

С. В. ЧЕПУРНЫХ, М. К. ЧМЫХ  
(Красноярск)

### СПОСОБ УМЕНЬШЕНИЯ ПОГРЕШНОСТИ ЦИФРОВЫХ ФАЗОМЕТРОВ НА НИЗКИХ ЧАСТОТАХ

В последнее время большое распространение получили цифровые фазометры (ЦФ) с постоянным измерительным временем. Как известно, основным источником погрешности таких фазометров на низких частотах является неkratность времени измерения и периода входного сигнала [1], что снижает быстродействие и ограничивает частотный диапазон этого класса фазоизмерителей. Существующие способы уменьшения этой составляющей погрешности не нашли в настоящее время широкого применения ввиду их достаточно сложной аппаратной реализации [2].

Предлагаемый в данной работе метод [3] обеспечивает высокую точность измерений на низких частотах, причем практически без существенного аппаратного усложнения фазометра с постоянным измерительным временем. Сущность метода заключается в использовании весовой дискретной обработки, или, другими словами, в уменьшении веса результатов измерений последнего неполного периода сигнала путем последовательного уменьшения частоты квантования. Моменты начала измерения и перехода на пониженные частоты квантования осуществляются синхронно с входным сигналом.

На рисунке, а приведена структурная схема одной из возможных реализаций предлагаемого способа. Формирующее устройство (ФУ) представляет собой двухканальный преобразователь разности фаз  $\varphi^0$  входных сигналов в эквивалентный интервал времени

$$t_{\varphi} = \varphi^0 T / 360^{\circ},$$

где  $T = 1/F$  — период сигнала. Прямоугольные импульсы длительностью  $t_{\varphi}$  в течение измерительного времени (схема совпадения СС2 открыта) заполняются в схеме совпадения СС1 импульсами высокой частоты  $f_{кв_i}$ , которые затем подсчитываются счетчиком Сч.

Значение квантующей частоты  $f_{кв_i}$  задается частотой генератора (Г)  $f_{кв_0}$  и коэффициентом деления управляемого делителя частоты (УДЧ). Импульс времени измерения формируется схемой пуска (СП). Начало времени измерения  $t_{изм}$  определяется приходом на СП импульса «Пуск» и совпадает с первым импульсом синхронизации ФУ. Период следования синхрипульсов равен  $T$ . Окончанием измерительного времени служит момент переполнения времязадающего делителя (ВЗД). В классической схеме ЦФ с постоянным измерительным временем УДЧ отсутствует, вследствие чего  $f_{кв} = f_{кв_0}$  и при  $t_{изм} = t_{изм_0}$  максимальное значение низкочастотной погрешности составит [1]

$$\Delta\varphi_{max} = 90^{\circ} / (t_{изм_0} F p^2),$$

где  $p$  — число полупериодов сигнала, используемых при измерении.

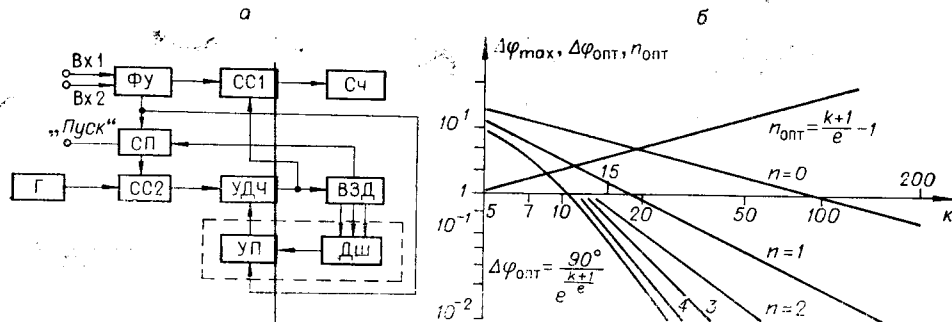
В рассматриваемой фазоизмерителе коэффициент деления УДЧ в процессе измерения дискретно увеличивается. Переключение УДЧ осуществляется устройством подготовки (УП), на которое поступают импульсы синхронизации с ФУ и сигналы управления с дешифратора (Дш). В моменты времени, отстоящие от конца измерения на интервал

$$\Delta t_i = T_n + \Delta\tau_i, \quad (1)$$

дешифратор выдает на УП импульс подготовки. Интервал

$$\Delta\tau_i = (T_n + \Delta\tau_{i+1}) / m_i = \Delta\tau_{i+1} / m_i \quad (2)$$

