

2. Коротков К. С., Фролов Д. Р., Левченко А. С. Анализ методов измерения истинного сдвига фаз смесителей сверхвысокой частоты // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60. № 8. С. 873—880.

3. IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms. N. Y.: IEEE Press, 1988.

4. Root D. E., Horn J., Betts L., Gillese C., Verspecht J. X-parameters: The new paradigm for measurement, modeling, and design of nonlinear RF and microwave components // Microwave Engineering Europe. 2008. No. 12. P. 16—21.

5. А. с. 1596278 СССР. Способ определения коэффициентов передачи четырёхполюсников с преобразованием частоты / К. С. Коротков // Открытия. Изобретения. 1990. № 9.

6. Пат. 2029966 РФ. Способ определения коэффициентов передачи преобразователей частоты / А. С. Елизаров (Белоруссия) // Изобретения. 1995. № 2.

7. Pat. 6,064,694 USA. Frequency Translating Device Transmission Response System / C. J. Clark, A. A. Moulthrop, M. S. Muha, C. P. Silva, 2000.

8. Novel Method for Vector Mixer Characterization and Mixer Test System Vector Error Correction [Электрон. версия] <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5988-7826EN.pdf> (дата обращения: 20.02.2017).

9. Коротков К. С., Фролов Д. Р. Новый метод измерений комплексных параметров сверхвысокочастотных смесителей // Измерительная техника. 2014. № 6. С. 54—57.

10. Van Moer W., Rolain Y. Determining the Reciprocity of Mixers Through Three-Port Signal Network Analyzer Measurements // IEEE Trans. on Instrum. and Measur. 2007. V. 56. No. 5. P. 2051—2056.

11. Pat. 2012/0295548 A1 USA. System For Characterizing Mixer or Converter Response / J. P. Dunsmore, 2012.

Дата принятия: 21.07.2016.

621.391.832.4:621.317

Новая методика измерения нелинейных искажений аналоговых перемножителей сигналов

А. В. ЗЕНЬКОВИЧ, В. Л. БАЛЛО, В. Б. ДОБРОВОЛЬСКИЙ

Нижегородский государственный технический университет,
Нижний Новгород, Россия, e-mail: avzen@nntu.ru

Экспериментально подтверждены преимущества новой методики измерения нелинейных искажений аналоговых перемножителей сигналов по чувствительности, разрешающей способности, диапазону частот и простоте реализации.

Ключевые слова: нелинейные искажения, аналоговые перемножители.

The new nonlinear distortion measurement technique for analog multipliers is proposed and studied. Improved sensitivity, resolution, frequency band and simplicity of realization are experimentally verified.

Key words: nonlinear distortion, analog multipliers.

Аналоговые перемножители сигналов (АПС) занимают второе место после операционных усилителей по распространённости и разнообразию областей применения. Эти перемножители используют в качестве смесителей, фазовых и синхронных амплитудных детекторов, амплитудных модуляторов различных видов, элементов частотных детекторов и т. д. [1]. Частотный диапазон, в котором применяют АПС, начинается со звуковых частот и включает сверхвысокие частоты. Большое число интегральных микросхем АПС выпускают зарубежные фирмы, в первую очередь Analog Device (США). Характеристики таких микросхем непрерывно улучшаются. Одним из важных параметров АПС является уровень вносимых ими нелинейных искажений. Общепринятым критерием нелинейности на низких и радиочастотах служит коэффициент гармоник K_f или THD (Total Harmonic Distortion). На высоких и сверхвысоких частотах зарубежные изготовители интегральных микросхем широко используют в качестве критерия нелинейности точки пересечения интермоду-

ляции второго и третьего порядков (Second Order and Third Order Intercept). Эти параметры эквивалентны коэффициентам комбинационных искажений, измеряемым с помощью суммы двух входных напряжений с различными частотами и равными амплитудами.

