

ИЗМЕРЕНИЯ ИСКАЖЕНИЙ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ ПРИ ПОМОЩИ ВЕКТОРНЫХ АНАЛИЗАТОРОВ ЦЕПЕЙ

ЧАСТЬ 1

К.Рыбкин¹

УДК 621.317
ВАК 05.11.00

Нелинейные искажения сигналов, вносимые различными полупроводниковыми устройствами, оказывают значительное негативное влияние: они приводят как к изменению формы сигнала, так и к генерации помех. Поэтому при разработке полупроводниковых устройств и систем на их основе актуальной является задача измерения вносимых ими нелинейных искажений. О том, как это сделать с помощью векторных анализаторов цепей, рассказывается в статье.

ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ

Идеальный четырехполюсник обеспечивает передачу сигналов от входа к выходу без внесения искажений. Передаточная функция напряжения такого четырехполюсника является линейной и вычисляется так:

$$u_{\text{вых.}}(t) = G_U \cdot u_{\text{вх.}}(t), \quad (1)$$

где $u_{\text{вых.}}(t)$ – напряжение на выходе цепи; $u_{\text{вх.}}(t)$ – напряжение на входе цепи; G_U – усиление цепи по напряжению.

Такие идеальные линейные цепи могут быть реализованы только с помощью пассивных компонентов. Например, фиксированные резистивные аттенюаторы можно в этом смысле считать идеальными. Цепи, содержащие полупроводниковые компоненты (например, усилители или смесители) всегда вносят нелинейности.

В этом случае любая нелинейная передаточная функция может быть аппроксимирована степенным рядом Тейлора следующим образом:

$$u_{\text{вых.}}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} g_n \cdot u_{\text{вх.}}^n(t) = \\ = g_1 \cdot u_{\text{вх.}}(t) + g_2 \cdot u_{\text{вх.}}^2(t) + g_3 \cdot u_{\text{вх.}}^3(t) + \dots + g_n \cdot u_{\text{вх.}}^n(t), \quad (2)$$

где g_n – коэффициент, связанный с нелинейностью элемента в функции передачи [1].

Выражение (2) в терминах волновых величин для векторного анализатора цепей (ВАЦ) можно переписать следующим образом:

$$b_2(a_1) \approx g_1 \cdot a_1 + g_2 \cdot a_1^2 + g_3 \cdot a_1^3 + \dots + g_n \cdot a_1^n, \quad (3)$$

где b_2 – волна (отклик) в порту 2 (на выходе); a_1 – волна (воздействие) в порту 1 (на входе). Число n (максимальное

¹ kitsok@pochta.ru.

количество учитываемых при анализе членов ряда) определяет качество аппроксимации степенным рядом произвольной функции [2].

Задачей представляемого материала является анализ искажений второго порядка, поэтому ограничимся $n=2$, тогда ряд Тейлора примет вид:

$$b_2(a_1) \approx g_1 \cdot a_1 + g_2 \cdot a_1^2. \quad (4)$$

Опустив тригонометрические преобразования, можно показать, что для входного сигнала $u_{вх.}(t) = \hat{A} \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi)$ с амплитудой \hat{A} и начальной фазой φ

$$u_{вых.}(t) = g_1 \cdot \hat{A} \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t + \varphi) + 0,5 \cdot g_2 \cdot \hat{A}^2 \cdot \cos(2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot t + 2\varphi). \quad (5)$$

При линейном увеличении амплитуды первой гармоники при возрастании амплитуды входного сигнала \hat{A} амплитуда второй гармоники увеличивается квадратично.

В общем случае для нелинейного исследуемого устройства (ИУ) воздействие однотонового сигнала (на частоте f) ведет к отклику, имеющему множество гармоник. Кроме первой гармоники на фундаментальной частоте f он содержит также вторую гармонику на частоте $2 \cdot f$ (если выбрать $n > 2$, можно рассчитать дополнительные гармоники на частотах $3 \cdot f, 4 \cdot f, \dots, n \cdot f$).

При двухчастотном входном сигнале на вход устройства воздействует сигнал $u_{вх.}(t)$, состоящий из двух гармонических сигналов. В этом случае входной сигнал выражается формулой:

$$u_{вх.}(t) = \hat{A}_1 \cdot \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot t) + \hat{A}_2 \cdot \sin(2\pi \cdot f_2 \cdot t). \quad (6)$$

где $\hat{A}_1 = \hat{A}_2 = \hat{A}$ – амплитуда, как правило, одинаковая для двух синусоидальных сигналов; f_1, f_2 – частоты сигналов.

