

УДК 621.396.61

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЛИНЕЙНОЙ ЦЕПИ

К. т. н. Б. С. Троицкий  
Одесский национальный политехнический университет  
Украина, г. Одесса

*Предложена методика экспериментального определения комплексных коэффициентов передачи нелинейной цепи, которая позволяет рассчитывать коэффициенты нелинейных искажений широкого класса радиоустройств, работающих с сигналами большого диапазона частот и амплитуд.*

*Ключевые слова: нелинейные цепи, нелинейные искажения.*

В современных устройствах передачи, приёма и обработки сигналов широко применяются нелинейные цепи, выбор схемы и расчёт параметров которых определяется передаточной характеристикой вида:

$$S_{\text{ВЫХ}}(t) = \hat{a}_1[S_{\text{ВХ}}(t)]^1 + \hat{a}_2[S_{\text{ВХ}}(t)]^2 + \hat{a}_3[S_{\text{ВХ}}(t)]^3 + \hat{a}_4[S_{\text{ВХ}}(t)]^4 + \dots + \hat{a}_n[S_{\text{ВХ}}(t)]^n, \quad (1)$$

где  $S_{\text{ВХ}}(t) = U_{\text{ВХ}} \cos(\omega t + \varphi)$ ,  $\hat{a}_1, \hat{a}_2 \dots \hat{a}_n$  – комплексные коэффициенты.

В [1] намечен путь определения комплексных коэффициентов ряда (1). Целью настоящей работы является экспериментальное определение коэффициентов ряда (1) для последующего использования при определении спектрального состава  $S_{\text{ВЫХ}}(t)$ .

Представление связи между выходным  $S_{\text{ВЫХ}}(t)$

$$S_{\text{ВЫХ}}(t) = \sum_{n=1}^N U_n \exp j(n\omega t + \varphi_n) \quad (2)$$

и входным  $S_{\text{ВХ}}(t) = U_{\text{ВХ}} \cos \omega t$  сигналами нелинейной цепи НЦ в виде степенного ряда с комплексными коэффициентами [1, 2, 3] предполагает, что комплексные коэффициенты  $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3 \dots \hat{a}_n$ , характеризующие НЦ, должны быть определены при подведении к её входу гармонического входного сигнала. В этом случае для определения  $\hat{a}_n$  нужно найти амплитуду  $U_n$  и начальную фазу  $\varphi_n$  каждой из гармонических составляющих  $S_{\text{ВЫХ}}$ , после чего отношение  $U_n/U_{\text{ВХ}}$  представит модуль  $\hat{a}_n$ , а  $(\varphi_n = n \varphi_{\text{ВХ}})$  – его аргумент. Для измерений можно применить анализатор спектра (избирательный вольтметр) и фазометр.

Пусть  $N=5$ . Тогда вещественная часть пятого члена ряда (1) равна

$$\operatorname{Re}\{\hat{a}_5[S_{\text{ВХ}}(t)]^5\} = |\hat{a}_5| [U_{\text{ВХ}}^5 [(5 \cos(\omega t + \varphi + \arg \hat{a}_5)/8 + 5 \cos(3\omega t + 3\varphi + \arg \hat{a}_5)/16 + \cos(5\omega t + 5\varphi + \arg \hat{a}_5)/16]]. \quad (3)$$

Измерив амплитуду  $U_5$  и фазу  $\varphi_5$  составляющей  $S_{\text{ВЫХ}}$  с частотой  $5\omega$ , найдём  $|\hat{a}_5| = 16 U_5 / U_{\text{ВХ}}^5$  и  $\arg \hat{a}_5 = \varphi_5 = 5\varphi$ .

Вещественная часть четвёртого члена (1) составляет:

$$\operatorname{Re}\{\hat{a}_4[S_{\text{ВХ}}(t)]^4\} = |\hat{a}_4| [U_{\text{ВХ}}^4 [(0,5 \cos(2\omega t + 2\varphi + \arg \hat{a}_4) + \cos(4\omega t + 4\varphi + \arg \hat{a}_4)/8]]. \quad (4)$$

Измерив  $U_4$  и фазу  $\varphi_4$  составляющей  $S_{\text{ВЫХ}}$  с частотой  $4\omega$ , найдём  $|\hat{a}_4| = 8 U_4 / U_{\text{ВХ}}^4$  и  $\arg \hat{a}_4 = \varphi_4 = 4\varphi$ .

