

Измерения импеданса с помощью рефлектометра

Амит БАЛ (Amit BANL)

Перевод: Сергей ШИХОВ
sergey@acont.ru

Измерение импеданса и проверка на наличие неисправностей и разрывов в разных точках проводящей дорожки печатной платы — нелегкая процедура. Это обусловлено тем, что импеданс является свойством переменного тока и не может измеряться как сопротивление. Измерения импеданса рефлектометром, который контролирует отраженный сигнал (TDR), необходимы для оценки целостности сигнала в конструкции печатной платы (рис. 1).

Для измерения импеданса важен расчет времени нарастания и задержки распространения. Рефлектометр подает импульс в проводящую линию на тестовом образце, а затем измеряет характеристическое сопротивление, анализируя изменения в амплитуде отраженной волны. Прибор наблюдает отражения только в том случае, если введенный импульс испытывает какой-либо разрыв на своем пути. Если разрыва нет, импульс поглощается оконечной нагрузкой, и отражения сигнала не возникают. Но это идеальный случай. Любое изменение импеданса отображается с помощью графика TDR.

Что такое рефлектометр для контроля формы отраженного сигнала?

Рефлектометр для контроля формы отраженного сигнала — электронное устройство, которое использует отраженные волны для

расшифровки и оценки характеристического сопротивления в платах с регулируемым сопротивлением, кабелях, разъемах и т. д. С его помощью находят электрические разрывы в разъемах или любых других электрических цепях. В статье рассматриваются некоторые важные TDR-функции.

Коэффициент замедления (VF)

Для работы TDR-рефлектометра обязательно знать скорость импульса сигнала, проходящего по проводящей дорожке. С помощью V_F рефлектометр преобразует время отраженных импульсов в расстояние. V_F показывает отношение скорости импульса в дорожке к скорости света.

Точность

Точность рефлектометра зависит от коэффициента замедления V_F . Для обеспечения наибольшей точности необходимо проверить проводящую дорожку с обоих концов.

Уровень импульса на выходе

Изменение уровня выходного импульса указывает на наличие разрывов. Проверка на небольшие разрывы в проводящей дорожке и разрывы на дальнем конце линии передачи требует высокого уровня импульса. Поскольку замыкания на передающем конце искажают большую часть отображаемого сигнала, для проверки требуются более низкие уровни импульсов.

Диапазон измерений

Исходно лучше всего установить диапазон выше ожидаемой длины развертки, чтобы увидеть полную картину — если ошибка не отобразится на дисплее, ее легко пропустить.

Автоматический поиск неисправностей

Многие рефлектометры оснащены автоматическими функциями, позволяющими выявить неисправности. Чтобы использовать прибор с максимальной отдачей, применяется также ручной режим проверки.

Факторы, влияющие на разрешение рефлектометра

Если TDR-система имеет недостаточное разрешение, небольшие или близко расположенные неоднородности могут проявляться в одном отклонении сигнала, а значит, указывать на одну неисправность. Такой эффект не только скрывает некоторые обрывы и нарушения, но и приводит к неточным измерениям и показаниям импеданса.

Время нарастания при измерениях импеданса

Отражение от любого разрыва, возникшего на пути прохождения сигнала, характеризуется временем нарастания, которое равно или меньше, чем у зондирующего импульса. Промежутки между двумя разрывами в тракте цепи определяют, насколько близко их от-

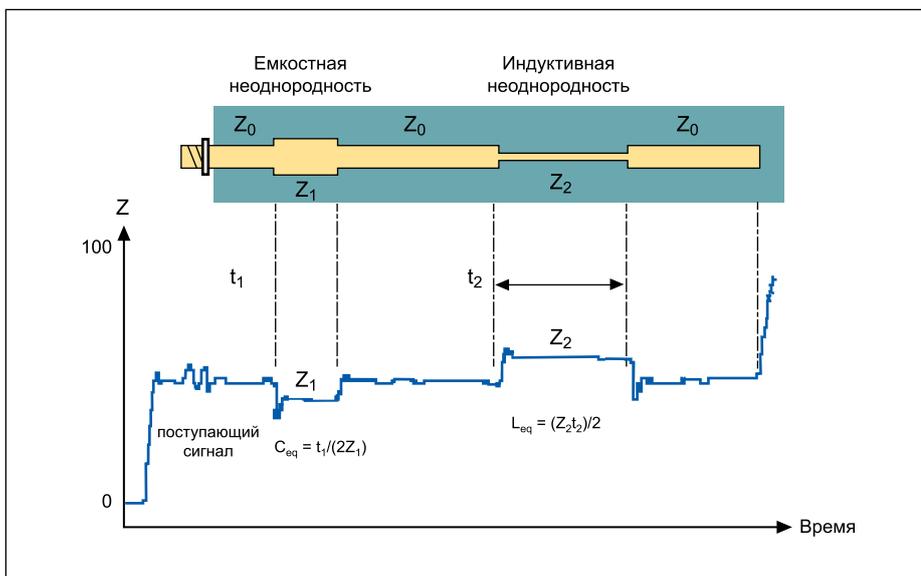


Рис. 1. Измерения импеданса рефлектометром необходимы для оценки целостности сигнала в конструкции печатной платы

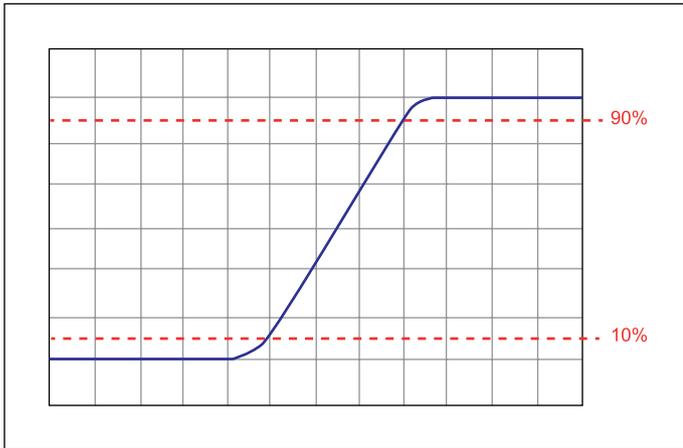


Рис. 2. Время нарастания представляет собой время перехода сигнала с уровня 10% на уровень 90%