Подставляя выражение (6) в нелинейную передаточную функцию, определяемую уравнением (2), на выходе цепи для двухчастотного входного сигнала в числе прочих можно получить следующие искажения второго порядка:

- вторые гармоники: $g_2 \cdot 0,5 \cdot \hat{A}_1^2 \cdot \cos(2 \cdot \omega_1 \cdot t)$, $g_2 \cdot 0,5 \cdot \hat{A}_2^2 \cdot \cos(2 \cdot \omega_2 \cdot t)$;
- интермодуляционные искажения (ИИ) второго порядка: $g_2 \cdot \hat{A}_1 \cdot \hat{A}_2 \cdot \cos(\omega_1 - \omega_2)t$, $g_2 \cdot \hat{A}_1 \cdot \hat{A}_2 \cdot \cos(\omega_1 + \omega_2)t$ где угловые частоты ω определяются как $\omega_1 = 2\pi \cdot f_1$ и $\omega_2 = 2\pi \cdot f_2$.

В зависимости от области применения нелинейной цепи искажения могут вызывать не только изменения действительной формы сигнала, но и помехи. Например, в кабельных телевизионных сетях, где сетка частот занимает более одной октавы, гармоники и ИИ

попадают внутрь используемого частотного диапазона. Поскольку в таких системах передается большое количество сигналов с очень близкими значениями уровней, требования, предъявляемые к уровню второй гармоники, а также к ИИ второго порядка становятся очень жесткими.

Вместо измерения амплитуды напряжения в большинстве случаев практический интерес имеет измерение уровня мощности сигнала:

$$L_{вх.} = 20 \cdot \lg(\hat{A}), \text{ дБм}. \quad (7)$$

Аналогично можно получить выходной уровень сигнала для фундаментальной частоты f из соотношения:

$$L_{вых.} = 20 \cdot \lg(g_1 \cdot \hat{A}) = L_{г1} + L_{вх.}. \quad (8)$$

Здесь $L_{г1} = 20 \cdot \lg(g_1)$ представляет собой коэффициент передачи на фундаментальной частоте. Для второй гармоники, то есть для частоты $2 \cdot f$, можно рассчитать выходной уровень следующим образом:

$$\begin{aligned} L_{г2} &= 20 \lg\left(\frac{g_2 \cdot \hat{A}^2}{2}\right) = 20 \lg(g_2) + 20 \lg\left(\frac{1}{2}\right) + 20 \lg(\hat{A}^2) = \\ &= L_{g2} - 6 \text{ дБ} + 2 \cdot 20 \lg(\hat{A}) = L_{g2} - 6 \text{ дБ} + 2L_{вх.}. \end{aligned} \quad (9)$$

Величина $L_{г2}$ известна как *уровень второй гармоники*. Компоненты $L_{g2} = 20 \cdot \lg(g_2)$ и (минус 6 дБ) являются независимыми от входного уровня $L_{вх.}$. Возрастание уровня на входе на $\Delta L_{вх.}$ приводит в результате к такому же изменению уровня первой гармоники на выходе, в то время как уровень второй гармоники увеличивается на $2 \cdot \Delta L_{вх.}$. Уровень $L_{г3}$ третьей гармоники повышается на $3 \cdot \Delta L_{вх.}$ и т.д.

Спектры сигналов при наличии гармонических искажений (ГИ) показаны на рис.1. Уровни ГИ $I_{г2}$ и $I_{г3}$ на рис.1 характеризуют разницу уровней между уровнем выходного сигнала на фундаментальной частоте $L_{вых.}$ и уровнем гармоник высших порядков $L_{г2}, L_{г3}, \dots$, например, $I_{г2} = L_{вых.} - L_{г2}$.

На рис.2 уровни $L_{вых.}$ и $L_{г2}$ первой и второй гармоник построены как функции от входного уровня $L_{вх.}$. Такие кривые типичны для нелинейных ИУ. Из рис.2 для конкретного входного уровня $L_{вх.1}$ соответствующее подавление гармоник $I_{г2}(L_{вх.1})$ может быть определено как разница между двумя функциями $L_{вых.}(L_{вх.1})$ и $L_{г2}(L_{вх.1})$.

Все рассмотренные до этого величины зависят от уровня входного сигнала $L_{вх.}$. Более удобной (например, для сравнения разных однотипных устройств) была бы характеристика, не зависящая от уровня входного сигнала. Для этого используется величина, известная как точка пересечения со второй гармоникой SHI (Second Harmonic Intercept).

