процессоров обработки сигналов, устройств связи и приборов радиочастотной передачи.

## Общий импеданс печатной платы

Импеданс цепи определяется расположением компонентов. Резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности являются одними из основных элементов схемы. Резисторы противодействуют протеканию тока, а значит, величина сопротивления не зависит от частоты питания. Однако конденсаторы и катушки индуктивности имеют реактивное сопротивление, которое зависит от частоты входного сигнала.

В идеале, реактивное сопротивление конденсатора должно быть обратно пропорционально угловой частоте сигнала, а реактивное сопротивление катушки индуктивности должно быть прямо пропорционально этой частоте.

Помимо параметров, упомянутых выше, импеданс цепи также зависит от подложки печатной платы и внутренних проводящих слоев. Изоляционный материал вместе с внутренними слоями может создавать паразитную емкость и индуктивность. Эти паразитные элементы, в свою очередь, приводят к возникно-

Таблица. Ключевые различия между сопротивлением и импедансом	
Сопротивление $R$	Импеданс $Z$
Не зависит от частоты источника питания	В основном, зависит от частоты питания
Два или более последовательных сопротивления можно складывать арифметически	Для суммирования импедансов необходимо выполнить векторное сложение
Ток через сопротивление всегда находится в фазе с напряжением на нем	Ток и напряжение не совпадают по фазе. Разность фаз зависит от индуктивности или емкости, присутствующих в схеме и влияющих на импеданс

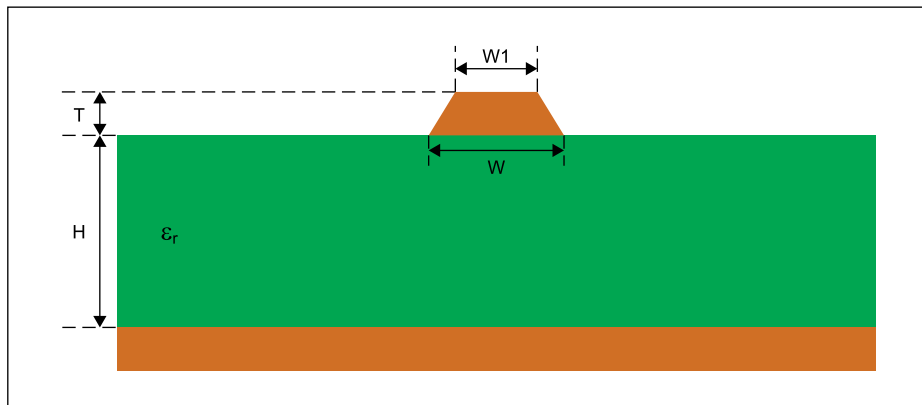


Рис. 1. Факторы, влияющие на импеданс дорожки печатной платы

вению перекрестных помех и влияют на импеданс всей схемы. Далее будут описаны факторы, от которых зависит величина импеданса цепи.

### Импеданс линии передачи

Импеданс линии передачи, в основном, зависит от ее характеристического импеданса, который, по сути, является сопротивлением этой линии в полной изоляции (рис. 2). Другими показателями, используемыми для количественной оценки импеданса линии передачи, являются импедансы четных и нечетных мод. Четный и нечетный — два основных режима распространения сигнала по парной линии передачи.

- **Нечетный режим** — это импеданс линии передачи, когда два проводника в паре работают дифференциально (сигналы с одинаковой амплитудой и противоположного направления).
- **Четный режим** — это импеданс линии передачи, когда два проводника в паре работают равномерно (сигналы одинаковой амплитуды и направления).

Импеданс линии передачи также зависит от того, как расположены дорожки друг относительно друга. Две дорожки, расположенные близко, испытывают индуктивную и емкостную связь, которая обычно приводит к появлению перекрестных помех, а также к изменению импеданса каждой линии.

### Импеданс сети подачи электроэнергии

На низких частотах линия питания (PDN) обладает реактивным импедансом емкостного типа (рис. 3). Сопротивление силовой цепи снижается, оказывая влияние на электронные компоненты и путь возвратного тока.

Физическое разделение между шинами питания, проводящими дорожками и внутренними слоями определяет импеданс линии питания. По мере увеличения входной частоты растет и импеданс этой линии.

Изучение спектра импеданса позволяет определить полосу пропускания с наименьшим импедансом линии питания. Спектр должен оставаться одинаковым во всем диапазоне рабочей частоты платы. Для поддержания целостности ее питания решающее значение имеет расположение заземляющего слоя.

