

## ЛИТЕРАТУРА

1 Болтянский А. А. и др. Построение многоканальных измерительных преобразователей, использующих тестовые переходные режимы. (Настоящий сборник).

2 Маграчев З. В. «Вольтметры одиночных импульсов». М., изд-во «Энергия», 1967.

3 O. Szavits. Analog—digital converter nonlinearity due to the current» Nuclear Instruments and Methods, № 39, 1966.

**Ф. Ф. Буканов, О. Г. Корганова, К. Г. Меркулов**

### ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ПРОСТРАНСТВЕННОГО УГЛА

При исследовании турбулентности атмосферы, водных масс морей и океанов, турбулентности газовых и жидкостных потоков вокруг гидротехнических сооружений и наземных строительных конструкций, в инклинометрии и ряде других областей возникает необходимость в измерении величины, однозначно определяемой пространственным углом.

В Куйбышевском политехническом институте разработано несколько преобразователей пространственного угла в электрический сигнал: контактного типа, бесконтактный и телеметрический [1]—[4].

Бесконтактный измерительный преобразователь пространственного угла в электрический сигнал конструктивно представляет собой три круглые взаимоперпендикулярные катушки, имеющие общий центр. Внутри этих катушек с помощью карданова подвеса размещена короткозамкнутая рамка, с которой жестко связан воспринимающий элемент.

Воспринимающим элементом при определении направлений потоков газа и жидкости является флюгарка, а в инклинометрии и при определении углов отклонений от вертикали — подвешенный груз.

В исходном положении подвижная рамка и одна из неподвижных катушек располагаются в одной плоскости. Эта подвижная катушка предназначена для съема сигнала и называется измерительной. Две другие неподвижные катушки запитываются квадратурными токами так, что образуется вращающееся магнитное поле, ось вращения которого совпадает с осью третьей неподвижной катушки, вследствие чего от вращающегося поля э. д. с. в ней не наводится. Э. д. с. отсутствует также и в подвижной рамке в ее исходном положении.

При отклонении подвижной рамки от исходного положения под воздействием воспринимающего элемента в ней наведется э. д. с.

$$e_p = k \cdot \dot{\theta} \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

т. е. амплитуда этой э. д. с. пропорциональна углу нутации  $\Theta$ , а фаза равна углу прецессии  $\varphi$  при определении положения вектора в пространстве через углы Эйлера.

В короткозамкнутой рамке ток

$$i_p = k_1 \cdot \Theta \cdot \sin [\omega t + (\varphi - \varepsilon)] \quad (2)$$

создает магнитное поле, взаимодействие с которым приводит к возникновению э. д. с.

$$e_n = k_2 \cdot F(\Theta) \cdot \sin [\omega t (\varphi - \varepsilon)], \quad (3)$$

которая может служить мерой величины и направления отклонения рамки от исходного положения, т. е. мерой пространственного угла  $\dot{\Theta}$  ориентации подвижной части преобразователя.

Для математического описания преобразователя можно ввести понятие комплексного угла пространственной ориентации

$$\dot{\Theta} = \Theta \cdot e^{j\varphi}. \quad (4)$$

Тогда из (1) и (3) следуют выражения для комплексных э. д. с. выходных сигналов:

$$E_p = k \cdot \dot{\Theta}, \quad (5)$$

$$E_n = k f(\Theta) \cdot \dot{\Theta}, \quad (6)$$

где комплексный коэффициент  $k$  учитывает сдвиг по фазе за счет комплексного сопротивления подвижной короткозамкнутой рамки.

