

Э. К. ЯЦЕНКО  
(Одесса)

### ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ ФАЗОВЫХ ДАТЧИКОВ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Фаза — параметр электрического сигнала, который зависит от воздействия внешних факторов намного меньше, чем амплитуда. Существенным достоинством выбора фазы в качестве параметра преобразования углового перемещения является достаточная простота ее преобразования в цифровую форму.

Фазовые датчики могут быть построены на дифференциальном принципе преобразования углового перемещения в фазу электрического сигнала [1—3] и принципе прямого преобразования [4]. Особенность дифференциального принципа заключается в том, что преобразование углового перемещения в фазу  $\varphi$  электрического сигнала осуществляется согласно соотношению

$$\varphi = 2k\alpha, \quad (1)$$

в то время как в датчиках второго типа это преобразование осуществляется в виде

$$\varphi = k\alpha, \quad (2)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от конструктивных особенностей датчика;  $\alpha$  — угол поворота контролируемого вала.

Фазовый датчик, реализующий принцип прямого преобразования, конструктивно выполняется в виде двух измерительных и индикаторных дисков [4]. Один измерительный диск жестко связывается с поворотной частью объекта, второй — с неподвижной частью. При перемещении жестко связанных между собой индикаторных дисков относительно измерительных генерируются два электрических сигнала:  $f_1(t)$  и  $f_2(t, \alpha)$ . Угловое перемещение, пропорциональное фазе относительного сдвига сигналов  $f_1(t)$  и  $f_2(t, \alpha)$ , определяется как

$$\varphi_2(\alpha) = \varphi_1 - \varphi_2(\alpha). \quad (3)$$

Частоты  $\omega_1(t)$  и  $\omega_2(t)$  изменения сигналов  $f_1(t)$  и  $f_2(t, \alpha)$  пропорциональны скорости  $\omega_n(t)$  перемещения индикаторного диска относительно измерительного. В этом случае

$$\omega_1 = z \omega_n(t); \quad (4)$$

$$\omega_2 = z \omega_n(t) \pm z \omega_n(t), \quad (5)$$

где  $\omega_n(t)$  — угловая скорость измерительного диска;  $z$  — количество штрихов или зубцов на измерительном диске.

Датчики, реализующие дифференциальный принцип преобразования углового перемещения в фазу электрического сигнала, существенно отличаются от рассмотренных по конструктивному выполнению и принципу работы. На рис. 1 представлен фотоэлектрический дифференциальный фазовый датчик [1]. Он состоит из двух растровых дисков 1 и 2,

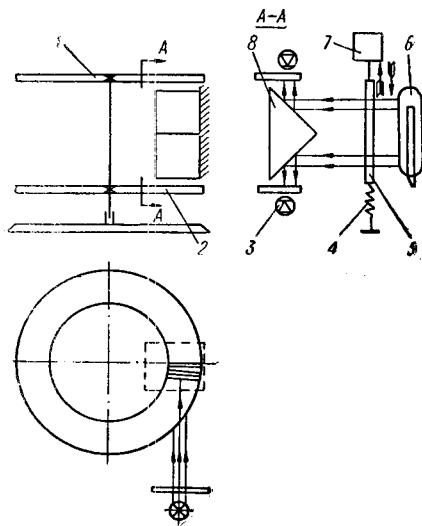


Рис. 1.

жестко связанных с контролируемым валом объекта. Эти растровые диски выполняют роль измерительных. Призма 8, осветитель 6, фотоприемники 3, электромагнит 7, осциллирующая растровая шкала 5 и пружина 4 расположены на неподвижной части объекта. Принцип работы этого датчика заключается в создании двух движущихся в противоположных направлениях изображений шкалы 5, что достигается посредством призмы 8. Это иллюстрируется рис. 2. За нуль отсчета перемещения в пределах шага нанесенных рисок растровых дисков 1, 2, 5 примем такое их положение, при котором амплитуды генерируемых сигналов  $f_1(t, \alpha)$  и  $f_2(t, \alpha)$  в электрических цепях фотоприемников 3 одновременно достигают определенного значения, например нулевого (см.

