

## Гальваническая развязка для устранения типичных источников ошибок при дифференциальных измерениях.

Типичная измерительная система содержит осциллограф и пробник, который обеспечивает подключение между испытываемым устройством (иУ) и осциллографом. Выбор пробника, поскольку его характеристики могут быть ограничивающим фактором в измерительной системе, имеет решающее значение. Идеальный пробник будет выдавать от иУ на осциллограф истинный дифференциальный сигнал, не оказывая на него заметного влияния.

Данная статья представлена в виде авторского перевода технического отчёта компании Tektronix [1].

### Введение

Стандартные дифференциальные пробники часто не способны обеспечить требуемое представление фактического сигнала из-за ограниченного значения коэффициента подавления синфазного сигнала (Common Mode Rejection Ratio, далее — CMRR), ухудшения их номинальных характеристик в зависимости от частоты, собственной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и длины кабелей пробника. Эти ограничения в большей степени негативно проявляют себя при тестировании мощных преобразователей с высокой скоростью переключения, причем даже при номинальном синфазном напряжении.

Как же обойти такие ограничения? Для этого необходимо сначала оценить возникающие при измерениях погрешности и найти решение для их нивелирования.

Исходя из сказанного, рассмотрим возможные источники погрешностей измерения и покажем, как их можно преодолеть с помощью предлагаемой компанией Tektronix изолированной измерительной системы под названием IsoVu. Подробная информация о данной системе представлена в техническом документе компании Tektronix, доступном по ссылке [2].



### Источники погрешности измерения

#### *Дифференциальные пробники подключены к общему проводу.*

Бытует ошибочное мнение, что потенциал дифференциального пробника является плавающим, но на самом деле традиционные дифференциальные пробники работают на основе дифференциальных усилителей, которые подключены к общему проводу или заземлению. Такое подключение ограничивает диапазон синфазного напряжения, вызывает снижение его допустимой частоты, создает паразитные контуры заземления и в итоге ограничивает подавление синфазного сигнала. Для устранения столь нежелательных эффектов идеальный дифференциальный пробник должен быть гальванически изолирован от общего провода или «земли». Усовершенствованная архитектура измерительной системы Tektronix IsoVu как раз и обеспечивает полную гальваническую развязку, которая достигается за счет оптоволоконного подключения.

#### *Недостаточно высокий коэффициент подавления синфазного сигнала*

Коэффициент подавления синфазного сигнала или, как его обозначают в технической литературе и спецификациях, — CMRR, определяет способность дифференциального пробника подавлять при дифференциальном измерении сигнал, который является синфазным по отношению

к обеим точкам подключения. В идеальном случае значение CMRR для пробника должно быть бесконечно большой величиной, но у традиционных дифференциальных пробников, поскольку невозможно полностью согласовать два входных сигнала между собой, этот коэффициент ограничен.

На практике пригодными для измерения можно считать те пробники, у которых величина CMRR превышает 80 дБ (10 000:1). В тех случаях, когда обеспечена точная настройка характеристик компонентов, CMRR большинства дифференциальных пробников для измерения напряжения постоянного тока и для переменного на низких частотах, как правило, превышает 80 дБ и не вызывает проблем, связанных с CMRR. Но по мере увеличения частоты измеряемых сигналов (в том числе и при измерении сигналов с крутыми фронтами, что требует соответствующей им полосы пропускания) коэффициент CMRR дифференциального пробника ухудшается. Это связано с тем, что с ростом частоты возникающее при этом рассогласование сложно компенсировать, вот почему на частотах от 100 МГц CMRR большинства измерительных систем не превышает 20 дБ.

Рассмотрим измерения на примере полумоста, часто используемого в преобразователях. Его упрощенное представление приведено на рис. 1. Выполнение точных измерений на транзисторе верхнего плеча может оказаться проблематичным из-за комбинации скорости включения/выключения ключа и наличия синфазного напряжения.

Как видно на рис. 1, синфазное напряжение затвор-исток VCM относительно общего провода составляет 40 В, а требуемое нам дифференциальное напряжение затвор-исток VDM равно всего 5 В. При проведении этого измерения следует понимать, что в спецификации на преобразователь, как правило, будет указана рабочая частота преобразования. Но мы будем иметь дело не только с ней и, соответственно, не с периодом переключения компонента, для нас и пробника критическим здесь будет длительность фронтов рабочих импульсов, которая обычно намного меньше длительности рабочих импульсов. При этом их частота и длительность может быть переменной, например, при частотном регулировании и использования широтно-импульсной модуляции.

