

## ИЗМЕРЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ИСКАЖЕНИЙ УСИЛИТЕЛЯ

М. С. РОЙТМАН

(Представлена научным семинаром факультета автоматики и вычислительной техники)

Измерение нелинейных искажений порядка 0,05% и особенно меньшие представляют значительные трудности. Выпускаемый отечественной промышленностью измеритель нелинейных искажений С6-1 для контроля указанных величин непригоден. В то же время представляется возможным, используя аппаратуру, имеющуюся практически в любой лаборатории, сравнительно просто определить нелинейные искажения усилителя, даже если они не превышают 0,01%.

Эта возможность базируется на том, что фазовый сдвиг  $\varphi$  и частотные искажения  $\frac{\Delta K}{K}(\omega)$  измерительного усилителя в полосе рабочих частот обычно не превышают  $n\pi \pm 10^\circ$  и  $\pm 3\%$ . Рассмотрим вначале

усилитель с фазовым сдвигом  $|\varphi| \leq 10^\circ$ , т. е. усилитель с  $n$ -четным. К таким усилителям относятся все многокаскадные усилители с последовательной обратной связью по напряжению, т. е. наиболее многочисленная группа измерительных усилителей. Включим на вход усилителя 2 четырехполюсник 1 с коэффициентом пере-

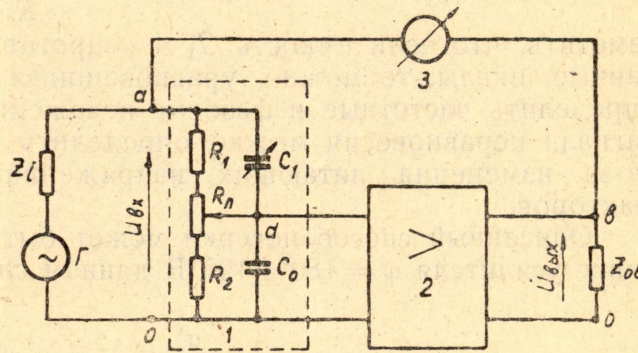


Рис. 1.

дачи  $\frac{1}{Ke^{j\varphi}}$  (рис. 1). Если на вход четырехполюсника 1 подать чисто синусоидальное напряжение с генератора  $\Gamma$  и включить измерительный прибор 3 (милливольтметр или осциллограф) между точками АВ, то его показания будут равны

$$U = \left( U \frac{1}{Ke^{j\varphi}} \cdot Ke^{j\varphi} + \sum_{n=2}^m U_{\text{пу}} e^{j\varphi n} + U_{\text{ш}} + U_{\text{ф}} \right) = \sum_{n=2}^m U_{\text{пу}} e^{j\varphi n} + U_{\text{ш}} + U_{\text{ф}},$$

где  $\sum_{n=2}^m U_{\text{пу}} e^{j\varphi n}$  — сумма напряжения гармоник, определяемая нелиней-

ными искажениями усилителя;  $U_{ш}$  — напряжение шумов;  $U_{ф}$  — напряжение фона. Обычно

$$\sum_{n=2}^m U_{ny} e^{j\varphi_n} \gg U_{ш} + U_{ф}$$

и нелинейные искажения легко определить, взяв отношение напряжения, показываемого прибором 3 к напряжению на выходе генератора  $\Gamma$ . Если же указанное неравенство не выполняется, то примерное разделение напряжений проще всего получить по кривой напряжения на экране осциллографа.

Итак, для измерения нелинейных искажений усилителя 2 необходимо включить вспомогательный делитель напряжения 1 и регулировкой его коэффициента передачи добиться минимального показания прибора 3. По этим показаниям и можно судить о нелинейных искажениях усилителя.

Фактически схема измерения нелинейных искажений представляет собой компенсационную схему по основной гармонике. Поскольку  $|\varphi| < 10^\circ$ , то возможно уравнивание схемы, близкое к разделному. При проверке усилителя в области верхних частот переменную емкость  $C_1$  следует подключить к точкам  $AD$  (рис. 1). Регулировка  $C_1$  позволяет менять фазовый сдвиг делителя по закону  $\varphi \approx \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times \omega(R_1 C_1 - R_2 C_0)$ , а переменного сопротивления  $R_{п}$  — модуль коэффициента передачи.

