

# Измерение параметров усилителей, смесителей и дифференциальных устройств с помощью векторного анализатора цепей

А. Пивак, к. т. н.<sup>1</sup>, А. Репин, к. т. н.<sup>2</sup>

УДК 621.317 | ВАК 05.11.08

Векторные анализаторы цепей (ВАЦ) – незаменимый измерительный инструмент при разработке различных радиотехнических блоков, модулей и узлов [1]. Традиционно ВАЦ используются для тестирования пассивных устройств (фильтров, линий передачи, антенно-фидерного тракта и т. д.). Выпускаемые компанией Rohde & Schwarz (R&S) ВАЦ, например R&S®ZVA, отличаются более широкими возможностями. Применение в R&S®ZVA современных подходов к построению радиочастотного тракта, цифровых методов формирования и обработки сигналов, а также специализированного программного обеспечения позволило существенно дополнить перечень измерительных задач и повысить точность измерений. Системная концепция R&S®ZVA, отличающаяся использованием независимых генераторов, позволяет выполнять измерения параметров устройств, работающих с преобразованием частоты. Рассмотрим применение ВАЦ R&S®ZVA в различных измерительных задачах.

## ОБЗОР ВОЗМОЖНОСТЕЙ ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗАТОРА ЦЕПЕЙ R&S®ZVA

R&S®ZVA представляет собой семейство двух- и четырехпортовых векторных анализаторов цепей высшего класса с двумя или четырьмя источниками сигнала. Дополнительно в ВАЦ может быть обеспечен прямой доступ к генератору и приемнику.

Использование второго источника в качестве гетеродина позволяет выполнять измерения параметров смесителя и интермодуляционных искажений усилителей без привлечения внешнего генератора. С помощью модели ВАЦ с четырьмя источниками можно измерить интермодуляционные характеристики смесителей без использования внешнего генератора.

Прямой доступ к генератору/приемнику предоставляет более широкие возможности для подключения внешних дополнительных компонентов схем измерения, например, предварительных усилителей, аттенюаторов, усилителей мощности или

использования анализатора цепей в качестве многоканального приемника, в частности для измерения параметров антенн.

Благодаря опциональным возможностям R&S®ZVA можно измерить коэффициент шума двухпортовых устройств (усилителей), определить параметры устройств с преобразованием частоты (смесителей), выполнить измерения балансных устройств (дифференциальные измерения с возможностью генерации когерентных сигналов) [2]. Анализатор имеет возможность работы в различных дифференциальных режимах измерений (в стандартном виртуальном или истинном дифференциальном).

Кроме этого, с помощью векторного анализатора цепей R&S®ZVA можно провести измерения во временной области, измерения параметров материалов, систем с изменяемым импедансом нагрузки, а также импульсные измерения.

## ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ АКТИВНЫХ УСТРОЙСТВ

Рассмотрим возможности применения векторного анализатора цепей для измерения основных параметров усилителей.

<sup>1</sup> ООО «РОДЕ и ШВАРЦ РУС», руководитель группы технической поддержки, Alexey.Pivak@rohde-schwarz.com.

<sup>2</sup> ООО «РОДЕ и ШВАРЦ РУС», инженер технической поддержки, Alexander.Repin@rohde-schwarz.com.



Рис. 1. Схема измерения S-параметров, гармоник и точки однодецибельной компрессии усилителя

### Измерение точки однодецибельной компрессии, уровня гармоник и интермодуляционных искажений

Векторный анализатор цепей R&S®ZVA наряду с традиционными измерениями S-параметров активных устройств позволяет измерить точку однодецибельной компрессии, уровень гармоник (рис. 1) и интермодуляционных искажений. В режиме свипирования по мощности можно определить зависимости коэффициента усиления, выходной мощности и уровня гармоник от уровня входной мощности усилителя.

На рис. 2 приведен пример отображения результатов измерений основных параметров усилителя.

Для измерения гармонических составляющих на выходе усилителя достаточно использовать двухпортовую модель анализатора цепей R&S®ZVA. В данном случае на одном из портов ВАЦ формируется сигнал основной частоты, в приемнике второго порта производится настройка и измерение параметров n-й гармоники этой частоты (рис. 3).

С помощью двухпортового анализатора цепей и внешнего генератора можно также измерить интермодуляционные искажения усилителя. Четырехпортовая модель ВАЦ R&S®ZVA с двумя источниками – более экономичное решение, поскольку позволяет выполнить измерения без использования внешнего генератора (рис. 4).



Рис. 2. Окно отображения результатов измерений параметров усилителя

При выполнении измерений интермодуляционных искажений следует учитывать ряд практических рекомендаций, изложенных в статье [3]. Так, например, при высоком уровне сигнала на входе измерительного приемника ВАЦ могут возникнуть продукты интермодуляционных искажений, обусловленных самим прибором. Чтобы избежать этого, необходимо использовать внутренний или внешний аттенюатор. Следует также учитывать развязку сумматора и влияние сигнала одного генератора на другой в случае недостаточной развязки.

