

# ИЗМЕРЕНИЯ ИСКАЖЕНИЙ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ ПРИ ПОМОЩИ ВЕКТОРНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ ЦЕПЕЙ

## ЧАСТЬ 2

К.Рыбкин<sup>1</sup>

УДК 621.317  
БАК 05.11.00

В первой части статьи, опубликованной в предыдущем номере журнала, рассматривались измерения гармонических искажений, вносимых четырехполюсниками, с помощью векторных анализаторов цепей (ВАЦ). В данной части рассказывается о том, как ВАЦ позволяют измерить интермодуляционные искажения, а также об оценке результатов и погрешностей измерений.

### ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫХ ИСКАЖЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ ВАЦ

Для измерения интермодуляционных искажений (любого порядка) прежде всего создается тестовый сигнал, состоящий из двух синусоидальных сигналов одинаковой амплитуды с частотным разнесением на требуемое значение  $\Delta f$ . Такой сигнал в определенной степени характеризует поведение реальных сигналов в занимаемой ими полосе частот  $\Delta f$  (например, модулированных сигналов). Для создания двухтонового сигнала подходит несколько решений, для использования любого из них в режиме измерения ИИ ВАЦ должен быть также оснащен опцией для работы с преобразованием частоты (К4):

1. В случае двухпортового ВАЦ с одним встроенным генератором можно использовать его сигнал и сигнал внешнего генератора, которые подаются на вход ИУ при помощи сумматора. Недостаток такого решения – необходимость доступа к двум измерительным приборам. О достоинствах речь пойдет ниже при рассмотрении внешнего генератора в качестве источника.
2. При использовании четырех- (и более) портового ВАЦ на вход сумматора можно подать два сигнала встроенных источников ВАЦ. Преимущество решения по сравнению с предыдущим способом состоит в том, что отпадает необходимость во внешнем генераторе.

Недостаток очевиден: многопортовые ВАЦ дороже двухпортовых.

3. Если четырехпортовый ВАЦ снабжен опцией прямого доступа к генераторам и приемникам портов (опция В16 для анализаторов цепей производства компании R&S), для получения двухтонового сигнала можно использовать схемы соединения, приведенные на рис.13.

Ключевая особенность представленных на этом рисунке схем – возможность одновременного измерения коэффициента передачи, коэффициента отражения по входу ИУ, а также интермодуляционных (и гармонических) искажений за одно подключение. Левая схема может быть использована также при работе с двухпортовым ВАЦ с опцией В16; в этом случае роль третьего порта для создания отстройки по частоте может выполнять внешний генератор сигналов. В приведенной справа схеме уменьшается динамический диапазон при измерениях, но она позволяет обойтись без дополнительного сумматора.

4. Использование четырехпортового ВАЦ семейства ZVA совместно с блоком расширения ZVAX-TRM (рис.14).

При использовании портов 1 и 3 ВАЦ в качестве источников двухтонового сигнала требуется, чтобы в модуле расширения был установлен выделенный на рис.14б узел, а именно – сумматор сигналов источников первого и третьего портов. Блок расширения управляется через интуитивно понятный графический

<sup>1</sup> kitsok@pochta.ru.

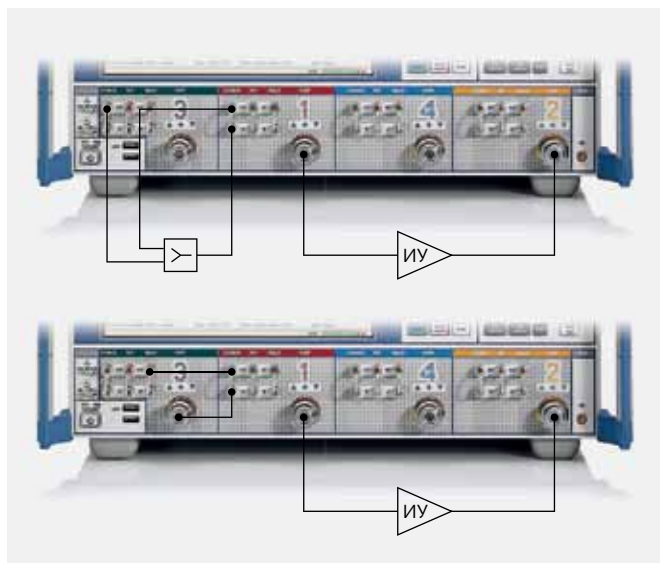


Рис.13. Схемы измерения интермодуляционных искажений с использованием опции прямого доступа

интерфейс ВАЦ. Таким образом, на выходе порта 1 блока расширения реализуется двухтоновый сигнал.

Достоинства схемы измерения с модулем расширения, оснащенным всеми опциональными узлами, заключаются в следующем:

- возможность всеобъемлющего исследования тестируемого устройства за одно подключение, в том числе в импульсном режиме (включая S-параметры,

коэффициент шума, уровни искажений n-го порядка, измерения с преобразованием частоты и т.д.);

- высокие рабочие мощности входных сигналов порта 2 позволяют выполнять измерения ИУ с большим коэффициентом усиления;
- отпадает необходимость во внешних элементах схем измерений.

Из недостатков стоит отметить стоимость, а также незначительное (около 10 дБ) сужение динамического диапазона при измерениях.

Для измерения интермодуляционных искажений ВАЦ производства компании R&S с опцией K4 оснащены также специальным режимом работы. По аналогии с измерением гармонических искажений в ВАЦ предусмотрено соответствующее меню и диалоговое окно для управления процессом измерения ИИ (рис.15). В этом меню можно назначить источники (Source) двухтонового сигнала (от внутренних или внешних генераторов, внешних генераторов может быть 1 или 2), расстройку между тонами по частоте, настроить измерения с преобразованием частоты, установить уровни мощности (или диапазон качания уровней) и диапазоны частот (или центральную частоту) тестовых сигналов (рис.16), сконфигурировать используемые при необходимости внешние генераторы. Затем выбираются порт, в приемнике (Receiver) которого будут производиться измерения ИИ, избирательность разрешающего фильтра приемника, также можно автоматически оптимально настроить измерения ИИ нечетных порядков.