Известная методика измерений нелинейных искажений АПС рассмотрена в [2]. Она основана на работе трёх высокочастотных генераторов и выходного измерительного тракта, состоящего из измерителя коэффициента амплитудной модуляции и низкочастотного анализатора спектра. Основные недостатки данной методики обусловлены использованием измерителя коэффициента амплитудной модуляции. Область применения таких приборов ограничена, поэтому номенклатура и объём их выпуска небольшие. Отечественный измеритель СКЗ-45 имеет минимальный измеряемый уровень входного напряжения 50 мВ. Амплитудные шумы измерителей коэффициента амплитудной модуляции во много раз больше шумов высокочастотных генераторов и анализа-

тора спектра. Амплитудные шумы измерителей ограничивают разрешающую способность измерений — минимальный измеряемый уровень нелинейных искажений проверяемого АПС. Методика не может быть реализована на низких частотах, прибор СКЗ-45 имеет нижнюю рабочую частоту 100 кГц, лучший зарубежный измеритель типа 8902S (Hewlett Packard, США) — 150 кГц. Верхняя рабочая частота прибора СКЗ-45 в режиме измерения коэффициента амплитудной модуляции составляет 500 МГц.

Новая методика измерений нелинейных искажений АПС реализована на основе измерительного устройства, структурная схема которого изображена на рисунке. Согласно данной методике измеряется перекрёстная амплитудная модуляция, что исключает требования к уровню собственных нелинейных искажений выходного измерительного тракта. Этот тракт состоит всего из одного широко распространённого прибора — анализатора спектра.

Измерительное устройство (см. рисунок) работает следующим образом. На АПС от трёх генераторов подаются амплитудно-модулированное U_1 и два гармонических напряжения U_2, U_3 :

$$\begin{aligned} U_1 &= E_1 \sin(1 + m \sin \Omega t) \sin \omega_1 t; \\ U_2 &= E_2 \sin \omega_2 t; U_3 = E_3 \sin \omega_3 t, \end{aligned} \quad (1)$$

где $E_1, E_2, E_3, \omega_1, \omega_2, \omega_3$ — амплитуды и частоты напряжений, соответственно; m — коэффициент амплитудной модуляции; Ω — частота модуляции.

Начальные фазы всех напряжений и амплитудной модуляции не влияют на результат измерения нелинейных искажений и для упрощения записи взяты равными нулю.

В рабочей полосе частот в достаточном для практического применения приближении АПС можно считать безынерционным. Его характеристику можно представить степенным полиномом с ограниченным в виду малости искажений числом членов. При перемножении напряжений U_2, U_3 , т. е. в выходном напряжении перемножителя, учитываются только члены его степенной амплитудной характеристики с чётными степенями [2]. Члены с нечётными степенями, в том числе линейный, можно не принимать во внимание и представить амплитудную характеристику АПС в виде

$$U_{\text{вых}} = \alpha_2 U_{\text{вх}}^2 + \alpha_4 U_{\text{вх}}^4 + \alpha_6 U_{\text{вх}}^6, \quad (2)$$

где $\alpha_2, \alpha_4, \alpha_6$ — постоянные коэффициенты $U_{\text{вх}} = U_1 + U_2 + U_3$.

Нелинейность второго порядка обуславливает идеальное выполнение операции перемножения. В результате нелинейности более высоких порядков — четвёртого и шестого — возникают нелинейные искажения.



Структурная схема измерительного устройства

Для определения нелинейных искажений АПС используются измеряемые анализатором спектра составляющие выходного напряжения с частотами $\omega_2 - \omega_3, \omega_2 - \omega_3 - \Omega, \omega_2 - \omega_3 - 3\Omega$ и соответствующими амплитудами $E_0, E_\Omega, E_{3\Omega}$. Подстановка (1) в (2) позволяет получить следующие выражения для измеряемых амплитуд указанных спектральных составляющих:

$$\begin{aligned} E_0 &= \alpha_2 E_2 E_3 + 3 \alpha_4 E_2^3 E_3 / 2 + 3 \alpha_4 E_2 E_3^3 / 2 + \\ &+ 3 \alpha_4 E_1^2 E_2 E_3 (1 + m^2 / 2) + 45 \alpha_6 E_2^3 E_3^3 / 8 + 15 \alpha_6 E_2^5 E_3 / 8 + \\ &+ 15 \alpha_6 E_2 E_3^5 / 8 + 45 \alpha_6 E_1^2 E_2^3 E_3 (1 + m^2 / 2) / 4 + \\ &+ 45 \alpha_6 E_1^2 E_2 E_3^3 (1 + m^2 / 2) / 4 + 45 \alpha_6 E_1^4 E_2 E_3 (1 + 3m^2 + 3m^4 / 8) / 8; \\ E_\Omega &= 3 \alpha_4 m E_1^2 E_2 E_3 + 45 \alpha_6 m E_1^2 E_2^3 E_3 / 4 + 45 \alpha_6 m E_1^2 E_2 E_3^3 / 4 + \\ &+ 45 \alpha_6 m E_1^4 E_2 E_3 (4 + 3m^2) / 16; \\ E_{3\Omega} &= 45 \alpha_6 E_1^4 E_2 E_3 / 16. \end{aligned}$$

Значения амплитуд E_1, E_2, E_3 и коэффициента m устанавливаются близкими к значениям, используемым в рабочем режиме АПС.

Измерение анализатором спектра амплитуды $E_{3\Omega}$ с частотой

$\omega_2 - \omega_3 - 3\Omega$ позволяет рассчитать $\alpha_6 = 16 E_{3\Omega} / (45 m^3 E_1^4 E_2 E_3)$.

Последующие измерения E_0, E_Ω дают возможность определить α_4 и α_2 :

$$\begin{aligned} \alpha_4 &= E_\Omega / (3 m E_1^2 E_2 E_3) - 15 \alpha_6 E_2^2 / 4 - \\ &- 15 \alpha_6 E_3^2 / 4 - 15 \alpha_6 E_1^2 (4 + 3m^2) / 16; \\ \alpha_2 &= E_0 / (E_2 E_3) - 3 \alpha_4 E_2^2 / 2 - 3 \alpha_4 E_3^2 / 2 - 3 \alpha_4 (1 + m^2 / 2) E_1^2 - \\ &- 45 \alpha_6 E_2^2 E_3^2 / 8 - 15 \alpha_6 E_2^4 / 8 - 15 \alpha_6 E_3^4 / 8 - 45 \alpha_6 E_1^2 E_2^2 (1 + m^2 / 2) / 4 - \\ &- 45 \alpha_6 E_1^2 E_3^2 (1 + m^2 / 2) / 4 - 45 \alpha_6 E_1^4 (1 + 3m^2 + 3m^4 / 8) / 8. \end{aligned}$$

Если нелинейные искажения АПС составляют менее единиц процентов, то при определении коэффициента α_2 влияние нелинейности четвертого α_4 и тем более шестого α_6 порядка можно не учитывать, т. е. с приемлемой погрешностью можно считать $\alpha_2 = E_0 / (E_2 E_3)$.

Анализ требований к уровню нелинейных искажений амплитудной модуляции, сделанный в [2], справедлив и для рассматриваемой методики.

Разрешающая способность измерений — минимальный измеряемый уровень (среднее квадратическое значение) спектральных составляющих с частотами $\omega_2 - \omega_3 - \Omega, \omega_2 - \omega_3 - 3\Omega$, равен тройному результирующему уровню собственного шума измерительного устройства. Определяющим здесь является уровень шума анализатора спектра. По сравнению с ним уровень шума современных генераторов, таких как отечественный Г4-201/1 или E448C (Agilent Technology, США), мал,

его можно не учитывать. Анализатор спектра СК4-56 на частотах 1—60 кГц в полосе 10 Гц имеет абсолютный уровень шума не более 50 нВ, при $U_{вх} = 80$ мВ относительный уровень шума не более $7 \cdot 10^{-7}$. Анализаторы спектра Е4440А и 4396В на частотах 1—1700 МГц в полосе 10 Гц при отстройке более 10 кГц имеют относительный уровень шума $5 \cdot 10^{-6}$ и $7 \cdot 10^{-6}$, соответственно. Уровень шума можно снизить при переходе к полосам 3 и 1 Гц, что связано с увеличением времени измерений.