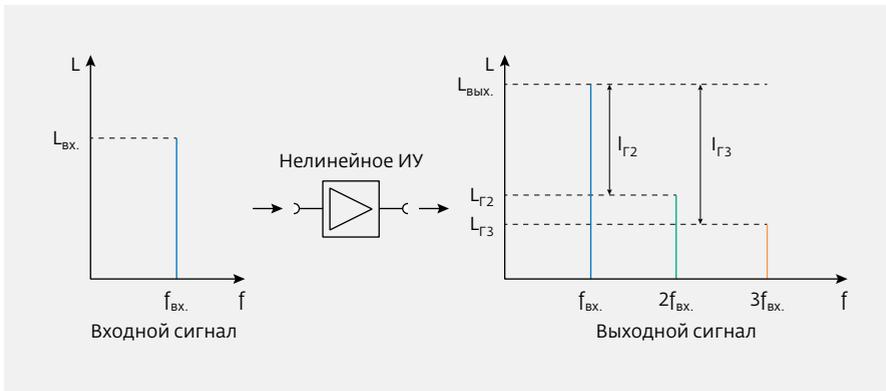


Рис.1. Спектр сигнала до и после нелинейной (усиливающей) цепи

Данная точка показана на рис.2. Уровень $L_{SHI\text{вх.}}$ соответствует фиктивному входному уровню, при котором выходной уровень $L_{\text{в.ых.}}$ фундаментальной частоты и уровень L_{G2} второй гармоники имеют одинаковое значение. Точка SHI в большинстве случаев не связана с эффектом насыщения, но является полезной, поскольку характеризует различные ИУ. Используя эту точку, можно провести две прямые линии для $L_{\text{в.ых.}}$ и L_{G2} с определенным наклоном (1 дБ/1 дБ и 2 дБ/1 дБ соответственно), не имея дополнительной информации об ИУ.

Чем выше уровни $L_{SHI\text{вх.}}$ и $L_{SHI\text{вых.}}$ связанные с точкой пересечения, тем меньше гармонические искажения. Чтобы определить точку пересечения SHI, все, что нужно сделать, – это измерить пару значений $L_{\text{в.ых.}}$ и L_{G2} при одном и том же значении входного уровня $L_{\text{вх.}}$. Последний следует выбрать (как, например, $L_{\text{вх.1}}$ на рис.2) так, чтобы на характеристике $L_{\text{в.ых.}}$ отсутствовали эффекты насыщения.

При $I_{G2} = L_{\text{в.ых.}} - L_{G2}$ значение

$$L_{SHI\text{вх.}} = L_{\text{вх.1}} + I_{G2} \tag{10}$$

Из рис.2 можно определить уровень точки пересечения, который отнесен к выходу. Он обозначен на рисунке $L_{SHI\text{вых.}}$ и может быть вычислен из коэффициента передачи на основной частоте L_{G1} , выраженного в дБ, и $L_{SHI\text{вх.}}$ из соотношения:

$$L_{SHI\text{вых.}} = L_{G1} + L_{SHI\text{вх.}} \tag{11}$$

Для сравнения различных устройств лучше использовать уровень пересечения по входу $L_{SHI\text{вх.}}$, поскольку такой уровень не зависит от коэффициента усиления устройства.

Кроме уровня второй гармоники аналогичным образом можно определить точки пересечения i -й гармоники. Для этого следует построить прямую с наклоном (i дБ/ 1 дБ), которая должна пересекать прямую

фундаментальной гармоники в точке пересечения iNI . Совокупность таких точек известна как точки пересечения i -го порядка (все они также фиктивные точки). Чем выше эти точки пересечения, тем меньше нелинейность ИУ.

В случае воздействия двухтонного сигнала (рис.3) изменение уровня двух синусоидальных несущих на входе ИУ на x дБ вызывает вариацию уровня соответствующего интермодуляционного продукта порядка n на $n \cdot x$ дБ. Поэтому разница между ИИ и уровнями мощ-

ности сигналов основных частот всегда должна указываться вместе с уровнем входного сигнала, иначе выводов о линейности цепи сделать невозможно. По аналогии с ГИ, для сравнения разных ИУ полезно указывать точку пересечения n -го порядка для ИИ (также не зависящую от уровня входного сигнала). Такая точка пересечения относительно входа рассчитывается по формуле:

$$IPn_{\text{вх.}} = \frac{I_{IIn}}{n-1} + L_{\text{вх.}} \tag{12}$$

где $IPn_{\text{вх.}}$ – входная точка пересечения n -го порядка, дБм; I_{IIn} – разница между уровнем ИИ n -го порядка и уровнем двух основных гармоник входного сигнала, дБ

