

# Сравнение производительности дифференциальных и несимметричных активных осциллографических пробников. Рекомендации по применению

**Современные изделия силовой электроники имеют тенденцию к уменьшению типоразмеров корпусов элементов, увеличению рабочих частот и требуют более тщательной проработки конструктивов и топологий печатных плат. Это приводит к тому, что внешние измерительные цепи оказывают все большее влияние как на функционирование тестируемых схемных узлов, так и на конечный результат измерений. Данный материал будет полезен производителям, использующим в своей работе прогрессивные схемные решения.**

Перевод и адаптация:  
Андрей Дорохов

adorokhov@aedon.ru

## Введение

Используя широкополосные осциллографы и активные пробники, иногда приходится выбирать между несимметричным и дифференциальным пробником. Обычно несимметричные пробники применяются для измерения несимметричных сигналов (напряжение относительно «земли»), а дифференциальные пробники для измерения дифференциальных сигналов (положительное напряжение относительно отрицательного напряжения). Несмотря на то, что существовала возможность приобретать только дифференциальные пробники для измерения как дифференциальных, так и несимметричных сигналов, большинство специалистов не делали этого по практическим соображениям. Ведь такие пробники дороже и сложнее в эксплуатации и имеют меньшую полосу пропускания, чем несимметричные пробники.

Система InfiniiMax компании Keysight Technologies позволяет использовать как дифференциальный, так и несимметричный режим измерения и в значительной степени ликвидирует недостатки дифференциальных пробников. В новой системе предусмотрены сменные зондовые головки, оптимизированные для ручных измерений, подключения к разъемам или паяным соединениям.

При таком подходе нужно определиться, какой пробник, дифференциальный или несимметричный, предпочтителен для измерения несимметричных сигналов. Для принятия оптимального решения необходимо рассмотреть компромиссы производительности и удобства использования дифференциальных и несимметричных пробников, что и сделано в настоящих рекомендациях.

Прежде всего обратим внимание на следующие аспекты:

- полоса пропускания, точность и удобство использования;
- ослабление синфазного сигнала;
- входное сопротивление;
- повторяемость измерений;
- физический размер.

