ПРЕДЕЛЬНАЯ ТОЧНОСТЬ, ДОСТИГАЕМАЯ В АНАЛОГОДИСКРЕТНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ УГОЛ-КОД

В. А. Михайлов, В. Е. Тырса

Харьков

Аналого-цифровые преобразователи (АЦП) угол-код [1] строятся на базе одного из двух фундаментальных принципов: пространственного или временного кодирования. АЦП, основанные на принципе пространственного кодирования (фотоэлектрические АЦП считывания) имеют точность 11—19 двоичных разрядов. Причем, если 11-разрядный кодовый диск имеет диаметр около 67 *мм*, то 19-разрядный [2] имеет диаметр 534 *мм*. Это дает основание считать, что информационная точность [3] АЦП угол-код с пространственным кодированием ограничена величиной $N_n = 10^5 \div 10^6$.

Вопросы точности временного кодирования (временной модуляции) рассмотрены в [3].

Там, на основании исследования информационно-энергетических соотношений при измерении времени (преобразование угол-фаза-время), показано, что максимальное количество измерительной информации (в дитах) в случае временной модуляции (см. рис. 1, кривые *а* и *в*)

$$I = 10{,}1 + \frac{1}{2}\lg(Pt), \tag{1}$$

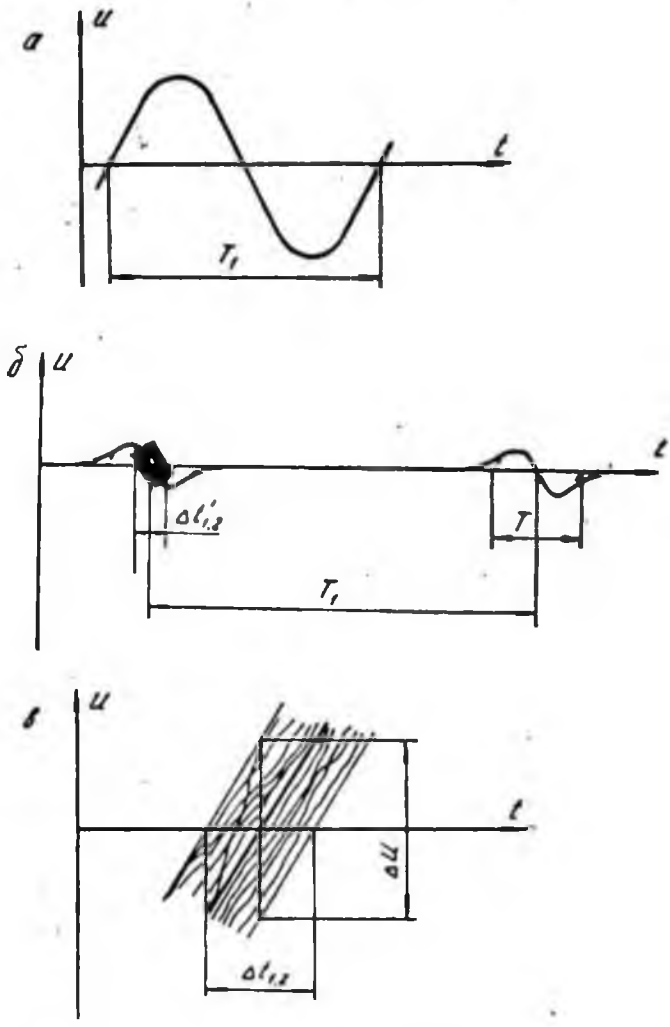
где Pt — энергия, потребляемая от объекта измерения.

Информационная способность (информационная точность) временной модуляции [3] (см. рис. 1,*а* и *в*)

$$N_b = 10^{10.1}\sqrt{Pt}. \tag{2}$$

При энергии, потребляемой от объекта измерения $Pt = 10^{-8}$ *дж*, максимальная точность временной модуляции $N_b = 10^6$.

Очевидно, точность временной модуляции может быть повышена, если переход ко времени осуществить не через фазу, как показано на рис. 1, а через «временные ворота» T_1, образованные прохождением постоянно вращающегося чувствительного элемента мимо датчиков начала и конца временного интервала [4]. В этом случае временной ин-



тервал, в который преобразуется угол, останется тем же, но относительная ошибка $\frac{\Delta t_{1,2}}{T_1}$ уменьшится и будет

$$\gamma = \frac{r\Delta t_{1,2}}{2\pi R T_1}, \qquad (3)$$

где R — радиус АЦП,

r — величина дуги, на которой ощущается влияние чувствительного элемента на датчик ($r = T$ точно так же, как входной максимальный угол $\alpha_{вх.\,max} = T_1$). Если $R = 50$ *мм*, а $r = 0{,}2$ *мм*, то $\frac{T_1}{T} = 1570$. Или, при $Pt = 10^{-8}_{дж}$, $N_{в.\,э} = 1{,}57 \cdot 10^8$.

Если заполнять «временные ворота» T_1 квантующими импульсами, следующими с частотой 100 *мгц* [5], то точность временного кодирования $N_{в.к.} \approx 10^8$. Таким образом, временное кодирование обеспечивает точность на 2—3 порядка большую, чем пространственное кодирование.