ражения расположены на экране рефлектометра. Если два разрыва находятся на расстоянии менее половины времени нарастания системы, импеданс измерить трудно:

$$T_{Res.} = 1/2T_{Rise.}$$

Управление временем нарастания с помощью измерений

В большинстве случаев желательно, чтобы время нарастания было минимальным, но иногда результаты, полученные в таком случае с помощью рефлектометра, могут оказаться не вполне очевидными. Например, если мы оцениваем импеданс микрополосковой линии с временем нарастания 35 пс, то ясно, что у рефлектометра — хорошее разрешение. Однако даже самые высокоскоростные логические схемы не могут соответствовать времени нарастания 35 пс импульса TDR. Время нарастания выходного сигнала у типовых логических схем с эмиттерными связями (ECL) находится в диапазоне 200 пс...2 нс. Отражения от небольших неоднородностей, например от заглушек или острых углов микрополосковой линии, хорошо видны и могут давать большие отражения при времени нарастания 35 пс.

С другой стороны, та же ECL-управляемая линия передачи с временем нарастания 1 нс может давать незначительные отражения. Вводящие в заблуждение показания импеданса можно исправить, если смоделировать среду, подобную реальным рабочим сигналам. Это позволяет оценить реакцию линий на время нарастания в ситуации, аналогичной фактической работе схемы. Для подобных целей в некоторых измерительных рефлектометрических системах предусмотрены средства увеличения кажущегося времени нарастания зондирующего импульса.

Время нарастания и задержка распространения

Время нарастания, один из наиболее важных параметров временной области, определяет период перехода с одного уровня на другой. Это время требуется для того, чтобы импульс напряжения повысился с 10 до 90% переднего фронта сигнала. Время нарастания высокоскоростных сигналов короче, а значит, быстрее переход между двумя уровнями напряжения. Для многоуровневых сигналов выполняется быстрое переключение между уровнями. При этом малое время нарастания приводит к возникновению проблем — более сильным электромагнитным и перекрестным помехам (рис. 2).

Задержка распространения относится к времени переключения сигнала со входа на выход. Это функция диэлектрической проницаемости ϵ_r . Задержка распространения выражается во времени на единицу длины. За временную задержку отвечает, в основном, паразитная емкость, что особенно характерно для любых высокоскоростных и HDI-плат (рис. 3).

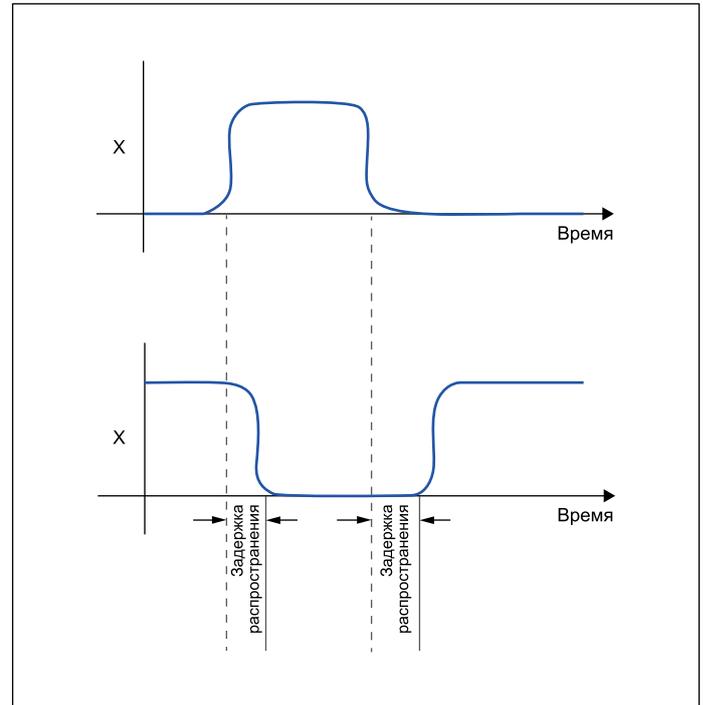


Рис. 3. Графическое представление задержки распространения

Как связаны время нарастания и полоса пропускания 3 дБ

В измерительных приборах, например в осциллографах и анализаторах спектра, время нарастания τ_r напрямую связано с полосой пропускания на уровне 3 дБ.

Как упоминалось, время нарастания определяет разницу во времени между двумя точками нарастающего импульса в ответ на входной ступенчатый сигнал. Полоса пропускания 3 дБ определяется как частота, при которой амплитуда напряжения или тока сигнала снижается до 70,7% от опорной амплитуды. По сути, оно измеряет частотную характеристику.

Эти связанные параметры указывают на способность системы реагировать на внезапные изменения входного сигнала. Соотношение между временем нарастания и полосой пропускания по уровню 3 дБ можно оценить, рассмотрев временную и частотную характеристики идеального низкочастотного RC-фильтра:

$$\tau_r = 0,35/f_{3\text{дБ}}$$

где τ_r — время нарастания; $f_{3\text{дБ}}$ — частота при полосе пропускания 3 дБ.

Это выражение не дает точные результаты в реальном времени. Чтобы получить точный результат, требуемый параметр следует рассчитать с помощью характеристических функций. Если значение одного из этих параметров известно, можно вычислить другие параметры с помощью преобразования Фурье.

Скорость фронта при измерении импеданса TDR

Импеданс измеряется на плоской вершине импульса, а не на фронтальной части. Скорость фронта определяет разрешение. Например, высокая скорость фронта указывает на короткий разрыв, а медленный фронт — на разрывы большей длины. Поскольку быстрые фронты реагируют на мелкие неоднородности, они также заметно реагируют, например, на неоднородность наконечника зонда, контактных площадок, переходных отверстий и разрывы импеданса, обычно свойственные тестовым проводникам в точках ввода. В результате сигналы искажаются, что, как правило, маскирует или искажает тестовую область измерений.