Регулировка фазы делителя приводит к изменению модуля коэффициента передачи на величину  $\delta \approx \frac{1}{2} \varphi^2$ . При проверке усилителя в области нижних частот емкость  $C_1$  следует подключить к точкам  $DO$  и величина фазового сдвига будет  $\varphi \approx \frac{R_2}{R_1 + R_2} \omega R_2 (C_1 + C_0)$ . Легко заметить, что если емкость  $C_1$  и сопротивление  $R_{п}$  имеют градуированные шкалы, то можно, уравнивая схему на каждой частоте, определить частотные и фазовые искажения усилителя. По изменению сигнала неравновесия можно определить и нестабильность усилителя из-за изменения питающих напряжений, температуры или других факторов.

Описанный способ проверки может быть реализован, если фазовый сдвиг усилителя  $\varphi = 180^\circ \pm 10^\circ$ . В данном случае для проверки усилителя

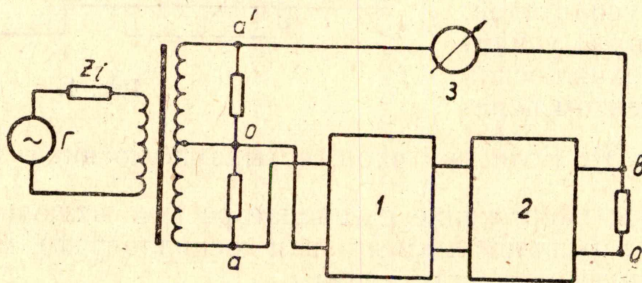


Рис. 2.

требуется, чтобы источник сигнала имел симметричный выход со средней точки и прибор 3 подключался не к точке  $A$ , а к выходу генератора  $A$  (рис. 2).

Все вышеуказанное справедливо в том случае, если напряжение генератора является чисто синусоидальным. Наличие гармонических составляющих может существенно увеличить погрешность поверки измерительного усилителя.

Целесообразно рассмотреть влияние гармонических составляющих в напряжении генератора на погрешность определения нелинейных искажений усилителя.

Примем  $U_{\text{вх}}(t) = \sum_{n=1}^m U_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$  и общий коэффициент передачи четырехполюсника 1 и усилителя 2 на данной частоте равным  $\dot{D}(\omega)\dot{K}(\omega) = 1$ . Тогда напряжение между точками  $A - B$

$$U_{\text{вх}}(t) = \sum_{n=2}^m U_n \sin(n\omega t + \varphi_n) - \sum_{n=2}^m U_n D_n K_n \cdot \sin(n\omega t + \varphi_n + \varphi_{\text{уп}} - \varphi_{\text{дп}}) + \sum_{n=2}^m U_{\text{пу}} \sin(n\omega t + \varphi_{\text{пу}_2}) + U_{\text{ш}} + U_{\text{ф}}, \quad (1)$$

где  $\varphi_{\text{уп}}$  — фазовый сдвиг усилителя для  $n$ -ой гармоники;

$\varphi_{\text{дп}}$  — фазовый сдвиг делителя для  $n$ -ой гармоники.

Поскольку фазовые искажения минимально-фазовых цепей выражены более ярко, чем частотные, то (1) можно упростить.

$$U_{\text{вых}}(t) \approx \sum_{n=2}^m U_{\text{пу}} \sin(n\omega t + \varphi_{\text{пу}_2}) + \sum_{n=2}^m U_n (\varphi_{\text{дп}} - \varphi_{\text{уп}}) \cdot \cos(n\omega t + \varphi) + U_{\text{ш}} + U_{\text{ф}}. \quad (2)$$

