

## АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИНДУКТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Основываясь на выводах ряда работ [1 – 3] можно выделить следующие погрешности индуктивных преобразователей перемещений:

1) погрешность от нелинейности характеристики; 2) температурная погрешность; 3) погрешность от влияния внешних электромагнитных полей; 4) погрешность от магнитоупругого эффекта; 5) погрешность от тензометрического эффекта обмотки; 6) погрешность от соединительного кабеля; 7) технологические погрешности; 8) погрешность от старения преобразователя.

В большинстве случаев определяющими являются: погрешность от нелинейности характеристики и температурная погрешность преобразователя. Рассмотрим расчет температурной погрешности. Под действием нестабильной температуры преобразователя изменяются его геометрические размеры и происходит изменение электромагнитных характеристик магнитопровода и обмотки, вследствие чего полное сопротивление преобразователя является зависимым от температуры. В результате возникает температурная погрешность преобразователя

$$\Delta_t = \frac{\partial Z}{\partial t} \Delta t \Big/ \frac{\partial Z}{\partial l} = \frac{\delta Z_t \Delta t}{\delta S_l}, \quad (1)$$

где  $\delta S_l = \frac{\partial Z}{\partial l} \frac{1}{Z}$  – относительная чувствительность преобразователя по входному перемещению  $l$ ;  $\Delta_t$  – нестабильность температуры.

Относительная температурная нестабильность полного сопротивления преобразователя  $\delta S_l = \frac{\partial Z}{\partial l} \frac{1}{Z}$  может быть определена из следующей зависимости:

$$\delta Z_t = \frac{1}{1+Q^2} \times \left\{ \left[ \alpha_n + a_n + 0,5(\delta\mu_{ct} + \alpha_c) \right] + Q^2 \left[ \delta\mu_{ct} + \alpha_c + \frac{\delta l_{zt} + \delta l_t}{\frac{S_3}{l_3\mu_c} \sum \frac{l_c}{S_c} + 1} \right] \right\}, \quad (2)$$

где  $Q = \frac{\omega L}{R_n}$  – добротность преобразователя;  $a_n, a_c$  – относительный линейный температурный коэффициент материала провода и сердечника;  $\alpha_n, \alpha_c$  – относительный температурный коэффициент сопротивления материала провода и материала сердечника;  $\delta l_{zt}, \delta l_t$  – относительное температурное смещение якоря и сердечника в направлении измерительного зазора и в направлении изменения площади измерительного зазора соответственно, вызванное температурными деформациями якоря, сердечника и корпуса преобразователя, град<sup>-1</sup>;  $l_3, S_3$  – длина и площадь сечения немагнитного зазора в сердечнике;  $l_c, S_c, \mu_c$  – длина, площадь сечения и относительная магнитная проницаемость участков сердечника.

В зависимости (2) параметры  $\alpha_n, \alpha_c, a_n, a_c, \delta\mu_{ct}, \mu_c$  определяются из справочных данных для выбранного материала сердечника.

Для нахождения добротности преобразователя расчетным путем необходимо определить его индуктивность на рабочем участке  $L$  и сопротивление потерь  $R_n$ , а также выбрать рабочую частоту  $f$ . Индуктивность преобразователя на стадии его расчета можно оценить по формулам

$$L = \frac{\pi\mu_0\omega^2 R}{l_k} \left\{ R + \frac{r^2}{l_c} (\bar{\mu}_c - 1) \left[ \sqrt{(m_0 + p_1)^2 + 1} + \sqrt{(m_0 - p_1)^2 + 1} - \sqrt{(m_0 + p_2)^2 + 1} - \sqrt{(m_0 - p_2)^2 + 1} \right] \right\}, \quad (3)$$

где

$$r = \sqrt{\frac{S_c}{\pi}}; \quad R = \frac{\sqrt{S_k} + \sqrt{S_c}}{2\sqrt{\pi}}; \quad m_0 = \frac{l_0}{R}; \quad p_1 = \frac{l_c + l_k}{2R}; \quad p_2 = \frac{l_c - l_k}{2R};$$

$$\frac{S_c}{S_3} = \frac{S_c}{k_b S_{\Pi}}; \quad \bar{\mu}_c = \frac{\mu_c}{1 + [(l_3 S_c)/(l_c S_3)](\mu_c - 1)},$$

где  $R$  – средний эквивалентный радиус обмотки преобразователя;  $S_k$  – площадь поперечного сечения обмотки;  $\mu_c$  – относительная магнитная проницаемость материала сердечника;  $l_k$  – длина обмотки;  $S_{\Pi}$  – площадь сечения полюса, образующего немагнитный зазор;  $S_c$  – площадь сечения магнитопровода,

средняя;  $l_c$  – длина средней магнитной линии в магнитопроводе;  $k_b = \left[ \left( 1,345 + 0,43 \frac{z}{a} \right) \left( \frac{l_3}{a} \right)^{\left( 0,088 + 0,066 \frac{z}{a} \right)} \right]$  – ко-

эффициент выпучивания магнитного поля в зазоре;  $z \approx 1,5a$  – координата поля выпучивания вдоль сердечника;  $a$  – ширина полюса.

