

## Проводники с углами 90°

Не часто в литературе можно повстречать обсуждения на тему: “Что происходит с сигналами на печатной плате при использовании проводников с углами 90°?” Однако, лишь упоминание о прямых углах – независимо от того, говорится ли о невозможности их применения или об их безвредности и возможности использования без всяких последствий – дает повод для дискуссии с теми, кто имеет противоположное мнение.

Аргументы против использования прямых углов подразделяются на две категории:

*Рассогласование импеданса* – ширина проводника в прямом углу больше, чем на прямолинейном участке, что приводит к уменьшению свойственного ему импеданса  $Z_0$  и, как следствие, к рассогласованию сигнала. В свою очередь, это приводит к отражениям и искажениям сигнала, а также к появлению дополнительного шума вдоль проводника.

*Электромагнитные помехи* – второй аргумент против использования проводников с прямыми углами, который постулирует, что электрическое поле становится более сосредоточенным на острых углах, вызывая повышенное электромагнитное излучение с таких поверхностей, проявляющее себя как помехи.

### Тестирование

Для разрешения разногласий по поводу возможности применения при разводке проводников с прямыми углами было решено сделать макетную плату, чтобы на ней провести реальный контроль и измерение эффектов, которые могут возникнуть. Результаты тестирования этого макета должны были устранить все разногласия. Испытания должны были проводиться, по крайней мере, тремя средствами, которые бы не находились в одном месте. Макетная плата должна была быть продуманной, сконструированной и изготовленной, после чего кто-то, обладающий соответствующим оборудованием и знаниями должен был провести ее тестирование и дать оценку результатам.

Рисунок 1 иллюстрирует разработанную и изготовленную печатную плату. Шесть проводников должны были служить различными объектами тестирования. Все они были сделаны в виде микрополосковых линий с подогнанным импедансом и одинаковыми размерами (двухслойная плата; диэлектрик FR4 с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r=4,6$ ; расстояние между слоями 0,178 мм (7 mils); медные проводники толщиной 42 мкм (1,2 oz) и шириной 0.254 мм (10 mils); второй слой – полигон). Для подключения к тестовому оборудованию питание на каждый проводник подавалось через разъем с волновым сопротивлением 50 Ом; другой конец каждого проводника подсоединялся к нагрузке для согласования. Все проводники имели строго одинаковую длину, равную 203,2 мм (8 inches). На печатной плате находились и другие проводники и разъемы (на рисунке не показаны) для дополнительных исследований, не относящихся к данному эксперименту.

В таблице 1 показаны детальные конфигурации углов каждого проводника. Проводник 2 представлял собой прямой отрезок без углов для контроля. Каждый из оставшихся проводников имел два одинаковых изгиба в 90° либо в 45°. Проводник 7 имел исключительную конфигурацию – пару острых углов в 135°.

### Результаты

Были проведены два вида тестирования: первый заключался в исследовании нарушения постоянства импеданса, второй – в исследовании электромагнитного излучения.

При измерении *импеданса* использовался динамический рефлектометр (time-domain reflectometer, TDR). Этот прибор позволяет эффективно измерять импеданс проводника в любой точке на протяжении всей длины. На рисунке 2 показаны геометрические размеры проводника с углом в 90°. Максимальная ширина в 1,414 раза (квадратный корень из 2) превышает номинальную ширину. Теоретически, в этом месте имеется уменьшение характеристического импеданса  $Z_0$  примерно на 15...20%. Вне угла, на расстоянии, равном ширине  $W$ , данный эффект пропадает (теоретически). Таким образом, импеданс (опять же теоретически) изменяется от номинального значения до 20% от его на расстоянии  $W/2$  от угла и, далее, возвращается к начальному значению на том же расстоянии  $W/2$ .

На рисунке 3 показаны результаты анализа рефлектометра. Время нарастания выходного импульса прибора составляло примерно 17 пикосекунд или примерно 2,79 мм длины микрополосковой линии, что превышает примерно в 10 раз ширину проводника. При таком времени нарастания нарушение постоянства импеданса было чрезвычайно малым и ограничивалось небольшим расстоянием от угла.

Подводя итог, эффект влияния углов в 90° на  $Z_0$  мал и трудно измерим и много меньше, чем эффект влияния простого переходного отверстия.

Несмотря на то, что испытания на электромагнитное излучение (EMI) трудноосуществимо по некоторым причинам, ситуация с измерениями в данном случае не представляет особых трудностей:

нас не интересовала абсолютная величина излучения проводников с различными конфигурациями, а только лишь относительный уровень их излучения. Вопрос состоял не в значении уровня излучения, а в том, излучают ли прямые углы больше, чем сглаженные под  $45^\circ$ .

Тестирование было проведено в частично экранированном помещении согласно схеме, приведенной на рисунке 4. На проводники платы подавался сигнал от схемного анализатора, а излучение принималось логопериодической антенной, расположенной примерно в метре от печатной платы. Было проведено более 60 измерительных тестов для всех проводников, при разной (горизонтальной и вертикальной) ориентации в пространстве, при наличии и при отсутствии нагрузки и т.п. В качестве тестового излучателя использовался отрезок экранированного провода длиной 3 см, который выступал в роли несимметричного вибратора на частотах до 1,3 ГГц.