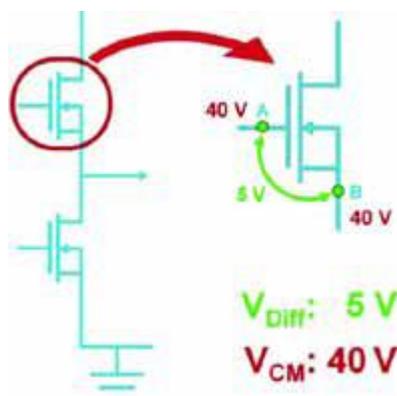


Рис. 1. Пример типового измерения дифференциального сигнала в полумостовой схеме

Так, при переключении преобразователя с рабочей частотой 100 кГц длительность фронтов импульсов может не превышать 5 нс. При такой крутизне фронтов спектр сигнала простирается до сотен мегагерц и при отсутствии должного согласования в линиях подключения средств измерения проявляются переходные процессы с выбросами и паразитными резонансами. У большинства измерительных систем, отвечающих требованиям для схемы на рис. 1 к полосе пропускания и синфазному напряжению, при длительности фронтов импульсов 5 нс величина CMRR составляет около 20 дБ, или 10:1. Поскольку при CMRR, равном 10:1, синфазная погрешность может составлять 4 В, ясно, что такая измерительная система не в состоянии точно передать и измерить дифференциальный сигнал с амплитудой 5 В.

Учитывая, что синфазное напряжение в схемах силовых преобразователей может превышать сотни или даже тысячи вольт, а при этом требуется обеспечить возможность измерения небольших по амплитуде дифференциальных сигналов, влияние синфазной погрешности может

сказаться в еще большей мере. При синфазном напряжении 1000 В погрешность при CMRR в 20 дБ составляет уже 100 В.

Характеристика CMRR пробника обычно указана в техническом описании. Как правило, величина этого параметра значительно превышает допустимое значение 80 дБ (10 000:1). При дальнейшем ознакомлении с техническим описанием выясняется, что указанные значения параметров не столь впечатляющие. Например, у дифференциального усилителя DA1855A от компании Teledyne LeCroy, Inc., который долгое время считался лучшим в своем классе для измерения сигналов в силовых цепях, значение CMRR составляет 100000:1, что верно для постоянного тока, но уже на частоте 70 Гц оно падает вдвое, до 50000:1. Во всей полосе пропускания усилителя, а это заявлено как не менее 100 МГц, величина CMRR составляет всего 20 дБ, или 10:1.

Из вышесказанного следует, что, сравнивая требования к результатам измерения конкретного схемотехнического решения того или иного изделия, необходимо привести в соответствие CMRR измерительной системы с длительность фронтов импульсов в критически важных измерениях. Проще всего выбор сделать по графику зависимости значения CMRR от частоты, который обычно приводится в руководстве пользователя. Пример такого графика, демонстрирующего зависимость параметров измерительного пробника от частоты, представлен на рис. 2, где сравниваются значения CMRR усилителя DA1855A компании Teledyne LeCroy с характеристикой измерительной системы IsoVu от компании Tektronix.

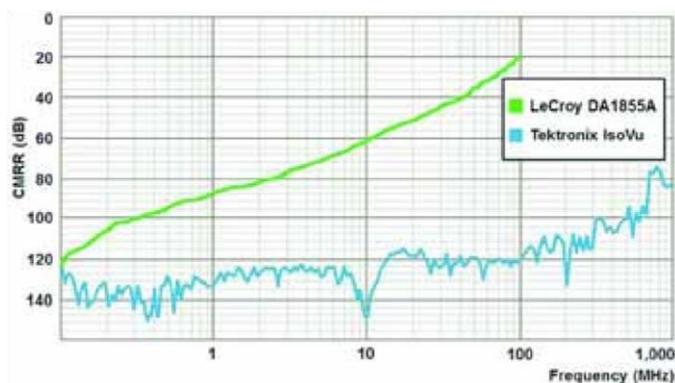


Рис. 2. Ухудшение показателя CMRR пробника с ростом частоты

Измерительная система IsoVu поддерживает высокий показатель CMRR во всем рабочем диапазоне благодаря полной гальванической развязке. На 100 МГц значение CMRR системы IsoVu составляет 1000000:1 (120 дБ). Напомним, у схемы, приведенной на рис. 1, длительность фронта импульса составляет 5 нс, а синфазная погрешность при использовании системы измерения с CMRR 10:1 равна 4 В. Для сравнения: синфазная погрешность IsoVu с CMRR, равным 1000000:1, составляет 40 мкВ. Высокий CMRR системы IsoVu от компании Tektronix во всей полосе пропускания позволяет измерять малые дифференциальные напряжения при наличии синфазных помех высокого уровня.

