

УДК 612.1

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

СЕЙДАЛИЕВ И.М.

*Азербайджанский Государственный Экономический Университет*

В работе получены аналитические выражения выходной характеристики температурных погрешностей электромеханического преобразователя перемещений с секционной обмоткой возбуждения и измерительной обмоткой. С этой целью использованы уравнения перегрева и магнитодвижущих сил обмоток. Установлено, что с увеличением добротности обмотки возбуждения погрешность выходного сигнала уменьшается.

В работе [1] рассмотрен расчет магнитной системы электромеханических преобразователей перемещений (ЭМП) с левитационным элементом (ЛЭ). Точностные характеристики этих преобразователей зависят от многих факторов, в том числе от температурных погрешностей. С перемещением ЛЭ токи в обмотке возбуждения (ОВ) и ЛЭ возрастают, из-за чего возрастают температуры перегрева ОВ и ЛЭ:

$$\tau_1 = \frac{I_1^2 R_1}{k_T S_{ox1}}; \quad \tau_2 = \frac{I_2^2 r_3}{k_T S_{ox2}},$$

где  $I_1$  и  $I_2$  - токи ОВ и ЛЭ;  $R_1$  и  $r_3$  - активные сопротивления ОВ и ЛЭ;  $k_T$  - коэффициент теплоотдачи;  $S_{ox1}$  и  $S_{ox2}$  - охлаждающие поверхности.

Сопротивление  $R_1$  включает в себя также приведенное сопротивление из цепи ЛЭ в цепь ОВ.

Допустим, что ОВ ЭМП (рис.) состоит из двух последовательно-встречно включенных секций, число витков которых равны  $W'_1$  и  $W''_1$ . Витки секций  $W'_1$  и  $W''_1$  расположены соответственно на нижних и верхних частях среднего стержня. То же самое относится к измерительной обмотке (ИО). Поэтому:

$$W_1 = W'_1 + W''_1 = W'_1 \left(1 + \frac{W''_1}{W'_1}\right) = (1 + k_{21}) W'_1,$$

$$W_2 = W'_2 + W''_2 = W'_2 \left(1 + \frac{W''_2}{W'_2}\right) = (1 + n_{21}) W'_2,$$

где  $W'_1 > W''_1$ ;  $W''_2 > W'_2$ ;  $k_{21} = \frac{W''_1}{W'_1}$ ;  $n_{21} = \frac{W''_2}{W'_2}$ .

Напряжение на выходе преобразователя определяется:

$$U_2 = \omega M I_1, \quad (1)$$

где  $M$  - взаимдуктивность между ОВ и ИО, которая зависит от перемещения  $x$  ЛЭ;  $I_1$  - ток ОВ.

Взаимдуктивность и ток ОВ соответственно равны:

$$M = M_{12}'' - M_{12}' = \lambda W_{12}'' + \lambda x W_{12}' ;$$

$$I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + x_1^2}} , \quad (2)$$

где

$$M_{12}' = W_1' W_2' \lambda (l_1 - x) ; \quad M_{12}'' = W_1'' W_2'' \lambda (l_2 + x) ;$$

$$W_{12}' = W_1' W_2' + W_1'' W_2'' ; \quad W_{12}'' = W_1'' W_2'' l_2 - W_1' W_2' l_1 . \quad (3)$$

Расстояния  $l_1$  и  $l_2$  показаны на рис.

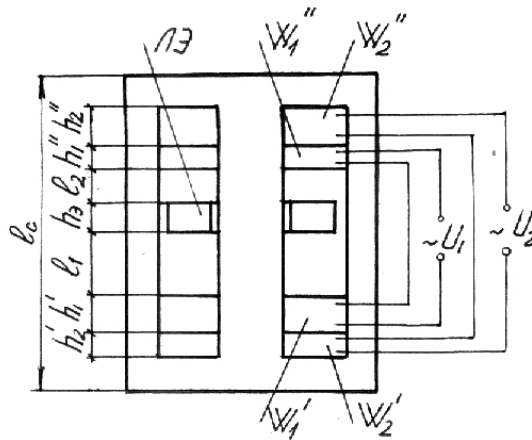


Рис. Принципиальная схема ЭМПП с левитационным экраном

Расчетная формула для определения удельной магнитной проводимости приведена в [1].