рис. 2, а). При повороте контролируемого вала на угол  $\alpha$  (см. рис. 2, б) в том же положении шкалы 5, что и для предыдущего состояния, сигналы  $f_1(t, \alpha)$  и  $f_2(t, \alpha)$  будут иметь значение амплитуд, отличное от нуля. Так,

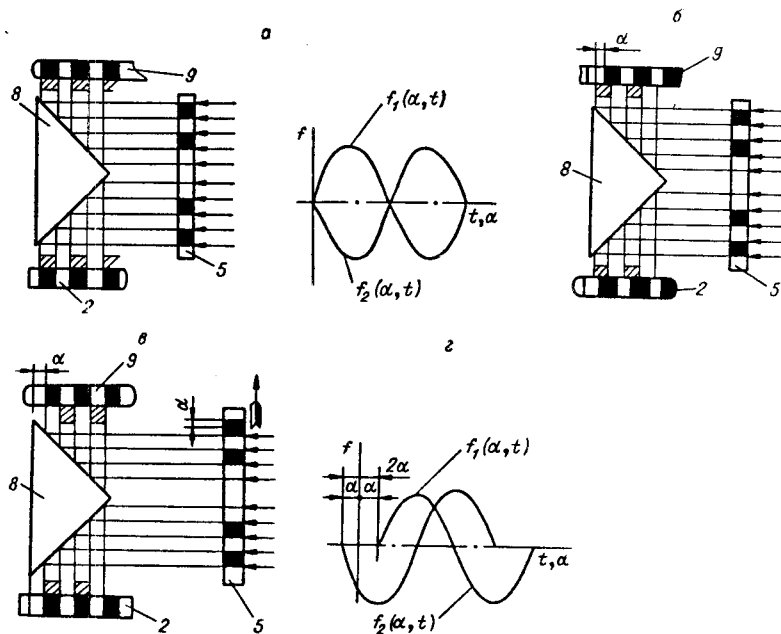


Рис. 2.

сигнал  $f_2(t, \alpha)$  прошел нулевое значение, и его фаза равна  $-\alpha$ , в то время как  $f_1(t, \alpha)$  только достигнет своего нулевого значения при перемещении шкалы 5 вверх на величину  $\alpha$  (см. рис. 2, в).

Таким образом, при смещении растровых дисков 1 и 2 на угол  $\alpha$  сигналы  $f_1(t, \alpha)$  и  $f_2(t, \alpha)$  смещаются относительно нуля отсчета соответственно влево и вправо на угол  $\alpha$  (см. рис. 2, в). Тогда сдвиг сигнала  $f_1(t, \alpha)$  относительно сигнала  $f_2(t, \alpha)$  равен  $2\alpha$ .

Огличительной особенностью фазового индуктивного датчика [3], представленного на рис. 3, а, б, является наличие только одного измерительного диска 8. Он состоит из двух глобоидальных полудатчиков 1 и 5, приводимых во вращение электродвигателем 6 посредством вала 3.

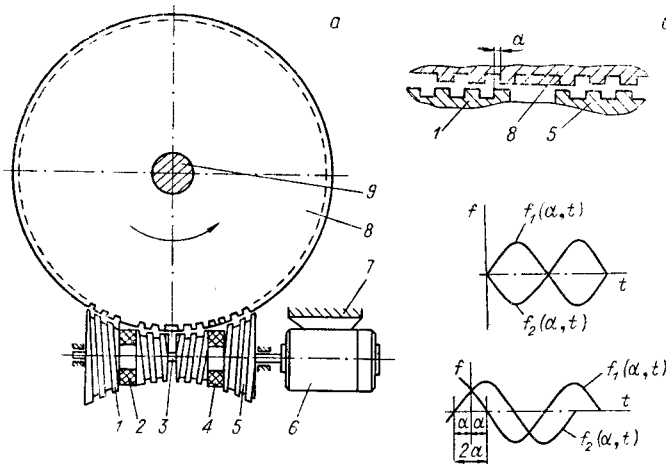


Рис. 3.

Индуктивные катушки 2 и 4 в середине каждого из полудатчиков и электродвигатель 6 установлены на неподвижной части 7 объекта. Контролируется угол поворота вала 1. Винтовые поверхности полудатчиков 1 и 5 имеют разное направление: правое и левое. Если принять за нуль такое взаимное положение полудатчиков относительно измерительного диска, при котором амплитуды генерируемых сигналов  $f_1(t, \alpha)$  и  $f_2(t, \alpha)$  одновременно достигают нулевого значения (см. рис. 2, а, в), то при смещении измерительного диска на угол  $\alpha$  (см. рис. 2, б) относительный сдвиг сигналов  $f_1(t, \alpha)$  и  $f_2(t, \alpha)$  по фазе будет равен  $2\alpha$  (см. рис. 2, в).