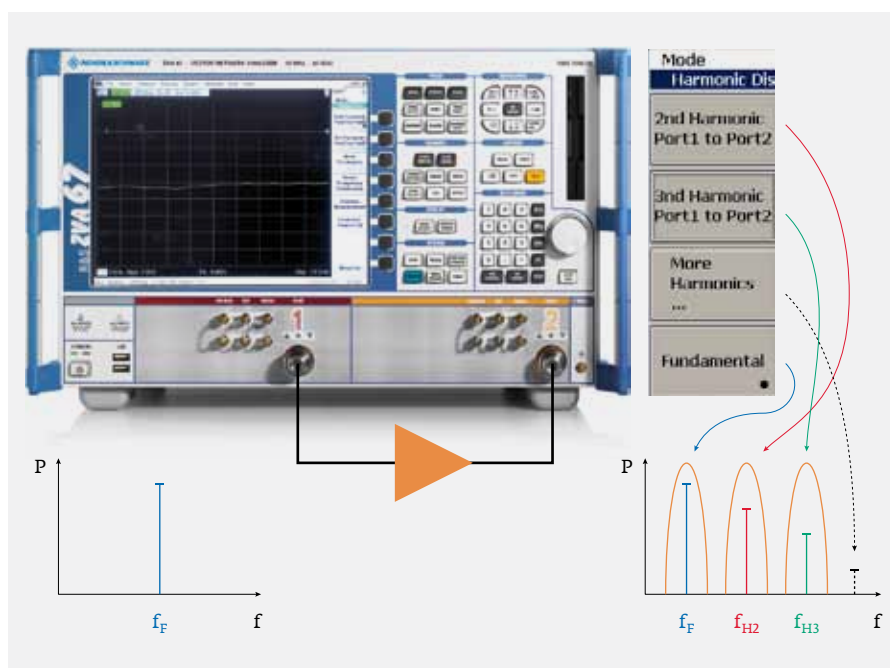
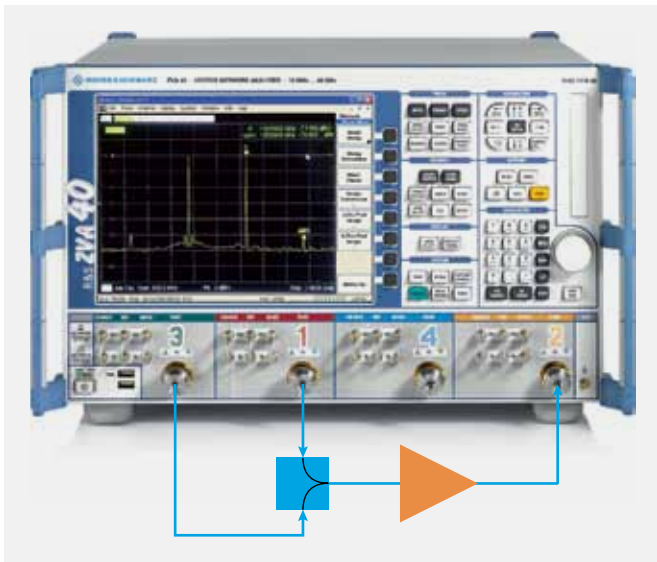


Рис. 3. Измерение гармоник усилителя



**Рис. 4.** Измерение интермодуляционных искажений усилителя (четырёхпортовый ВАЦ с двумя источниками)

**Измерение коэффициента шума усилителя**

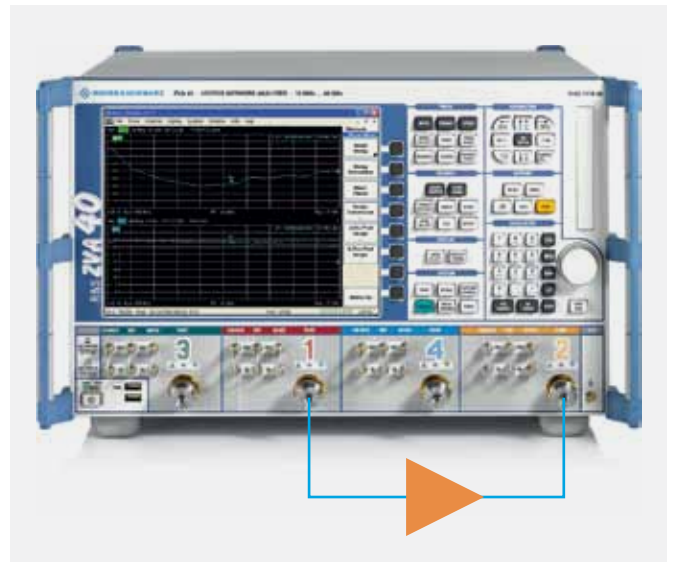
Наряду с известным способом измерения коэффициента шума усилителя с помощью анализатора спектра методом Y-фактора [4, 5] существует альтернативная возможность определить данный параметр с помощью векторного анализатора цепей (рис. 5). Такая возможность обеспечивается благодаря специализированной опции ВАЦ R&S®ZVAB-K30.

Для реализации данной опции компания Rohde & Schwarz применила принципиально новый подход, который позволяет обойтись без генераторов шума и трансформаторов сопротивления. При этом опция обеспечивает высокую скорость и одновременное измерение коэффициента шума и S-параметров.