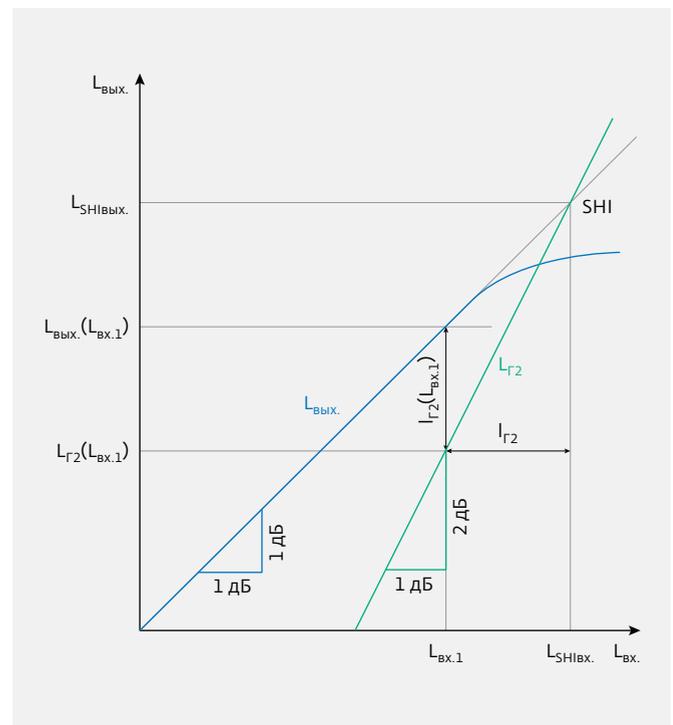


Рис.2. Точка пересечения со второй гармоникой

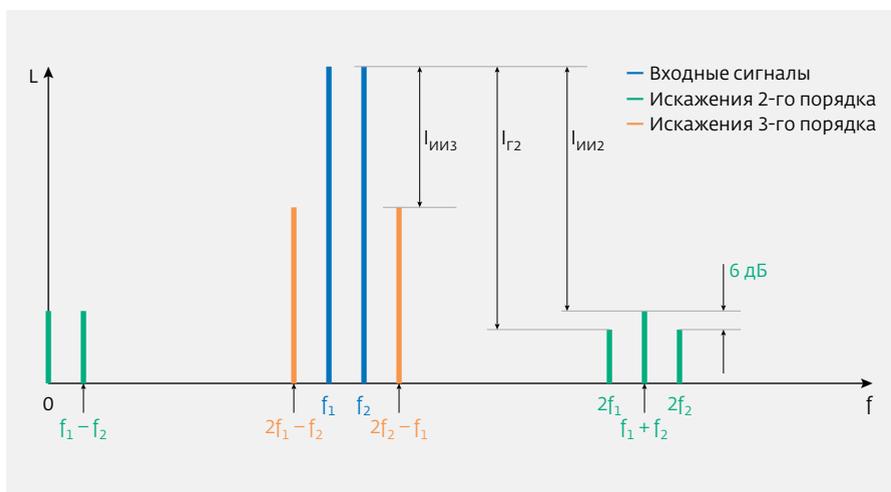


Рис.3. Выходной спектр нелинейной цепи при двухчастотном входном сигнале

(см. рис.3); $L_{вх.}$ – уровень каждого из двух входных сигналов, дБм.

В большинстве случаев для характеристики ИУ указываются точки пересечения с продуктами интермодуляции второго и третьего порядка. Они обозначаются как SOI (Second Order Intercept, также встречается обозначение IP2) и TOI (Third Order Intercept, или IP3) соответственно (рис.4). Измерения ИИ третьего порядка в статье не рассматриваются, информация об искажениях

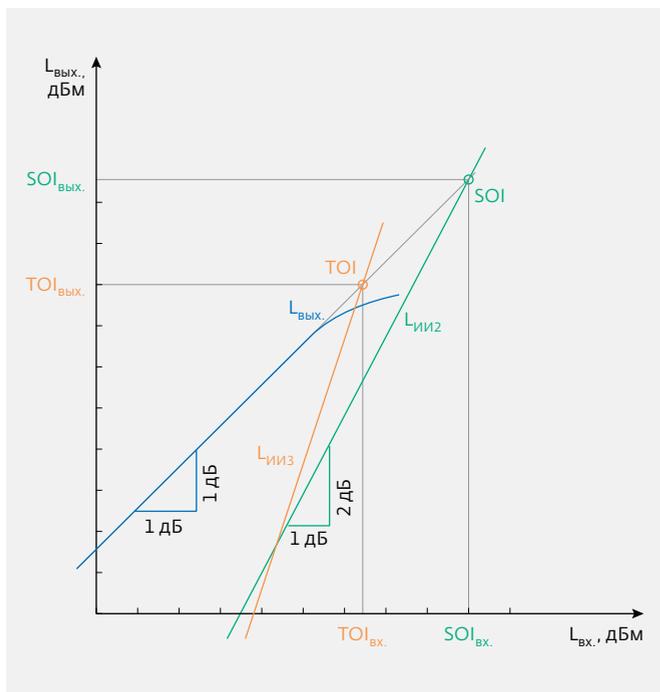


Рис.4. Точки пересечения с продуктами интермодуляции второго и третьего порядка

третьего порядка приведена для сведения. Входной уровень пересечения с продуктами интермодуляции второго порядка определяется как:

$$SOI_{вх.} = I_{ИИ2} + L_{вх.} \quad (13)$$

Значения координат точек пересечения по выходу могут быть рассчитаны на основе координат точек пересечения по входу путем добавления к ним коэффициента усиления цепи ИУ (в дБ).