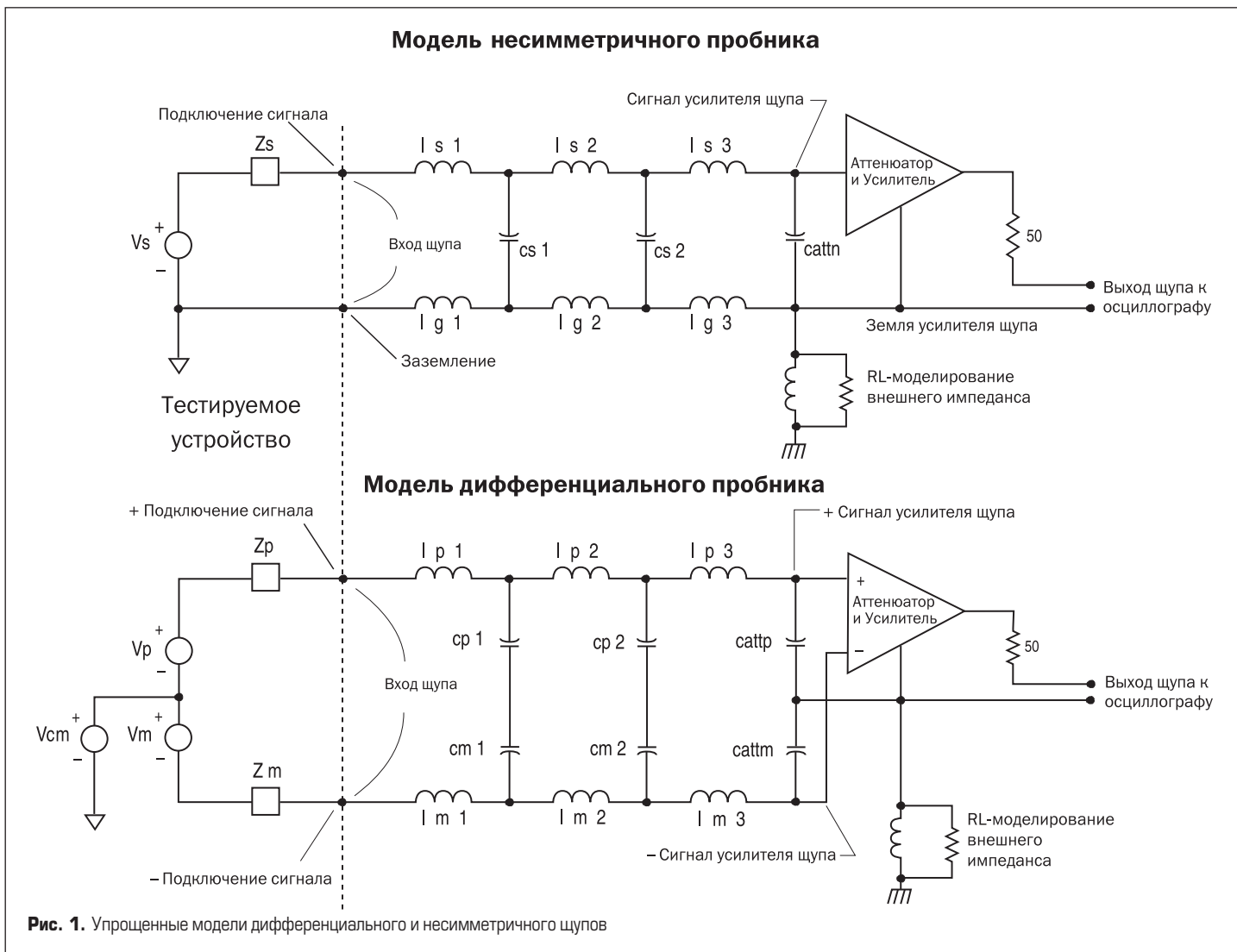
Для того чтобы провести сравнение, применим упрощенные модели (рис. 1) и практические данные, полученные с помощью активного щупа Keysight 1134A 7 ГГц с впаиваемой дифференциальной и впаиваемой несимметричной головками. Обе головки имеют очень похожие размеры, поэтому основное различие в производительности между ними будет связано с различиями в дифференциальной и несимметричной топологиях. Головки пробников показаны на рис. 2 и 3.

Для измерения производительности мы использовали оснастку Keysight E2655A, векторный анализатор цепей Keysight 8720A и стробоскопический осциллограф Keysight Infiniium DCA.

## Сравнение полосы пропускания, точности и удобства использования

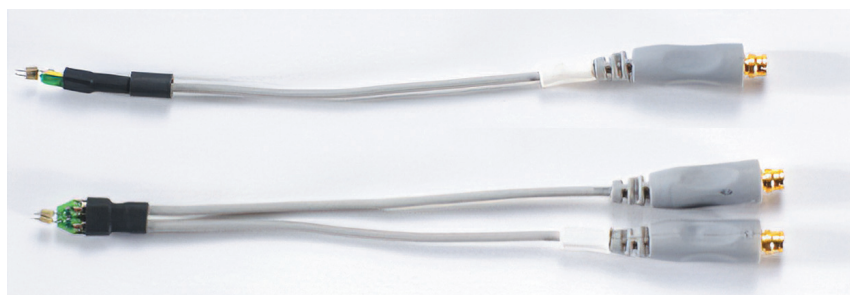
Как было сказано ранее, несимметричные пробники традиционно имеют более высокую полосу пропускания, чем дифференциальные пробники. Но почему это верно? Из-за некоторого фундаментального закона физики или просто из-за реализации дифференциальной архитектуры?