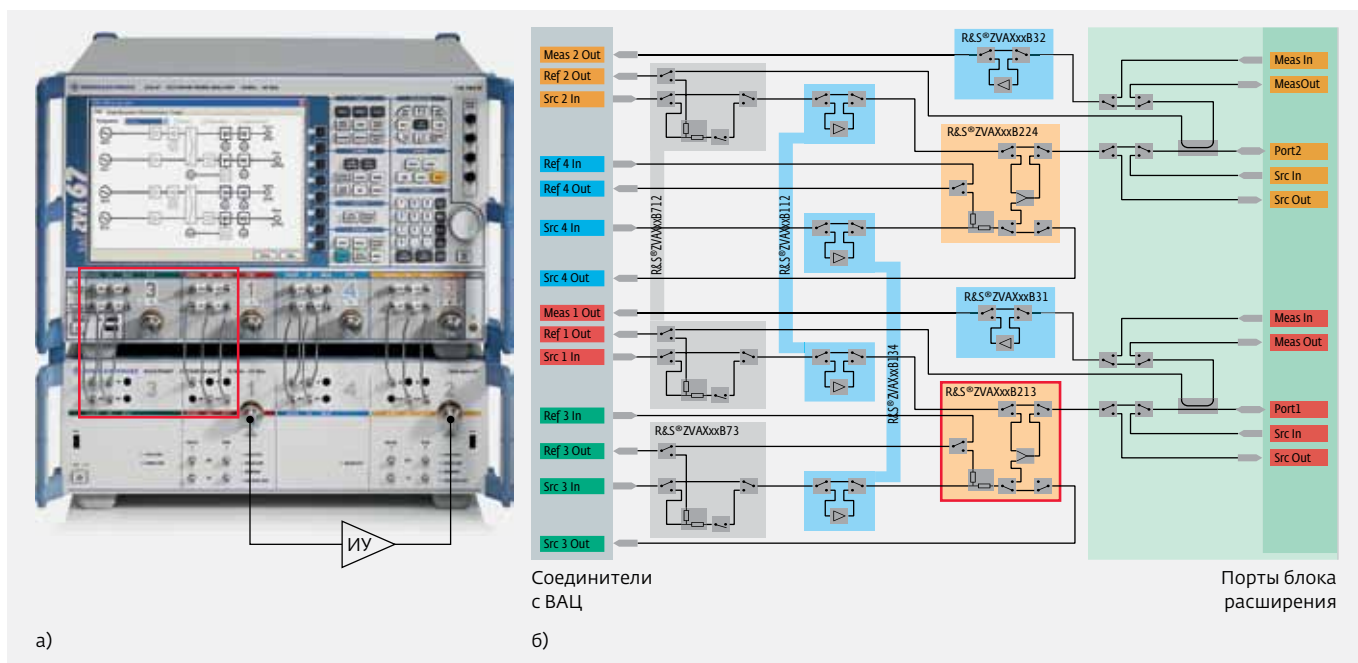


Рис.14. Схема подключения ВАЦ к блоку расширения и ИУ (а), структурная схема блока расширений, оснащенного всеми узлами (б)

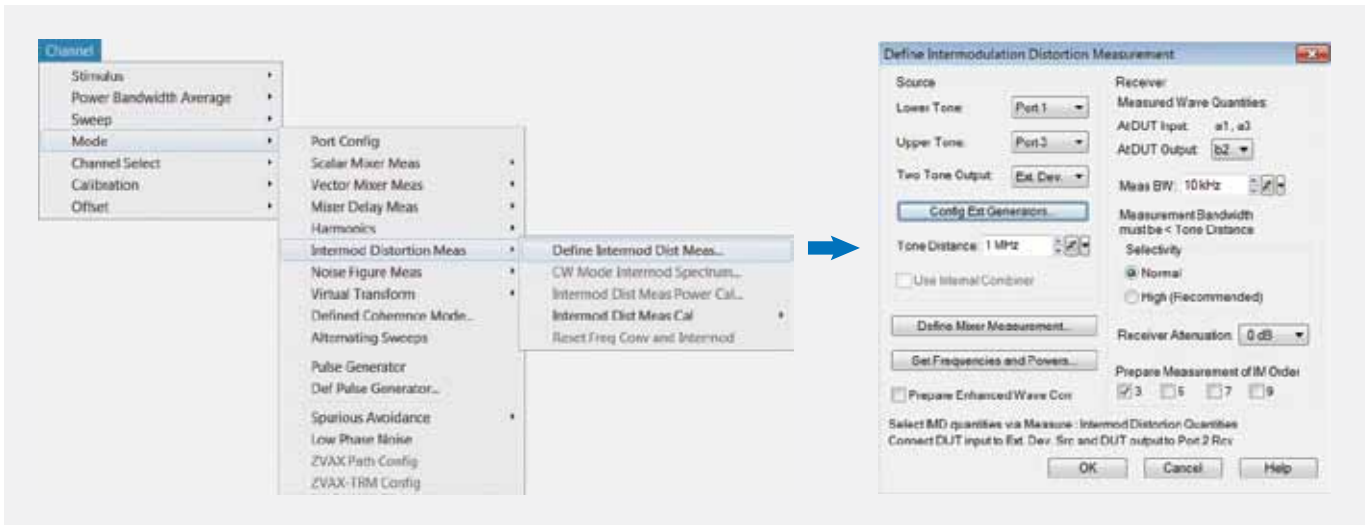


Рис.15. Доступ к меню измерения ИИ и диалоговое окно конфигурирования ВАЦ R&S ZVA

В настройках измерений ИИ в ВАЦ предусмотрен также режим, аналогичный тому, при котором на вход ИУ воздействуют два сигнала постоянной частоты и уровня мощности, а измерения искажения на выходе ИУ выполняются с помощью гетеродинного анализатора спектра (CW Mode Intermod Spectrum). Пример результата измерений в таком режиме представлен на рис.17.

Кроме того, по аналогии с режимом измерения гармоник подмену измерения ИИ содержит доступ к калибровке по мощности, а также коррекции системных ошибок (см. рис.16).

После выполнения соответствующих шагов настройки и калибровки можно, как и в случае измерения ГИ, достаточно легко получить результаты измерения ИИ

из набора искажений нечетного порядка, предлагаемого ВАЦ.

В ВАЦ сконфигурированы оптимальные настройки по умолчанию для искажений 3-го, 5-го, 7-го и 9-го порядка исходя из соображения, что именно эти интермодуляционные продукты, с одной стороны, имеют частоты вблизи полосы частот полезных сигналов и, с другой, являются наиболее существенными по уровню. При этом поставленная в данной статье задача требует частной пользовательской настройки ВАЦ для случая измерения ИИ 2-го порядка, после освоения которой измерения искажений любого порядка будут также легко выполнимы вручную.