В формировании амплитуды и фазы составляющей  $S_{\text{ВЫХ}}$  с частотой  $3\omega$  принимает участие третий и пятый член (1), поэтому соответствующее соотношение для третьей гармоники  $S_{\text{ВХ}}$  примет вид:

$$U_3 \cos(3\omega t + \varphi_3) = |\hat{a}_3| [U_{\text{ВХ}}^3 [0,25 \cos(3\omega t + 3\varphi + \arg \hat{a}_3) + 5 |\hat{a}_5| U_{\text{ВХ}}^5 \cos(3\omega t + 3\varphi + \arg \hat{a}_5)/16]]. \quad (5)$$

Найдя экспериментальным путем  $U_3$  и  $\varphi_3$ , можно определить  $|\hat{a}_3|$  и  $\arg \hat{a}_3$ , решив систему двух уравнений:

$$U_3 = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 \cdot A_2 \cos(\psi_2 - \psi_1)}, \quad (6)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_3 = (A_1 \sin \psi_1 + A_2 \sin \psi_2) / (A_1 \cos \psi_1 + A_2 \cos \psi_2), \quad (7)$$

в которых  $A_1 = 0,25 |\dot{a}_3| [U_{\text{ВХ}}]^3$ ,  $A_2 = 5 |\dot{a}_5| [U_{\text{ВХ}}]^5 / 16$ ,  $\psi_1 = 3\varphi + \operatorname{arg} \dot{a}_3$ ,  $\psi_2 = 3\varphi + \operatorname{arg} \dot{a}_5$ .

Аналогично изложенному запишем соотношения, определяющие вторую и первую гармонические составляющие  $S_{\text{ВХ}}$ :

$$U_2 \cos(2\omega t + \varphi_2) = |\dot{a}_2| [U_{\text{ВХ}}]^2 0,5 \cos(2\omega t + 2\varphi + \operatorname{arg} \dot{a}_2) + 0,5 |\dot{a}_4| [U_{\text{ВХ}}]^4 0,5 \cos(2\omega t + 2\varphi + \operatorname{arg} \dot{a}_4), \quad (8)$$

$$U_1 \cos(\omega t + \varphi_1) = |\dot{a}_1| [U_{\text{ВХ}}] \cos(\omega t + \varphi + \operatorname{arg} \dot{a}_1) + 0,75 |\dot{a}_3| [U_{\text{ВХ}}]^3 \cos(\omega t + \varphi + \operatorname{arg} \dot{a}_3) + 5 |\dot{a}_5| [U_{\text{ВХ}}]^5 \cos(\omega t + \varphi + \operatorname{arg} \dot{a}_5) / 8, \quad (9)$$

после чего, измерив на выходе НЦ  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ , можно определить  $|\dot{a}_2|$  и  $\operatorname{arg} \dot{a}_2$ ,  $|\dot{a}_1|$  и  $\operatorname{arg} \dot{a}_1$ .

В случае безинерционной НЦ  $\dot{a}_n$  являются вещественными ( $\dot{a}_n = \dot{a}_1$ ) и не зависят от частоты входного сигнала; их величины могут быть определены экспериментально на основе предложенного алгоритма или путём решения системы  $n$  линейных уравнений, составленных согласно методу выбранных точек [2] для всей области возможных значений аргумента передаточной характеристики НЦ. В последнем случае  $\dot{a}_n$  инвариантны и к амплитуде  $S_{\text{ВХ}}$ , что позволяет определить коэффициент нелинейных искажений устройства (например, усилителя).

Если  $S_{\text{ВХ}}$  состоит из суммы нескольких гармонических колебаний с одинаковыми амплитудами и близкими частотами, то  $S_{\text{ВЫХ}}$  кроме кратных гармоник содержит также и колебания комбинационных частот. Определив в спектре  $S_{\text{ВЫХ}}$  интересующие сигналы, можно найти для них коэффициенты  $|\dot{a}_n|$  описанным способом. В радиоприёмных устройствах, в устройствах многоканальной и радиорелейной связи нелинейные искажения избирательных усилителей оценивают коэффициентами интермодуляционных искажений, которые характеризуют отношение амплитуд гармоник с частотами  $2\omega_2 - \omega_1$ ,  $3\omega_2 - 2\omega_1$  и т. д. к амплитуде выходного колебания с частотой сигнала  $\omega_1$  ( $\omega_2 = \omega_1 \pm \Delta\omega$  – частота помехи,  $\Delta\omega$  – не превышает половину полосы пропускания). Поэтому коэффициенты  $\dot{a}_n$ , найденные описанным способом, практически не отличаются от величин, соответствующих частотам  $2\omega_2 - \omega_1$ ,  $3\omega_2 - 2\omega_1$  и т. д.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Троицкий Б. С., Домбровский К. М. Экспериментальное определение комплексных параметров нелинейной цепи // Труды 6 МНПК «СИЭТ». — Украина, г. Одесса. — 2005 г. — С. 65.
2. Богданович Б. М. Радиоприёмные устройства с большим динамическим диапазоном. — Москва: Радио и связь. — 1984.
3. Троицкий Б. С. Анализ нелинейных усилителей с обратной связью на основе обращения степенных рядов // Радиотехника. — 1988 г. — № 7.

B. S. Troitsky

#### Experimental method for obtaining the transfer-function coefficient of nonlinear circuits

The paper describes an experimental method allowing one to obtain transfer-function coefficients of nonlinear circuits. This method may be used for calculation of nonlinear distortion factor of different devices operating with signals with high amplitudes and wide band frequencies.

Keywords: *nonlinear circuits, nonlinear distortions.*