Из выражений (5) и (6) следует, что в идеальном случае между комплексной э. д. с. выходного сигнала  $\dot{E}$  и комплексным углом, пространственной ориентации  $\dot{\Theta}$ , существует определенное отношение, которое может быть выражено некоторым оператором  $\dot{A}$ , т. е.

$$\dot{E} = \dot{A} \cdot \dot{\Theta}. \quad (7)$$

Для реального преобразователя можно записать

$$\dot{E} = \dot{A}_1 \cdot \dot{\Theta}_1 \quad \text{где} \quad \dot{\Theta}_1 = \Theta_1 e^{j\varphi_1} \quad (8)$$

т. е. то же, что и в (7), значение комплексной амплитуды э. д. с.  $\dot{E}$  соответствует не значению  $\dot{\Theta}$  комплексного угла пространственной ориентации, а некоторому другому значению  $\dot{\Theta}_1$ . Иными словами, возникает абсолютная векторная погрешность по выходу

$$\Delta \dot{\Theta} = \dot{\Theta}_1 - \dot{\Theta} \quad (9)$$

Для более наглядного рассмотрения закона распределения конца реального вектора относительно конца истинного, введем

понятие относительной комплексной погрешности

$$\dot{\delta} = \frac{\Delta \dot{\theta}}{\dot{\theta}} = a e^{j(\varphi_1 - \varphi)} - 1, \text{ где } \dot{a} = \frac{\theta_1}{\theta} \quad (10)$$

Геометрическая интерпретация абсолютной и относительной комплексных погрешностей показана на рис. 1.

Возникновение погрешности преобразователя обусловлено такими причинами как неравенство амплитудных значений индукций магнитных полей, создаваемых квадратурными катушками возбуждения; неквадратность питающих их токов; несовпадение центра подвижной рамки и центра ее вращения (центра карданова подвеса); отклонение центра рамки от оси вращающегося магнитного поля; неперпендикулярность плоскостей катушек возбуждения. Основными из них являются погрешности от неквадратности и от неперпендикулярности. При неперпендикулярности и неквадратности, равных 2—3 градусам, каждая из этих причин в отдельности вызывает погрешность в преобразовании по фазе э. д. с., примерно, на то же значение (т. е. 2—3°) и погрешность в преобразовании по амплитуде э. д. с. на 1,7—2,6%, что может вызвать погрешность в определении угла на нелинейном участке характеристики преобразователя, равную 3—5°.

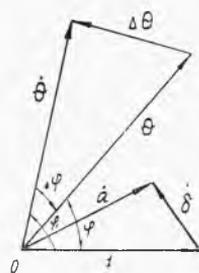


Рис. 1

Исследования показывают, что возможны два пути борьбы с погрешностями. В одном случае всегда будет погрешность по фазе э. д. с., равная абсолютному значению угла отклонения плоскости катушки от необходимого (рис. 2а). В другом случае погрешность по фазе будет отсутствовать (рис. 2б). В том и в другом случае будет существовать погрешность преобразования по амплитуде э. д. с., одинаковая по значению для обоих случаев и зависящая от величины угла отклонения от идеального положения катушек: при  $\lambda = \eta = \pm 10^\circ$   $\gamma = 1,5\%$ ; при  $\lambda = \eta = \pm 5^\circ$   $\gamma \pm 0,4\%$ ; при  $\lambda = \eta = \pm 2^\circ$   $\gamma = 0,04\%$ ; где  $\lambda$  — угол неквадратности,  $\eta$  — угол перпендикулярности

$\gamma = \frac{\Delta \theta}{\theta} = \frac{\Delta E_p}{E_p \text{ идеал}}$  — относительная погрешность по амплитуде э. д. с., возникающая в результате погрешности преобразования. Как видно из приведенных значений погрешность по амплитуде может быть сведена к минимуму, поскольку величин углов перпендикулярности и неквадратности, не превышающих по абсолютному значению 3°, добиться вполне возможно при существующих размерах преобразователей.

В практике измерений иногда необходимо определить положение вектора в пространстве, осуществлять автоматическое слежение за ним на удаленном расстоянии. В связи с этим был

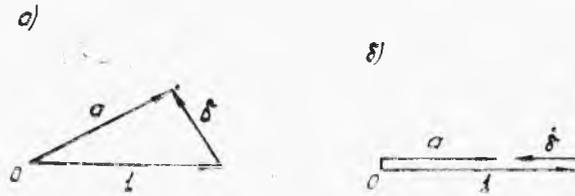


Рис. 2

разработан телеметрический преобразователь пространственного угла, информация с которого передается по радиоканалу.

