

Н. Е. КОНЮХОВ,  
Л. Ф. КУЛИКОВСКИЙ, Ф. М. МЕДНИКОВ

(Куйбышев)

### ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ МАЛЫХ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПОВЫШЕННОЙ ТОЧНОСТИ

Рассмотрены трансформаторные преобразователи малых перемещений, конструкция которых обеспечивает высокую линейность статической характеристики и постоянство фазы выходной э. д. с. в рабочем диапазоне перемещения подвижного элемента.

В информационно-измерительных системах важное место занимают первичные преобразователи информации и, в частности, преобразователи малых линейных перемещений в электрический сигнал.

Наибольшее распространение получили индуктивные и трансформаторные преобразователи, отличающиеся простотой конструкции, большой выходной мощностью, достаточно высокой чувствительностью и т. д.

К преобразователям малых линейных перемещений предъявляется целый ряд требований, основными из которых являются:

1) высокая степень линейности статической характеристики:

$$E = f(x);$$

2) практическое отсутствие фазовых погрешностей, т. е. неизменность фазы э. д. с. на выходе для любого положения подвижной части; это особенно важно при работе преобразователя в компенсационной системе, так как наличие фазовых погрешностей, превышающих  $1-1,5^\circ$ , ведет к тому, что компенсация измеряемой э. д. с. производится неполностью (последнее обстоятельство резко ухудшает динамические свойства прибора);

3) минимальное значение остаточной э. д. с. на выходе в «нулевом» положении подвижной части.

Для получения высокочувствительного преобразователя необходимо снизить до минимума отношение величины остаточной э. д. с. к чувствительности преобразователя:

$$\Delta_{\min} = \frac{E_{\text{ост}}}{S} = \frac{E_{\text{ост}}}{\frac{\alpha E_{\text{max}}}{\Delta}}, \quad (1)$$

где  $E_{\text{ост}}$  — величина остаточной э. д. с. на выходе преобразователя в в;  
 $S$  — чувствительность преобразователя в в/м;  
 $E_{\text{max}}$  — максимальный сигнал на выходе преобразователя;  
 $\Delta$  — величина линейного перемещения в м.

Значение  $\Delta_{\text{min}}$  представляет собой величину остаточной э. д. с., или величину абсолютной погрешности, выраженную в линейном перемещении. По величине  $\Delta_{\text{min}}$  можно судить о тех наименьших перемещениях, для измерения которых с заданной степенью точности может быть использован преобразователь с постоянной магнитной цепью и подвижной измерительной обмоткой [1, 2]. Однако наличие магнитного сопротивления стали таких преобразователей при относительно малых воздушных зазорах приводит к изменению индукции вдоль магнитопровода не по линейному закону. Указанное обстоятельство увеличивает нелинейность статической характеристики ( $\epsilon \geq 0,5\%$ ) и фазовую погрешность ( $\Delta\phi \geq 1 \div 2^\circ$ ) преобразователя. Поэтому перспективным является использование конструкции магнитной цепи преобразователя, у которой влияние магнитного сопротивления стали практически исключается [3].

Разработанная конструкция трансформаторного преобразователя малых линейных перемещений имеет по сравнению с существующими следующие преимущества: 1) более высокую степень линейности статической характеристики и минимальное значение фазовой погрешности; 2) полную экранировку от влияния внешних магнитных полей независимо от их направления; 3) минимальное значение остаточной э. д. с. на выходе преобразователя в «нулевом» положении подвижной части.

Конструкция преобразователя представлена на рис. 1. Магнитопровод преобразователя выполняется из сплошной стали Армко и состоит из корпуса 1, имеющего в сечении Т-образную форму, и двух одинаковых крышек с цилиндрическими полыми сердечниками 2. Обмотка возбуждения 3 состоит из двух секций, соединенных последовательно и встречно. Измерительная катушка 4 охватывает сердечники 2 и может перемещаться вдоль магнитопровода с помощью немагнитного штока 5, помещенного внутри полых сердечников 2.