Как ИИ второго порядка при двухчастотном входном сигнале, так и ГИ при одночастотном входном сигнале появляются за счет квадратичного члена передаточной функции нелинейной цепи. Имеет

место фиксированное соотношение [1]:

$$SHI = SOI + 6 \text{ дБ}. \quad (14)$$

ИЗМЕРЕНИЯ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ

Традиционно уровень гармонических искажений четырехполосников измеряют при помощи генератора сигналов и анализатора спектра. Большинство современных анализаторов спектра позволяет использовать соответствующую автоматическую измерительную функцию, то есть результат измерений можно получить после нажатия одной клавиши. Пример такого измерения высших гармоник, до 10-й включительно, на фундаментальной частоте 1,675 ГГц представлен на рис.5.

В диапазоне частот до 200 кГц для измерений гармоник применяются также измерители нелинейных искажений, в том числе автоматические (приборы класса С6 отечественного производства).

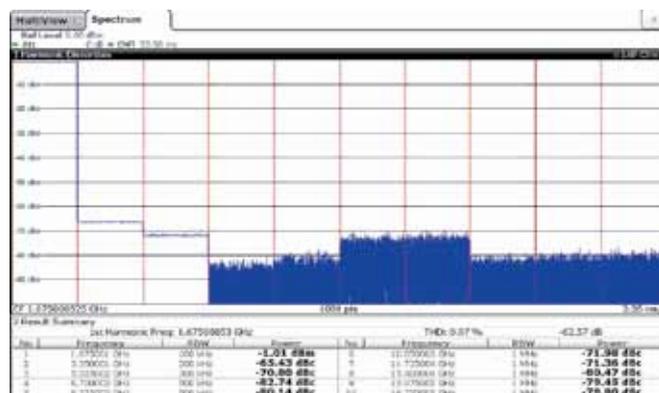


Рис.5. Режим измерения уровня гармонических искажений в анализаторе спектра R&S FSW

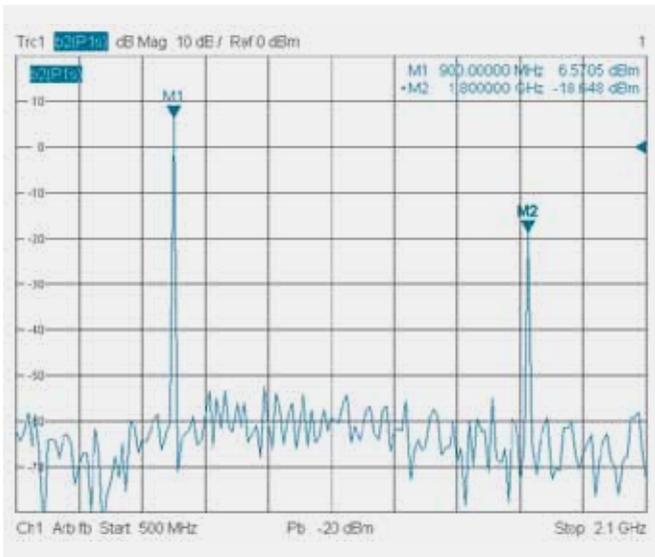


Рис.6. Первая и вторая гармоники сигнала, измеренные при помощи ВАЦ, работающего в режиме анализатора спектра с использованием сигнала воздействия генератора в порту 1

Недостатки перечисленных методов при анализе четырехполюсников – требование к наличию дополнительного источника сигнала фундаментальной частоты f , а также приемника сигналов, работающего в диапазоне частот от f до минимум $2f$. Кроме того, такие измерения, как правило, производятся на одной фундаментальной частоте. Следует отметить, что результаты измерений уровня искажений на одной частоте при наличии внешнего источника или при источнике сигнала в одном из портов можно легко

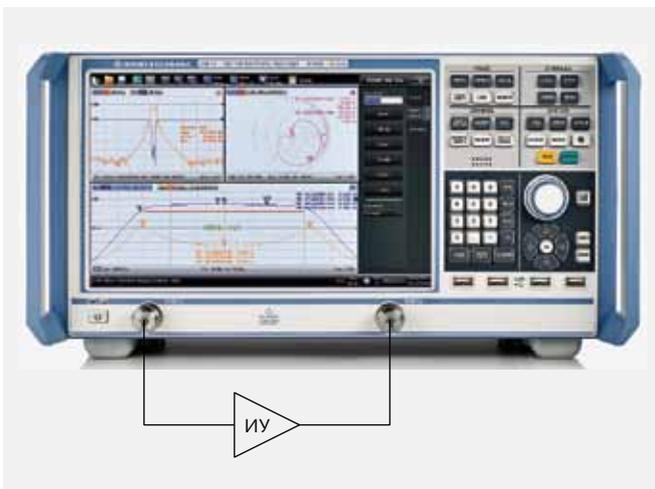


Рис.7. Исходная схема измерений гармонических искажений

получить и с помощью ВАЦ. Пример таких измерений приведен на рис.6.