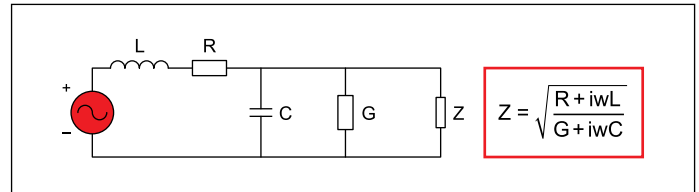


Рис. 2. Характеристический импеданс линии передачи

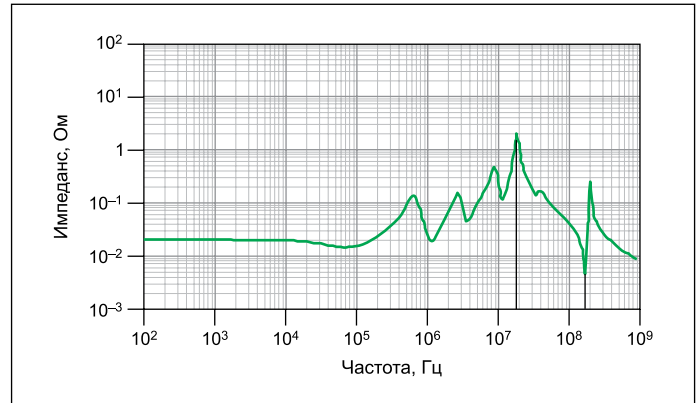


Рис. 3. Зависимость сопротивления линии питания от частоты

Поскольку при движении к заземляющему слою сигналы распространяются по пути с наименьшим реактивным сопротивлением, он должен находиться непосредственно под проводниками на плате. Это гарантирует, что индуктивность контура цепи будет наименьшей и сократится восприимчивость к электромагнитным помехам.

### Выбор материала подложки и сборки

Сборка платы — это расположение слоев в последовательном порядке. На рис. 4 в схематичном виде показана четырехслойная плата.

Job Name: Ex-4Layer  
 Customer: <Not Defined>  
 Part Name: Test  
 Revision:

Customer Required Finished Thickness: 62,00 (+6,20 / -6,20) mils  
 Measured: Over mask on plated copper  
 Estimated Thickness after Lamination: 58,90 mils

Imp	Lyt	Type	Cu Us...image	Foil	Thk (Mil)	it (Mil)	Er	Family	Generic	Item
3xΩ	L1	Signal		0,25oz	2,75	1	0,00	Foil	0,25 oz – Foil	
	L2	Powe...		0,5oz	21	0	4,24	FR-370HR	1086	
	L3	Powe...		0,5oz	21	0	4,24	FR-370HR	0,021 HHxHH	
3xΩ	L4	Signal		0,25oz	2,75	1	0,00	Foil	0,25 oz – Foil	

Impedance Table

Index	Layer	Required Impedance [ohms]	Tol [ohms] +/-	Type	Ref 1	Ref 2	Orig LW [mil]	Orig Spacing [mil]	Orig CP Spacing [mil]	Finished LW [mil]	Finished Spacing [mil]	Fin. CP Spacing [mil]	Impedance Simulator [ohms]	Impedance before Mask [ohms]	IMG
a	1	50	10%	SE Coated		2	4,30			4,30			49,8		
b	4	50	10%	SE Coated		3	4,30			4,30			49,8		
c	1	90	10%	Diff Coated		2	4,25	6,25		4,25	6,25		90,0		
d	4	90	10%	Diff Coated		3	4,25	6,25		4,25	6,25		90,0		
e	1	100	10%	Diff Coated		2	3,50	7,00		3,50	7,00		99,1		
f	4	100	10%	Diff Coated		3	3,50	7,00		3,50	7,00		99,1		

Рис. 4. Сборка печатных плат с требованиями к контролируемому импедансу

L1 и L4 — внешние слои, L2 и L3 — внутренние слои.

Как уже упоминалось, соседние проводящие слои в конструкции платы могут создавать паразитный эффект, который, в свою очередь, влияет на общий импеданс схемы. Несоответствие импедансов из-за паразитных помех становится причиной возникновения отражений на трассе, что, в конечном итоге, приводит к появлению перекрестных и электромагнитных помех.

Описание структуры слоев печатной платы — это часть документации с требованиями заказчика к производителю. Отсутствие этой информации может затруднить или сделать невозможным точное соблюдение технических требований клиента при изготовлении платы.

Использование материала, который наилучшим образом соответствует выбранной конструкции печатной платы, поможет избежать подобных проблем. Диэлектрическая проницаемость  $D_k$  влияет на геометрию проводящей дорожки с определенным значением импеданса. Содержание смолы и толщина материала также являются двумя важными факторами, определяющими  $D_k$  материала:  $D_k$  уменьшается по мере увеличения толщины, а значит, чем выше содержание смолы, тем ниже значение  $D_k$ .

Разработчикам следует выбирать подходящие материалы для печатных плат во избежание изменения общего значения импеданса. Приведем некоторые рекомендации на эту тему.