При подаче в обмотку возбуждения переменного напряжения в рабочем зазоре преобразователя на участке между сечениями 1—1 и 2—2 (рис. 2) образуется практически равномерная индукция, что достигается в первом приближении постоянством длины пути по стали для рабочего потока при любом положении подвижной части. Последнее обеспечивает постоянство магнитного сопротивления по стали для магнитного потока на рассматриваемом участке цепи. Следовательно, магнитный поток изменяется вдоль цилиндрических сердечников 3 и 4 на длине  $l_s$  по линейному закону, что определяет постоянство чувствительности преобразователя. На участке цепи  $\frac{h}{2}$  вследствие непостоянства длины пути магнитного потока по стали индукция в сердечниках изменяется не по линейному закону; для уменьшения влияния участка магнитной цепи  $\frac{h}{2}$  на характеристики преобразователя между сердечниками 4 имеется зазор, ширина которого  $b$  больше или равна  $h$ .

Необходимо отметить, что короткозамкнутые контуры цилиндрического сердечника 3 оказывают экранирующее воздействие на распределение потока вдоль сердечников 4. Угол потерь  $\Theta$  в стали и экране изменяется вдоль магнитопровода, достигая максимальной величины в сечении 1—1, и может быть определен из соотношения

$$\Theta_{\max} = \operatorname{arctg} \frac{X_{\mu c} + X_{\mu \varepsilon}}{R_{\mu c} + R_{\mu \varepsilon} + R_{\mu \delta}},$$

где  $X_{\mu c}, R_{\mu c}$  — реактивное и активные магнитные сопротивления стали;  
 $X_{\mu \varepsilon}, R_{\mu \varepsilon}$  — реактивное и активные магнитные сопротивления экрана, определяемые из соотношений:

$$X_{\mu \varepsilon} = \frac{\omega}{\sqrt{2} R_{\varepsilon}}; \quad R_{\mu \varepsilon} = \rho_{\varepsilon} \frac{l_{\varepsilon}}{S_{\varepsilon}} = \rho_{\varepsilon} \frac{\pi (d_2 + d_3)}{(d_3 - d_2) l_s}.$$

$R_{\mu \delta}$  — магнитное сопротивление зазора  $\delta$  на длине  $l_s$ .

Изменение значения угла  $\Theta$  между сечениями 1—1 и 2—2 магнитной цепи может достигать нескольких градусов, что приводит к такому же изменению фазы выходной э. д. с. С целью исключения экранирующего воздействия короткозамкнутых контуров сердечника 3 на распределение индукции в рабочем зазоре сердечник 3 разрезается по образующей (см. рис. 2).