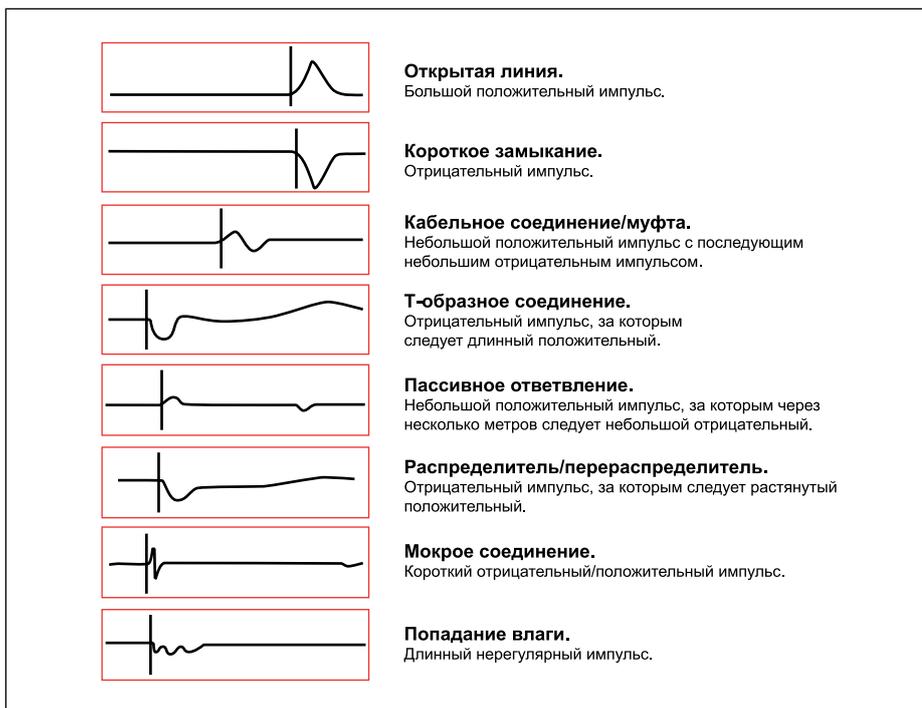


Рис. 4. Типовые рефлектограммы

Аберрации или эффект звона при TDR-измерении импеданса

Аберрации — это общее название для отклонений от нормы, а эффект звона — частный случай аберрации зондирующего импульса. Аберрации достигают неоднородности раньше зондирующего импульса, после чего возникают отражения. «Преждевременные» отражения снижают разрешение рефлектометра, не позволяя заметить близко расположенные неоднородности.

Факторы, влияющие на точность TDR-измерений

Несколько факторов влияют на точность измерения импеданса рефлектометрическим способом.

Эталонный импеданс

Все TDR-измерения импеданса выполняются путем сравнения амплитуд отраженных импульсов с амплитудами зондирующих импульсов, а результаты измерений представляются в единицах Ом или ρ . Однако общий процесс измерения зависит от точности измерения эталонного импеданса Z_0 . Например, некоторые TDR-модули используют разъемы в качестве эталона стабильного импеданса для расчета коэффициента отражения.

Амплитуда ступенчатого сигнала и поправка на нулевой уровень

Современные TDR-инструменты периодически отслеживают нулевой уровень и амплитуду ступенчатого сигнала. Таким образом, рефлектометрическая система может

автоматически выполнять компенсацию, что подходит для часто повторяемых измерений, даже в условиях дрейфа амплитуды ступенчатого сигнала.

Искажения в зондирующем импульсе

Искажения в подаваемом импульсе вызывают ошибки при измерении точной амплитуды отраженного импульса, если импульс не устанавливается в течение короткого времени по сравнению с измеряемой линией.

Шум

Случайный шум создает проблемы при измерениях небольших изменений импеданса. В измерениях с помощью современных рефлектометров используются методы многократной выборки и усреднения сигнала, чтобы уменьшить влияние случайных шумов. Однако усреднение снижает скорость обработки TDR-системы.

Точность соединения

Элементы межсоединений и интерфейсы между датчиком и тестируемым устройством также генерируют отражения и могут создавать индуктивные отражения. Во избежание таких проблем рекомендуется использовать короткие наконечники пробника и заземляющие провода.

Потери в кабеле

Из-за длинных тестовых кабелей импеданс тестируемого устройства превышает свое фактическое значение. Кроме того, время нарастания и время установки зондирующего импульса ухудшаются, когда импульс достигает конца кабеля. Потери в кабеле влияют на точность

рефлектометрического измерения, поскольку эффективная амплитуда шага отличается от ожидаемой. Этой точностью амплитуды можно пренебречь, если импеданс тестируемого устройства близок к 50 Ом, но при большем или меньшем импедансе точность амплитуды становится более значимой.

TDR-тест для измерения импеданса

Рефлектометр подает сигнал на проводник тестируемой печатной платы для измерения отражений, которые возникают, когда сигнал проходит через среду передачи. Если импеданс проводника однородный, отражения не наблюдаются, а зондирующий импульс поглощается на дальнем конце линии передачи оконечной нагрузкой.

И наоборот, если импеданс претерпевает разрывы, некоторые сигналы отражаются обратно к источнику (в данном случае к рефлектометру). Прибор сравнивает эти отражения с теми, что генерируются стандартным импедансом. Так определяется импеданс разрыва в сигнальном тракте. Расстояние до отражающей неоднородности можно рассчитать по времени, необходимому импульсу для возврата.

Как измеряется импеданс?

Для определения того, как изменяется импеданс, используются два параллельных проводника. Любое соединение, тип кабеля/трассы, обрыв кабеля/трассы или неисправность изменят значение импеданса. Каждый тип изменения по-своему влияет на отображение на приборе. Положительное значение отражения соответствует более высокому импедансу, отражение меньшей величины указывает на меньший импеданс (рис. 4).

Измерения импеданса имеют ограничения — например, минимальное время нарастания. Суммарное время нарастания состоит из времени нарастания возбуждающего импульса и времени нарастания на осциллографе, который мониторит отражения. Следует учитывать, что характеристический импеданс не меняется с изменением частоты, а является неотъемлемым свойством проводящей дорожки.