Для изучения этого вопроса рассмотрим упрощенную модель паразитных соединений как для дифференциального, так и для несимметричного пробника (рис. 1). Поскольку физические размеры симметрич-

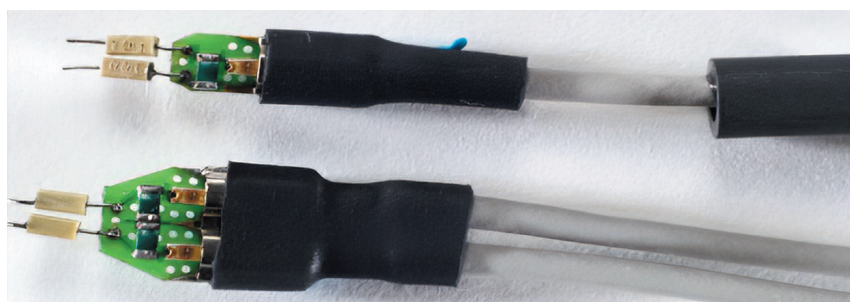


ной и дифференциальной головок аналогичны, значения индуктивностей и емкостей будут одинаковыми. Индуктивность заземления ( $I_g$ ) несимметричного пробника может быть несколько уменьшена, но не координально, если в качестве заземления используется широкий плоский проводник. Отметим, что у дифференциального щупа есть резистор на обоих входах, а у несимметричного имеется резистор на сигнальном входе и отсутствует резистор на «земляном» проводе (0 Ом в реальном щупе). Резисторы необходимы, чтобы должным образом подавить резонанс, вызванный индуктивностями ( $L_s$ ) и емкостями ( $C_s$ ) входного соединения. В рекомендациях по применению Keysight 1404 «Правда о точности широкодиапазонных осциллографических пробников ([www.keysight.com/ru/ru/assets/7018-01107/application-notes/5988-6515.pdf](http://www.keysight.com/ru/ru/assets/7018-01107/application-notes/5988-6515.pdf))» представлена дополнительная информация по этой теме.

Анализ несимметричной модели показывает, что индуктивность заземления существенна, а полоса пропускания определяется значениями индуктивностей и емкостями. Индуктивность заземления позволяет появляться напряжению между заземлением тестируемого устройства и заземлением пробника на высоких частотах, тем самым уменьшая сигнал на входе аттенюатора или усилителя. Если было бы возможно уменьшить индуктивность заземления, это