Рассматриваемая методика измерений нелинейных искажений АПС была проверена экспериментально. Схема измерений соответствовала приведённой на рисунке. Использовались современные синтезированные генераторы: 1 — генератор Г4-201/1 на частоте $f_1 = 282$ МГц с амплитудной модуляцией с коэффициентом $m = 80\%$ и частотой модуляции 10 кГц; 2 — генератор Е4438С с частотой $f_2 = 250$ МГц; 3 — генератор Г4-164 с частотой 249,5 МГц. Анализатором спектра 4396В при полосе 10 Гц и усреднении результатов 16 измерений измеряли уровни спектральных составляющих с частотами $f_2 - f_3 = 500$ кГц, $f_2 - f_3 - F = 490$ кГц и $f_2 - f_3 - 3F = 470$ кГц на выходе АПС — микросхемы AD831 (Analog Device, США).

Измерения проводили в двух режимах при различных уровнях испытательных входных напряжений: $U_1 = 150$ мВ, $U_2 = 150$ мВ, $U_3 = 200$ мВ; $U_1 = 30$ мВ, $U_2 = 26$ мВ, $U_3 = 200$ мВ. Результаты измерений и расчёта коэффициентов α для микросхемы AD831 сведены в таблицу.

В режиме 2 составляющая с частотой $f_2 - f_3 - F = 490$ кГц имеет относительный уровень $10^{-3} \%$, что подтверждает высокую разрешающую способность измерений. По известным значениям коэффициентов амплитудной характеристики могут быть рассчитаны связанные с ними другие критерии нелинейности. Примеры расчёта всех нелинейных характеристик аналогового перемножителя в режиме смесителя приведены в [2].

Данная методика позволяет измерять нелинейные искажения не только в АПС, но и в других устройствах, в которых выполняется операция перемножения сигналов, например в однодиодных, балансных, кольцевых диодных и транзисторных смесителях, балансных и амплитудных модуляторах различных видов.

Результаты измерений и расчёта коэффициентов α

Режим измерений	Амплитуда	Частота составляющих спектра, кГц	Относительный уровень составляющих спектра, % (дБмкВ)	Абсолютный уровень составляющих спектра, В	Коэффициенты амплитудной характеристики α
1	E_0	500	100,0 (100,0)	0,10	$\alpha_2=3,550$
	E_Ω	490	$4,5 \cdot 10^{-5}$ (33,0)	$4,47 \cdot 10^{-5}$	$\alpha_4=0,015$
	$E_{3\Omega}$	470	$7,5 \cdot 10^{-3}$ (19,5)	$9,44 \cdot 10^{-6}$	$\alpha_6=0,114$
2	E_0	500	100,0 (93,2)	$4,56 \cdot 10^{-2}$	$\alpha_2=6,250$
	E_Ω	490	$1,0 \cdot 10^{-3}$ (–7,0)	$4,47 \cdot 10^{-6}$	$\alpha_4=0,014$
	$E_{3\Omega}$	470	$2,2 \cdot 10^{-2}$ (0)	$1,00 \cdot 10^{-6}$	$\alpha_6=29,14$

Таким образом, рассматриваемая методика измерений нелинейных искажений АПС имеет следующие преимущества. Высокая чувствительность и сравнительно малый уровень шумов анализатора спектра обеспечивают измерения в широком диапазоне уровней выходного напряжения перемножителей и более высокую разрешающую способность измерений. Кроме того, использование высокочастотного анализатора спектра вместо измерителя коэффициента амплитудной модуляции и низкочастотного анализатора спектра упрощает измерительное устройство и процедуру измерений и позволяет расширить диапазон частот как в сторону более низких, так и сверхвысоких. Особенности методики обеспечивают высокую технико-экономическую эффективность измерений.

Л и т е р а т у р а

1. Банк М. У. Аналоговые интегральные схемы в радиоаппаратуре. М.: Радио и связь, 1981.
2. Зенькович А. В., Балло В. Л., Добровольский В. Б. Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2012. Вып. 1—2. С. 160—163.
3. Пат. 2457496 РФ. Измеритель нелинейных искажений аналоговых перемножителей сигналов / А. В. Зенькович, В. Л. Балло, В. Б. Добровольский // Изобретения. Полезные модели. 2012. № 21.

Дата принятия: 13.01.2016.