

---

---

# ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

---

---

УДК 621.396:681.323

С. И. ЗИАТДИНОВ

## ОЦЕНКА НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ СИГНАЛА, ВНОСИМЫХ ЭЛЕКТРОННЫМ УСИЛИТЕЛЕМ

Исследуются нелинейные искажения сигнала, вносимые электронным усилителем. Приведены результаты расчетов коэффициента нелинейных искажений для гармонического входного сигнала. Рассмотрено влияние положения рабочей точки на уровень нелинейных искажений при заданной вольт-амперной характеристике транзистора.

*Ключевые слова:* усиление, рабочая точка, нелинейность, искажения.

При разработке электронных усилителей необходимо решать задачу обеспечения минимальных нелинейных искажений усиливаемых сигналов.

Причиной нелинейных искажений сигнала является нелинейная вольт-амперная характеристика (ВАХ) активного элемента (транзистора) усилителя. При этом даже при выборе рабочей точки транзистора в середине линейного участка ВАХ (режима класса А) при большом уровне сигнала неизбежно возникают нелинейные искажения.

В существующей практике оценка нелинейных искажений осуществляется по уровню паразитных гармоник в выходном сигнале усилителя. При этом качество усилителя определяется коэффициентом нелинейных искажений

$$K_{н.и} = \sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2 / U_1^2},$$

где  $U_1$  — амплитуда первой гармоники выходного сигнала усилителя;  $U_i, i=2, 3, 4, \dots$  — амплитуды паразитных гармоник.

Принято считать, что для усилителя первого класса уровень паразитных гармоник не должен превышать 5 %. Вместе с тем измерение амплитуды паразитных гармоник является достаточно сложной задачей. Объективным критерием нелинейных искажений является степень отличия форм входного и выходного сигналов усилителя.

Введем в рассмотрение коэффициент нелинейных искажений

$$K_{н.и} = \sqrt{1 - R_{12}(0)}, \quad (1)$$

где  $R_{12}(0)$  — коэффициент взаимной корреляции входного и выходного сигналов усилителя при отсутствии временного сдвига; коэффициент  $R_{12}(0)$  определяется как

$$R_{12}(0) = \frac{B_{12}(0)}{\sigma_{вх} \sigma_{вых}}, \quad (2)$$

где  $B_{12}(0)$  — взаимная корреляционная функция входного и выходного сигналов при нулевом временном сдвиге;  $\sigma_{вх}$ ,  $\sigma_{вых}$  — среднеквадратические значения входного и выходного сигналов соответственно.

На рис. 1 показана зависимость базового тока транзистора ( $I_{\bar{6}}$ ) от входного напряжения между базой и эмиттером ( $U_{\bar{6}-\bar{3}}$ ). Значения  $I_{\bar{6}0}$  и  $U_{\bar{6}-\bar{3}0}$  определяют рабочую точку транзистора. Для обеспечения линейного режима работы транзистора рабочая точка выбирается в середине линейного участка ВАХ. Относительно рабочей точки действует входной сигнал  $u_{вх}(t)$ , изменяя ток базы  $i_{\bar{6}}(t)$  транзистора.

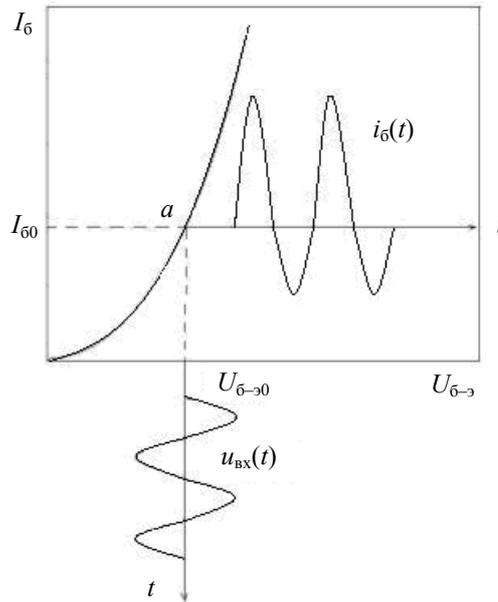


Рис. 1

Рассмотрим с общих позиций вопрос оценки нелинейных искажений с помощью коэффициента (1). Пусть ВАХ транзистора является известной функцией  $y(x)$  входного сигнала  $x(t)$ , имеющего нулевой средний уровень и действующего относительно рабочей точки  $a$ .