**Рис. 2.** Keysight 1134A с несимметричной впаиваемой головкой (вверху) и дифференциальной впаиваемой головкой (внизу)



**Рис. 3.** Несимметричная (вверху) и дифференциальная (внизу) впаиваемые головки крупным планом

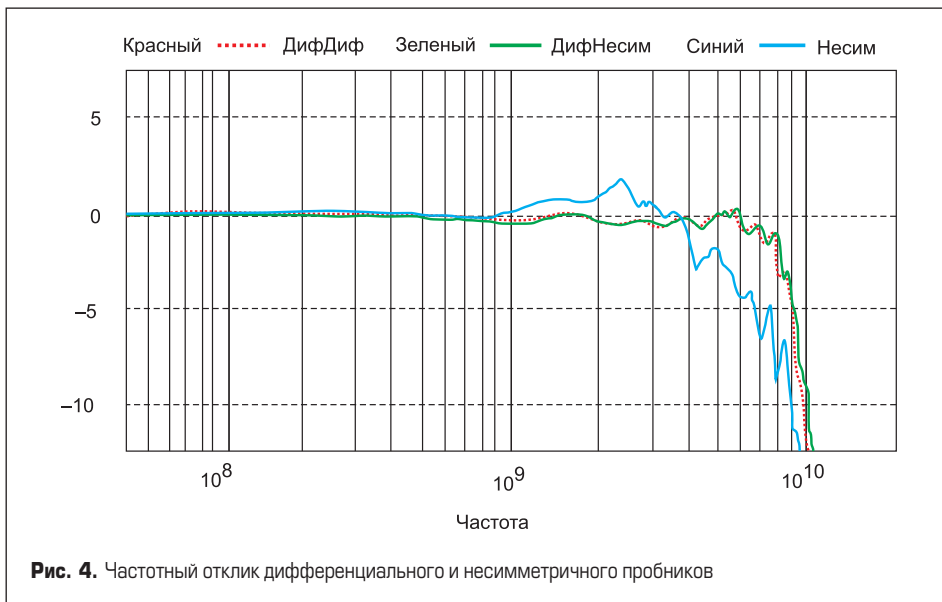


Рис. 4. Частотный отклик дифференциального и несимметричного пробников

бы увеличило полосу пропускания. Для уменьшения индуктивности заземления требуется уменьшить длину заземляющего соединения или сделать соединение массивнее. Идеальным заземлением был бы очень короткий, плоский широкий проводник или цилиндр вокруг сигнального соединения (которое создает коаксиальное соединение пробника). Такие идеальные подключения заземления непрактичны для реальных измерений сигналов и значительно снижают удобство работы с несимметричными пробниками.

Однако это не означает, что несимметричный пробник в коаксиальном исполнении не может быть использован для реальных измерений.

Если анализировать дифференциальную модель, работающую от дифференциального сигнала ( $V_{cm} = 0, V_p = V_m$ ), то видно, что из-за неотъемлемой симметрии плюсовых и минусовых сигнальных соединений существует плоскость между соединениями, в которой нет «суммарного» сигнала. Можно вообразить эту «эф-

фективную» плоскость заземления как прочно связанную с заземлением тестируемого устройства и заземлением пробника. Рассматривая эту эффективную плоскость заземления, можно проанализировать полуконтурную модель, где площадь петли сигнала над плоскостью заземления имеет приблизительно половину площади петли несимметричной модели и, следовательно, значительно меньшую индуктивность. Анализ полуконтурной модели показывает, что ширина полосы пропускания дифференциальной модели намного выше, чем у несимметричной модели. Кроме того, эффективная плоскость заземления является идеальным заземлением, но она вовсе не препятствует удобству использования.

Когда дифференциальный пробник работает от несимметричного источника, то для определения общего отклика можно применить суперпозицию. Несимметричный сигнал приложен к модели, когда  $V_{cm} = V_p = V_m$ . Для первого члена суперпозиции  $V_{cm}$  задается отключенным, для второго члена суперпозиции  $V_p$  и  $V_m$  задаются отключенными. Первый член — это отклик на дифференциальную составляющую несимметричного сигнала и не отличается от рассмотренного ранее. Второй член — отклик на синфазную составляющую несимметричного сигнала, поэтому он определяется ослаблением синфазного сигнала пробником. Если пробник хорошо ослабляет синфазный сигнал, то полный отклик на несимметричный сигнал как раз является откликом на дифференциальную составляющую несимметричного сигнала. Если пробник не имеет хорошего ослабления синфазного сигнала, будет видна разница в откликах при измерении дифференциального и несимметричного сигналов. На рис. 4 показано, что в обоих откликах практически нет различий.

На рис. 4 изображен измеренный частотный отклик дифференциального пробника, измеряющего несимметричный сигнал (зеленый), и несимметричного пробника, измеряющего несимметричный сигнал (синий) с использованием 7-ГГц усилителя пробника. Полоса пропускания пробника определяется как частота, при которой величина выходного сигнала пробника, разделенная на величину входного сигнала пробника, уменьшается на 3 дБ. Видно, что дифференциальная головка зонда имеет значительно большую полосу пропускания, чем несимметричная головка зонда (7,8 против 5,4 ГГц). Оба пробника имеют пологую частотную кривую из-за наличия демпфирующих резисторов, используемых при подключении.