Рассмотренные конструктивные особенности и принцип работы фазовых дифференциальных датчиков показывают, что фазы  $\varphi_1(\alpha)$  и  $\varphi_2(\alpha)$  генерируемых электрических сигналов  $f_1(t, \alpha)$  и  $f_2(t, \alpha)$  зависят от углового перемещения измерительных дисков. Фаза  $\varphi_{\Sigma}(\alpha)$  смещения сигнала  $f_1(t, \alpha)$  по отношению к сигналу  $f_2(t, \alpha)$  при перемещении диска на угол  $\alpha$  определяется из соотношения

$$\varphi_{\Sigma}(\alpha) = \varphi_1(\alpha) - \varphi_2(\alpha). \quad (6)$$

Частоты  $\omega_1(t)$  и  $\omega_2(t)$  изменения сигналов в этих датчиках относительно неподвижной части равны

$$\omega_1(t) = z \omega_n(t) \pm z \omega_n(t), \quad \omega_2(t) = z \omega_n(t) \mp z \omega_n(t)$$

при величине круговой частоты  $\omega_{\Sigma}(t) = 2z \omega_n(t)$  относительного смещения сигналов  $f_1(t, \alpha)$  и  $f_2(t, \alpha)$ .

Как видно из рассмотрения принципов построения датчиков, дифференциальные фазовые датчики имеют высокую чувствительность и реализуют так называемый физический нуль отсчета.

Определим условия, влияющие на величину и характер ошибки преобразования. Поскольку обычно сигналы  $f_1(t, \alpha)$  и  $f_2(t, \alpha)$  генерируются посредством взаимодействия индикаторных и измерительных дисков, то в величину фазы каждого из них будет входить инструментальная ошибка своей пары дисков. Нетрудно видеть, что погрешность фазы  $\delta \varphi_{\Sigma}(\alpha)$  в этом случае с учетом выражения (3) для датчиков с прямым принципом преобразования будет равна

$$\delta \varphi_{\Sigma}(\alpha) = \delta \varphi_1 - \delta \varphi_2(\alpha),$$

где  $\delta \varphi_1$ ,  $\delta \varphi_2(\alpha)$  — инструментальные ошибки дисков, участвующих в создании сигналов соответственно  $f_1(t)$  и  $f_2(t, \alpha)$ .

Поскольку  $\delta \varphi_1$  определяется элементами датчика, не участвующими в угловом перемещении объекта, то существует положение, при котором  $\delta \varphi_1$  и  $\delta \varphi_2(\alpha)$  находятся в противофазе и ошибка преобразования  $\delta \varphi_{\Sigma}(\alpha)$  достигает своего максимального значения:

$$\delta \varphi_{\Sigma}(\alpha) = \max [|\delta \varphi_1| + |\delta \varphi_2(\alpha)|].$$

Минимальное значение  $\delta \varphi_{\Sigma}(\alpha)$  для этих датчиков равно нулю.

Из анализа видно, что ошибка  $\delta \varphi_{\Sigma}(\alpha)$  датчика определяется абсолютной величиной инструментальных ошибок растровых или зубчатых дисков. Повышение точности этого типа датчиков возможно только за счет уменьшения инструментальной погрешности элементов, участвующих в преобразовании углового перемещения в фазу электрического сигнала.

Рассмотрим зависимость  $\delta \varphi_{\Sigma}(\alpha)$  для дифференциальных фазовых датчиков [1--3], в которых преобразование углового перемещения в фазу происходит одновременно в каждом из электрических сигналов  $f_1(t, \alpha)$  и  $f_2(t, \alpha)$ . Ошибка фазового преобразования для этого случая с учетом выражения (6) будет выглядеть так:

$$\delta \varphi_{\Sigma}(\alpha) = \delta \varphi_1(\alpha) - \delta \varphi_2(\alpha),$$

где  $\delta \varphi_1(\alpha)$  и  $\delta \varphi_2(\alpha)$  — инструментальные ошибки элементов, участвующих в создании соответственно сигналов  $f_1(t, \alpha)$  и  $f_2(t, \alpha)$ . Ошибка  $\delta \varphi_{\Sigma}(\alpha)$  определяется взаимным расположением измерительных или индикаторных дисков. При этом существует такое их положение, в котором  $\delta \varphi_{\Sigma}(\alpha)$  будет минимальна. В случае осуществления равенства  $\delta \varphi_1(\alpha) = \delta \varphi_2(\alpha)$  ошибка преобразования равна нулю. Минимум ошибки рассматриваемых датчиков определяется минимумом разности однородных составляющих погрешности  $\delta \varphi_{\Sigma}(\alpha)$ .