Телеметрический преобразователь, изображенный на рис. 3, состоит из трех неподвижных взаимоперпендикулярных катушек 1, 2, 3 и подвижной 4. Катушки 2 и 3 запитываются квадратурными токами

$$I_2 = I_m \sin \omega t \quad (11)$$

$$I_3 = I_m \cos \omega t. \quad (12)$$

Катушка 1 служит элементом индуктивности в колебательном контуре одной цепи генератора (лампа 5), а катушка 4 — элементом положительной обратной связи в сеточной цепи генератора, который генерирует колебания вида

$$I = I_m \sin \Omega t \quad (13)$$

При отклонении катушки 4 от исходного положения в ней наводится э. д. с.  $I$ , которая поступает на сетку. В результате выходной ток генератора описывается выражением

$$I_r = I_m [1 + m \sin(\omega t + \varphi)] \cdot \sin \Omega t. \quad (14)$$

Для измерения фазового сдвига  $\varphi$  модулирующего тока вводится опорный ток, для чего один из токов низкочастотного

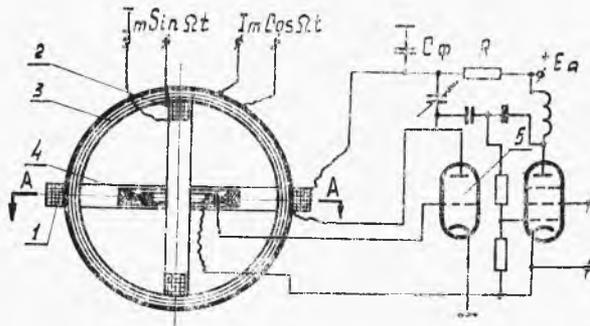


Рис. 3

квадратурного источника питания подается на высокочастотный генератор через частотный модулятор  $b$ , в результате этого осуществляется дополнительная частотная модуляция и выходной ток генератора описывается выражением:

$$I_r = I_{m_0} [1 + m \sin(\omega t + \varphi)] \sin(\Omega t + \beta \sin \Omega_{оп} t) \quad (15)$$

где  $m = \frac{k \Theta}{I_{m_0}}$  — глубина амплитудной модуляции.

$\Theta$  и  $\varphi$  — пространственные координаты, пропорциональные соответственно глубине модуляции и фазовому сдвигу модулирующего тока.

На основе рассмотренных преобразователей разработан совмещенный измерительный преобразователь для определения направления и скорости газовых потоков [5], для обработки сигнала с которого разработана информационно-измерительная система, принцип действия которой рассмотрен в работе М. А. Евдокимова и Е.М. Карпова (см. настоящий сборник).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Куликовский Л. Ф., Карпов Е. М., Завьялов В. Г., Меркулов К. Г. Устройство для определения направления потока газа или жидкости. Авт. свид. № 249799.
2. Карпов Е. М., Меркулов К. Г., Завьялов В. Г. Устройство для определения направления потока газа или жидкости. Авт. свид. № 277423.
3. Куликовский Л. Ф., Карпов Е. М., Буканов Ф. Ф. Устройство для преобразования пространственного угла. Авт. свид. № 269743.
4. Карпов Е. М., Буканов Ф. Ф., Меркулов К. Г. Устройство для преобразования пространственного угла. Авт. свид. № 301728.
5. Карпов Е. М., Меркулов К. Г., Евдокимов М. А. Устройство для измерения вектора скорости воздушного потока. Авт. свид. № 301617.

Н. Е. Конюхов, В. Г. Никитин

#### ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ С РЕГУЛИРУЕМОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

Преобразователи перемещения в электрический сигнал являются наиболее распространенными элементами информационно-измерительных систем. В связи с повышением требований по точности, повторяемости характеристики и ее стабильности в настоящее время наметилась тенденция по созданию преобразователей с коррекцией амплитудно-фазовой характеристики [11].

В простейшем случае в качестве такого преобразователя может быть выбран дифференциально-трансформаторный датчик, показанный на рис. 1. С помощью обмоток возбуждений 2,