На рис. 5 представлен измеренный временной отклик дифференциального пробника при измерении ступенчатого сигнала с временем нарастания ~100 пс, а на рис. 6 — измеренный временной отклик несимметричного пробника при определении ступенчатого сигнала с временем нарастания ~100 пс. На обоих рисунках красная линия — выход пробника, зеленая линия — вход пробника. Отметим, что это не переходная характеристика пробников, а простое измерение того, насколько хорошо они могут отслеживать 100-пс скачок. Чтобы измерить отклик на ступеньку, вход должен быть идеальным, с очень малым временем нарастания, в этом случае дифференциальный пробник

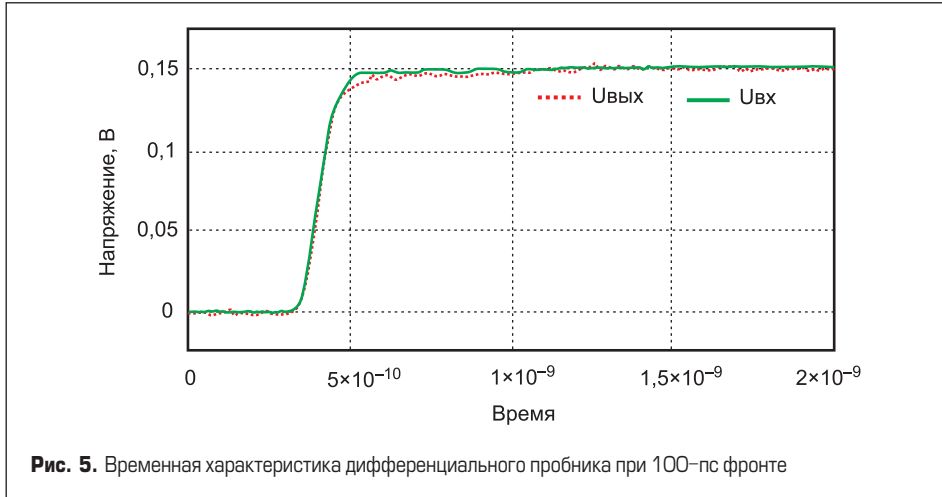


Рис. 5. Временная характеристика дифференциального пробника при 100-пс фронте

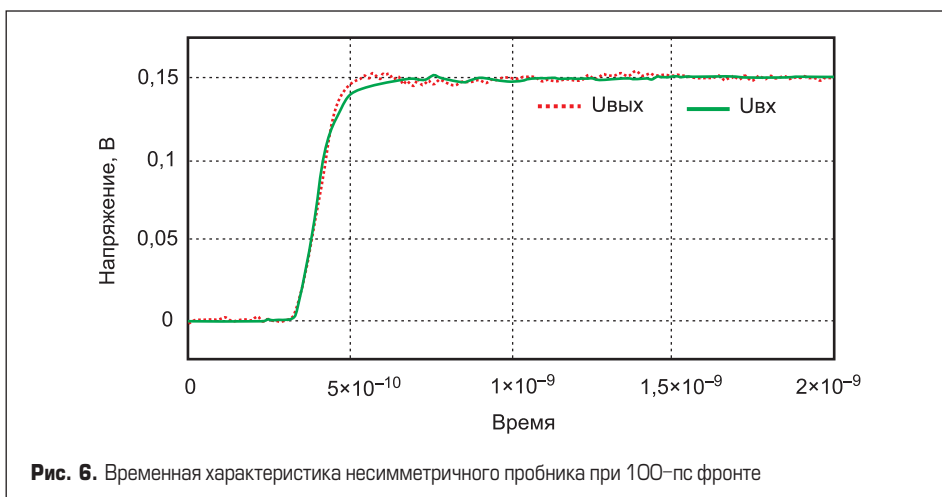


Рис. 6. Временная характеристика несимметричного пробника при 100-пс фронте

показывает более быстрое время нарастания, чем несимметричный пробник. Оба пробника очень хорошо отслеживают 100-пс фронт.