Импульсная и шаговая технологии

Импульсная технология

Импульсная технология в рефлектометрии — давно зарекомендовавший себя подход, когда источник передает один импульс, а затем отключается. Далее срабатывает приемник, отмечая отражения сигнала. Промежуток времени между выключением передатчика и включением приемника создает так называемую мертвую зону.

Более длинный импульс увеличивает дальность измерения, но расширяет мертвую зону за счет роста времени активации приемника. Если оператор подает более короткий импульс, мертвую зону можно уменьшить, но это огра-

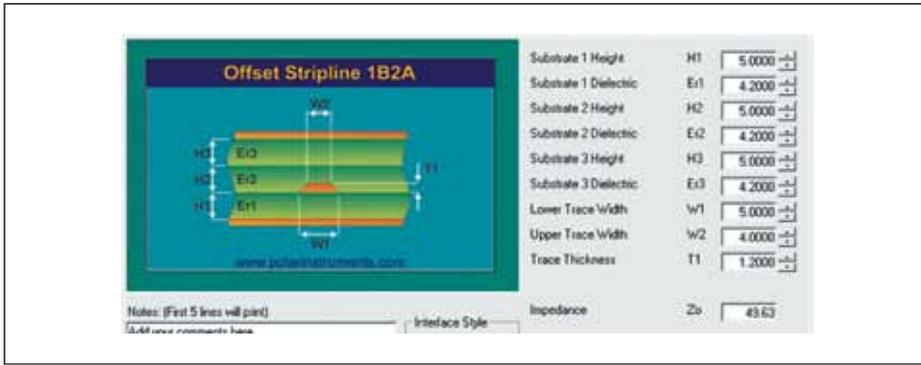


Рис. 5. Параметры 50-Ом несимметричной полосковой линии со смещением

Frequency Hz	Dielectric Constant E	Loss Tangent Tanδ
1.00E+00	4.2000	0.0250
1.00E+01	4.1000	0.0250
1.00E+02	4.0000	0.0250
1.00E+03	4.0700	0.0250
1.00E+04	4.0000	0.0245
1.00E+07	3.9000	0.0247

Рис. 6. Таблица частотно-зависимых параметров

ничивает диапазон измерения. Еще одна особенность, связанная с импульсной технологией, — малая энергия сигнала, которая ухудшает отношение сигнал/шум и дает неполную картину при тестировании кабеля.

Шаговая технология

Шаговая технология, которая, в частности, используется в рефлектометре VIAVI DSP TDR для тестирования коаксиальных кабелей, позволяет передатчику непрерывно отправлять сигналы, а приемнику в это время прослушивать отраженные сигналы. Эта технология исключает проблему «мертвой зоны» как таковой, избавляя оператора от трудоемкой работы по настройке ширины импульса и обеспечивая быстрое получение полноценной оценки всего кабеля.

Ступенчатый сигнал с более высокой энергией увеличивает отношение сигнал/шум. Ступенчатая технология с функцией цифрового усреднения также позволяет эффектив-

но уменьшать помехи, приводящие к ухудшению принимаемого сигнала.

Временная или частотная область?

TDR — это рефлектометр, использующий метод наблюдения за формой отраженного сигнала. Он не работает в частотной области. Высокочастотные гармоники, присутствующие в импульсе, в основном проявляются в скорости нарастания (или спада) фронта. Однако импеданс измеряется на плоской вершине импульса, а не на фронте. В случае импульса с быстрым нарастанием преобразование Фурье показывает гармоники с более высокой частотой, чем импульс с медленным временем нарастания. Хотя при тестировании во временной области все гармоники импульса отражаются вместе, а отражение представляет собой совокупность всех его частот.

Для теста необходимо использовать, например, векторный анализатор цепей, который использует синусоидальный сигнал

в заданном диапазоне и выполняет проверку на определенных частотах. Обычно так делается для определения потери сигнала на этих частотах. Производители печатных плат, как правило, не применяют анализаторы цепей из-за следующих недостатков:

- сложность в использовании;
- необходимость ручного вмешательства;
- длительный промежуток времени между измерениями и результатом (от нескольких секунд до минут).

Проверку с помощью TDR-прибора может проводить и неквалифицированный оператор, а измерения и вычисления выполняются за доли секунды. Этот прибор дает воспроизводимые результаты вне зависимости от пользователя, а параметры тестирования легко программируются и не требуют вмешательства специалиста. Теоретически импеданс линии быстро падает до стабильного уровня, как показано на рис. 5. Диэлектрическая проницаемость ϵ_r может уменьшаться с частотой, как можно видеть в таблице частотно-зависимых параметров (рис. 6).

С увеличением частоты ϵ_r немного уменьшается, как видно из рис. 6, но поскольку величина Z_0 обратно пропорциональна $\sqrt{\epsilon_r}$, это оказывает минимальное влияние на импеданс. На рисунке приведены типичные показатели проводящей дорожки печатной платы: $\sqrt{4,2} = 2,0494$, $\sqrt{3,98} = 1,995$, а значит, изменение составляет всего 2,7%.

Импеданс проводящей дорожки выглядит следующим образом (обратите внимание на дополнительные 1,5 Ом и тот факт, что его характеристика почти пологая выше 800 кГц) (рис. 7).

