УДК 681.2.08

В. М. ЕФИМОВ, С. А. ТИМОХИН

(Новосибирск)

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОШИБКИ ФАЗОМЕТРА С ПОСТОЯННЫМ ВРЕМЕНЕМ ИЗМЕРЕНИЯ

В работе определяются ошибки фазометров с постоянным временем измерения, обусловленные некратностью времени измерения периоду сигнала и квантованием временных интервалов.

Измерение фазы фазометром с постоянным измерительным временем θ является частным случаем определения среднего значения периодического сигнала с периодом T и случайной начальной «фазой» μ

$$x(t+\mu) = \sum_{-\infty}^{\infty} c_n \exp\left\{in\frac{2\pi}{T}(t+\mu)\right\} \tag{1}$$

путем его интегрирования с весовой функцией $h(t)$ на отрезке времени $[-0{,}5\theta;\ 0{,}5\theta]$

$$z = \int_{-0,5\theta}^{0,5\theta} x(t+\mu)\,h(t)\,dt. \tag{2}$$

Как следует из (1) и (2), если

$$\int_{-0,5\theta}^{0,5\theta} h(t)\,dt = 1,$$

то ошибка в измерении среднего, т. е. коэффициента c_0,

$$\varepsilon = z - c_0 = \sum_{n\neq 0} c_n\tilde{h}\left(n\frac{2\pi}{T}\right)\exp\left\{in\frac{2\pi}{T}\mu\right\},$$

где $\tilde{h}(\lambda)$ — спектр функции $h(t)$.

Среднее (по начальной «фазе» μ) значение ошибки и ее квадрата определяется очевидными соотношениями:

$$\bar{\varepsilon}_\mu = \sum_{n\neq 0} c_n\tilde{h}\left(n\frac{2\pi}{T}\right)\tilde{\varphi}\left(n\frac{2\pi}{T}\right);$$

$$\overline{\varepsilon_\mu^2} = \sum_{n\neq 0}\sum_{m\neq 0} c_n c_m \tilde{h}\left(n\frac{2\pi}{T}\right)\tilde{h}\left(m\frac{2\pi}{T}\right)\tilde{\varphi}\left((n+m)\frac{2\pi}{T}\right),$$

где $\tilde{\varphi}(\lambda)$ — характеристическая функция μ.

Если исходить из естественного предположения о равномерном распределении μ на периоде сигнала T, то

$$\bar{\varepsilon}_\mu = 0;$$

$$\overline{\varepsilon_\mu^2} = 2\sum_{n=1}^{\infty} |c_n|^2 \left|\tilde{h}\left(n\frac{2\pi}{T}\right)\right|^2, \tag{3}$$

т. е. ошибка определяется, как справедливо отмечено в *, спектром весовой функции. Соотношение (3) будет исходным при анализе методических ошибок аналогового и цифрового вариантов фазометра с постоянным временем измерения.

---

* Л. Т. Смирнов. Исследование низкочастотной погрешности измерения цифровых фазометров.— Автометрия, 1969, № 1.

Аналоговый фазометр. Сигнал, поступающий на вход фазометра, представляет собой периодическую последовательность прямоугольных импульсов шириной τ и единичной высотой. Поэтому

$$c_n = \frac{1}{n\pi} \sin n\pi \frac{\tau}{T}$$

и

$$\overline{\varepsilon_\mu^2} = \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \sin^2 n\pi \frac{\tau}{T} \left| \tilde{h}\left(n\frac{2\pi}{T}\right)\right|^2.$$

Положим далее, что распределение измеряемой величины $c_0 = r/T$ одинаково для всех T. Тогда

$$\overline{\varepsilon_{\mu,c_0}^2} = \frac{1}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} (1 - \mathrm{Re}\, \tilde{\psi}(2\pi n)) \left| \tilde{h}\left(n\frac{2\pi}{T}\right)\right|^2, \qquad (4)$$

где $\mathrm{Re}\tilde{\psi}(\lambda)$ — действительная часть характеристической функции величины c_0. Из (4) следует, что если частота сигнала $\omega = 2\pi/T$ известна, то при $\theta > T$ можно добиться равенства нулю дисперсии ошибки, выбрав весовую функцию фазометра $h(t)$ таким образом, чтобы ее спектр $h(\lambda)$ обращался в нуль в точках $\lambda = n\omega$. Для этого, например, достаточно, чтобы $h(t)$ была постоянна на отрезке, равном периоду сигнала, и обращалась в нуль при других t.