### Проблемы подавления синфазного сигнала

Подавление синфазного сигнала является проблемой как для дифференциальных, так и для несимметричных пробников. Для дифференциального пробника подавление синфазного сигнала означает, что сигнал, общий для обоих + и - входов пробника, не проходит на выход. Для несимметричного пробника подавление синфазного сигнала означает, что сигнал, общий для сигнального входа и для заземления, не проходит на выход.

В моделях дифференциального и несимметричного пробников показан резистор и индуктивность между заземлением attenuатора/усилителя пробника и заземлением на «землю». Это упрощенная модель импеданса, обусловленного линией передачи (или антенной), образованной экраном кабеля пробника и заземлением на «землю». Внешний импеданс важен, потому что при приложении синфазного сигнала к несимметричному пробнику индуктивность заземления образует делитель с этим внешним импедансом и ослабляет сигнал заземления, идущий к усилителю. Поскольку сигнальный вход усилителя не имеет такого же ослабления, как вход заземления, существует сигнал на выходе усилителя и, следовательно, выходной сигнал. Чем выше индуктивность заземления, тем меньше ослабление синфазного сигнала, поэтому при использовании несимметричных пробников важно, чтобы заземление было как можно короче. Нужно отметить, что такой внешний сигнал напрямую не влияет на внутренний сигнал (который является нормальным выходным сигналом в коаксиальном кабеле), но отраженный внешний сигнал воздействует на заземление усилителя пробника и, следовательно, косвенно влияет на внутренний сигнал. Это дополнительно рассматривается в разделе «Повторяемость измерений».

Когда синфазный сигнал прикладывается к дифференциальному пробнику, тот же самый сигнал воспринимается обоими «+» и «-» входами attenuатора/усилителя. Единственным выходным сигналом будет функция коэффициента ослабления синфазного сигнала усилителя, который не зависит от индуктивности соединения.

Нужно определить, несимметричный или дифференциальный пробник обеспечивает лучшее ослабление синфазного сигнала, когда производится измерение несимметричного сигнала с синфазным шумом. Это зависит от индуктивности заземления несимметричного щупа и ослабления синфазного сигнала усилителя дифференциального пробника. В данном примере для дифференциальной и несимметричной головки щупа на рис. 7 показано, что дифференциальный пробник имеет значительно большее синфазное ослабление, чем несимметричный пробник, и, следовательно, может обеспечить лучшее

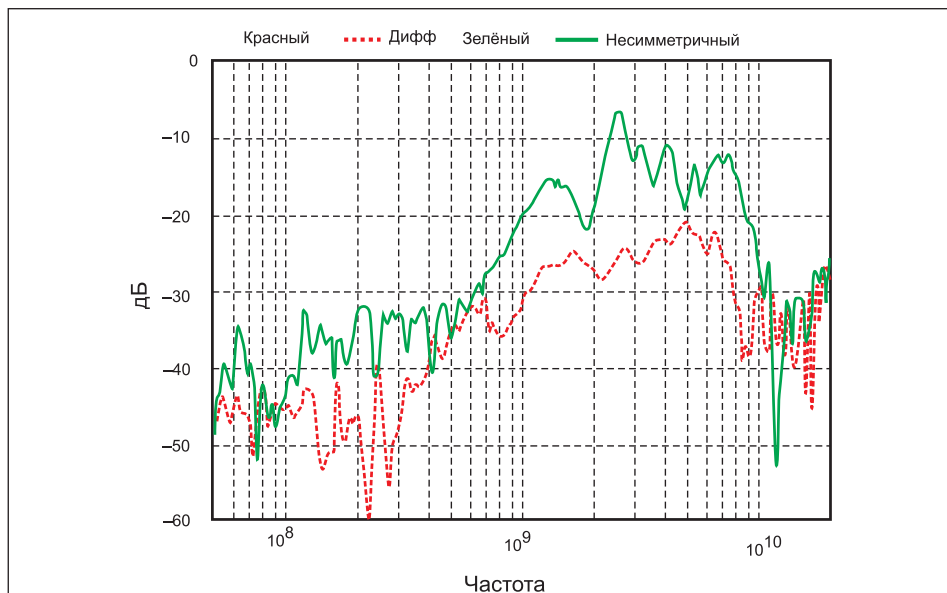


Рис. 7. Чувствительность к синфазному сигналу дифференциального и несимметричного пробников