Падение импеданса связано с распределением тока в поперечном сечении проводящей дорожки, а именно с тем, что ток не распределяется равномерно по четырем поверхностям, а больше тяготеет к той стороне дорожки, которая обращена к опорным плоскостям. Приближение к опорной плоскости снижает индуктивность контура и увеличивает кажущуюся емкость, что приводит к уменьшению импеданса. Дополнительные 1,5 Ом обусловлены проводимостью меди (или удельным

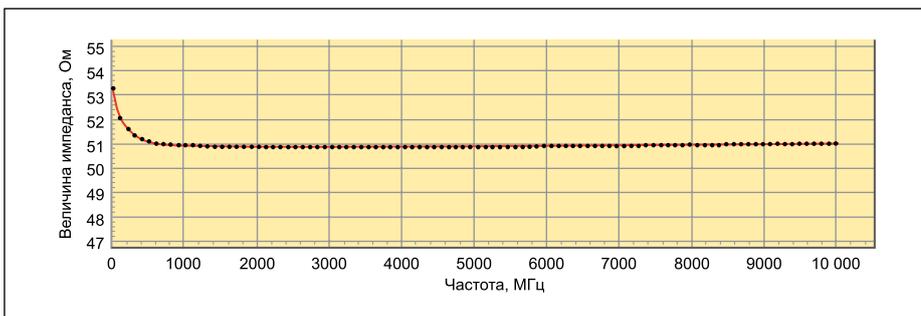


Рис. 7. Расчет импеданса

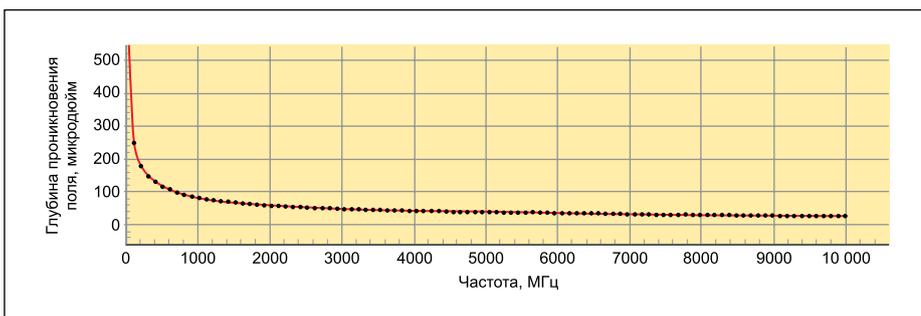


Рис. 8. С ростом частоты рефлектограмма становится пологой

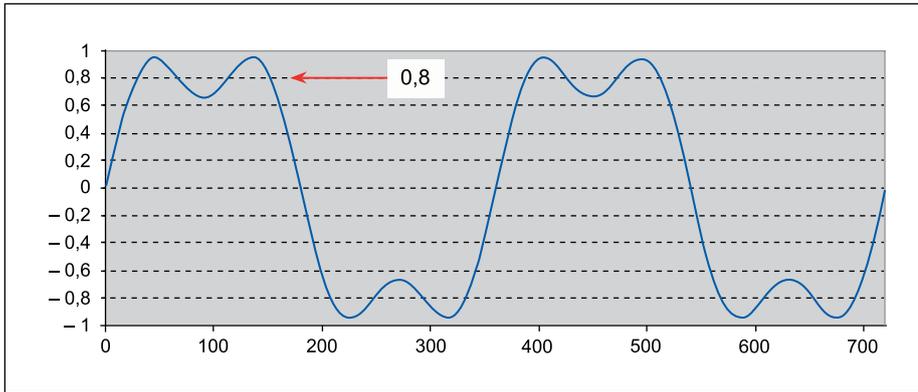


Рис. 9. Средняя высота импульса изменяется при добавлении более высокочастотных гармоник

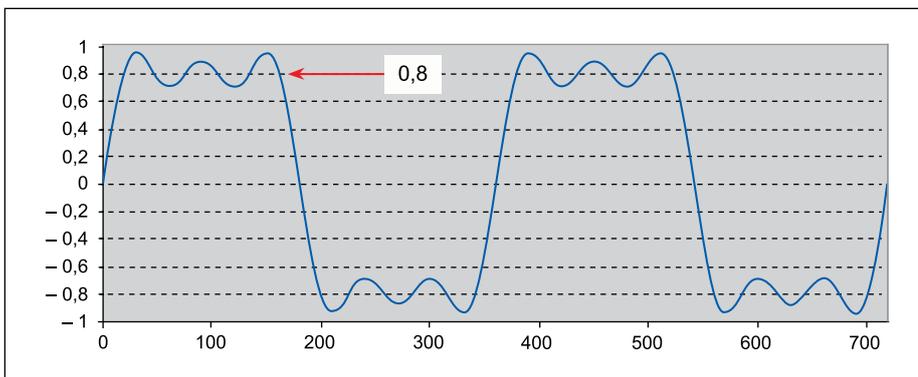


Рис. 10. Средняя высота импульса изменяется при добавлении 5-й гармоники

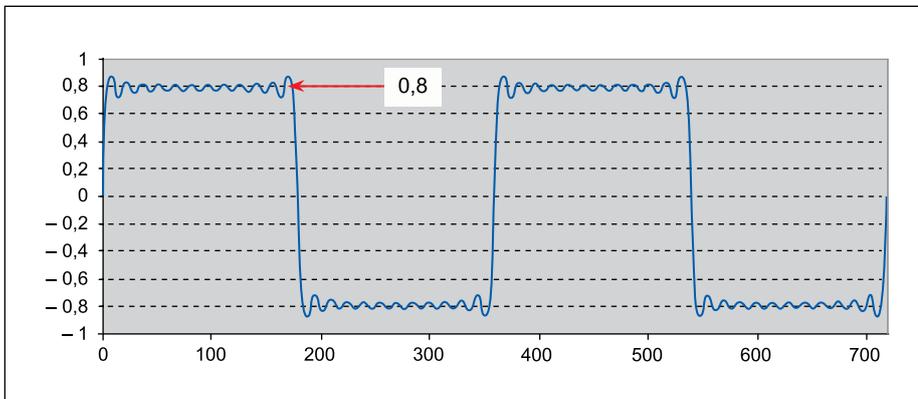


Рис. 11. Средняя высота импульса изменяется до 23-й гармоники

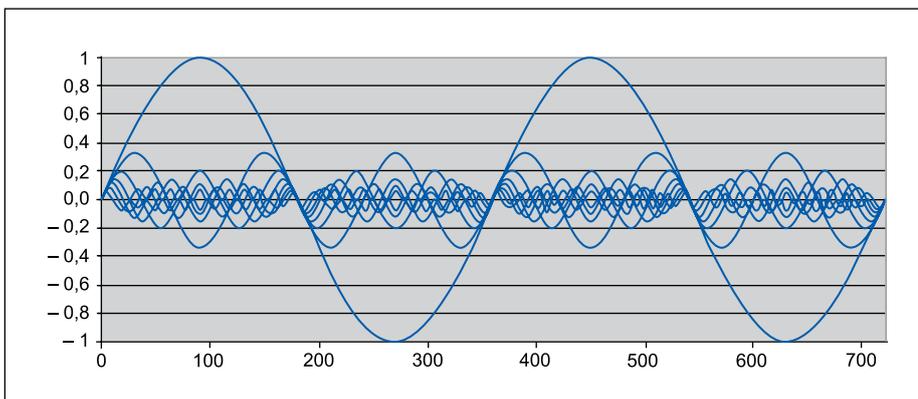


Рис. 12. Составляющая синусоида до 23-й гармоники

сопротивлением) и глубиной проникновения поля на частотах выше нескольких кГц. Чем длиннее кривая на рефлектограмме, тем больше сопротивление (рис. 8).