В опции применен метод, основанный на одновременном измерении мощности шума и мощности сигнала и шум с последующим вычислением коэффициента шума усилителя [6]. Для этого используются два типа детекторов: среднего и среднеквадратического значений (рис. 6). Предварительно производится калибровка ВАЦ по мощности источника, уровню сигнала приемника, коэффициенту шума и S-параметрам.

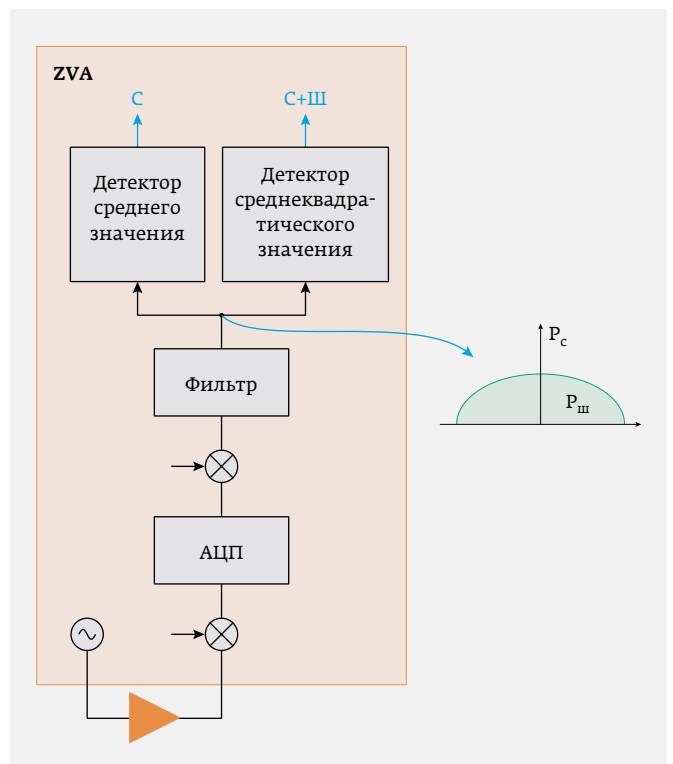
Погрешность измерения коэффициента шума с помощью опции R&S®ZVAB-K30 зависит от коэффициента шума анализатора цепей, коэффициента усиления и коэффициента шума усилителя. Для расчета погрешности измерений компанией Rohde & Schwarz предоставляется бесплатная специализированная программа (рис. 7).

Для измерений малых значений коэффициента шума усилителя с высокой точностью требуется высокая чувствительность прибора. В векторном анализаторе цепей



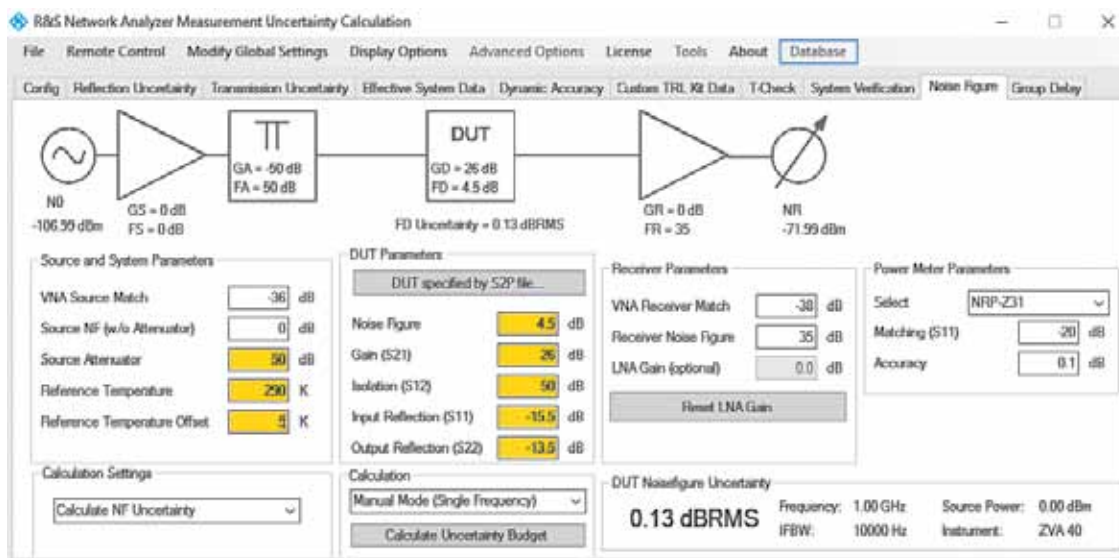
**Рис. 5.** Схема измерений коэффициента шума

R&S®ZVA это обеспечивается благодаря наличию прямого доступа к приемнику ВАЦ. При таком решении усилитель подключается напрямую ко входу приемника ВАЦ, минуя направленный ответвитель. Таким образом исключаются потери в направленном ответвителе, ухудшающие чувствительность прибора.