Первый член (2) является полезным «продуктом», второй член обусловлен наличием гармоник в напряжении генератора. Коэффициент соответствующей гармоники тем меньше, чем выше ее порядковый номер. Поэтому практически следует учитывать только 2-ю и 3-ю гармоники. В случае, когда фазовые искажения усилителя в полосе рабочих частот равны  $\pm 10^\circ$ , то максимальные погрешности равны:

$$\delta_{\text{н}(2f)} \approx \frac{U_2}{U_1} \cdot \frac{1}{4} \quad (3)$$

и

$$\delta_{\text{н}(3f)} \approx \frac{U_3}{U_1} \cdot \frac{1}{2}. \quad (4)$$

Следует иметь в виду, что эти погрешности имеют место, только на краях рабочего диапазона, где фазовые сдвиги максимальны. При фазовых сдвигах меньше  $2^\circ$

$$\delta_{\text{н}(2f)} < \frac{U_2}{U_1} \cdot \frac{1}{20} \quad \text{и} \quad \delta_{\text{н}(3f)} < \frac{U_3}{U_1} \cdot \frac{1}{10}.$$

Особо отметим, что чем более высококачественным является усилитель, тем меньше в полосе рабочих частот его фазовые сдвиги и тем с меньшей погрешностью можно контролировать его нелинейные искажения.

В заключение рассмотрим еще один вариант измерения нелинейных искажений усилителей с  $\varphi \approx 180^\circ$ . Достоинством этого варианта является то, что отпадает необходимость в применении генератора с симметричным выходом. Напряжение с выхода генератора  $\Gamma$  через делитель 1 подается на усилитель 2 (рис. 3). Между входом делителя (точка  $a$ ) и выходом усилителя (точка  $b$ ) включаются последовательно два примерно одинаковых активных сопротивления  $Z_{\text{ас}}$  и  $Z_{\text{вс}}$ . Между точкой  $C$  и

землей (точка  $O$ ) включается высокочувствительный измерительный прибор 3. Основная гармоника напряжения  $U_{co}(t)$  будет равна нулю, если выполняется условие

$$Ke^{j\varphi_y} = \frac{Z_{вс} + Z_{ов}}{De^{-j\varphi_d}(Z_{ас} + Z_{эк})} \approx \frac{1}{De^{-j\varphi_d}} \cdot \frac{Z_{вс}}{Z_{ос}} \cdot \left(1 + \frac{Z_{ов}}{Z_{вс}} - \frac{Z_{эк}}{Z_{ас}}\right),$$

где

$$Z_{эк} = \frac{Z_i Z_{оа}}{Z_i + Z_{оа}}.$$

Уравновешивание схемы осуществляется регулировкой делителя 1 или  $Z_{вс}$  или  $Z_{ас}$ . Зная параметры делителя и относительные величины со-

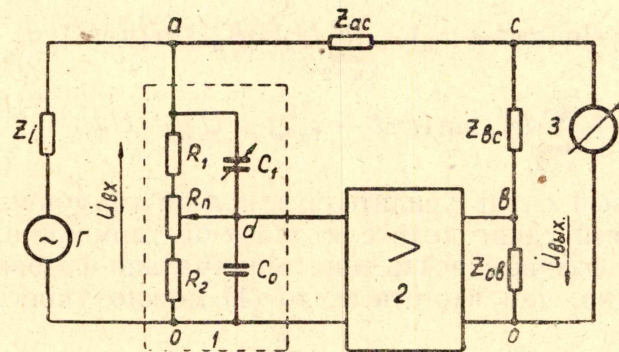


Рис. 3.

противлений, можно легко определить коэффициент передачи усилителя, его амплитудно- и фазочастотные характеристики. Когда схема уравновешена по первой гармонике, тогда по напряжению  $U_{co}(t)$  можно найти нелинейные искажения усилителя.

$$K_f \approx \frac{U_{co}(t)}{U_{оа}} \cdot \frac{Z_{эк} + Z_{ас} + Z_{вс} + Z_{ов}}{Z_{ас} + Z_{эк}} \approx 2 \frac{U_{co}(t)}{U_{оа}}.$$

В заключение еще раз отметим, что вышеописанными способами сравнительно легко можно с высокой точностью измерить наряду с нелинейными искажениями почти все остальные характеристики усилителя — частотные и фазовые искажения, нестабильности коэффициента передачи.