Для измерения импеданса на плате некоторые OEM-производители включают специальные тестовые фиктивные проводящие дорожки в готовые печатные платы. Обычно для оценки качества изготовления платы используются тест-купоны на ее краях, однако зачастую они недостаточно точно отражают условия трассировки. Фиктивные дорожки, расположенные на плате вместе с фактически проводящими дорожками, позволяют лучше учитывать размеры платы, материал заготовки и т.д. Однако следует принимать во внимание, что фиктивные дорожки могут также создать ряд проблем. Перечислим некоторые из них.

- Как связать опорные плоскости, не затронув остальную часть платы? На практике платы содержат разделительные конденсаторы и подключаются к источникам питания с очень низким импедансом.
- Использование фиктивных дорожек увеличивает размеры платы: они занимают ее ценную площадь, что повышает стоимость изготовления.
- Дилемма: тестирование трассировки дорожек на каждой плате приведет к увеличению производственных затрат, а выполнение процедуры лишь выборочно делает бессмысленным наличие фиктивных дорожек на всех платах в партии.
- Ошибки трассировки, например нежелательные ответвления, могут повлиять на сигнал и создать помехи.
- Доступ зонда к проводящей дорожке и опорному слою практически невозможен.

Полосковые дорожки на плате предназначены для обеспечения заданного импеданса при соответствующих нагрузке и питании. Производители плат имеют больше возможностей для тестирования полосковых линий во время сборки, потому что на определенной стадии технологического процесса каждая полосковая линия представляет собой микрополосу (до ламинирования). На этом этапе дорожки и единая опорная плоскость становятся более доступными для тестирования, а анализатор цепей может предсказать величину импеданса дорожки. Если последующие ламинирования выполнены в точности с проектом, обеспечивается требуемый импеданс. При этом измерение с помощью рефлектометра дает среднюю высоту отраженного сигнала.

Далее посмотрим, как изменится средняя высота импульса при добавлении высокочастотных гармоник: на рис. 9 показано сложение основной гармоники и ее 3-й гармоники. Из рис. 10–11 видно, как изменяется средняя высота импульса при добавлении 5-й гармоники, а также при добавлении всех гармоник вплоть до 23-й.

Можно сделать вывод, что добавление высших гармоник делает отражение более пологим, не меняя его амплитуды (рис. 12).