необходим для последующих переходов на пониженные частоты. Коэффициент  $m_i$  равен отношению частот квантования на соседних интервалах  $m_i = f_{кв_{i-1}} / f_{кв_0}$ , а  $T_n$  — периоду сигнала на нижней частоте диапазона фазометра. Погрешность измерения при  $n$ -кратном



уменьшении частоты квантования равна

$$\Delta\varphi_{\max} = 90^\circ \left/ \left( t_{\text{изм}_0} F \rho^2 \prod_{i=1}^n m_i \right) \right. \quad (3)$$

Очевидно, что время измерения будет переменным и изменяется от минимального  $t_{\text{изм}_0}$  до максимального, соответствующего случаю, когда поступление синхронизирующих импульсов и соответственно переход на пониженные частоты квантования происходит практически одновременно с действием импульсов подготовки:

$$t_{\text{изм}_{\max}} = (t_{\text{изм}_0} - \Delta t_1) + (\Delta t_1 m_1 - \Delta t_2) + \dots + (\Delta t_{n-1} m_{n-1} - \Delta t_n) + \Delta t_n m_n. \quad (4)$$

Используя (1), (2), выражение (4) можно преобразовать к виду

$$t_{\text{изм}_{\max}} = (t_{\text{изм}_0} - \Delta t_1) + T_H \sum_{i=1}^n m_i \approx t_{\text{изм}_0} + T_H \left( \sum_{i=1}^n m_i - 1 \right). \quad (5)$$

Отсюда подстановкой (5) в (3) получим

$$\Delta\varphi_{\max} = 90^\circ \left/ \left\{ \left[ t_{\text{изм}_{\max}} - T_H \left( \sum_{i=1}^n m_i - 1 \right) \right] F \rho^2 \prod_{i=1}^n m_i \right\} \right. \quad (6)$$

Выражение (6) имеет минимум при

$$m_1 = m_2 = \dots = m_n = (k+1)/(n+1),$$

где  $k = F_n t_{\text{изм}_{\max}}$ , и на нижней частоте диапазона составляет

$$\Delta\varphi_{\max} = 90^\circ / (m^{n+1} \rho^2). \quad (7)$$

Минимизируя (7) по параметру  $n$ , получим

$$\Delta\varphi_{\text{опт}} = 90^\circ / (e^{(k+1)/e} \rho^2) \quad \text{при } n_{\text{опт}} = (k+1)/e - 1,$$

где  $e$  — основание натурального логарифма. На рисунке, б приведены зависимости  $n_{\text{опт}}$ ,  $\Delta\varphi_{\max}$  и  $\Delta\varphi_{\text{опт}}$  от  $k$  для  $\rho=1$ . Как видно из графиков, рассматриваемый метод позволяет существенно уменьшить погрешность измерения. Например, на частоте 25 Гц при времени измерения 1 с погрешность в фазометре по классической схеме составит  $3,5^\circ$ , а в предлагаемом — менее  $0,01^\circ$ . В настоящее время разработан ряд фазометров [4], использующих рассмотренный принцип. Полученные экспериментальные результаты при работе с этими фазометрами подтверждают выводы настоящей работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецкий С. С., Чмых М. К. Методологические прогрешности цифровых фазометров.— В кн.: Автоматический контроль и методы электрических измерений. Новосибирск, «Наука», 1965.
2. Смирнов П. Т. Цифровые фазометры. Л., «Энергия», 1974.
3. Чмых М. К., Глинченко А. С., Чепурных С. В. Широкодиапазонный цифровой фазометр на интегральных схемах.— В кн.: Метрология в радиоэлектронике. М., изд. ВНИИФТРИ, 1975.
4. Чмых М. К., Глинченко А. С., Чепурных С. В., Алдонин Г. М. Цифровой фазометр.— «ПТЭ», 1974, № 5, с. 240.

Поступило в редакцию 13 января 1977 г.,  
окончательный вариант — 7 апреля 1977 г.