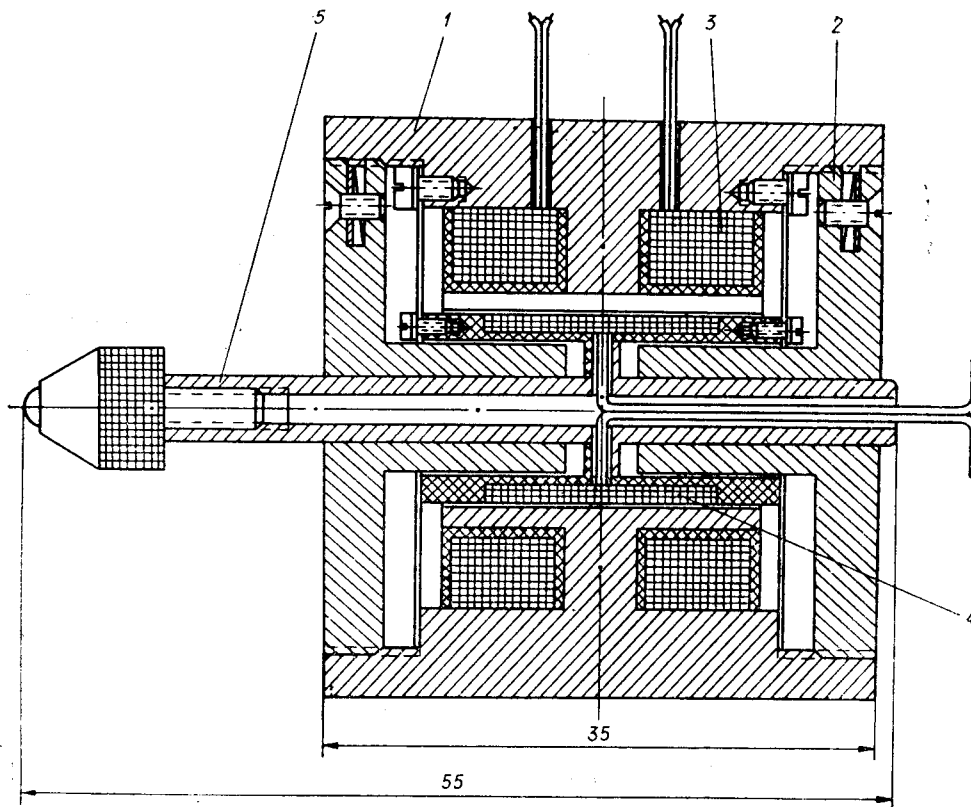


Рис. 1.

С достаточным приближением статическая характеристика преобразователя представляется как

$$E = -j\omega \frac{\dot{U}_B w_n w_B g}{R_B + j\omega w_B^2 G_\Sigma} x = \dot{S}_n x, \quad (2)$$

где  $w_n$  — число витков измерительной обмотки;  
 $w_B$  — число витков обмотки возбуждения;  
 $g$  — удельная магнитная проводимость в рабочем зазоре преобразователя;  
 $R_B$  — активное сопротивление обмотки возбуждения;  
 $G_\Sigma$  — суммарная магнитная проводимость цепи;  
 $x$  — координата подвижной части;  
 $\dot{S}_n$  — комплексная чувствительность преобразователя.

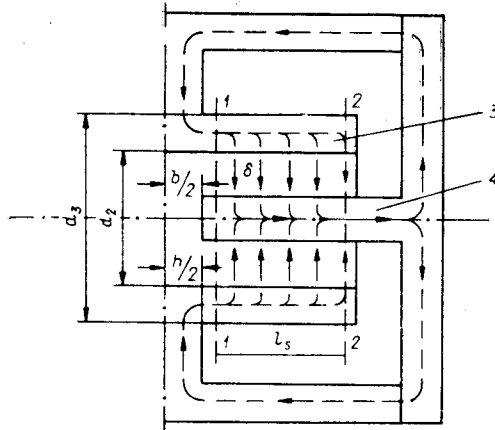


Рис. 2.

Преобразователь имеет следующие характеристики: диапазон перемещения подвижной части  $\pm 1$  и  $\pm 5$  мм; ток возбуждения 0,1 а; чувствительность 0,2 в/мм; нелинейность статической характеристики не более 0,1%; фазовая погрешность 15'; остаточная э. д. с. в «нулевом» положении подвижной части составляет: по первой гармонике 0,005% от  $E_{\max}$ ; по высшим гармоническим составляющим 0,1% от  $E_{\max}$ .

Магнитопровод преобразователя является одновременно и экраном, вследствие чего влияние внешних магнитных полей практически не сказывается на характеристиках преобразователя. На рис. 3 изображен преобразователь, у которого характер выходной э. д. с. практически не зависит от закона распределения индукции в рабочем зазоре.