Однако измерение параметров гармоник в диапазоне частот (или диапазоне уровней сигнала) связано с комплексными настройками генератора и приемника сигналов, включая синхронизацию измерений в каждой точке.

Измерения ГИ удобно производить при помощи векторных анализаторов цепей, уже содержащих в себе синхронизированные источники и приемники сигналов. Для того чтобы измерять сигнал на частотах, кратных частоте основного сигнала (т.е. частотах интересующих нас гармоник), необходимо, чтобы источник ВАЦ и его приемник могли работать на разных частотах. В анализаторах цепей компании Rohde & Schwarz (R&S) такой режим достигается при установке программной опции K4 (опция Frequency conversion – работа с преобразованием частоты).

Измерения ГИ могут быть выполнены независимо от типа развертки: частотная развертка отображает искажения как функцию частоты, развертка по мощности показывает зависимость искажений от мощности сигнала на фиксированной частоте. Кроме того, пользователь может сконфигурировать несколько каналов для того, чтобы одновременно всесторонне исследовать ИУ в зависимости как от частоты, так и мощности входного сигнала.

ИЗМЕРЕНИЯ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИСКАЖЕНИЙ ПРИ ПОМОЩИ ВАЦ

Рассмотрим общую методику измерений ГИ с использованием анализаторов цепей вне зависимости от количества портов ВАЦ.

При измерениях генератор одного из портов (для определенности назовем им порт 1) будет служить источником сигнала фундаментальной частоты f , а приемник другого порта (например, 2-го) будет работать на удвоенной частоте $2 \cdot f$, то есть на частоте второй гармоники. Очевидно, что диапазон фундаментальных частот при этом будет ограничен диапазоном рабочих частот ВАЦ:

$$f_{\min} \leq f \leq \frac{1}{2} f_{\max}, \quad (15)$$

где f_{\min} и f_{\max} – соответственно, минимальная и максимальная частота используемого ВАЦ. Например, для ВАЦ R & S ZVA67 диапазон фундаментальных частот, используемых при измерении второй гармоники, составляет от 10 МГц до 33,5 ГГц, а используя ВАЦ с преобразователями частоты, диапазон фундаментальных частот можно расширить до 55 ГГц.

Для обеспечения безопасной работы приемника ВАЦ следует выбрать уровень (или диапазон уровней)

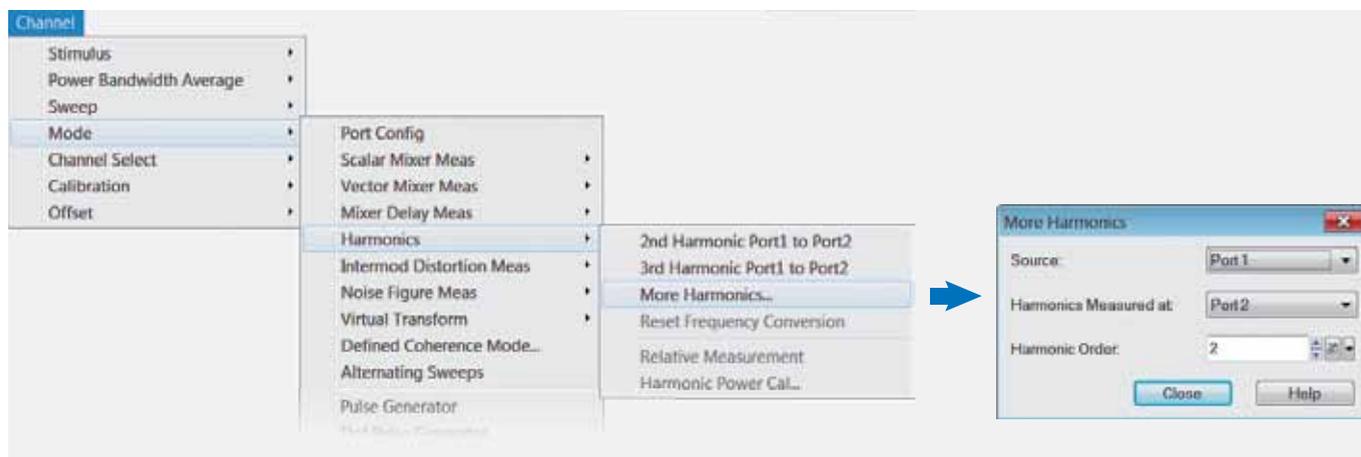


Рис.8. Доступ к меню измерения гармоник и диалоговое окно настроек измерения ГИ в ВАЦ R&S ZVA