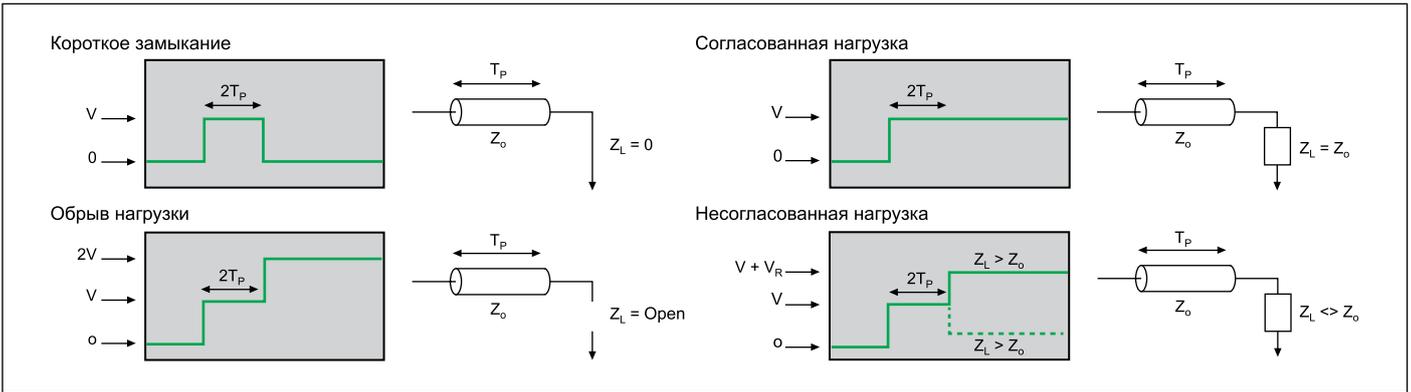


Рис. 13. Открытые, короткие, совпадающие и несоответствующие нагрузки

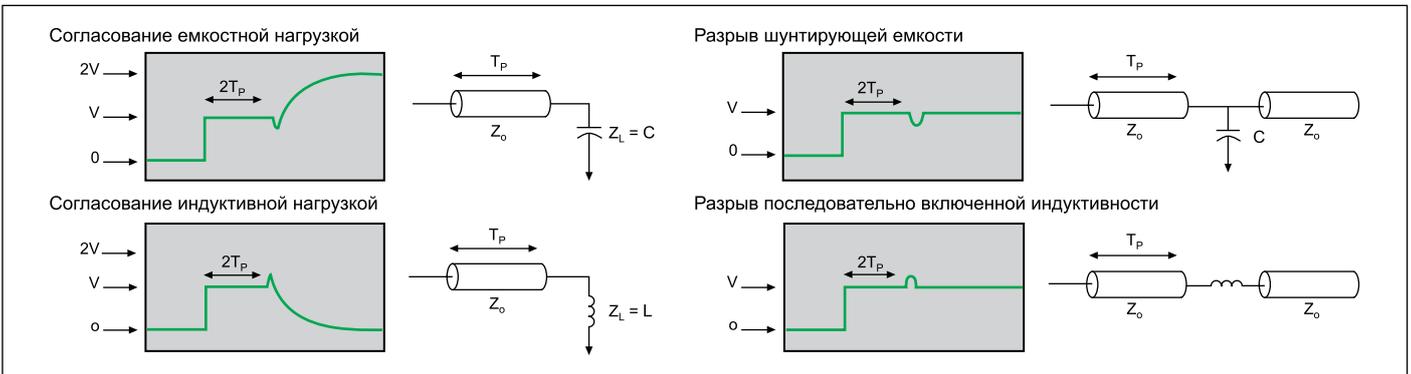


Рис. 14. Оконечные и разрывные нагрузки емкостной и индуктивной нагрузки

Коэффициент отражения при измерении импеданса рефлектометром

Измерения импеданса с помощью рефлектометра определяются с точки зрения коэффициента отражения. Параметр ρ представляет собой отношение амплитуды отраженного импульса $V_{\text{Reflected}}$ к амплитуде зондирующего импульса V_{Incident} .

$$\rho = V_{\text{Reflected}}/V_{\text{Incident}}$$

Для фиксированной оконечной нагрузки Z_L значение ρ может указываться с помощью полного сопротивления линии Z_0 и импеданса нагрузки Z_L :

$$V_{\text{Reflected}}/V_{\text{Incident}} = (Z_L - Z_0)/(Z_L + Z_0).$$

Теперь можно добавить значения для проверки состояния согласованной нагрузки, короткого замыкания и обрыва нагрузки. В данном случае ρ изменяется в диапазоне $1 \dots -1$, где 0 означает согласованную нагрузку.

1. Если $Z_L = Z_0$, то нагрузка согласована. $V_{\text{Reflected}} = 0$, и $\rho = 0$. В таком случае:

$$\rho = V_{\text{Reflected}}/V_{\text{Incident}} = 0/V = 0.$$

2. $Z_L = 0$ означает короткое замыкание, то есть $V_{\text{Reflected}} = -V_{\text{Incident}}$. Тогда:

$$\rho = V_{\text{Reflected}}/V_{\text{Incident}} = -V/V = -1.$$

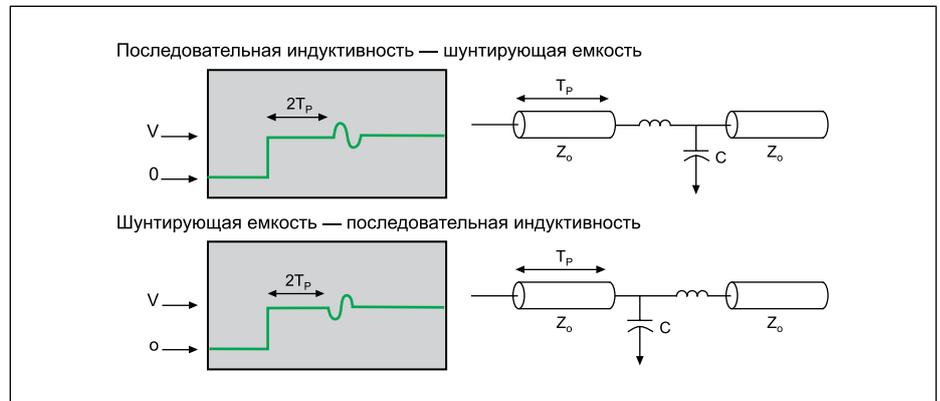


Рис. 15. Последовательно-шунтирующая и последовательно-шунтирующая емкостная/индуктивная нагрузка

3. $Z_L = \infty$ отражает обрыв нагрузки. Это значит, что $V_{\text{Reflected}} = V_{\text{Incident}}$. Тогда:

$$\rho = V_{\text{Reflected}}/V_{\text{Incident}} = V/V = 1.$$

Расчет импеданса линии передачи и нагрузки

$$Z_L = Z_0(1 + \rho)/(1 - \rho).$$

Измерения импеданса с помощью рефлектометра отображаются в единицах В, Ом или ρ (по вертикальной шкале величин) и по времени (по горизонтальной оси). На рис. 13–15 приведены результаты, полученные с помощью рефлектометра с разными импедансами и нагрузками.

Проверка разрывов трассировки платы с помощью рефлектометра

Сигнал, представленный на рис. 1, является результатом прохождения идеального импульса через проводник. Рефлектометр генерирует точно контролируемый импульс с малым временем нарастания. Если же отправить импульс данных по тому же тракту, искаженный импульс данных будет испытывать влияние многих неоднородностей на этом пути, что приведет к появлению проблем. По этой причине измерения импеданса с помощью рефлектометра выполняются повторно для оценки целостности сигнала после устранения обрывов.

Измерение импеданса дифференциальных линий передачи

В большинстве высокоскоростных конструкций используются дифференциальные линии передачи, в отношении которых также могут применяться несимметричные методы измерения импеданса с помощью рефлектометра. Для этого используются два режима, связанные с характеристическим импедансом и скоростью распространения линии передачи, — импеданс нечетной и четной моды. Мы дадим несколько подсказок, относящихся к измерению дифференциального импеданса:

- импеданс нечетной моды измеряется путем расчета импеданса по одной линии, тогда как дополнительный сигнал управляет другой линией;
- дифференциальный импеданс измеряется между двумя линиями, когда пара управляется дифференциально;
- дифференциальный импеданс равен удвоенному импедансу нечетной моды;



Сергей Шихов,
директор по управлению проектами «А-КОНТРАКТ»

В современной цифровой технике широко распространены печатные платы, на которых применяются линии передачи с заданным значением волнового сопротивления. Однако способ измерения импеданса зачастую бывает непонятен разработчикам печатных плат. В статье даны объяснения базовых принципов рефлектометрического метода, что может быть интересно инженерам, использующим подобные линии передачи.

На наш взгляд, эта статья актуальна и имеет большую практическую значимость. Мы внимательно ознакомились с материалом, и у нас возникло несколько вопросов. На них нам любезно ответил переводчик статьи Сергей ШИХОВ, директор по управлению проектами «А-КОНТРАКТ».