Для создания произвольной конфигурации измерения ИИ следует учитывать параметры сигналов, которые

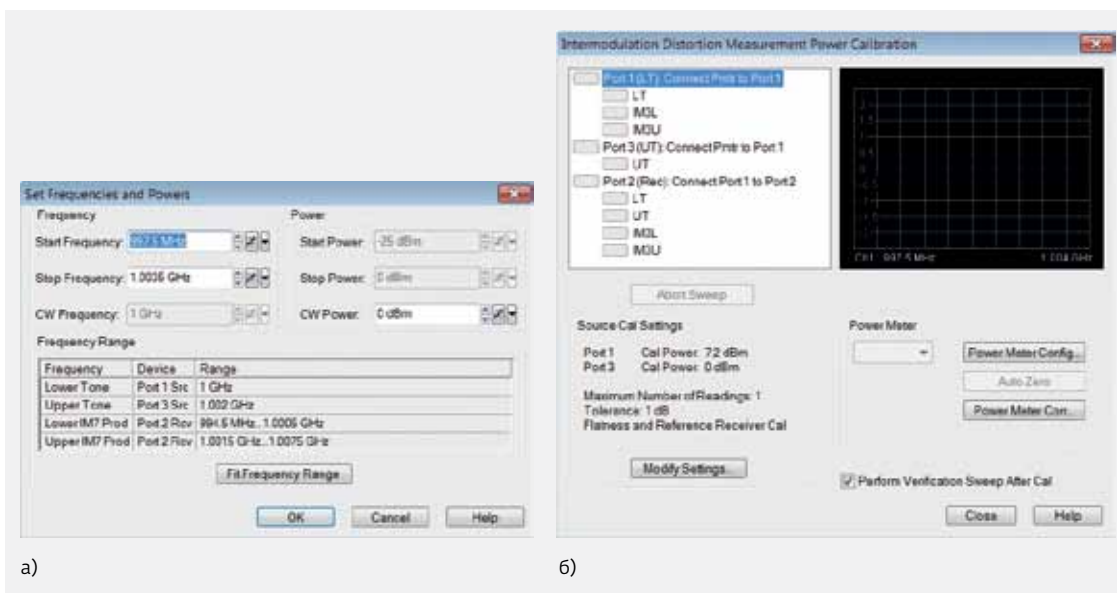


Рис.16. Диалоговые окна установки частоты и уровня мощности сигналов воздействия (а) и калибровки по мощности (б) в ВАЦ R&S ZVA

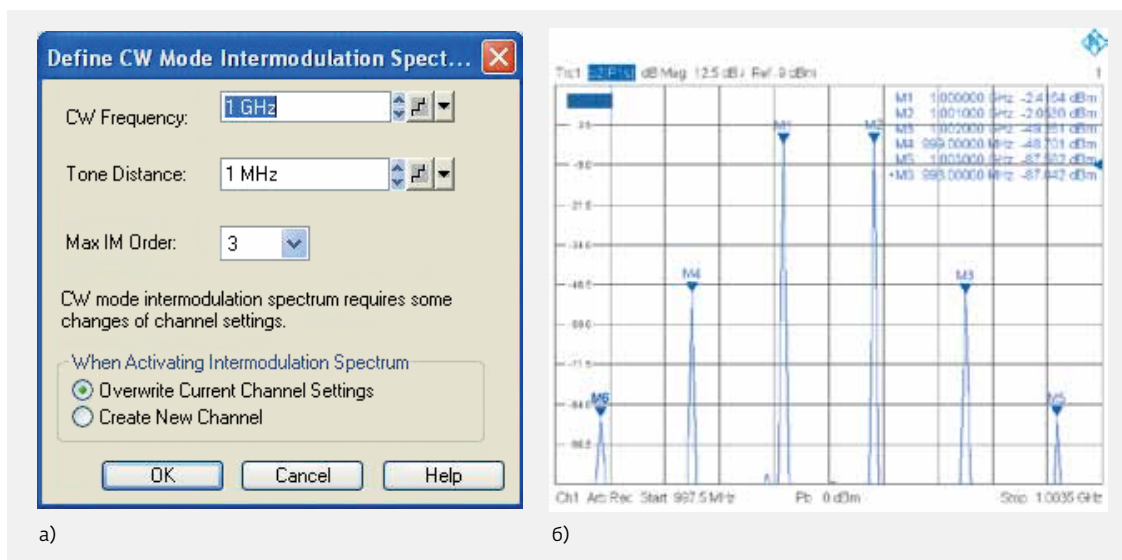


Рис.17. Конфигурирование (а) и результат (б) измерения ИИ в режиме CW Mode Intermod Spectrum при помощи маркеров ВАЦ

нужно приложить ко входу ИУ, а также сигнала на выходе ИУ. Предположим, что требуется измерить уровень ИИ (2-го порядка), возникающих на выходе ИУ при воздействии двух сигналов с расстройкой по частоте на 10 МГц, при этом  $f_1$  (нижний тон) будет перестраиваться в диапазоне частот от 1,0 до 1,1 ГГц, соответственно диапазон частот верхнего тона  $f_2$  будет составлять от 1,01 до 1,11 ГГц. Тогда сигнал на комбинационной частоте  $f_1 + f_2$  (обозначим ее  $f_{ИИ}$ ) должен быть измерен в диапазоне частот от 2,01 до 2,21 ГГц, что можно выразить как  $2 \cdot f_1 + 10$  МГц.

Для измерения уровня искажений необходимо прежде всего сконфигурировать измерительные каналы. Пусть измерения проводятся по схеме № 2 с использованием четырехпортового ВАЦ. Тогда источниками двухтонового воздействия  $f_1$  и  $f_2$  будет удобно назначить генераторы портов 1 и 3 ВАЦ, а измерения продуктов интермодуляции на выходе ИУ на частоте  $f_{ИИ}$  будут производиться приемником порта 2.

Перед подключением активного тестируемого устройства рассчитывается его вероятная выходная мощность для используемого уровня мощности сигнала воздействия для того, чтобы избежать перегрузки приемника порта 2 (подробнее см. при измерениях ГИ).