Разложим функцию  $y(x)$  в окрестности точки  $a$  в степенной ряд Маклорена [см. лит.]:

$$y(x) = y(a) + \frac{x}{1} y'(a) + \frac{x^2}{1 \cdot 2} y''(a) + \dots + \frac{x^n}{n!} y^{(n)}(a) + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} y^{(n)}(a) \frac{x^n}{n!}, \quad (3)$$

где  $y^{(n)}(a)$  —  $n$ -я производная ВАХ в рабочей точке.

Тогда выражение для взаимной корреляционной функции  $B_{12}(0)$  в соотношении (2) примет вид

$$B_{12}(0) = \overline{x(t) \left[ y(t, a) - \overline{y(t, a)} \right]} = \sum_{n=1}^{\infty} y^{(n)}(a) \frac{\overline{x^{n+1}(t)}}{n!}, \quad (4)$$

где черта сверху означает статистическое усреднение.

При этом среднеквадратическое значение функции  $y(t)$  будет определяться выражением

$$\sigma_y = \sqrt{\overline{\left[ \sum_{n=1}^{\infty} y^{(n)}(a) \frac{x^n(t) - \overline{x^n(t)}}{n!} \right]^2}} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} y^{(n)}(a) y^{(m)}(a) \frac{\overline{x^{n+m}(t) - x^n(t)x^m(t)}}{n!m!}}. \quad (5)$$

С учетом соотношений (4) и (5) формула (2) может быть представлена следующим образом:

$$R_{12}(0) = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} y^{(n)}(a) \frac{\overline{x^{n+1}(t)}}{n!}}{\sigma_x \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} y^{(n)}(a) y^{(m)}(a) \frac{\overline{x^{n+m}(t) - x^n(t)x^m(t)}}{n!m!} \right]^{1/2}}. \quad (6)$$

Малые значения величины  $1/n!$  при  $n > 5$  позволяют в выражении (6) ограничиться небольшим числом членов ряда.

На практике нелинейные искажения оцениваются при гармоническом входном сигнале  $x(t) = X \sin \omega t$ , где  $X$  и  $\omega$  — амплитуда и круговая частота сигнала. В этом случае после несложных, но громоздких выкладок можно показать, что для нечетных степеней сигнала  $x^{2k+1}(t)$  среднее значение по времени  $\overline{x^{2k+1}(t)} = 0$ , где  $k = 0, 1, 2, \dots$ , а двойная черта сверху означает временное усреднение. При этом для четных степеней сигнала  $x^{2k}(t)$  нетрудно получить

$$\overline{x^2(t)} = \frac{X^2}{2}; \quad \overline{x^4(t)} = \frac{3X^4}{8}; \quad \overline{x^6(t)} = \frac{5X^6}{16}; \quad \overline{x^8(t)} = \frac{35X^8}{128} \quad (7)$$

и т. д., общей закономерности в этом случае не наблюдается.

Полученные соотношения (1), (6) и (7) позволяют исследовать нелинейные искажения сигнала при различном положении рабочей точки и характере нелинейности ВАХ транзистора.

Рассмотрим ряд частных случаев. Пусть рабочая точка определяется значениями  $a = 1$  и  $y(a) = 0,85$ , а ВАХ транзистора содержит учитываемые первую и вторую производные  $y'(a) = 1$ ,  $y''(a) = 0,5$ . Положим амплитуду входного сигнала  $X = 0,2$ . При этом из соотношения (3) следует, что ВАХ транзистора и его ВАХ относительно рабочей точки имеют соответственно вид

$$y^*(x^*) = 0,1 + 0,5x^* + 0,25(x^*)^2, \quad y(x) = x + 0,25x^2. \quad (8)$$

График данных функций приведен на рис. 2.