- **Определите правильную толщину слоя:** более тонкие слои уменьшают площадь контура и паразитную индуктивность, одновременно увеличивая паразитную емкость. Чтобы найти подходящую толщину слоя, можно использовать инструменты моделирования с разными наборами слоев.
- **Выбирайте материал с меньшей диэлектрической проницаемостью:** подложки с большей  $D_k$  увеличивают паразитную емкость. Всегда выбирайте подложку с меньшей  $D_k$ , особенно для высокоскоростных применений.
- **Избегайте выбора подложки с очень малым содержанием смолы** — это может привести к ее истощению, что, в свою очередь, повлечет изменение импеданса.
- **Не используйте в сборке более трех разных типов препрега** — иначе может увеличиться вероятность большого перепада в конечной толщине. При использовании препрегов нескольких типов эффективную диэлектрическую проницаемость композиционного материала следует рассчитывать методом средневзвешенной величины.

## Импеданс переходных отверстий

Переходные и сквозные отверстия в многослойной плате имеют паразитные соедине-

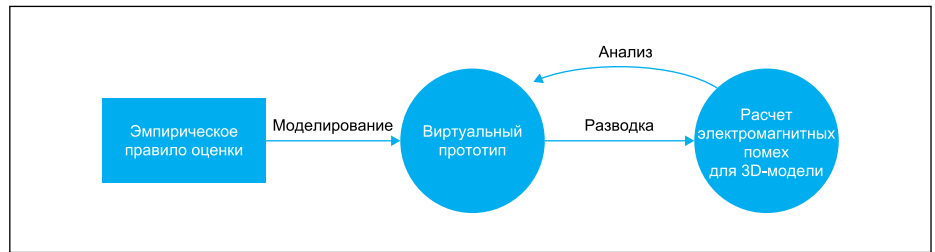


Рис. 5. Процесс моделирования схемы

ния между соседними проводящими элементами. Величина индуктивности переходного отверстия составляет порядка нГн и в основном определяется соотношением его сторон.

Импеданс переходных отверстий обычно составляет 25–35 Ом. Следовательно, существует значительная разница между импедансами переходных отверстий и дорожек (около 50 Ом). Когда переходное отверстие размещается на проводящих дорожках, возникает шумовая связь, вызывающая разрывы импеданса. Рекомендуется избегать размещения переходных отверстий между дифференциальными парами, чтобы уменьшить эти разрывы.

## Методы определения импеданса цепи

Импеданс цепи можно рассчитать, используя следующие методы.

### Моделирование схемы

Моделирование схемы — метод, используемый для проверки функциональности конструкции платы перед ее производством. Расчет импеданса включен во многие программы для проектирования печатных плат. Одним из основных преимуществ в этом отношении является то, что параметры расчета импеданса можно менять и моделировать разные варианты, чтобы выбрать лучшую конструкцию для изготовления.

### Онлайн-калькуляторы импеданса

Контролируемый импеданс или параметры дорожки можно определить с помощью онлайн-калькуляторов. Они не обеспечивают ту детализацию, что инструменты моделирования, но позволяют скорректировать проект в процессе работы над ним.

Так, например, калькулятор импеданса от Sierra Circuits использует двумерное численное решение уравнений Максвелла для линий передачи печатных плат. Полученные данные достаточно точны и подходят для производства печатных плат. Инструмент оценивает параметры дорожки: емкость, индуктивность, задержку распространения на единицу длины и эффективную диэлектрическую проницаемость структуры.

В отличие от упомянутого инструмента измерения импеданса, большинство бесплатных онлайн-калькуляторов импеданса

не очень точны, поскольку основаны на эмпирических формулах и не учитывают влияние таких факторов как трапециевидная форма дорожки, многочисленные диэлектрические материалы и др.

### Практический метод

Чтобы быстро получить приблизительное контролируемое значение импеданса, рекомендуется рассчитать время нарастания по формуле:

$$t_r = 0,35/f_{\max}$$

где  $f_{\max}$  — максимальная рабочая частота.

Максимальная длина дорожки вычисляется по формуле:

$$l = 5,08 \text{ см/нс} \cdot t_r$$

Характеристический импеданс трассы рассчитывается следующим образом:

$$Z = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1,41}} \ln \left( \frac{5,98}{0,8W + T} \right),$$

где  $\epsilon_r$  — диэлектрическая проницаемость материала (по паспорту);  $H$  — расстояние между дорожкой и слоем заземления;  $W$  — ширина дорожки;  $T$  — толщина дорожки.

Каким бы способом вы ни определяли импеданс печатной платы, рекомендуется сотрудничать с ее контрактным производителем, поскольку на ее изготовление влияют стандарты технологичности и наличие на рынке соответствующих материалов. ■



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

«Для высокоскоростных/высокочастотных схем импеданс является одним из основополагающих параметров. Он оказывает влияние на согласование линий передачи,

а значит — на целостность сигналов и электромагнитную совместимость, которые, в свою очередь, определяют качество печатной платы. Неверный выбор значения импеданса может существенно снизить эффективность платы и даже привести к отказу конечного электронного блока. Именно поэтому крайне необходимо, чтобы разработчик умел правильно определять импеданс в цепи.»