После установки анализатора в режим "по умолчанию" активным становится единственный измерительный канал 1. В настройках конфигурации портов (Port Configuration) активируем генераторы сигналов портов 1 и 3. Настроим диапазон качания "базовой" частоты (в диалоговых окнах ВАЦ обозначаемой как  $f_b$ ) в источнике порта 1 в требуемом частотном диапазоне. После этого зададим требуемую отстройку для частоты генератора порта 3 (рис.18). На данном этапе удобно произвести калибровку по мощности источников и приемника ВАЦ в канале (подробное описание

процесса калибровки см. ниже) на частотах  $f_1$ ,  $f_2$  и  $f_{ИИ}$ . В настройках развертки (меню Sweer анализатора) рекомендуется выбрать число точек и шаг перестройки между ними таким, чтобы в диапазоны частот [1–1,1]; [1,01–1,11]; [2,01–2,21] ГГц уложилось требуемое (и достаточное для описания поведения ИУ в интересующем диапазоне частот) количество точек. Для примера выберем количество точек для третьего поддиапазона 201 (шаг перестройки 1 МГц). Тогда для того, чтобы все крайние частоты поддиапазонов попали в процесс калибровки, в рассматриваемом режиме измерений следует выбрать диапазон качания частоты

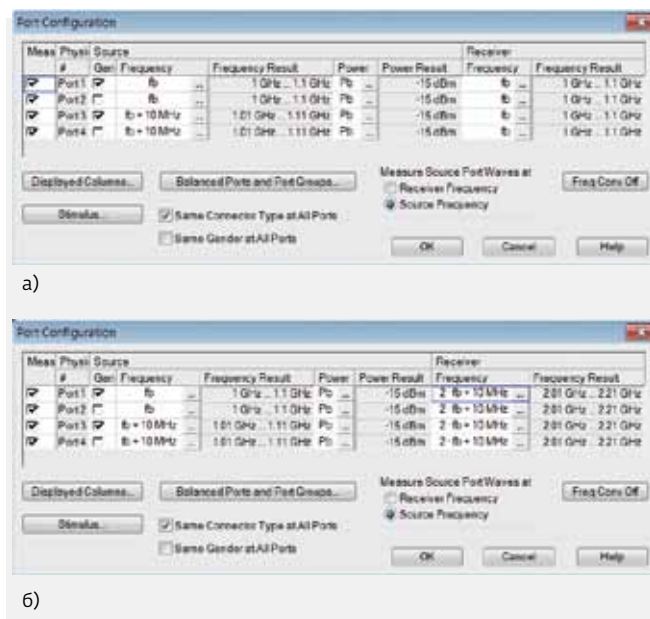
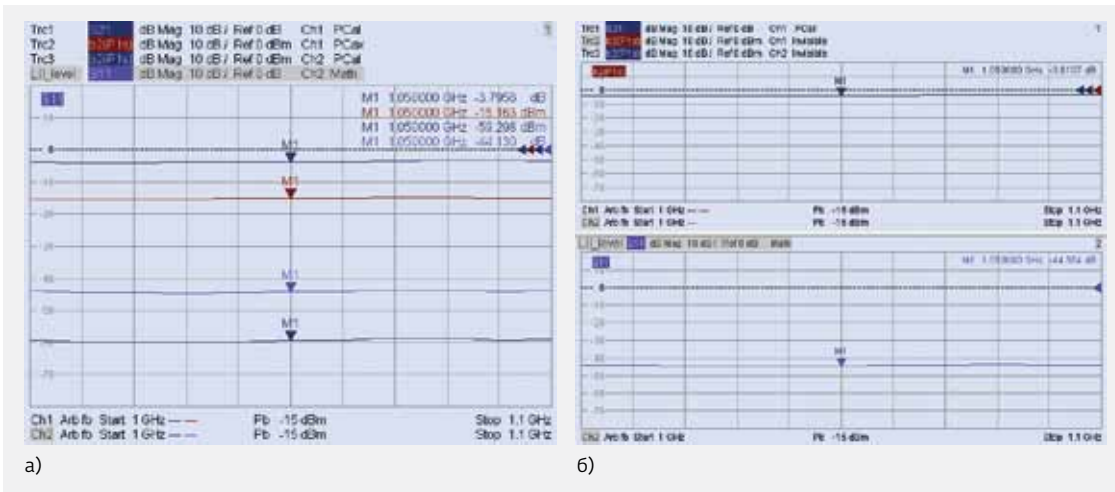


Рис.18. Конфигурация портов для измерения ИИ 2-го порядка для каналов 1 (а) и 2 (б)



**Рис.19.** Результат измерений уровня ИИ 2-го порядка: а – на единой диаграмме с графиками мощностей приемника порта 2 на частотах  $f_1$  и  $f_{ИИ}$ ; б – на отдельной диаграмме внизу

от 1,0 до 2,21 ГГц с 1211 точками измерений с указанным шагом перестройки.

После окончания калибровки необходимо создать измерительный канал 2 и сконфигурировать его для приемника ВАЦ, работающего на частоте комбинации  $f_{ИИ}$ . Вновь созданный канал по умолчанию будет дублировать канал 1, включая результаты калибровки. Пользователю остается только назначить диапазон качания частот приемника, который в нашем случае будет работать на частотах  $2 \cdot fb + 10$  МГц. Результирующая частота будет определена ВАЦ автоматически, а приемник окажется откалиброванным по мощности.

Таким образом, мы получим два измерительных канала, в которых по умолчанию измеряется коэффициент передачи (КП)  $S_{21}$ , но на разных частотах приемника. В первом канале выполняется измерение КП на частоте приемника  $f_1 (=fb)$ , а во втором – на частоте  $f_{ИИ}$ . Из этих результатов можно определить уровень ИИ второго порядка  $I_{ИИ2}$ . Для этого нужно перейти от измерения коэффициента передачи к измерению мощности в каналах (b2) на интересующих нас частотах. Разность уровней этих мощностей и будет являться искомой величиной  $I_{ИИ2}$ . Определив для новой трассы математическую операцию в виде разности (Trc2 – Trc3), получим результат измерений, как в примере на рис.19 (новая трасса названа LII\_level).

По аналогии с режимом измерения ГИ можно проводить измерения ИИ не только с качанием частоты источников, но и с перестройкой уровня мощности сигналов воздействия. Для этого следует задать диапазоны перестройки мощности (Pb) в меню конфигурации портов, создав при необходимости дополнительные измерительные каналы.

Для определения точки пересечения с продуктами интермодуляции (SOI) следует использовать подход, описанный ранее при измерениях ГИ, записав выражение (13) через линейные величины:

$$P_{SOI\text{ вх}} = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{ИИ2}} \cdot P_{\text{вх}} = \frac{|b_2(f_1)|^2}{|b_2(f_{ИИ})|^2} \cdot |a_1|^2. \quad (17)$$

Таким образом, для получения графика значений SOI, выражение для математических операций над кривыми в нашем случае можно записать как  $\text{LinMag}[\text{Trc2}] / \text{LinMag}[\text{Trc3}] \cdot \text{LinMag}[\text{Trc1}]$  при условии, что первый график в канале 1 будет настроен на измерение падающей волны в порту 1 (или 3, т.к. они равны).

### ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

После получения результата измерений ГИ или ИИ правильно задать себе вопрос: искажения какого устройства отображены на экране ВАЦ? Мы можем в теории отличать искажения приемника и источника сигналов ВАЦ от искажений, вносимых, например, тестируемым усилителем. Анализатор делать этого не умеет.

При измерении ГИ объект измерений возникает не только в исследуемом устройстве, но и в приемниках и источниках ВАЦ. Это может привести к неправильным измерениям, особенно при высоком уровне сигнала на входе анализатора, поскольку искажения, создаваемые ВАЦ, добавляются к создаваемым в тестируемом устройстве. Измеренные значения нелинейности в результате будут неверными.

Линейность приемника ВАЦ в основном определяют смесители и усилители промежуточной частоты, при этом входной аттенюатор (в силу резистивной природы) фактически не влияет на линейность. Если изменять уровень сигнала входного смесителя ВАЦ при помощи аттенюатора, то уровни искажений, создаваемых приемниками ВАЦ, будут изменяться также в соответствии с их порядком. Уровень искажений, создаваемых ИУ, останется в этом случае неизменным.

Таким образом, при помощи аттенюатора можно определить, где возникают искажения, отображаемые

ВАЦ. Результат измерений верен в том случае, если относительные уровни искажений остаются постоянными независимо от увеличения ослабления. Если относительный уровень искажений, измеряемых ВАЦ, изменяется, значит приемник порта ВАЦ находится в режиме насыщения и результат измерений неправильный. Вышеизложенные соображения справедливы при использовании как встроенного аттенюатора приемника ВАЦ (опция В3х), так и внешних дополнительных аттенюаторов.

Для того чтобы нелинейные элементы ВАЦ при измерениях находились в линейном режиме, на входе приемника анализатора нужно подобрать такой аттенюатор, увеличение значения ослабления которого не приводило бы к изменению результата измерений.

Кроме искажений, возникающих в приемнике порта ВАЦ, на выходе ИУ можно также наблюдать усиленные искажения источника сигнала. Поэтому для измерения искажений необходим сигнал источника с низкими собственными искажениями. Собственные искажения источника ВАЦ должны быть, по крайней мере, на 10 дБ ниже, чем ожидаемое значение искажений, возникающих в ИУ. Гармонические искажения источника сигнала в ВАЦ, заявленные в спецификациях, как правило, составляют от минус 20 до минус 30 дБ (типичные значения на 10 дБ ниже) относительно максимального специфицированного уровня мощности, который, в свою очередь, составляет от 2 до 13 дБм. При использовании меньших уровней мощности сигнала источника уровень второй гармоники уменьшается на удвоенную величину уменьшения. Недостатком такого метода снижения искажений источника является уменьшение диапазона его мощностей и, как следствие, уменьшение динамического диапазона всей системы измерений. То есть, результат измерения ИУ со сверхнизким уровнем искажений может стать неразличимым на фоне собственных шумов приемника.

Измеряемые значения гармонических искажений ИУ могут быть выше искажений источника сигнала, сопоставимыми с ними или даже ниже. В первом случае (при разнице уровней искажений как минимум на 10 дБ) результат измерений можно считать правильным. В двух других случаях уровень гармоник источника ВАЦ можно понизить при помощи фильтра нижних частот (НЧ), который устанавливается между портом ВАЦ и входом ИУ.

Для обеспечения согласования между входом ИУ и источником сигнала следует дополнительно подключить фиксированный аттенюатор (рис.20). Хорошее согласование при измерении искажений необходимо, поскольку в этом режиме, как правило, затруднительно использовать векторную коррекцию системной

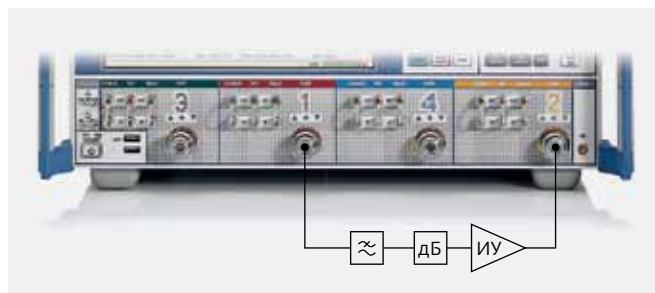


Рис.20. Схема измерений с подавлением гармонических искажений источника сигнала

ошибки ВАЦ (калибровку). Например, при использовании аттенюатора с номиналом 10 дБ достигается согласование источника на 20 дБ и более.

Для того чтобы получить требуемый эффект от использования фильтра, нужно ограничить диапазон качания частоты. Обозначим через  $f_r$  частоту завала АЧХ используемого фильтра, а через  $f_3$  – частоту записания (рис.21). Тогда нижняя граница частотного диапазона, используемого при измерениях, будет равна  $f_3/2$  (для подавления второй и высших гармоник сигнала источника). Максимальная частота при измерениях будет равняться  $f_r$  (при более высоких частотах сигнал источника будет затухать).

Например, использование фильтра нижних частот с АЧХ, приведенной на рис.22а, при измерении гармонических искажений в диапазоне фундаментальных частот от 0,9 до 1,0 ГГц приводит к корректировке результата измерений (рис.22б, ср. с рис.10).