**Рис. 6.** Метод измерения коэффициента шума векторным анализатором цепей





**Рис. 7.** Интерфейс программы для расчета погрешности измерения коэффициента шума

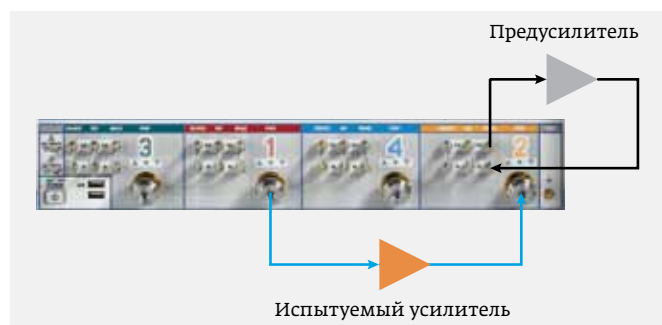
Другим способом повысить чувствительность прибора можно, если использовать предварительный малошумящий усилитель на входе измерительного порта. Предпочтительно выбрать схему измерения с предварительным усилителем в цепи прямого доступа (рис. 8), что позволяет произвести калибровку ВАЦ по S-параметрам и одновременно измерить коэффициент шума и S-параметры усилителя без переключений испытуемого устройства.

В качестве предварительного малошумящего усилителя можно рекомендовать усилитель из состава блоков расширения R&S®ZVAX-TRMxx или R&S®ZVAX24, применяемых совместно с ВАЦ R&S®ZVA.

### ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СМЕСИТЕЛЕЙ

Смесители – один из основных функциональных узлов большей части приемников и передатчиков радиотехнических систем различного назначения.

В спецификациях на узлы, модули и блоки смесителей не всегда содержатся сведения о коэффициенте шума,

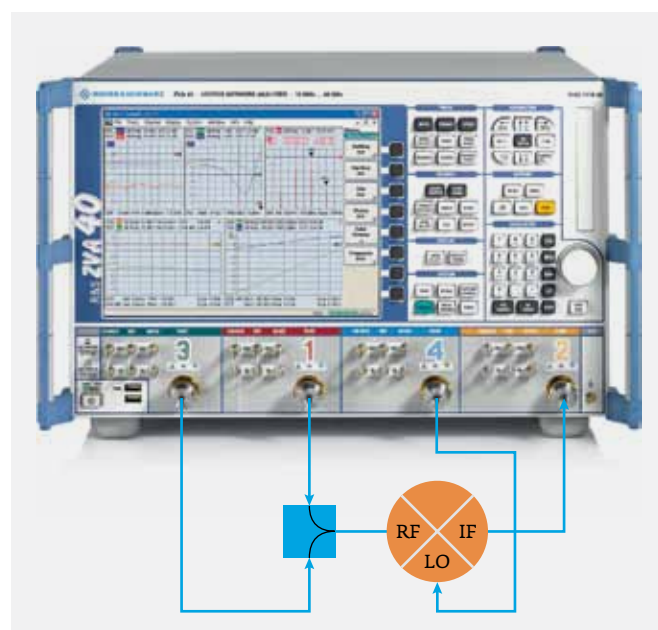


**Рис. 8.** Схема измерений коэффициента шума малошумящего усилителя с предварительным усилителем в цепи прямого доступа к приемнику ВАЦ

интермодуляционных искажениях. Значения параметра группового времени запаздывания (ГВЗ), как правило, не приводятся. Поэтому возникает потребность в измерении данных параметров.

### Измерение скалярных параметров смесителей

Для измерения основных параметров смесителей с помощью векторного анализатора цепей R&S®ZVA используется опция прибора R&S®ZVA-K4 [7], позволяющая измерить потери на преобразование, изоляцию, согласование, интермодуляционные искажения и точку



**Рис. 9.** Схема измерения интермодуляционных искажений с помощью четырехпортовой модели ВАЦ R&S®ZVA с четырьмя источниками

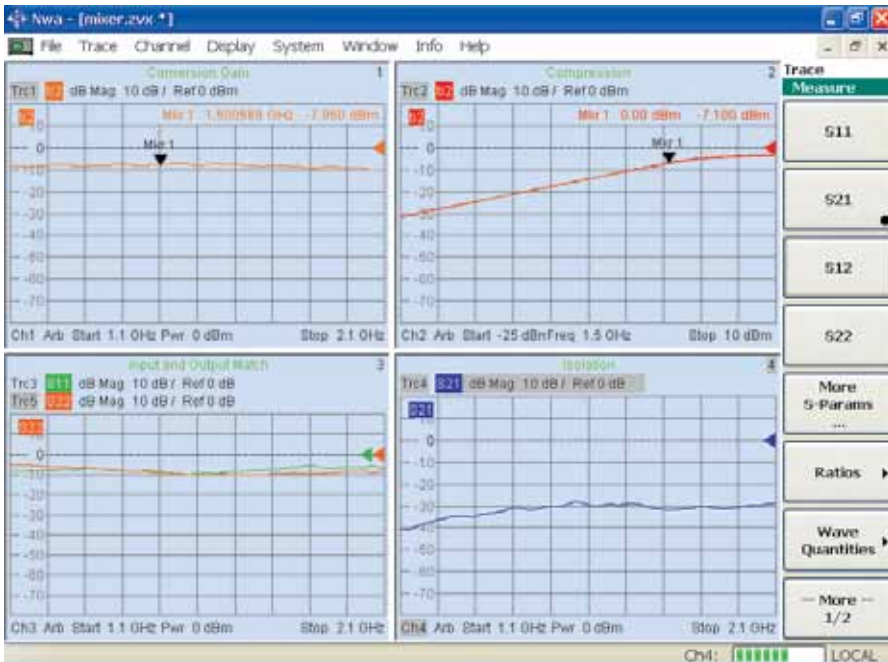


Рис. 10. Окно отображения результатов измерений параметров смесителя

однодецибельной компрессии. Измерения точки однодецибельной компрессии выполняются в режиме свипования по мощности.