Сопrotивление потерь складывается из сопротивления обмотки и активного эквивалентного сопротивления потерь в сердечнике преобразователя:

$$R_{\Pi} = R_0 + R_c; \quad (4)$$

$$R_0 = \frac{4l_{\Pi}}{\pi d_{\Pi}^2 \gamma_{\Pi}}; \quad (5)$$

$$R_c \approx \omega^2 \frac{u_c}{l_c} \sqrt{\frac{\mu_c \mu_0 \omega}{\gamma_c}}; \quad (6)$$

где  $l_{\Pi}$ ,  $d_{\Pi}$  – длина провода обмотки и его диаметр соответственно;  $l_c$ ,  $u_c$  – длина сердечника и периметр его поперечного сечения соответственно;  $\gamma_{\Pi}$ ,  $\gamma_c$  – удельная проводимость материала провода и материала сердечника соответственно.

Формула (6) справедлива при резком проявлении поверхностного эффекта. Если эффект не проявляется, то  $R_c$  допустимо пренебречь.

Для нахождения относительных температурных смещений якоря и сердечника  $\delta l_{zt}$  и  $\delta l_t$  используем температурные деформации элементов сердечника  $l_{ci}$ , и элементов корпуса  $l_{ki}$ , в направлении немагнитного зазора  $l_3$ , которые оказывают обратное друг другу влияние на длину зазора. Поскольку  $\Delta l_i = a_i l_i \Delta t$ , то можно записать

$$\Delta l_{zt} = a_k l_k \Delta t_k - \Delta t_c (a_{c1} l_{c1} + a_{c2} l_{c2} + a_{c3} l_{c3}).$$

В общем случае изменения температуры элементов сердечника и элементов корпуса не будут равны между собой (например, из-за нагрева сердечника током, проходящим через катушку, и из-за ухудшения теплопередачи на границе между сердечником и корпусом). Поэтому обозначим  $\Delta t_k = k \Delta t_c$ , где  $k_i$  – коэффициент, учитывающий различный характер изменения температуры у сердечника и корпуса преобразователя. Тогда

$$\Delta l'_{zt} = \frac{\Delta l_{zt}}{\Delta t} = k_t \sum_{j=1}^n a_{jk} l_{jk} - \sum_{i=1}^m a_{ic} l_{ic}; \quad (7)$$

где  $n$  – число однородных участков, на которые можно разбить корпус преобразователя;  $a_{jk}$ ,  $l_{jk}$  – температурный линейный коэффициент и длина в направлении измерительного зазора  $l_3$  участков корпуса;  $a_{ic}$ ,

$l_{ic}$  – температурный линейный коэффициент и длина в направлении измерительного зазора  $l_3$  участков сердечника;  $m$  – число однородных участков, на которые можно разбить сердечник преобразователя.

Выражение (7) можно записать в ином виде, если под величиной  $\Delta t_c$  понимать не изменение температуры в абсолютных величинах, а изменение перепада температур между сердечником и корпусом. Тогда  $\Delta t_k = 0$ ,  $k_i = 0$  и

$$\Delta l'_{3t} = -a_c \sum_{i=1}^m l_{ic}; \quad \delta l_{3t} = \frac{\Delta l'_{3t}}{l_3}. \quad (8)$$

В зависимости от того, как удобно оценивать изменение температуры преобразователя – по абсолютной величине изменения или по изменению перепада температур между сердечником и корпусом, – можно пользоваться выражениями (7) или (8).

Температурно-зависимыми параметрами в выражении (2) являются величины  $a_{п1}$ ,  $a_{п2}$ ,  $a_{с1}$ ,  $a_{с2}$ ,  $\delta\mu_{с1}$ . Наибольшую нестабильность имеет удельное электросопротивление материала; несколько меньшую, но существенную нестабильность имеет магнитная проницаемость материала. Температурную же нестабильность линейных размеров можно не учитывать без заметной погрешности (это не относится к определению температурной нестабильности параметров немагнитного зазора).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Фрейдлин Ю.М., Макаренко Г.Д. Способ уменьшения температурной погрешности индуктивного приемника // Измерительная техника, 1970. № 8. С. 43 – 44.
- 2 Федотов А.В. Оценка температурной погрешности индуктивных измерительных преобразователей // Измерительная техника, 1974. № 1. С. 58 – 60.
- 3 Пудовкин А.П., Чернышов В.Н. Неразрушающий контроль качества биметаллов и изделий из них. М.: "Издательство Машиностроение-1", 2003. 156 с.