Другой способ снижения искажений сигналов источника при измерениях – использование дополнительного

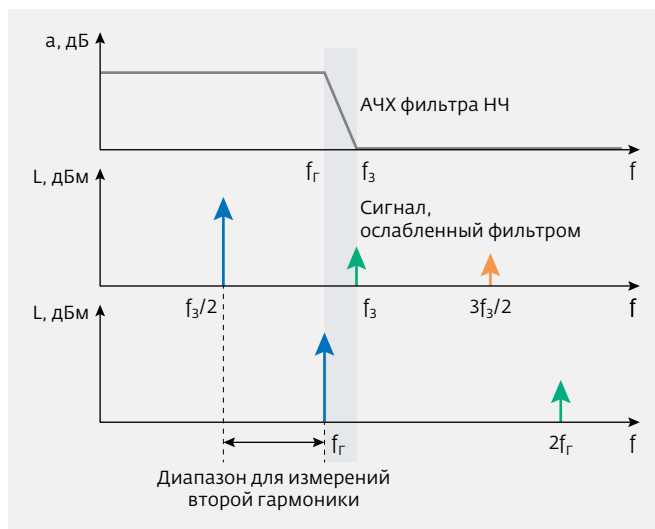


Рис.21. Пояснения к используемому частотному диапазону при использовании ФНЧ

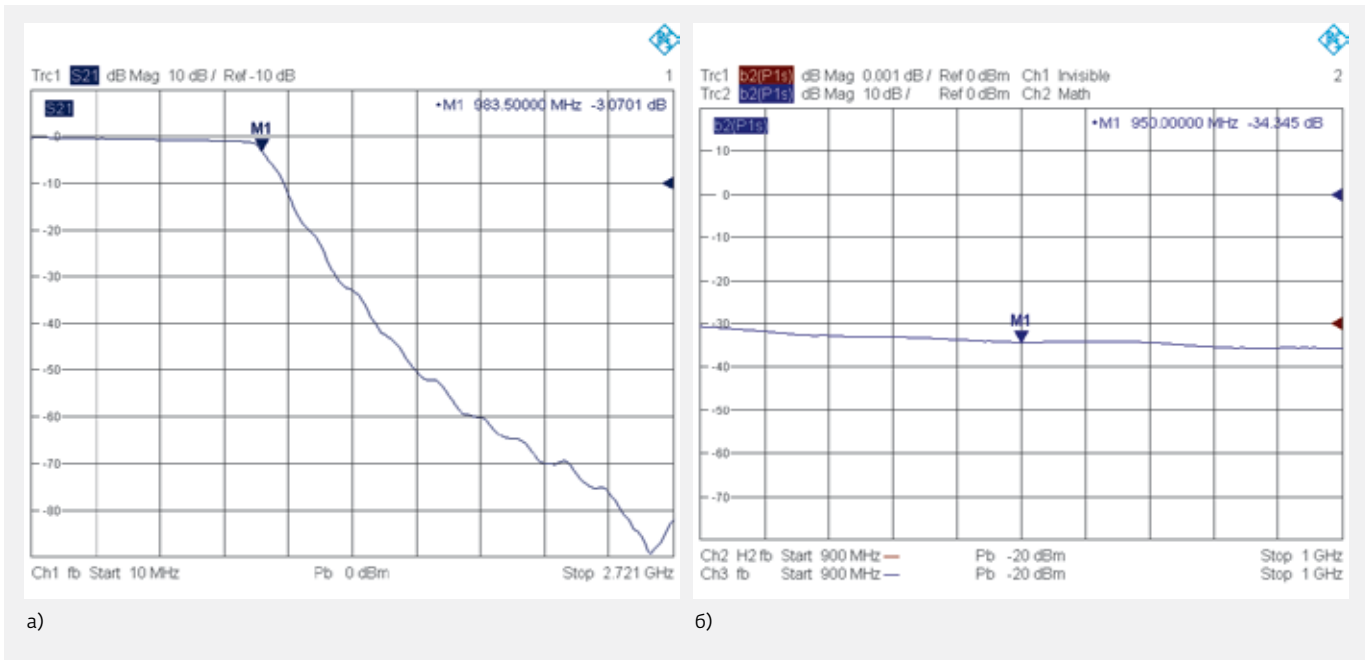


Рис.22. АЧХ используемого фильтра (а) и результат измерения НИ при использовании фильтра (б)

генератора сигналов, которому предстоит работать в диапазоне фундаментальных частот. Таким генератором (производства R&S и некоторых других компаний) можно автоматически управлять через интерфейс LAN (а также USB, GPIB) с помощью встроенного программного обеспечения ВАЦ, включая автоматическую

перестройку частоты и уровня мощности сигнала. При этом приемники ВАЦ будут работать на частотах высших гармоник.

Для реализации этого способа нужно собрать схему измерений с использованием дополнительного генератора (рис.23), соединив приборы посредством RJ45-кабеля, а также BNC-кабелем в целях синхронизации опорных генераторов. Настройки внешнего генератора, такие как адрес дистанционного управления, выбор источника опорной частоты, режим работы и синхронизации производятся в соответствующем пункте меню конфигурирования внешних устройств для ВАЦ (рис.24).

В меню More Harmonics (см. рис.8) для такого режима работы выбирается внешний генератор (Gen1) в качестве источника фундаментальной частоты. А в меню Define Intermodulation Distortion Measurement (см. рис.15) настройки генераторов выполняются нажатием клавиши Config Ext Generators. Дальнейшие измерения проводятся аналогично тому, как описано для ВАЦ с использованием собственных источников сигналов.

Преимуществом использования внешнего генератора являются его значительно меньшие собственные гармонические искажения, что позволяет обходиться в процессе измерений без внешних устройств, таких как фильтры и аттенюаторы на входе ИУ.

Таким образом, учитывая приведенные факторы и производя соответствующую корректировку при измерениях, можно получить результат измерений гармонических искажений ИУ, близкий к истинному.

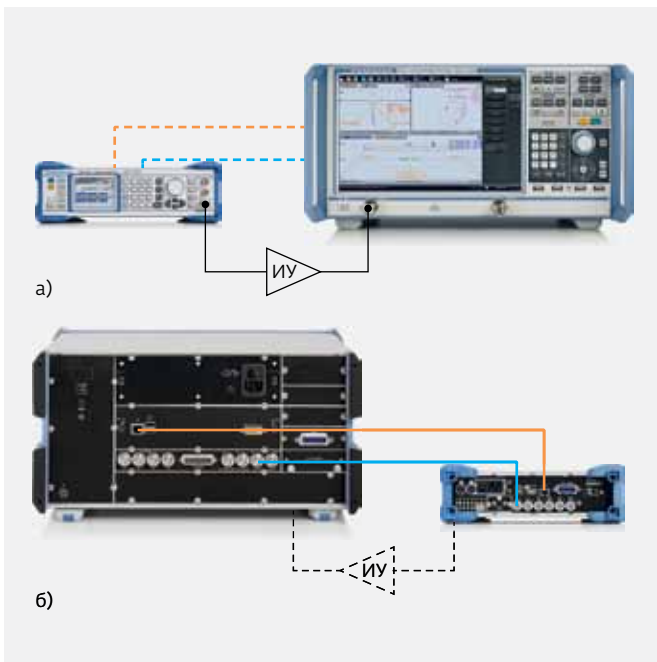


Рис.23. Схема измерений ГИ при использовании внешнего генератора: а - вид спереди, б - вид сзади



Рис.24. Меню настройки внешнего генератора в ВАЦ R&S ZNх

При измерениях ИИ также следует учитывать, что эффекты интермодуляции возникают не только в тестируемом устройстве, но и в любой цепочке аналоговой обработки сигналов, которая содержит нелинейные компоненты и на которую воздействуют, по крайней мере, два сигнала. Поскольку источники сигналов во всех схемах измерения ИИ независимы, а сигналы суммируются при помощи резистивных, то есть линейных компонентов, можно предположить, что результирующий сигнал на входе ИУ свободен от продуктов интермодуляции, так как источники развязаны резистивным сумматором. При необходимости можно обеспечить дополнительную развязку генераторов посредством использования внешних аттенюаторов на входах сумматора. Дополнительно, по аналогии с режимом измерения ГИ, можно использовать ФНЧ для подавления ИИ, возникающих при суммировании сигналов источников по схеме, представленной на рис.25.