Для того чтобы окончательно сравнить АЦП угол-код с пространственным и временным кодированием, рассмотрим влияние на их точность общей для всех типов АЦП угол-код ошибки эксцентриситета, которая является практически неустранимой.

В [6] показано, что ошибка эксцентриситета составляет

$$\delta\alpha_1 = \frac{\varepsilon}{R}\left[\frac{\sin\alpha}{\sqrt{1-2\frac{\varepsilon}{R}\cos\gamma+\frac{\varepsilon^2}{R^2}}}+\frac{\sin(\alpha-\gamma)}{\sqrt{1-2\frac{\varepsilon}{R}\cos(\alpha-\gamma)+\frac{\varepsilon^2}{R^2}}}\right], \tag{4}$$

где ε — эксцентриситет вращающихся частей АЦП,

R — радиус АЦП;

γ — направление эксцентриситета относительно положения начала отсчета.

В практике точных измерений широко используется применение двухотсчетных устройств, расположенных диаметрально противоположно друг к другу. В этом случае истинным является среднее арифметическое от показаний двух отсчетных устройств. Ошибка эксцентриситета уменьшается и равна [6]

$$\delta\alpha_2 = \frac{\varepsilon^2}{R^2}\sin\alpha\cos(\alpha-2\gamma). \tag{5}$$

Для анализа ошибки эксцентриситета можно положить $\gamma = 0$, а знаменатели в (4) и (5) равными 1. Тогда (4) и (5) примут, соответственно, вид

$$\delta\alpha_1 = \frac{\varepsilon}{R}\sin\alpha; \tag{6}$$

$$\delta\alpha_2 = \frac{\varepsilon^2}{2R^2}\sin 2\alpha. \tag{7}$$

В соответствии с [3] дифференциальный закон распределения вероятностей ошибки $\delta\alpha_1$ запишется в виде

$$p(\delta\alpha_1) = \frac{1}{\pi\sqrt{\frac{\varepsilon^2}{R^2}-(\delta\alpha_1)^2}}, \tag{8}$$

со среднеквадратическим отклонением (с. к. о.)

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon}{\sqrt{2}R}, \tag{9}$$

а ошибки $\delta\alpha_2$

$$p(\delta\alpha_2) = \frac{1}{\pi\sqrt{\frac{\varepsilon^4}{4R^4}-(\delta\alpha_2)^2}}, \tag{10}$$

$$\sigma_2 = \frac{\varepsilon^2}{2\sqrt{2}R^2}. \tag{11}$$

Максимальное количество информации, при измерении $\alpha_{max} = 2\pi$ с погрешностями, имеющими с. к. о. σ [3],

$$I_э = \lg 2\pi - \lg 2k\sigma, \tag{12}$$

где k — энтропийный коэффициент. Для законов распределения в виде (8) и (10) (см. [3], стр. 88).

$$k = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1{,}11.$$

Из (12) следует, что

$$N_э = \frac{\pi}{k\sigma}. \tag{13}$$

В оптико-механическом приборостроении [7] существует три уровня точности обработки деталей: экономический, производственный и технический. Эксцентричность цилиндрических наружных поверхностей (валики, оси, ролики), соответственно каждому из уровней, составляет 20, 10 и 5 микрон. Надо полагать, что для высокоточных АЦП точность механической обработки узлов должна соответствовать техническому уровню.

Тогда при $R = 50$ *мм*, $e = 0{,}005$ *мм*, и учитывая (9), (11) и (13), имеем

$$N_{э1} = 4 \cdot 10^4,$$
$$N_{э2} = 8 \cdot 10^8.$$

Разработанные в последнее время [6] двухшкальные АЦП на емкостных фазовращателях, индуктосинах и пр., также не могут иметь точность выше $N_{э2} = 8 \cdot 10^8$, поскольку эксцентриситет при наличии редукции является величиной смещения точного фазовращателя относительно истинного значения входного угла. Практически [6] технологические погрешности совместно с ошибкой эксцентриситета в двухшкальных АЦП ограничивают точность на уровне

$$N = 3{,}5 \cdot 10^5.$$

Преимущество двухшкальных АЦП угол-код заключается лишь в более высоком быстродействии по сравнению с одношкальными, ввиду наличия в двухшкальных АЦП параллельного съема информации с грубого и точного преобразователей.

Таким образом, максимальная точность, $N = 10^8$, может быть достигнута в одношкальных преобразователях с переходом к временному интервалу (без промежуточного перехода в фазу), поскольку у этого типа АЦП отсутствуют технологические погрешности кроме ошибки эксцентриситета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Э. И. Гитис. Преобразователи информации для электронных цифровых вычислительных устройств. Госэнергоиздат, М., 1961.
2. Fischerbacher R., Mills A. Аналого-цифровые преобразователи, «Control», 1962, v. 5, № 18.
3. П. В. Новицкий. Основы информационной теории измерительных устройств, «Энергия», Л., 1968.
4. В. А. Михайлов, В. Е. Тырса. Циклический преобразователь угол-код со стабилизированным синхронным двигателем в качестве чувствительного элемента, «Приборы и системы автоматики», вып. 12. Харьков, 1969.
5. В. В. Климов. Электронные счетчики на туннельных диодах, «Энергия», М., 1968.