измерение в среде с высоким синфазным шумом. Это, как правило, имеет место для дифференциальных и несимметричных пробников, если только несимметричный пробник не имеет подключения заземления с чрезвычайно низкой индуктивностью, что на практике трудно реализовать. Важно отметить, что ослабление синфазного сигнала несимметричного пробника, рассмотренного здесь, является хорошим или лучшим по отношению к многим несимметричным пробникам, поскольку имеет очень короткий вывод заземления. Синфазные отклики, построенные на рис. 7, определяются как синфазный отклик дифференциального пробника равен  $20[\log(voc/vic)]$ , где  $vic$  — синфазное напряжение на обоих + и - входах,  $voc$  — напряжение на выходе пробника при приложенном  $vic$ .

### Сравнение входного сопротивления

Если проанализировать модели на рис. 1 со значениями индуктивностей и емкостей, выведенных из дифференциальной и несимметричной головок пробников, то можно увидеть, что входные импедансы, определяемые со стороны несимметричного источника, к каждой головке пробника несущественно различаются. Незначительным моментом в этом анализе является то, как импеданс внешнего режима влияет на дифференциальный и несимметричный пробники. В модели усилителя несимметричного пробника импеданс внешнего режима обычно намного больше импеданса заземления (из-за  $Igs$ ), поэтому он не оказывает заметного влияния на входной импеданс. Однако из-за внешнего импеданса несимметричный сигнал в диффе-

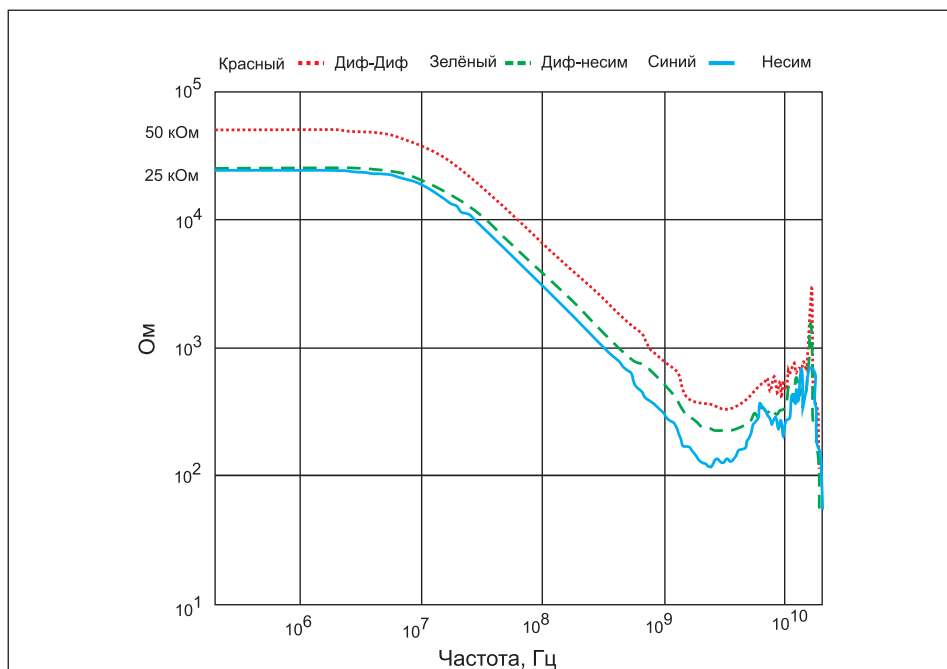


Рис. 8. Входной импеданс дифференциального и несимметричного пробников



рнциальном пробнике будет иметь немного более низкое значение емкости на более высоких частотах, чем на более низких.