Уменьшить продукты интермодуляции во входных цепях анализатора можно только до определенного конечного значения. Как правило, значения собственной интермодуляции приемников ВАЦ не специфицируются. Для оценки уровня искажений в приемнике можно использовать два подхода:

- как и в случае измерения ГИ, можно уменьшить уровень сигнала на входе приемника при помощи внешних или внутренних ступенчатых аттенюаторов (пассивные резистивные цепи). Подключим ИУ. Если вклад приемника ВАЦ в измеренное значение интермодуляции является доминирующим, то внесение дополнительного ослабления аттенюаторами должно изменить измеренное значение уровня ИИ. Если результаты измерений при дополнительном ослаблении сигнала на выходе ИУ не изменяются, то измеренные значения искажений принадлежат собственно ИУ;
- заменим ИУ соединением "на проход". Уровень сигнала источников ВАЦ устанавливается так, чтобы значение уровня мощности сигнала в приемнике было тем же, что и при подключенном ИУ. Поскольку входной сигнал для измерительного приемника

свободен от интермодуляции благодаря достигнутой развязке источников, результатом измерений будут собственные искажения приемника ВАЦ. Для того чтобы результаты измерений интермодуляции ИУ были правильными, рекомендуется убедиться в том, что значение искажений приемника ВАЦ как минимум на 10 дБ ниже, чем измеренное значение интермодуляционных искажений ИУ.

### ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

При любых настройках схемы измерений и ВАЦ точность измерений будет определяться погрешностью установки уровня мощности сигнала источников, а также погрешностью измерения уровня мощности приемниками ВАЦ. Совокупная погрешность измерений с доверительной вероятностью 0,95, если предполагается, что перечисленные погрешности – независимые величины, может быть рассчитана по формуле:

$$\delta_{\Sigma} = 1,96 \cdot \sqrt{\delta_{Р\text{ ист.}}^2 + \delta_{Р\text{ пр.}}^2 + \delta_{\text{лин. ист.}}^2 + \delta_{\text{лин. пр.}}^2} \tag{18}$$

где  $\delta_{Р\text{ ист.}}$ ,  $\delta_{Р\text{ пр.}}$  – погрешности измерения некоторого опорного уровня (как правило, минус 10 дБ) источником и приемником соответственно;  $\delta_{\text{лин. ист.}}$ ,  $\delta_{\text{лин. пр.}}$  – линейность по мощности источника и приемника.

В отсутствие калибровки по мощности (при использовании ВАЦ в режиме заводских установок по умолчанию) рассчитанное по (18) значение неопределенности измерений составит (для анализатора R&S ZVA50 в максимальном диапазоне частот)  $\pm 7,3$  дБ. Для обеспечения меньшей погрешности при измерениях рекомендуется произвести калибровку по мощности всех измеряемых величин.

В случае измерения ГИ калибровку приемника по мощности следует производить во всем диапазоне

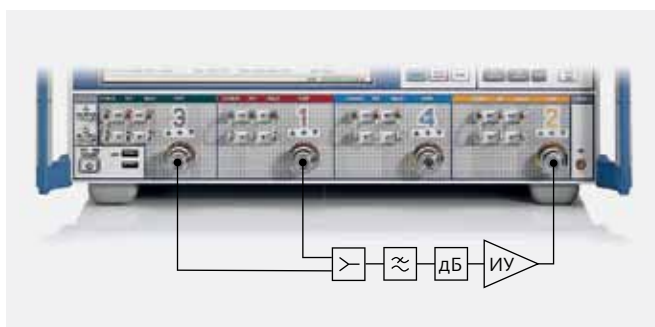


Рис.25. Схема измерений с подавлением ИИ источников сигналов



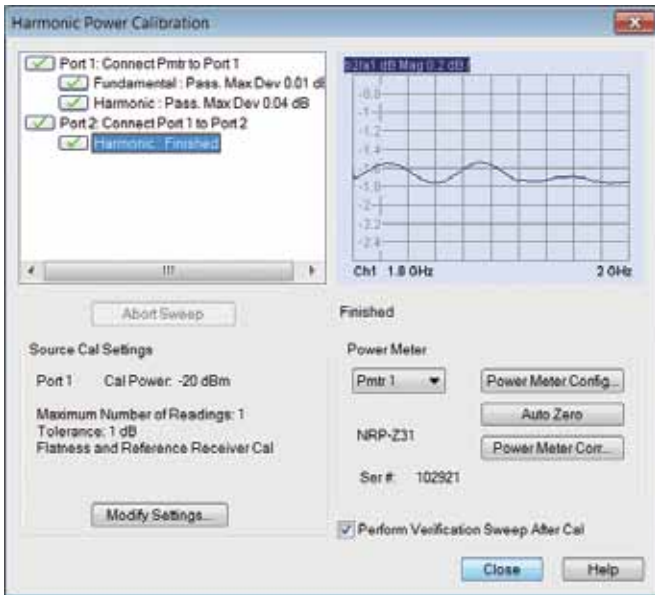


Рис.26. Диалоговое окно калибровки по мощности в режиме измерения гармоник в ВАЦ R&S ZVA

фундаментальных частот, а также во всем частотном диапазоне подлежащих измерению гармоник. В анализаторах цепей R&S такая калибровка выполняется при помощи диалоговых окон, которые активируются после выбора режима измерения гармоник (рис.26). Если анализатор цепей не оснащен опцией K4 или при

измерениях используется ФНЧ, то необходимо сконфигурировать и провести этапы калибровки вручную.