— Как определяется скорость распространения импульса сигнала V_f и как от погрешности V_f зависит погрешность определения импеданса?

У нас больше распространено понятие «коэффициент укорочения» — безразмерная величина, характеристика линий передачи (электрических, оптоволоконных, волноводных), показывающая, во сколько раз фазовая или групповая скорость волны в линии передачи меньше скорости света в вакууме.

Так, если при измерении длины кабеля TDR-методом установить в приборе неточное значение коэффициента укорочения, например, отличающееся от действительного значения на 2%, то и погрешность измерения длины кабеля также будет не больше 2%.

В иностранной литературе вместо коэффициента укорочения часто применяют обратную ему величину, называемую коэффициентом скорости, или коэффициентом замедления (Velocity of Propagation, Velocity Factor):

$$v_p = 1/k_p = c/v,$$

где c — скорость распространения электромагнитной волны в вакууме (скорость света); v — скорость распространения электромагнитной волны в среде.

Приведу пример. У коаксиальных кабелей V_f обычно составляет 60–90%. Если $V_f = 70\%$, то сигнал проходит со скоростью 0,7 от скорости света, или $2 \cdot 10^8$ м/с.

— Расскажите, пожалуйста, немного подробнее о способе измерения импеданса дифференциальной линии.

— Измерения в дифференциальном режиме линии передачи реализуются на печатной плате при соблюдении технологии производства, заданных материалов, геометрических размеров проводников и других элементов платы. Импеданс линий передачи должен быть согласован для прохождения по ним высокочастотного сигнала. В соответствии с теорией, оптимальная ситуация достигается в случае полного согласования импеданса разных сред передачи сигнала. Всякий раз, когда импеданс меняется, часть сигнала теряется в результате затухания или искажений из-за отраженной помехи.

В настоящее время типична ситуация, когда платы для высокочастотных изделий изготавливаются с соблюдением определенных заданных значений импеданса для конкретных проводников. Измерение импеданса на печатных платах выполняется с помощью рефлектометра. Это особое требование стандартов IPC.

Первое и наиболее простое измерение по методу TDR — это так называемое несимметричное измерение. В данном случае измеряется импеданс одиночного

- импеданс четной моды измеряется на одной линии, в то время как эквивалентный сигнал возбуждает другую линию;
- импеданс синфазного сигнала определяется как импеданс параллельно соединенных линий, который составляет половину импеданса четного режима.

Модуль TDR подает ступенчатый импульс с возможностью выбора полярности для каждого из двух каналов для точного измерения дифференциального импеданса. При таком подходе система может фактически управляться дифференциально. Реакция каждой стороны дифференциальной линии регистрируется отдельно и оценивается как дифференциальная величина. В рефлектометрической системе с зондирующим пошаговым импульсом добавление двух каналов дает дифференциальный импеданс.

Тестирование с помощью рефлектометра представляет собой удобный и надежный метод определения импеданса несимметричных и дифференциальных линий, а также сетей передачи. TDR-метод основан на том, что любое изменение импеданса в линии или сети передачи вызывает отражения, зависящие от величины разрыва. Современные приборы с TDR-поддержкой автоматически сравнивают амплитуды падающего и отраженного сигналов, чтобы обеспечить прямое считывание импеданса, коэффициента отражения и времени не только для синфазного, но и дифференциального импеданса.

Кроме того, математические функции могут автоматически отображать результаты рефлектометрии для выбранного пользователем времени нарастания. Это позволяет увидеть реакцию тестируемого устройства на сигналы, с которыми оно будет работать при эксплуатации.

Используя последовательные процедуры, защиту от статического электричества и передовые методы измерения, можно получить стабильные и точные рефлектометрические результаты.

проводника (микрополосковой линии). На заготовке обычно размещается особый измерительный проводник, называемый купоном. На одном из концов проводника выполнена пара отверстий. Одно предназначено для сигнала и соединено с проводником, второе — опорное и подсоединено к земле.

Однако теперь используются дифференциальные измерения, когда возникает необходимость в проведении измерений на дифференциальных парах, применяемых для передачи дифференциального сигнала. Дифференциальная пара состоит из двух линий передачи. Каждая из них может представлять собой обычную полосковую или микрополосковую линию передачи. Важным свойством является то, что временная задержка в дифференциальных линиях должна быть согласована так, чтобы фронт и спад сигналов в отдельных линиях были точно и четко определены.

Любое различие во временной задержке между двумя линиями или иное несогласование между ними приведет к тому, что дифференциальный сигнал преобразуется в синфазный сигнал. С помощью специального пробника два импульса одновременно подаются по одному на каждый проводник.

— Поясните фразу: «Импеданс нечетной моды измеряется путем расчета импеданса по одной линии, в то время как дополнительный сигнал управляет другой линией».

— Если рассматривать несимметричную линию передачи, которая является частью дифференциальной пары, то она описывается тремя разными импедансами. Она обладает несимметричным импедансом — мгновенным импедансом, соответствующим ситуации, в которой в другой линии пары присутствует постоянное напряжение; импедансом нечетной моды — мгновенным импедансом линии, соответствующим ситуации, в которой пара возбуждается нечетной модой; и импедансом четной моды — мгновенным импедансом линии, соответствующим ситуации, в которой пара возбуждается четной модой.

— И еще одна фраза не вполне нам ясна: «Дифференциальный импеданс измеряется между двумя линиями, когда пара управляется дифференциально».

— Дифференциальный импеданс пары линий равен удвоенному импедансу нечетной моды.

Если связь между линиями очень мала, несимметричный импеданс одной линии совпадает с импедансом нечетной моды этой линии, а дифференциальный импеданс равен удвоенному значению несимметричного импеданса.

Однако если между линиями имеется связь, то несимметричный импеданс не совпадает с импедансом нечетной моды. Импеданс нечетной моды такой линии снизится из-за связи линий. Мы не можем просто и точно измерить импеданс нечетной моды или дифференциальный импеданс пары линий, если не возбудим пару нечетной модой с помощью дифференциального сигнала.