На рис. 8 изображен входной импеданс дифференциального и несимметричного пробников. Красная линия — это импеданс, который создает дифференциальный пробник для дифференциального источника. Зеленая линия — импеданс, который создает дифференциальный пробник для несимметричного источника, синяя линия — импеданс, который создает несимметричный пробник для несимметричного источника. Значения для сопротивления постоянному току, емкости и минимального импеданса для всех трех случаев приведены на рис. 8. Примечательно, что входное сопротивление для несимметричного сигнала одинаково для дифференциального и несимметричного пробников.

### Повторяемость измерений

У высокочастотных пробников есть проблема с повторяемостью измерений. В идеале позиция пробника, позиция кабеля и позиция рук не должны служить причиной отклонений в измерениях пробником. К сожалению, во многих случаях это все же происходит. Обычно причиной являются изменения во внешнем импедансе. В действительности такой импеданс сложнее, чем показано в моделях зондов, поскольку фактически это неэкранированная линия передачи (антенна), на которую может сильно повлиять положение зонда, руки и кабеля.

Если проанализировать несимметричную модель с изменением внешнего импеданса, то можно увидеть, что данное изменение вызывает изменение отклика. Кроме того, поскольку внешний

импеданс также является фактором в синфазном отклике, изменение импеданса приводит к изменению ослабления синфазного сигнала. Чем выше индуктивность заземления, тем больше изменения отклика будут наблюдаться.

Анализ дифференциальной модели с изменением внешнего импеданса показывает, что это изменение вызывает очень небольшое изменение отклика. Любой сигнал, присутствующий на заземлении усилителя датчика, подавляется синфазным ослаблением усилителя. Поэтому изменения отклика из-за положения зонда, руки или кабеля значительно ослаблены. На рис. 4 дифференциальный пробник имеет более плавный отклик, чем несимметричный пробник. Многие «горбы и волнистые линии» на откликах несимметричных пробников связаны с изменениями внешнего импеданса. Когда этот импеданс меняется, меняется отклик. Ферритовые бусы на кабеле зонда могут несколько помочь в решении данной проблемы, ослабляя и подавляя внешний сигнал и, следовательно, уменьшая переменчивость внешнего импеданса. Это снижает изменчивость отклика, вызванную положением зонда, руки и кабеля.

### Сравнение физических размеров

Предыдущие сравнения дифференциального и несимметричного зондов показывают, что дифференциальный пробник обладает лучшими характеристиками в каждой категории измерения дифференциальных или несимметричных сигналов.

Однако существуют ситуации, когда имеет смысл использовать несимметричный пробник. Несимметричные пробники позволяют

проводить приемлемые измерения во многих ситуациях, и они могут быть дешевле и физически меньше из-за более простых наконечников. Физически маленький пробник помогает проводить измерения в ограниченных областях и подключить несколько пробников к точкам зонда, которые находятся очень близко друг к другу. С этой точки зрения было бы лучше иметь пробник, позволяющий выполнять и дифференциальное, и несимметричное измерение в несимметричной системе.

### Выводы

Из-за дребезга заземления, перекрестных связей и проблем с электромагнитной совместимостью электронная промышленность переходит с несимметричной на дифференциальную передачу сигналов. Чтобы измерительное оборудование было полезным в этой новой области, дифференциальное измерение сигналов становится абсолютной необходимостью. Поскольку эффективная плоскость заземления между сигнальными соединениями в дифференциальных пробниках является более эффективной, чем большинство используемых (не коаксиальных) заземляющих соединений в несимметричных пробниках, дифференциальные пробники могут проводить более качественные измерения на несимметричных сигналах, чем несимметричные пробники. Дифференциальные пробники нового поколения просты в эксплуатации, обладают передовыми характеристиками и экономичны, когда вы используете их для измерения как дифференциальных, так и несимметричных сигналов.