Схема измерений скалярных параметров смесителей с помощью четырехпортового анализатора цепей с четырьмя внутренними источниками представлена на рис. 9.

Пример результатов измерений потерь на преобразование (Conversion Gain), точки однодецибельной компрессии (Compression), согласования по входу и выходу (Input and Output Match) и изоляции (Isolation) приведен на рис. 10. Изоляция между гетеродинным входом и выходом промежуточной частоты смесителя характеризует

такой важный параметр смесителя, как утечка сигнала гетеродина.

С помощью ВАЦ R&S®ZVA можно измерить интермодуляционные искажения смесителей (рис. 11).

Смесители являются нелинейными устройствами, параметры и характеристики которых в значительной мере зависят от уровня подаваемой мощности. Поэтому для повышения точности измерений в ВАЦ R&S®ZVA применяется калибровка по мощности. Калибровка выполняется по всем входам смесителя, в том числе гетеродинному, если в качестве источника сигнала гетеродина служит внутрен-

ний генератор четырехпортовой модели ВАЦ.

### Векторные измерения параметров смесителей

В устройствах с преобразованием частоты (например, смесителях) частота на входе устройства отличается от частоты на выходе. В связи с этим разность фаз между входным и выходным сигналами не может быть измерена напрямую. Кроме этого, фаза выходного сигнала смесителя зависит от фазы гетеродина.

В векторном анализаторе цепей R&S®ZVA применяется опция векторного измерения параметров смесителей R&S®ZVA-K5. В опции реализуется обратное преобразование выходной частоты смесителя и частоты опорного сигнала ВАЦ с помощью вспомогательных смесителей, выполняется полная комплексная коррекция систематической погрешности (векторная калибровка) и производятся векторные измерения параметров смесителей. Это позволяет определить абсолютные значения параметров смесителей независимо от фазы гетеродина.

На рис. 12 представлено диалоговое окно задания параметров для проведения векторных измерений смесителей.

В отличие от скалярных измерений смесителей (с помощью опции R&S®ZVA-K4) векторные измерения позволяют получить информацию о модуле и фазе измеряемых параметров, в частности абсолютные значения фазы и группового времени запаздывания [2].

В процессе калибровки в качестве меры вместо перемычки используется «калибровочный смеситель», параметры которого определять не требуется.

Опция векторных измерений смесителей позволяет в полной мере измерить параметры смесителя, который

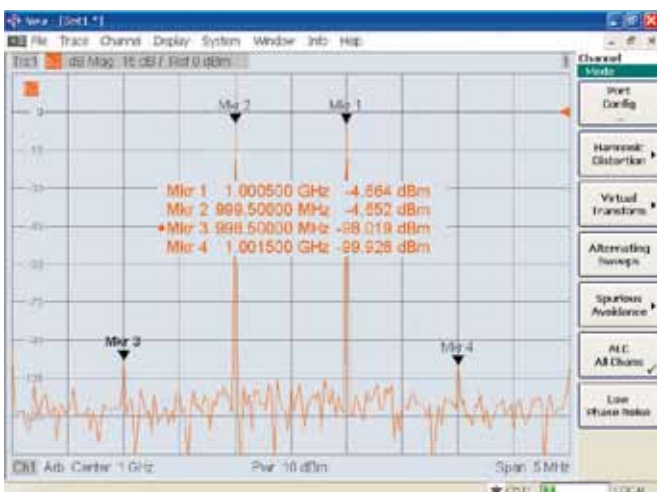
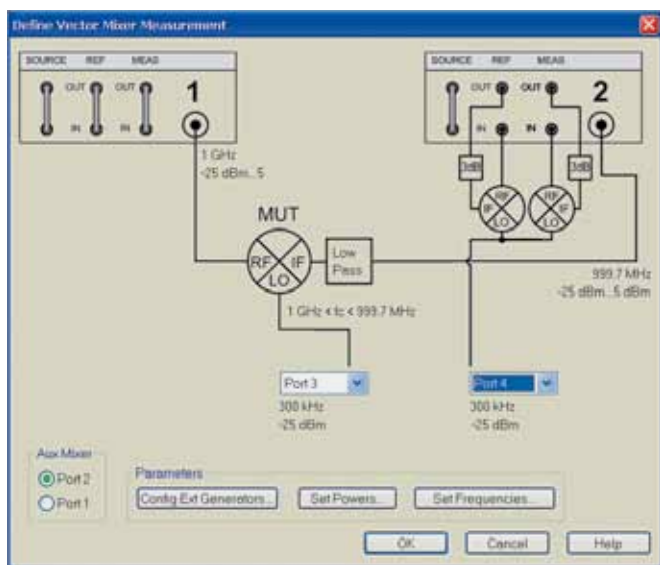


Рис. 11. Окно отображения результатов измерений интермодуляционных искажений смесителя



**Рис. 12.** Диалоговое окно задания параметров векторных измерений смесителя

может быть в дальнейшем применен в качестве эталонного при проведении относительных измерений.