Перед тестированием проводников и излучателя было произведено измерение опорного уровня излучения, которое передавалось с выхода анализатора (порт 2) на его вход (порт 1). Затем сигнал подключался к проводнику #2 (прямой проводник). Его излучение было на 15 дБ больше опорного уровня, но на 35 дБ меньше излучения вибратора.

Далее было измерено излучение от других проводников. Проводники #3 (углы в  $90^\circ$ ) и #6 (углы в  $45^\circ$ ) имели излучение, немного превышающее излучение проводника #2. Вопреки ожиданиям, излучение проводника #6 незначительно превосходило излучение проводника #3. Кроме того, ни один из тестируемых проводников не обладал излучением, которое бы существенно превышало излучение от остальных. Это говорит о двух вещах: 1) трудность в проведении таких видов измерений и 2) эффекты, связанные с угловыми проводниками, (если такие эффекты имеют место) существенно меньше погрешностей данного типа измерений.

## Выводы

Данные динамического рефлектометра не показали сколько-нибудь значительные отражения для углов в  $45^\circ$  и  $90^\circ$  проводников микрополосковых линий. Согласно теории, существует изменение  $Z_0$ , связанное с углом, но при нарастающем фронте тестового импульса от 17 пс и более реальный эффект от этого проявляется слабо.

Измерения излучения (вплоть до частоты 1,3 ГГц) не показали в пределах погрешности увеличенного уровня этого излучения для прямых углов по сравнению с углами в  $45^\circ$ . Уровень излучений от угловых проводников был на 35-50 дБ меньше уровня излучения от 3-сантиметрового вибратора и лишь незначительно превышал уровень излучения от прямого проводника (без углов).

Надо полагать, что для большинства типов печатных плат сосредоточенные неоднородности встречающиеся в корпусах интегральных микросхем, разъемах и отверстиях будут создавать большие отражения или излучения, чем углы проводников в  $45$  или  $90^\circ$ .

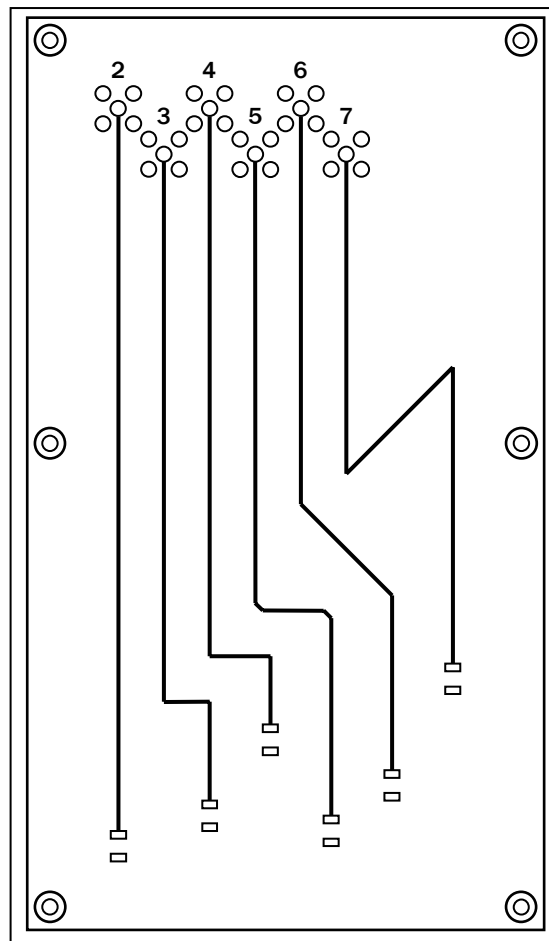


Рис. 1. Тестовая плата с проводниками

Таблица 1. Конфигурация углов проводников

№ проводника	Конфигурация	Макс. ширина в углу
2		
3		$W \times 1,414$
4		$W \times 0,707$
5, 6		$W \times 1,082$
7		$W \times 2,613$