Основными элементами преобразователя являются замкнутый прямоугольный магнитопровод (конденсатор) 2, несущий

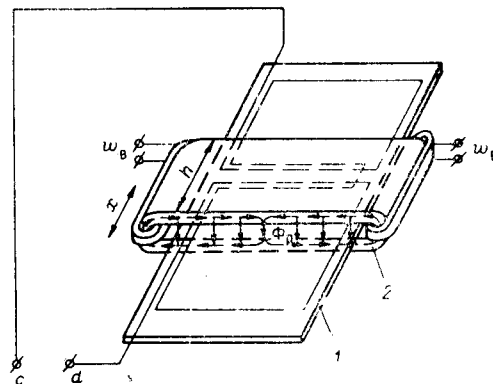


Рис. 3

Вследствие постоянства индукции в рабочем зазоре  $S_n$  представляет собой комплексную величину с неизменным модулем и аргументом.

Фаза выходной э. д. с. изменяется на обратную при переходе через нуль, оставаясь постоянной в рабочем диапазоне перемещения подвижной части. В преобразователе предусмотрена регулировка «нуля», осуществляемая поворотом крышек 2 (см. рис. 1), что приводит к изменению комплексных магнитных сопротивлений левой и правой (относительно поперечной оси симметрии) частей магнитопровода.

щий обмотку возбуждения  $w_b$ , выполненную в виде двух секций, соединенных последовательно и встречно. Эти обмотки возбуждают в сердечнике 2 разностный поток  $\Phi_r$ . Измерительная часть состоит из изоляционной пластины 1, на которой расположена плоская измерительная обмотка  $cd$ , имеющая форму двух прямоугольных секций, выполненных методом печатного монтажа или вручную, путем наклейки на пластину обмотки из медного провода.

Пластина 1 с плоской измерительной обмоткой  $cd$  расположена в зазоре конденсатора 2. При перемещении пластины происходит изменение магнитного потокосцепления прямоугольной обмотки  $cd$  и, следовательно, э. д. с. на выходе преобразователя изменяется. Характер изменения э. д. с. определяется формой измерительной обмотки. Если обмотка  $cd$  выполнена в виде двух прямоугольников, то при перемещении пластины относительно конденсатора магнитное потокосцепление изменяется по линейному закону и, следовательно, по линейному закону изменяется э. д. с.  $E$  в этой обмотке. Необходимо отметить, что характер распределения индукции в зазоре не оказывает существенного влияния на амплитудно-фазовые характеристики преобразователя, так как измерительная обмотка сцепляется с трубками магнитного потока, имеющими постоянную длину. У данного преобразователя нелинейность характеристики  $E=f(x)$  зависит в основном от того, с какой степенью точности выполнены стороны прямоугольной обмотки.

Преобразователь имеет следующие технические характеристики: диапазон перемещения подвижной части  $\pm 5$  и  $\pm 10$  мм; ток возбуждения 0,12 а; чувствительность 0,1 в/мм; нелинейность статической характеристики 0,1%; фазовая погрешность  $10'$ ; остаточная э. д. с. в «нулевом» положении подвижной части составляет (от максимального значения выходной э. д. с.) по первой гармонике 0,01%, по высшим гармоникам 0,02%.

Рассмотренные преобразователи благодаря их высокой точности и надежности нашли широкое применение в устройствах контроля и измерения различных физических параметров, а также в аналоговых счетно-решающих устройствах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л. Ф. Куликовский. Индуктивные измерители перемещений. М.—Л., Госэнергоиздат, 1961.
2. М. Ф. Зарипов, Л. Ф. Куликовский, Л. А. Бровкин. Регулируемый трансформатор. Авторское свидетельство № 153190.— Бюллетень изобретений, 1963, № 4.
3. Л. Ф. Куликовский, М. Ф. Зарипов. Индуктивные преобразователи перемещения с распределенными параметрами. М.—Л., «Энергия», 1966.

*Поступила в редакцию  
11 февраля 1966 г.,  
окончательный вариант —  
2 июня 1966 г.*

**N. E. Konyukhov,  
L. F. Kulikovskiy, F. M. Mednikov**  
**HIGH PRECISION DISPLACEMENT TRANSDUCERS**

Transformer transducers of small linear displacements are regarded whose constructions provide high linearity of static characteristic and phase constancy of output emf.