В результате соотношение (6) принимает следующий вид:

$$R_{12}(0) = \frac{\overline{x^2(t)}}{\sigma_x \left\{ \overline{x^2(t)} + 0,0625 \left[ \overline{x^4(t)} - \left[ \overline{x^2(t)} \right]^2 \right] \right\}^{1/2}}.$$

При этом для ранее принятых значений параметров сигнала коэффициент нелинейных искажений  $K_{н.и} = 1,8\%$ .

Рассмотрим влияние положения рабочей точки на уровень нелинейных искажений при ранее заданной ВАХ транзистора. Для этого найдем первую и вторую производные от функции (8):

$$\left[ y^*(x^*) \right]' = 0,5 + 0,5x^*; \quad \left[ y^*(x^*) \right]'' = 0,5.$$

Подставим в данное выражение  $x^* = a$ . Тогда в рабочей точке ВАХ  $y'(a) = 0,5 + 0,5a$ ,  $y''(a) = 0,5$ . При  $a = 1$  получим  $y'(1) = 1$ ,  $y''(1) = 0,5$ , что соответствует ранее рассмотренному случаю.

В результате выражение для относительной ВАХ принимает вид

$$y(x) = (0,5 + 0,5a)x + 0,25x^2.$$

При этом можно записать следующее соотношение для коэффициента взаимной корреляции (6):

$$R_{12}(0) = \frac{(0,5 + 0,5a) \overline{x^2(t)}}{\sigma_x \left\{ (0,5 + 0,5a)^2 \overline{x^2(t)} + 0,0625 \left\{ \overline{x^4(t)} - \left[ \overline{x^2(t)} \right]^2 \right\} \right\}^{1/2}}.$$

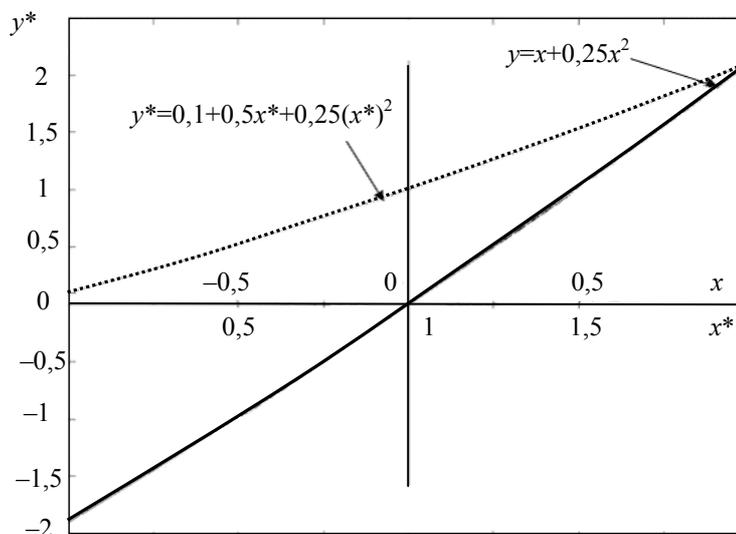


Рис. 2

Ниже приведены результаты расчетов коэффициента нелинейных искажений для различных значений параметра  $a$  (положения рабочей точки на ВАХ транзистора) и ранее принятых значений параметров сигнала.

$a$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
$K_{н.и}, \%$	3,0	2,5	2,2	2,0	1,8	1,6

Предложенная методика исследований нелинейных искажений может быть применена для сигнала произвольной формы и вольт-амперной характеристики транзистора.

### ЛИТЕРАТУРА

Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления. М.: Наука, 1965. Т. 2. С. 310.

#### Сведения об авторе

**Сергей Ильич Зиятдинов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра информационно-сетевых технологий; E-mail: kaf.53@GUAP.ru

Рекомендована кафедрой  
информационно-сетевых технологий

Поступила в редакцию  
21.03.08 г.