В каждом конкретном случае для нахождения этого минимума необходимо решить уравнение

$$\delta \varphi_{\Sigma}(\alpha) = \min [\max |\delta \varphi_1(\alpha) - \delta \varphi_2(\alpha, \beta)| - \min |\delta \varphi_1(\alpha) - \delta \varphi_2(\alpha, \beta)|]$$

с целью определения величины угла  $\beta$  смещения ошибки  $\delta \varphi_1(\alpha)$  по отношению к ошибке  $\delta \varphi_2(\alpha)$ .

В общем виде эта задача не имеет решения. Для определения этого угла введем квадратичную интегральную оценку

$$\delta^2 \varphi_{\Sigma}(\alpha) = \int_{-\pi}^{\pi} [\delta \varphi_1(\alpha) - \delta \varphi_2(\alpha, \beta)]^2 d\beta. \quad (7)$$

Угол  $\beta$  будем искать из условия минимальности интегральной оценки

$$\frac{d [\delta^2 \varphi_{\Sigma}(\alpha)]}{d \beta} = 0. \quad (8)$$

Основным мотивом для выбора указанной оценки в качестве основного критерия при определении значения угла  $\beta$  является ее близость к среднеквадратическому отклонению двух функций, которое дает меньшую разность на большем участке изменения сравниваемых функций.

Представим  $\delta\varphi_1(\alpha)$  и  $\delta\varphi_2(\alpha)$  тригонометрическими рядами и запишем для этого случая значение

$$\delta^2 \varphi_{\Sigma}(\alpha) = \int_{-\pi}^{\pi} \left[ \frac{a_0}{2} + \sum_n a_n \cos n\alpha + \sum_n b_n \sin n\alpha - \frac{a_{01}}{2} - \sum_n a_{1n} \cos(n\alpha + \beta) - \sum_n b_{1n} \sin(n\alpha + \beta) \right]^2 d\alpha, \quad (9)$$

где  $a_0, a_n, b_n, a_{01}, a_{1n}, b_{1n}$  — коэффициенты тригонометрических рядов.

Разложим  $\delta^2 \varphi_{\Sigma}(\alpha)$  в выражении (9) на составляющие, предварительно выделив функцию угла  $\beta$  из  $\cos(n\alpha + \beta)$  и  $\sin(n\alpha + \beta)$ . Выражение (9) примет вид

$$\begin{aligned} \delta^2 \varphi_{\Sigma}(\alpha) = & \int_{-\pi}^{\pi} \left[ \frac{a_0}{2} + \sum_n a_n \cos n\alpha + \sum_n b_n \sin n\alpha \right]^2 d\alpha - \\ & - 2 \int_{-\pi}^{\pi} \left[ \frac{a_0}{2} + \sum_n a_n \cos n\alpha + \sum_n b_n \sin n\alpha \right] \times \\ & \times \left[ \frac{a_{01}}{2} + \sum_n (a_{1n} \cos \beta + b_{1n} \sin \beta) \cos n\alpha + \sum_n (-a_{1n} \sin \beta + \right. \\ & \left. + b_{1n} \cos \beta) \sin n\alpha \right] d\alpha + \int_{-\pi}^{\pi} \left[ \frac{a_{01}}{2} + \sum_n a_{1n} \cos(n\alpha + \beta) + \right. \\ & \left. + \sum_n b_{1n} \sin(n\alpha + \beta) \right]^2 d\alpha. \end{aligned} \quad (10)$$

Упростим выражение (10) с учетом ортогональности некоторых функций [5], входящих под знак интегралов:

$$\begin{aligned} \delta^2 \varphi_{\Sigma}(\alpha) = & \frac{a_0^2}{2} \pi + \pi \sum_n (a_n^2 + b_n^2) + \frac{a_{01}^2}{2} \pi + \pi \sum_n (a_{1n}^2 + b_{1n}^2) - \\ & - a_0 a_{01} \pi - 2\pi \sum_n a_n \sum_n (a_{1n} \cos \beta + b_{1n} \sin \beta) - \\ & - 2\pi \sum_n b_n \sum_n (-a_{1n} \sin \beta + b_{1n} \cos \beta). \end{aligned} \quad (11)$$

Преобразуем выражение (11), вынося тригонометрические функции за скобки:

$$\begin{aligned} \delta^2 \varphi_{\Sigma}(\alpha) &= C - 2\pi \left( \sum_n a_n \sum_n a_{1n} + \sum_n b_n \sum_n b_{1n} \right) \cos \beta - \\ &- 2\pi \left( \sum_n a_n \sum_n b_{1n} - \sum_n b_n \sum_n a_{1n} \right) \sin \beta, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $C = f(a_0, a_n, b_n, a_{01}, a_{1n}, b_{1n})$ .