**Измерение группового времени запаздывания смесителей со встроенным гетеродином**

Относительная фаза и ГВЗ могут быть измерены с помощью так называемого опорного или образцового смесителя при условии наличия доступа к гетеродину. В случае отсутствия доступа к гетеродину компания Rohde & Schwarz предлагает новый подход к измерению ГВЗ [8].

Ключевой аспект такого подхода – использование двухтонального сигнала при измерении ГВЗ (рис. 13). В приборе измеряется разность фаз между двумя несущими на входе и выходе смесителя, вычисляется ГВЗ по формуле:

$$\tau = \frac{-1}{360^\circ} \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta f}, \text{ где } \Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1.$$

Для измерения разности фаз между двумя несущими в приборе R&S®ZVA для каждого аналогового канала приемника используются два цифровых приемника, с помощью которых оба сигнала измеряются одновременно. Частотная и фазовая нестабильность гетеродина смесителя взаимно компенсируются при вычислении разности фаз.

Данный метод реализован в опции измерения группового времени запаздывания смесителей со встроенным гетеродином R&S®ZVA-K9. Для применения опции требуется четырехпортовая модель анализатора цепей R&S®ZVA с двумя источниками и наличием прямого доступа к генератору/приемнику ВАЦ.

Опция позволяет провести относительные измерения ГВЗ. Для измерения абсолютных значений необходимо

использовать данные калибровочного смесителя, которые могут быть получены, например, с помощью опции векторного измерения смесителей R&S®ZVA-K5.

**Измерение коэффициента шума смесителей**

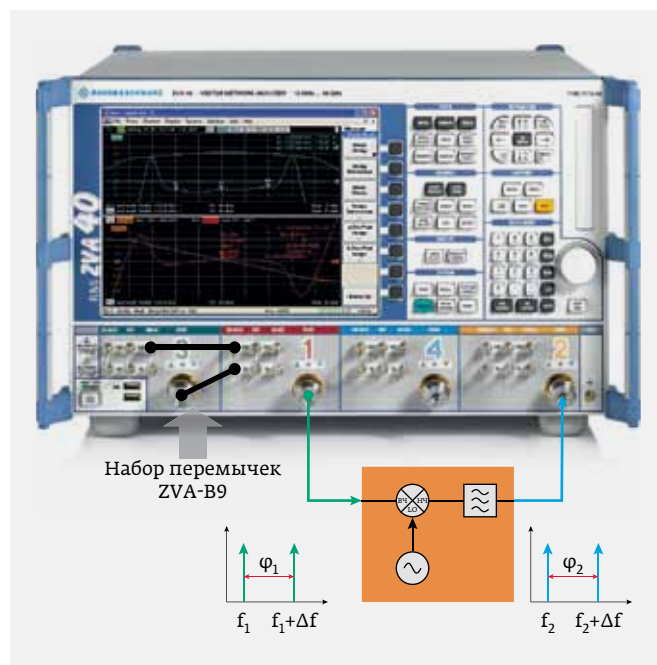
С помощью векторного анализатора цепей R&S®ZVA можно определить коэффициент шума устройств с переносом частоты. Данная возможность реализована в опции прибора R&S®ZVA-K31 [2]. Окно задания параметров смесителя и необходимых этапов выполнения измерений представлено на рис. 14.

Принцип измерения аналогичен принципу определения коэффициента шума двухпортовых устройств (см. выше).

Опция обеспечивает корректировку результатов измерений с учетом наличия зеркального канала, присутствующего переносу частоты, что реализуется соответствующей функцией. С помощью данной функции производятся измерение общей суммарной мощности шума и автоматическая корректировка коэффициента шума на каждой частоте измерений.

Функцию корректировки следует использовать в случае, если полоса частот зеркального канала лежит в рабочем диапазоне частот анализатора цепей. Диапазон частот зеркального канала отображается в окне задания параметров смесителя (рис. 15).