мощности сигнала источника порта таким образом, чтобы избежать перегрузки приемника с учетом коэффициента усиления ИУ. Для семейства ВАЦ R&S ZVA насыщение приемников портов происходит в диапазоне уровней мощности от 3 до 15 дБм в зависимости от диапазона частот. При этом максимально допустимый для безопасной работы уровень мощности, который не следует превышать ни при каких условиях, составляет 27 дБм (500 мВт). Поэтому, если ожидаемый коэффициент усиления ИУ составляет, например, 30 дБ, максимальный уровень мощности источника не должен превышать минус 15 дБм.

Для проведения измерений прежде всего следует собрать схему измерений в соответствии с тем, как были определены номера портов (рис.7). После этого можно приступать к измерениям.

После установки режима "по умолчанию" (Preset) в ВАЦ включается режим измерения коэффициента передачи устройства, подключенного между портами 1 и 2 (S_{21}). Сконфигурируем измерительный канал, который будет выполнять измерения ГИ как функцию частоты. Пусть тестируемое устройство работает в диапазоне частот 0,9–2,0 ГГц. Выберем диапазон частот при измерениях 0,9–1,0 ГГц для того, чтобы в диапазон рабочих частот ИУ попали поддиапазоны фундаментальных частот и вторых гармоник.

Для измерения интересующих нас ГИ в меню анализаторов производства компании R&S (при активации опции K4) реализовано управление соответствующим режимом Harmonics. В этом меню содержится прямой доступ к наиболее распространенным видам измерений второй и третьей гармоник, а также доступ к расширенным настройкам, позволяющим определить номера используемых портов и настроить измерения (рис.8).

Выбрав пару портов, между которыми подключено ИУ, и задав порядок измеряемой гармоники, можно незамедлительно получить результаты, например такие, как представлены на рис.9.

Пункт меню Relative Measurement позволяет измерять отношение уровня гармоники к уровню фундаментальной частоты на выходе ИУ, то есть уровень нелинейных искажений (НИ) второго порядка. В этом режиме анализатор создает новую кривую с результатом измерения НИ (рис.10).

В режиме измерений нелинейных искажений ВАЦ производит измерения отраженной волны b_2 в порту приемника и вычитает значения в каждой точке из значения падающей волны a_1 (т.к. измерения проводятся