Определим угол  $\beta$ , при котором  $\delta^2 \varphi_{\Sigma}(\alpha)$ , согласно выражению (8), минимально. Продифференцируем выражение (12):

$$\begin{aligned} \frac{d[\delta^2 \varphi_{\Sigma}(\alpha)]}{d\beta} &= -2\pi \left( \sum_n a_n \sum_n a_{1n} + \sum_n b_n \sum_n b_{1n} \right) \sin \beta + \\ &+ 2\pi \left( \sum_n a_n \sum_n b_{1n} - \sum_n b_n \sum_n a_{1n} \right) \cos \beta. \end{aligned} \quad (13)$$

Так как  $\frac{d[\delta^2 \varphi_{\Sigma}(\alpha)]}{d\beta} = 0$ , то

$$\sin \beta \left( \sum_n a_n \sum_n a_{1n} + \sum_n b_n \sum_n b_{1n} \right) = \cos \beta \left( \sum_n a_n \sum_n b_{1n} - \sum_n b_n \sum_n a_{1n} \right), \quad (14)$$

или, решив уравнение (14) относительно функции угла  $\beta$ , получим

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sum_n a_n \sum_n b_{1n} - \sum_n b_n \sum_n a_{1n}}{\sum_n a_n \sum_n a_{1n} + \sum_n b_n \sum_n b_{1n}}. \quad (15)$$

Для растровых дисков, изготовленных на делительных машинах, имеет место идентичность характера инструментальных ошибок. Поэтому при использовании в датчике растровых дисков, изготовленных на одной делительной машине, наблюдается близость ошибок  $\delta\varphi_1(\alpha)$  и  $\delta\varphi_2(\alpha)$  как по характеру, так и по величине их составляющих. В этом случае ошибка  $\delta\varphi_{\Sigma}(\alpha)$  дифференциальных фазовых датчиков не превышает

$$\delta\varphi_{\Sigma}(\alpha) \leq 0,05 [|\delta\varphi_1(\alpha)| + |\delta\varphi_2(\alpha)|].$$

В настоящее время не представляет трудности изготовление растровых дисков с погрешностью не хуже  $10''$ , что позволяет получать точность преобразования в дифференциальном фазовом датчике до  $2-3''$ . В экспериментальном варианте фазовый фотоэлектрический датчик [1] имел  $\delta\varphi_{\Sigma}(\alpha) = 12''$  при  $\delta\varphi_1(\alpha) = 96''$  и  $\delta\varphi_2 = 80$ .

К достоинствам дифференциальных фазовых датчиков следует отнести их нечувствительность к радиальному биению контролируемого вала, так как последнее вызывает в фазах  $\varphi_1(\alpha)$  и  $\varphi_2(\alpha)$  дополнительные ошибки преобразования одного знака, что приводит их к взаимной компенсации. Дифференциальный принцип преобразования углового перемещения в фазу электрического сигнала обладает значительными возможностями уменьшения ошибки преобразования без введения дополнительных устройств в датчик и систему преобразования.

Незначительная погрешность преобразования, нечувствительность к радиальному биению контролируемого вала, высокая разрешающая способность дифференциальных фазовых датчиков позволяют применять их в качестве прецизионных датчиков обратной связи в системах программного управления угловыми перемещениями.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Л. К. Шраго, Л. А. Срибнер, Э. К. Яценко, Б. И. Песчанский. Фотоэлектрическое отсчетное устройство для измерения угла поворота объектов. Авторское свидетельство № 263898.— ОИПОТЗ, 1970, № 8.
2. Л. К. Шраго, Л. А. Срибнер, Э. К. Яценко. Поворотный стол с фазовой системой. Авторское свидетельство № 234112.— ОИПОТЗ, 1969, № 3.
3. Л. К. Шраго, Э. К. Яценко, Л. А. Срибнер, Б. И. Песчанский. Индуктивный фазовый датчик линейных перемещений. Авторское свидетельство № 244918.— ОИПОТЗ, 1969, № 18.
4. А. В. Мироненко. Фотоэлектрические измерительные системы. М., «Энергия», 1967.
5. Б. М. Будаков, С. В. Фомин. Кратные интегралы и ряды. М., «Наука», 1967.

*Поступила в редакцию  
13 февраля 1970 г.,  
окончательный вариант —  
12 мая 1970 г.*

---