На практике обычно используется весовая функция $h(t) = 1/\theta$. При этом

$$\overline{\varepsilon_{\mu,c_0}^2} = \frac{1}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} (1 - \mathrm{Re}\, \tilde{\psi}(2\pi n)) \left(\frac{\sin 0,5\, n\omega\theta}{0,5\, n\omega\theta}\right)^2. \qquad (5)$$

Если измеряемая величина c_0 распределена равномерно на отрезке [0,1], то

$$\overline{\varepsilon_{\mu,c_0}^2} = \frac{1}{6} \left(\frac{\alpha(1-\alpha)}{m+\alpha}\right)^2, \qquad (6)$$

где $m = \left[\frac{\theta}{T}\right]$ — целая часть отношения $\frac{\theta}{T}$; $\alpha = \frac{\theta}{T} - \left[\frac{\theta}{T}\right]$.

Из (6) следует, что

$$\overline{\varepsilon_{\mu,c_0}^2} \leqslant \frac{1}{96m(m+1)} [1 - 2(1 + 2m - 2\sqrt{m^2+m})]^2.$$

Цифровой фазометр. Обычно в цифровом фазометре весовая функция *

$$h(t) = \frac{q}{\theta} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kq + \nu) = \frac{1}{\theta} \sum_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{\frac{i2\pi k}{q}(t+\nu)\right\}; \quad -\frac{\theta}{2} \leqslant t \leqslant \frac{\theta}{2},$$

где q — интервал между счетными импульсами; ν — случайная начальная «фаза» последовательности счетных импульсов. Следовательно,

$$|\tilde{h}(n\omega)|^2 = \sum_{-\infty}^{\infty} \sum_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{\frac{i2\pi}{q}(k+l)\nu\right\} \frac{\sin 0,5\theta\left(n\omega + \frac{2\pi k}{q}\right)}{0,5\theta\left(n\omega + \frac{2\pi k}{q}\right)} \cdot \frac{\sin 0,5\theta\left(-n\omega + \frac{2\pi l}{q}\right)}{0,5\theta\left(-n\omega + \frac{2\pi l}{q}\right)}. \qquad (7)$$

Начальную «фазу» ν естественно считать равномерной на отрезке $[0, q]$.

---

* Л. Т. Смирнов предлагает изменять частоту счетных импульсов по треугольному закону (см. ж. «Автометрия», 1969, № 1).

Тогда после усреднения (7) по ν получим, что

$$\overline{\varepsilon^2_{\mu,\tau,\nu}} = \frac{1}{\pi^2}\sum_{n=1}^{\infty}\frac{1}{n^2}\left(1-\operatorname{Re}\widetilde{\psi}(2\pi n)\right)\sum_{-\infty}^{\infty}\left\{\frac{\sin 0{,}5\theta\left(n\omega+\frac{2\pi k}{q}\right)}{0{,}5\theta\left(n\omega+\frac{2\pi k}{q}\right)}\right\}^2. \quad (8)$$

Слагаемое (8) с $k=0$ совпадает с (5). Остальные слагаемые определяют дополнительную ошибку из-за цифрового измерения временных интервалов сигнала.

На практике измерительный интервал θ, как правило, формируется делением частоты следования счетных импульсов. Поэтому его можно [illegible] времени между счетными импульсами и сигнала, а квант q не кратен T, дисперсия ошибки

$$\overline{\varepsilon^2_{\mu,\tau,\nu}} = \frac{q^2}{6T^2}.$$

Если же интервал q кратен периоду T, то дисперсия ошибки равна удвоенной дисперсии измеряемой величины

$$\overline{\varepsilon^2_{\mu,\tau,\nu}} = \frac{1}{6}.$$

Соотношения, полученные выше, позволяют определить методическую погрешность фазометров с постоянным временем измерения.

Поступила в редакцию 7 июля 1972 г.

УДК 621.317+681.14

В. И. ПИЩУЛИН

(Москва)

ПОСТРОЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ ЭВМ БЭСМ-4

Увеличение объема измерительной информации при исследовании физических явлений, усложнение эксперимента требуют привлечения самых разнообразных средств и способов автоматизации измерительной аппаратуры и процесса обработки информации. Непосредственное включение ЦВМ в измерительные системы позволяет обрабатывать входную информацию в процессе ее накопления, оперативно менять программу в ходе эксперимента, сокращая при этом некоторые этапы исследований и концентрируя внимание на наиболее интересных и важных явлениях [1, 2].

Машина БЭСМ-4 имеет развитое математическое обеспечение, и применение ее для научных и технических расчетов весьма эффективно [3]. В последние годы в связи с возрастанием объема информации,