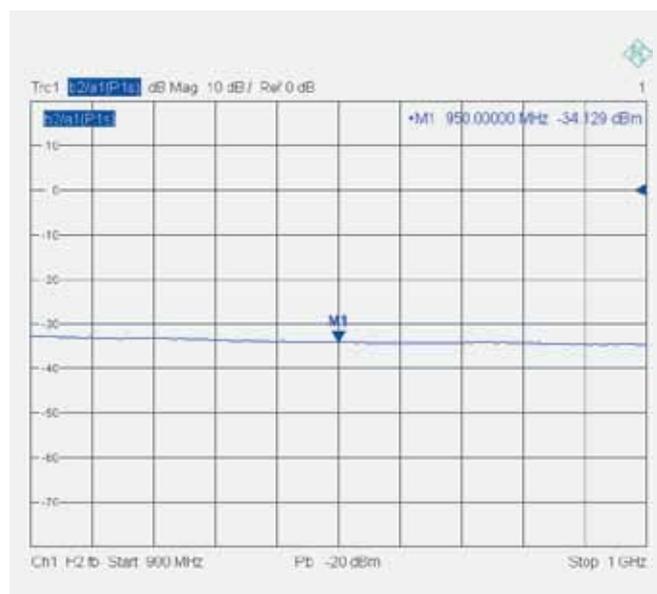


Рис.9. Результат измерения (абсолютного) уровня второй гармоники ИУ

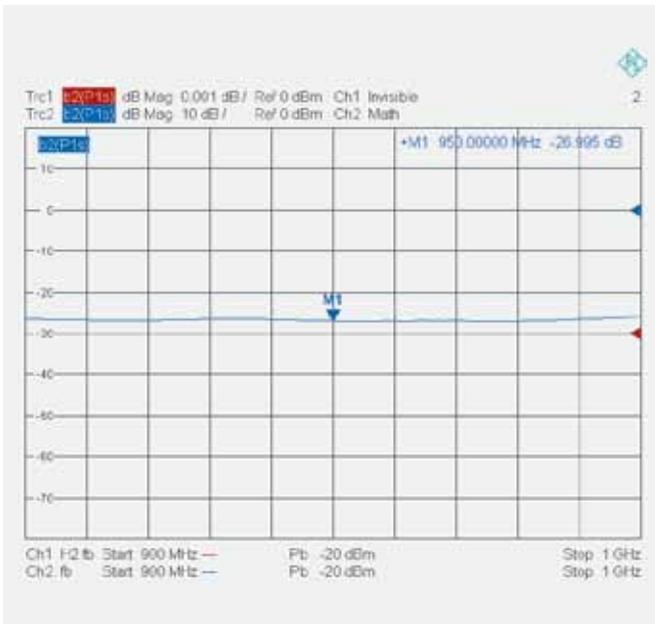


Рис.10. Результат измерений уровня нелинейных искажений при тех же настройках

в логарифмическом масштабе шкал, разность уровней мощности соответствует отношению мощностей в линейном масштабе).

Если сконфигурировать два отдельных измерительных канала (один – с перестройкой по частоте и второй – с перестройкой по мощности), можно одновременно получить результаты измерений, представленные для примера на рис.11.

При необходимости для расчета точки пересечения со второй гармоникой, SH1, следует определить математические функции над кривыми измеренных волновых величин в диалоговом окне User Def Math (математика, определяемая пользователем) ВАЦ, как на рис.12. Поскольку математическая обработка совершается над

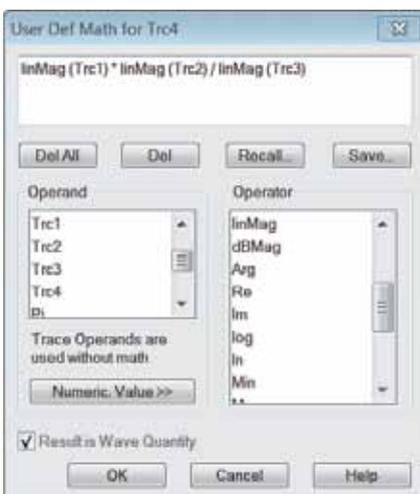


Рис.12. Настройки результата математических операций над кривыми для определения SH1 в ВАЦ R&S ZVA

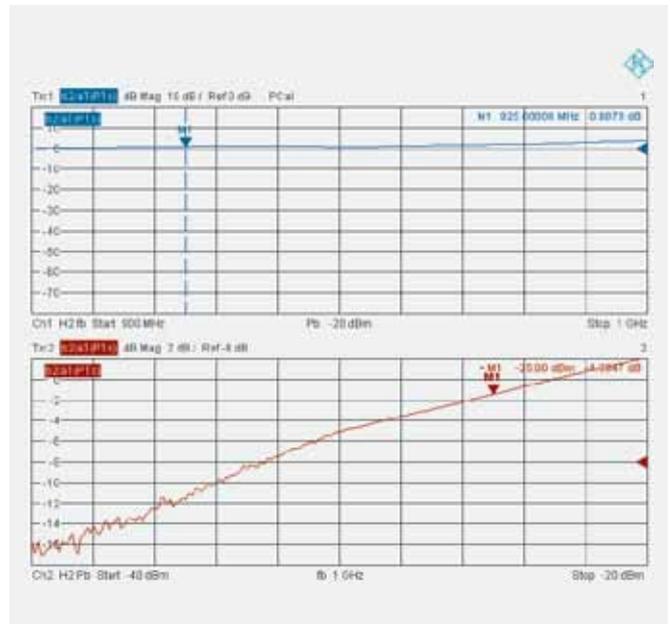


Рис.11. Результат измерения уровня ГИ при одновременном качании частоты и мощности

комплексными линейными значениями, формула (10) должна быть записана через линейные величины:

$$P_{SH1vx} = P_{vx} \cdot \frac{P_{Bvix}}{P_{k2}} = |a_1|^2 \cdot \frac{|b_2|^2}{|b_2(2f)|^2}, \quad (16)$$

где P_{k2} – мощность второй гармоники, f – фундаментальная частота.

Кроме того, точка пересечения SH1 может быть найдена путем построения касательной к графику нелинейных искажений при перестройке по мощности. При этом касательная строится к прямому участку графика, на котором отсутствуют эффекты насыщения (диапазон уровней мощности до минус 30 дБм на рис.11). Дополнительно на эту же диаграмму следует добавить график падающей мощности в порту приемника на фундаментальной частоте ($b_2(f)$). Точка пересечения графика с касательной будет искомым точкой пересечения (как на рис.2).

Продолжение следует.

ЛИТЕРАТУРА

1. Раушер К., Йанссен Ф., Минихольд Р. Основы спектрального анализа / Под ред. Ю. А.Гребенко; пер. с англ. С. М.Смольского. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006.
2. Хибель М. Основы векторного анализа цепей / Под ред. У.Филипп; пер. с англ. С. М.Смольского. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009.