Опция R&S®ZVA-K31 также позволяет измерять коэффициент шума блоков преобразования частоты со встроенным гетеродином. В данном случае



**Рис. 13.** Измерение ГВЗ смесителей со встроенным гетеродином



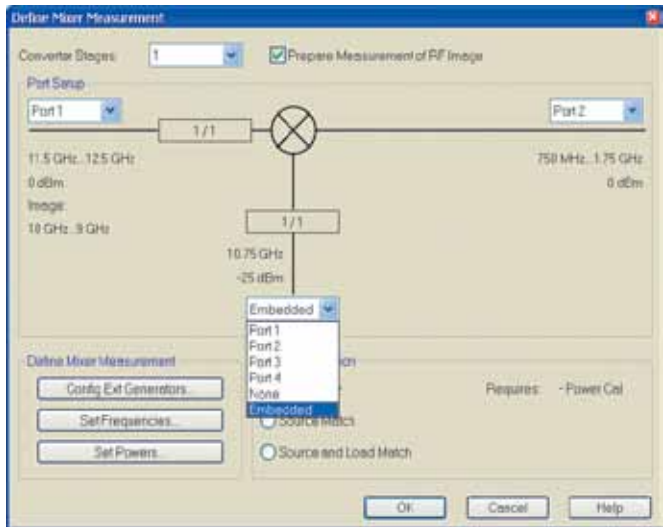
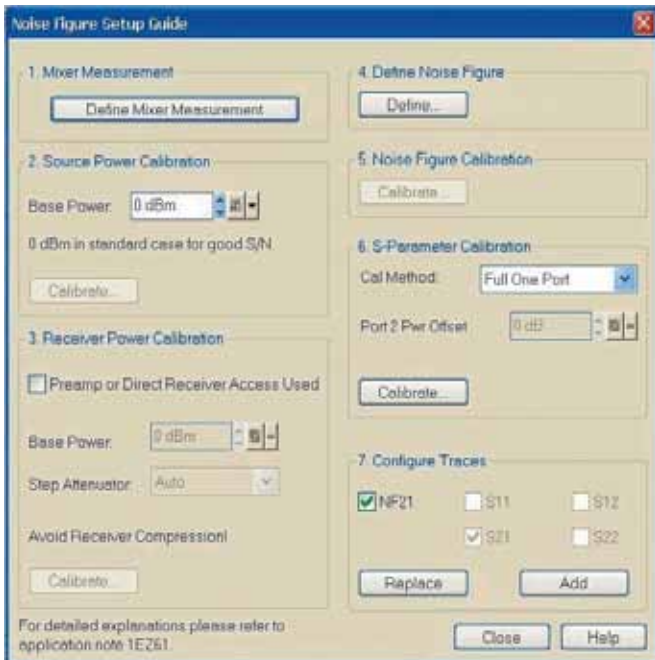


Рис. 15. Окно задания параметров смесителя

Рис. 14. Окно задания параметров смесителя и этапов выполнения измерений коэффициента шума смесителей

в окне параметров смесителя задается режим работы со встроенным гетеродином (см. рис. 15).

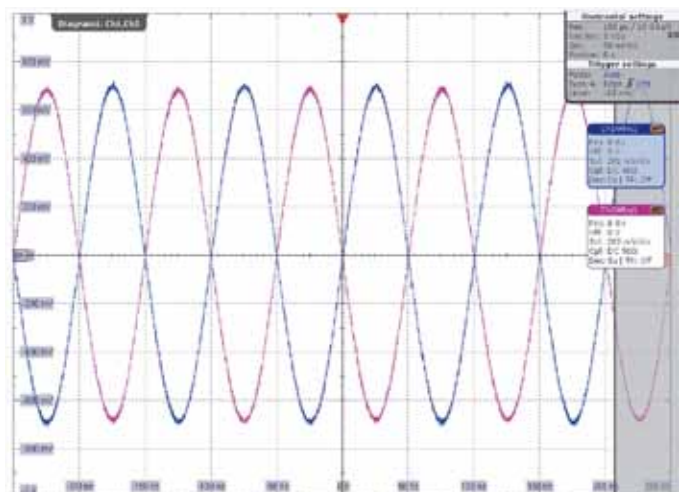
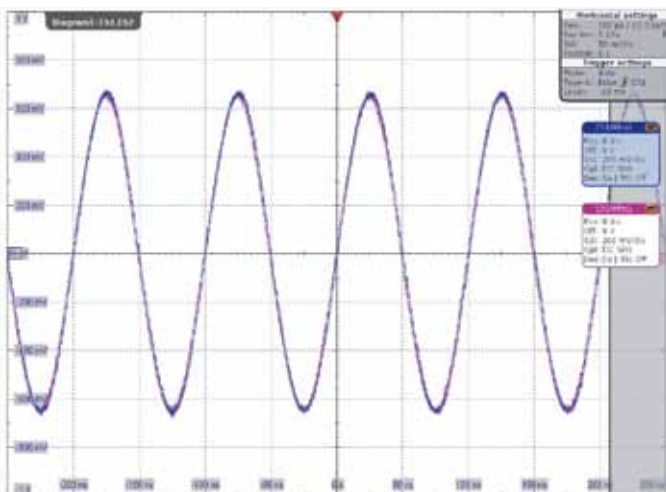
Для измерения блоков преобразования частоты с малым коэффициентом шума в качестве гетеродина рекомендуется использовать внешний генератор с низким уровнем собственных шумов.

Вследствие нелинейных свойств смесителей на их выходе возникают продукты интермодуляционных искажений. Кроме этого, в реальных смесителях существует

канал прямого прохождения сигнала гетеродина. Коэффициент шума необходимо измерять в диапазоне частот, свободном от интермодуляционных искажений, для подавления сигнала гетеродина следует использовать фильтр на выходе смесителя.

### ИСТИННЫЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

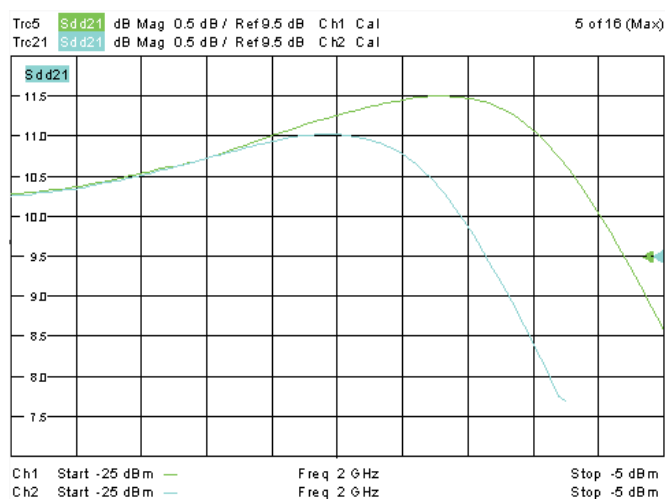
Дифференциальные устройства и линии передачи широко используются в цифровых и аналоговых схемах. Параметры линейных дифференциальных устройств и линий передач могут быть измерены в стандартном режиме виртуальных дифференциальных измерений. В этом режиме в ВАЦ генерируются несимметричные



а)

б)

Рис. 16. Синфазные (а) и дифференциальные (б) сигналы ВАЦ в режиме истинных дифференциальных измерений, измеренные с помощью осциллографа



**Рис. 17.** Результаты измерений коэффициента усиления усилителя в зависимости от уровня входного сигнала, полученные в режимах виртуальных (синяя кривая) и истинных (зеленая кривая) дифференциальных измерений

задающие сигналы и применяется математическое преобразование для пересчета несимметричных волновых величин в симметричные S-параметры. Для формирования несимметричных сигналов используется один источник, сигналы на портах ВАЦ некогерентные.

В режиме истинных дифференциальных измерений [1, 2] генерируются истинные дифференциальные и синфазные сигналы в произвольном сечении схемы измерения (рис. 16). Для формирования этих сигналов в ВАЦ применяются два генератора.

В истинном дифференциальном режиме на портах ВАЦ формируются дифференциальные сигналы, равные по амплитуде и сдвинутые по фазе на 180°. Сигналы на портах ВАЦ когерентны.

Различия двух режимов характерны при измерении параметров нелинейных дифференциальных устройств в случае высокого уровня воздействующего сигнала (рис. 17) [2].

Режим истинных дифференциальных измерений реализован в ВАЦ R&S®ZVA в виде опции R&S®ZVA-K6, которая позволяет также задать дисбалансы по амплитуде и фазе сигналов для исследования их влияния на дифференциальные цепи и устройства [2].

Таким образом, векторный анализатор цепей R&S®ZVA с двумя и четырьмя источниками предоставляет возможности удобного и экономичного решения целого ряда измерительных задач. Применение векторной калибровки и калибровки прибора по мощности позволяет получить результаты измерений с высокой точностью.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Хибель М.** Основы векторного анализа цепей / Пер. с англ. С. М. Смольского; под ред. У. Филипп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009.
2. R&S®ZVA / R&S®ZVB / R&S®ZVT Vector Network Analyzers. Operating Manual / Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, Germany, 2016.
3. **Поляков А.Е., Стрыгин Л.В.** Методика измерения IP2 и IP3 двухтонового сигнала // Труды МФТИ. 2012. Т. 4 № 2. С. 54–63.
4. Noise Figure Measurement Accuracy: The Y-Factor Method. Application Note / Keysight Technologies, Inc., USA, 2017.
5. **Leffel M., Daniel R.** The Y Factor Technique for Noise Figure Measurements. Application Note 1MA178\_3E. – Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, Germany, 2018.
6. **Paech A., Neidhardt S., Beer M.** Noise Figure Measurement without a Noise Source on a Vector Network Analyzer. Application Note 1EZ61\_2E. – Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, Germany, 2010.
7. **Rasmussen K.** Performing Mixer Measurements with the Vector Network Analyzer ZVA + ZVA-K4 Frequency Conversion option. Application Note. – ROHDE & SCHWARZ DENMARK A/S, Denmark, 2009.
8. **Bednorz T.** Group Delay and Phase Measurement on Frequency Converters. Application Note 1EZ60\_1E. – Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, Germany, 2012.

## Предлагаем авторам сотрудничество с журналом "ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес"!

Приглашаем авторов для написания научных статей на темы, соответствующие рубрикам нашего журнала.

Если Вы заинтересованы в сотрудничестве, присылайте статьи на адрес электронной почты [redactor@electronics.ru](mailto:redactor@electronics.ru). Дополнительные пояснения можно получить в редакции журнала по тел. (495) 234-0110, доб. 382.

По итогам рассмотрения присланных статей редакция принимает решение о возможности публикации. Срок публикации составляет от 2 до 10 месяцев (в зависимости от тематики статьи). С тематическим планом журнала можно ознакомиться на сайте: [www.electronics.ru](http://www.electronics.ru).

Публикация в журнале бесплатная.