### **Ухудшение номинальных рабочих характеристик с ростом частоты**

В техническом описании дифференциального пробника указаны номинальные входные напряжения, при этом в некоторых случаях диапазон синфазного напряжения может достигать тысяч вольт. Однако следует понимать, что приведенная спецификация обычно верна только для напряжения постоянного тока и области низких частот. Как и в случае с CMRR, номинальные напряжения также уменьшаются с ростом частоты, что серьезно ограничивает величину максимально допустимого синфазного напряжения на более высоких частотах.

Примером такого уменьшения допустимого напряжения служит характеристика высоковольтного дифференциального пробника N2790A от компании Keysight Technology с рабочей полосой частот 100 МГц, показанная на рис. 3. Номинальное напряжение  $V_{rms}$  пробника N2790A при постоянном токе составляет 1 кВ и уже как среднеквадратичное на низких частотах, но на частоте 2 МГц характеристики пробника начинают ухудшаться, и если говорить о всей

заявленной полосе пропускания, то в ней такой пробник способен нормально функционировать только при напряжении в несколько вольт.

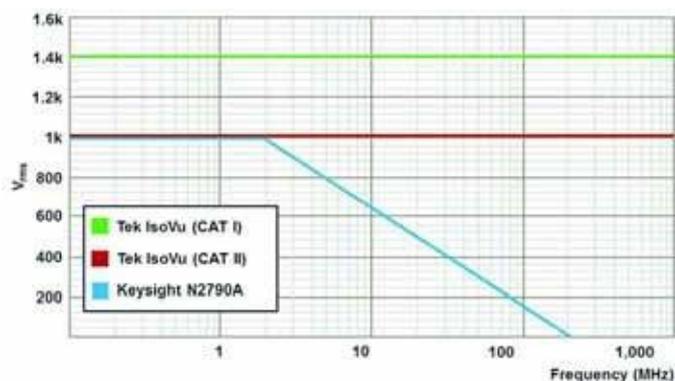


Рис. 3. Уменьшение номинального напряжения с ростом частоты дифференциального пробника N2790A от компании Keysight Technology

При работе со стандартными дифференциальными пробниками приходится выбирать между широкой полосой пропускания и высоким уровнем напряжения. Пробники IsoVu со встроенной схемой развязки и экранированным коаксиальным кабелем обеспечивают измерения дифференциального напряжения  $\pm 2500$  В в широкой полосе пропускания. Заметим, что при полной гальванической развязке с помощью оптоволоконного соединения единственное ограничение на номинальное синфазное напряжение оптического пробника диктуется сертификатом на соответствие требованиям к безопасности. Как видно на рис. 3, кривая ухудшения номинальных характеристик системы IsoVu представляет собой горизонтальную линию. Это значит, что допустимое для изделия напряжение с увеличением частоты не уменьшается.

#### *Длинные подводящие провода*

Как показано на рис. 4, у традиционных высоковольтных дифференциальных пробников имеются длинные подводящие провода. С одной стороны, провода такой длины обеспечивают удобный доступ к контрольным точкам, а с другой — они чувствительны к электромагнитным помехам (ЭМП), излучаемым рядом расположенным оборудованием, в том числе и каскадами контролируемых устройств. Кроме того, любое рассогласование наводки на кабель синфазных ЭМП, за счет их преобразования в дифференциальную помеху, приводит к погрешности измерения. Даже при идеально согласованном дифференциальном усилителе подключение чего-либо к его входам в неконтролируемой среде ухудшает характеристики измерительной установки.



Рис. 4. Традиционный дифференциальный пробник с аксессуарами от компании Tektronix

В типовом приложении пара пробников подключается к входу дифференциального усилителя. Эти пробники различаются по длине проводов, ориентации, восприимчивости и

нагрузке, что делает такие измерения невозпроизводимыми. Как правило, чтобы решить проблему с длинными проводами, их скручивают (свивают с определенным шагом) или укорачивают. Однако такие ухищрения не всегда помогают решить исходную задачу — повысить точность измерений.

Идеальный дифференциальный пробник должен быть невосприимчивым к вариациям длины кабеля подключения, различиям по ориентации и восприимчивости по нагрузке. Уникальная архитектура пробника IsoVu от компании Tektronix исключает необходимость использования согласованных подводящих проводов, обеспечивая истинно дифференциальный вход с экранированной структурой.