Ниже для примера приведены такие этапы при измерении второй гармоники с перестройкой по частоте:

- калибровка по мощности источника для частотного диапазона от  $2f_n$  до  $2f_k$  ( $f_n, f_k$  – начальное и конечное значение фундаментальной частоты соответственно). При этом калибруется мощность сигнала в сечении измерительного порта. Эта калибровка является подготовительным этапом для калибровки приемника в частотном диапазоне второй гармоники;
- калибровка по мощности приемника для волны  $b_1$  ( $b_2$  в нашем случае). Калибровка производится в том же частотном диапазоне при помощи соединения портов источника и приемника (1 и 2 в нашем случае) переключкой;
- калибровка по мощности источника в диапазоне фундаментальных частот от  $f_n$  до  $f_k$ . В этом случае к порту источника подключаются фильтр и аттенюатор. Калибровка производится на выходе аттенюатора (в месте подключения входа ИУ);
- калибровка по мощности приемника при помощи соединения переключкой выхода аттенюатора с портом приемника.

При использовании для калибровки, например, измерителя мощности R&S NRP50S погрешность измерений

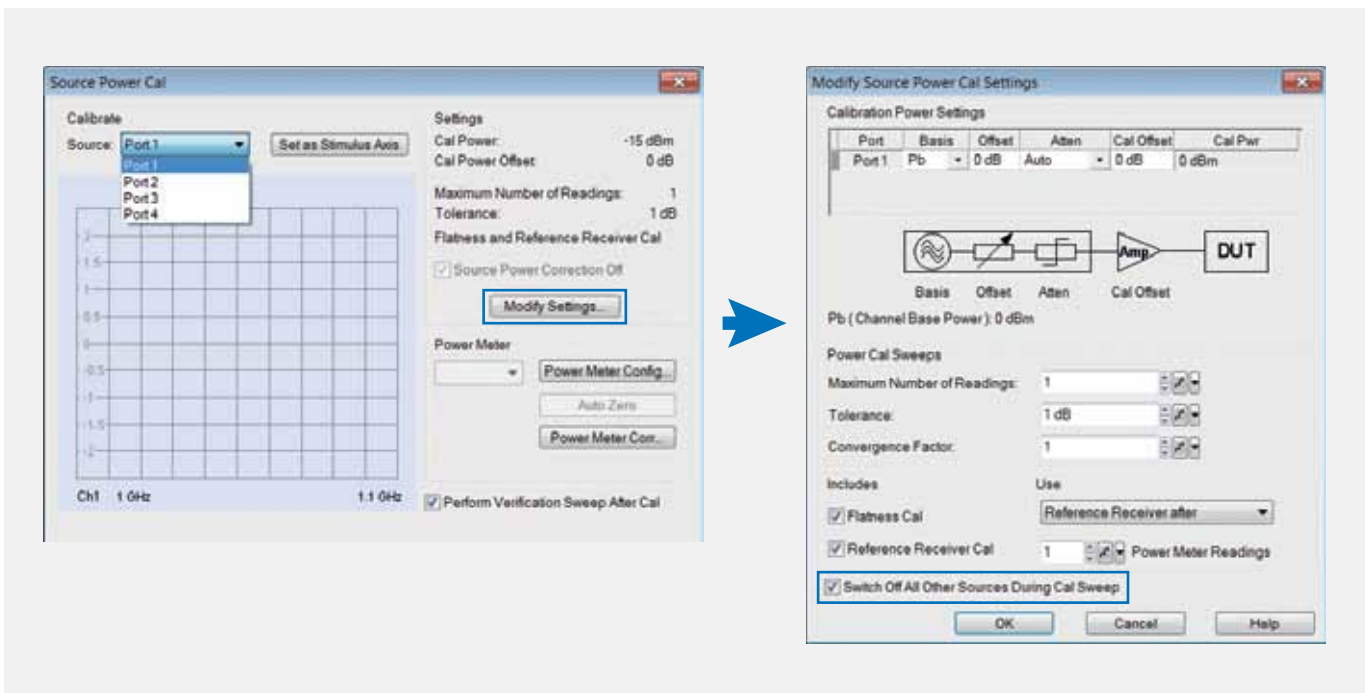


Рис.27. Диалоговое окно калибровки по мощности источников сигнала ВАЦ (слева) и деактивация не участвующих в калибровке источников (справа)

гармонических искажений, вычисленная по формуле (18) в диапазоне частот до 50 ГГц, будет находиться в пределах  $\pm 0,48$  дБ. Таким образом, калибровка по мощности позволяет повысить точность измерений более чем в 10 раз.

При измерении ИИ 2-го порядка калибровку по мощности следует проводить следующим методом:

- калибровка по мощности источников (порты 1 и 3 в рассмотренном случае) в сечении, соответствующем входу тестируемого устройства, для канала 1. При этом следует попеременно активировать генераторы тех портов, для источников которых проводится калибровка (рис.27). Кроме того, следует произвести калибровку по мощности используемого приемника, соединив откалиброванный выход источников "на проход" и активировав оба генератора портов;
- аналогично в созданном канале 2, то есть канале измерения продуктов интермодуляции, сначала проводится калибровка по мощности источников в диапазоне частот, перекрывающем частоты интермодуляции ( $2 \cdot f_1 + \Delta f$ , где  $\Delta f$  – частотная расстройка между тонами), а затем – калибровка по мощности приемника измерительного порта в том же диапазоне частот.

Можно объединить перечисленные шаги, если, как было указано выше, рассчитать количество точек

измерения и шаг между ними таким образом, что все точки из первого и второго шагов попадут в диапазон калибровки, а также в интересующие диапазоны измерений. При несовпадении точек калибровки и измерений корректировка по данным калибровки будет интерполирована в промежуточных некалиброванных точках, что приведет к снижению точности.

\* \* \*

В заключение отметим, что приведенные методы испытаний устройств можно, разумеется, реализовать при помощи одного или двух отдельно стоящих источников сигналов и приемника (анализатора спектра). Такие измерения можно выполнять в диапазоне частот или при перестройке мощности входных сигналов. При этом нужно синхронизировать измерительные приборы и применить несложное программирование для получения требуемых результатов.

Удобнее использовать для измерений векторные анализаторы цепей, уже включающие в себя необходимое количество источников и приемников, а также алгоритмы синхронизации и выполнения измерений. ВАЦ семейства ZVA производства компании Rohde & Schwarz, дополненные при необходимости модулем расширения ZVAX-TRM, являются, пожалуй, оптимальным решением для рассматриваемых задач. ●