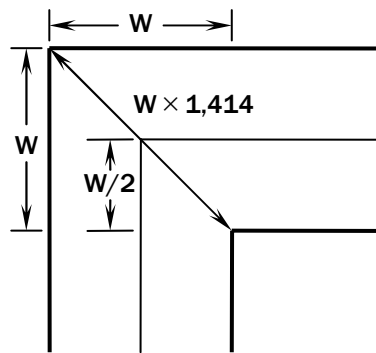
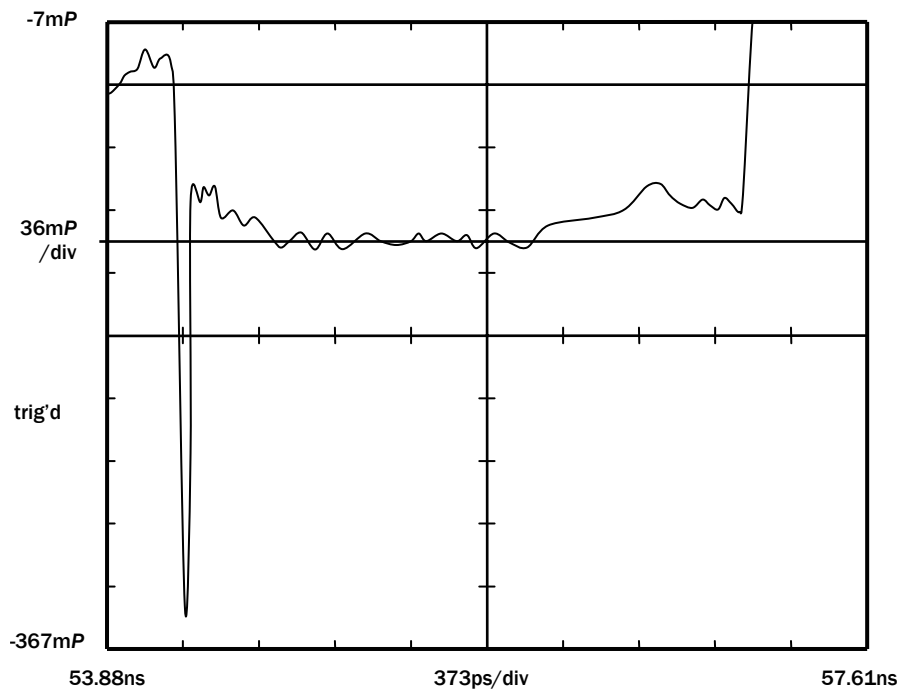


Рис. 2. Геометрия прямого угла

118018 DIGITAL SAMPLING OSCILLOSCOPE  
 date: 21-MAY-97 time: 15:17:17



Cursor			$\Omega$	$\Omega \times 2$	Cursor 1
Type	P1	-43.000mP	45.88 $\Omega$	91.75 $\Omega$	-43.0004mP
Horizontal	P2	-136.60mP	37.98 $\Omega$	75.96 $\Omega$	Cursor 2
Bars	$\Delta P$	-93.600mP	-7.896 $\Omega$	-15.79 $\Omega$	-136.600mP
Exit	Set Zero				Remove/Clr Trace 1 M1 Main

Рис. 3. Типовой выходной сигнал рефлектометра для проводника № 3

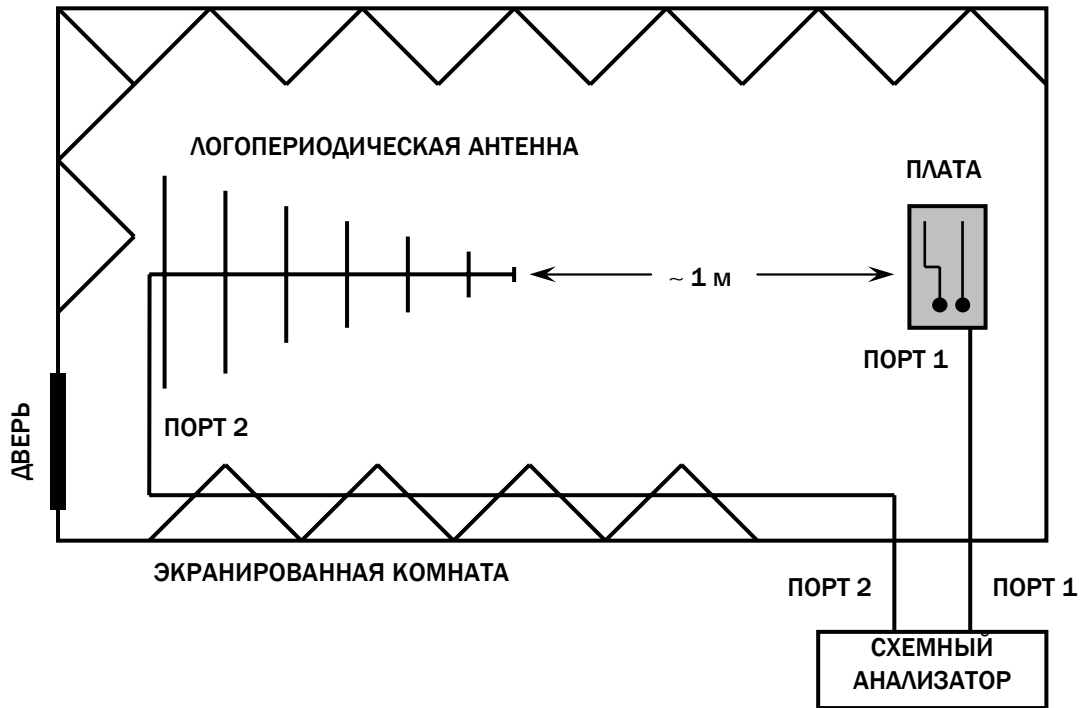


Рис. 4. Установка для измерения электромагнитных помех