## Заключение

Точные дифференциальные измерения зависят от совокупности характеристик измерительной системы, синфазного напряжения и возможности подавления синфазного сигнала. Однако контрольно-измерительные приборы, предназначенные для испытания мощных полупроводниковых преобразователей энергии, испытания их на уровень электромагнитных помех и устойчивость к электростатическим разрядам в ходе проверки выполнения требований по электромагнитной совместимости, а также для дистанционного измерения, в целом не соответствуют современным требованиям. Появление на рынке пробника IsoVu от компании Tektronix решило эту задачу.

Благодаря схеме гальванической развязки и устойчивой работе пробников IsoVu при высоких частотах, разработчики систем питания могут выполнять более точные измерения, чем стандартными дифференциальными пробниками, при решении задач, требующих измерения высоковольтных сигналов в широкой полосе пропускания.

Пробники IsoVu применяются в следующих областях:

- Разработка импульсных источников питания.
- Разработка/анализ мощных полевых транзисторов для устройств на основе широкозонных полупроводников (GaN и SiC).
- Разработка инверторов.
- Разработка приводов электродвигателей.
- Измерения инъекции объемного тока (BCI) и электростатических разрядов (ESD).
- Измерения токов при помощи шунтов.
- Дифференциальное напряжение:  $\pm 2500$  В.
- Синфазное напряжение:  $\pm 60$  кВ.
- Полосы пропускания: 200 и 500 МГц, 1 ГГц.
- Коэффициент ослабления синфазного сигнала в полосе частот:
  - 0 Гц — 160 дБ;
  - 100 МГц — 100 дБ;
  - 200 МГц — 100 дБ.
- Длина оптоволоконного кабеля: 2 м (для пробников с индексом L: 10 м).

Появление пробника с гальванической развязкой, такого как IsoVu от компании Tektronix, свидетельствует о том, что первый шаг в преодолении целого ряда ограничений в части дифференциальных измерений в условиях сильных синфазных напряжений и помех уже сделан. Новая технология компании Tektronix позволяет работать в широкой полосе пропускания с высоким

синфазным напряжением и высоким коэффициентом подавления синфазного сигнала, обеспечивая высокую достоверность для сложных дифференциальных измерений.

## Пробники IsoVu с гальванической развязкой

Как измерить быстрые сигналы с плавающим уровнем, которые неразличимы при использовании неизолированных пробников? Решение есть: использовать изолированный пробник.

Изолированный пробник включает схему гальванической (оптической) или высокочастотной развязки для изоляции опорного потенциала пробника от опорного потенциала осциллографа (как правило, заземления). Это позволяет разработчикам систем питания точно выделять широкополосные дифференциальные сигналы на фоне высокого синфазного напряжения. Компания Tektronix разработала новую технологию (IsoVu), использующую схему гальванической развязки для наибольшего в данном классе приборов ослабления синфазного сигнала в широкой полосе пропускания.

Пробник IsoVu со схемой оптической развязки практически исключает синфазную составляющую, мешающую рассмотреть требуемый сигнал. Это позволяет выполнять точные дифференциальные измерения при напряжении синфазного сигнала до  $\pm 60$  кВ, которое может меняться со скоростью 100 В/нс и быстрее. Система IsoVu второго поколения обладает всеми характеристиками и преимуществами технологии IsoVu, но занимает в пять раз меньше места.



С выпуском пробников IsoVu Gen 2 (показан на рисунке) с универсальными разъемами MMCX и оптимальным сочетанием полосы пропускания, динамического диапазона и коэффициента ослабления синфазного сигнала, был установлен новый стандарт конструкции изолированных пробников. В сочетании с осциллографами MSO серий 4/5/6, пробники IsoVu обеспечивают эффективный и надежный способ выделения широкополосных дифференциальных сигналов на фоне быстро меняющихся синфазных сигналов, чтобы разработчики могли не тратить драгоценное время на проектирование «вслепую», если им необходимы:

- плавающие измерения в источниках питания;
- измерение тока при помощи шунтирующих резисторов;
- отладка проблем устойчивости к электростатическим разрядам и электромагнитным помехам;
- разрыв связи с контурами заземления.

Ознакомиться с широким выбором пробников и принадлежностей более чем из ста наименований, предлагаемых компанией Tektronix, полностью совместимых с ее несомненно лучшими в отрасли осциллографами, и выбрать нужный пробник под конкретную задачу можно обратившись к авторизованному дилеру компании Tektronix – ООО «Альфа Инструментс» любым удобным способом: воспользоваться формой обратной связи на сайте, по телефону: +7 (383) 203-10-00 или по e-mail: [info@alfa-instr.ru](mailto:info@alfa-instr.ru).

#### **Литература:**

1. Neville T. Isolation Addresses Common Sources of Differential Measurement Error. Technical Brief. Tektronix.
2. Tektronix IsoVu Measurement System. White Paper. Tektronix.