При  $x = 0$ , имеем  $U_2 = 0$ , поэтому, согласно (3,) находим:

$$W_1'' W_2'' l_2 - W_1' W_2' l_1 = 0 .$$

Отсюда получим условие:

$$\frac{W_1'' W_2''}{W_1' W_2'} = \frac{l_1}{l_2} ,$$

выполнение которого необходимо для устранения остаточного сигнала. Это достигается подбором количества витков в секциях ОБ и ИО. Очевидно,  $l_1 > l_2$  и  $W_1'' W_2'' > W_1' W_2'$ . Тогда взаимоиндуктивность будет определяться из выражения:

$$M = W_{12}' \lambda x . \quad (4)$$

Напряжение на выходе преобразователя определяется в соответствии с (1), (2) и (4):

$$U_2 = \frac{\omega W_{12}' \lambda U_1 x}{\sqrt{R_1^2 + x_1^2}} .$$

Отсюда видно, что выходное напряжение зависит от сопротивлений  $R_1$  и  $x_1$ , которые в свою очередь зависят от температур перегрева  $\tau_1$  и  $\tau_2$ . Выразим активное сопротивление секций ОБ и ЛЭ через температуры перегрева  $\tau_1$  и  $\tau_2$ . С этой целью определим полные сопротивления секций ОБ:

$$\dot{Z}'_1 = R'_1 + jx'_1 ; \quad \dot{Z}''_1 = R''_1 + jx''_1.$$

Активные сопротивления  $R'_1$  и  $R''_1$  через приведенные сопротивления ЛЭ  $r_s$  определяются из выражений:

$$R'_1 = r'_1 + r_s k_{s1}^2 b_2^2 ; \quad R''_1 = r''_1 + r_s k_{s2}^2 b_2^2 ,$$

где  $r'_1$ ,  $r''_1$  и  $r_s$  - сопротивления секций и экрана;  $k_{s1}$  и  $k_{s2}$  - коэффициенты трансформации;  $b_2 = 0,98 \div 0,99$  коэффициент электромагнитной связи между контурами:

$$\begin{aligned} r'_1 &= r'_{10} (\Delta'_{OK} + \alpha_M \tau_1) ; & r''_1 &= r''_{10} (\Delta''_{OK} + \alpha_M \tau_1) ; \\ r_s &= r_{s0} (\Delta''_{OK} + \alpha_A \tau_2) ; & k_{s1} &= \frac{W'_1}{W_s} = W'_1 ; & k_{s2} &= \frac{W''_1}{W_s} = W''_1 . \end{aligned}$$

Секции ОБ выполняются из медного провода, а ЛЭ из алюминия. Поэтому коэффициенты  $\alpha_M, \alpha_A, \Delta'_{OK}, \Delta''_{OK}$  определяются, как:

$$\begin{aligned} \alpha_M &= 0,0042 \text{ } 1/^\circ\text{C} ; & \alpha_A &= 0,0043 \text{ } 1/^\circ\text{C} ; \\ \Delta'_{OK} &= 1 + \alpha_M (\theta_{OK} - 20) ; & \Delta''_{OK} &= 1 + \alpha_A (\theta_{OK} - 20) . \end{aligned}$$

Сопротивления  $r'_{10}, r''_{10}, r_{s0}$  определяются через удельные омические сопротивления при температуре  $20^\circ\text{C}$ :

$$r'_{10} = \rho_{M20} W'_1 \frac{l'_{cp1}}{q_1} ; \quad r''_{10} = \rho_{M20} W''_1 \frac{l''_{cp1}}{q_1} ; \quad r_{s0} = \rho_{A20} \frac{l_{cp2}}{q_2} ,$$

где  $l'_{cp1}$  и  $l''_{cp1}$  - средние длины витков секций;  $q_1$  и  $q_2$  - площади поперечных сечений проводов;

$$\rho_{M20} = 1,72 \times 10^{-8} \text{ Ом.м} ; \quad \rho_{A20} = 2,8 \times 10^{-8} \text{ Ом.м} .$$

Тогда для активных сопротивлений секций и полного активного сопротивления ОБ можно записать:

$$\begin{aligned} R'_1 &= R'_0 + m'_1 \tau_1 + m'_2 \tau_2 ; \\ R''_1 &= R''_0 + m''_1 \tau_1 + m''_2 \tau_2 ; \\ R_1 &= R'_1 + R''_1 = R_0 + m_1 \tau_1 + m_2 \tau_2 , \end{aligned}$$

где обозначены:

$$\begin{aligned}
R_0 &= R'_0 + R''_0; & m_1 &= m'_1 + m''_1; & m_2 &= m'_2 + m''_2; \\
m'_1 &= \alpha_M r'_{10}; & m''_1 &= \alpha_M r''_{10}; & m'_2 &= \alpha_A r_{\text{ЭО}} k_{\text{Э1}}^2 b_2^2; & m''_2 &= \alpha_A r_{\text{ЭО}} k_{\text{Э2}}^2 b_2^2; \\
R'_0 &= r'_{10} \Delta'_{\text{ОК}} + r_{\text{ЭО}} \Delta''_{\text{ОК}} k_{\text{Э1}}^2 b_2^2; & R''_0 &= r''_{10} \Delta'_{\text{ОК}} + r_{\text{ЭО}} \Delta''_{\text{ОК}} k_{\text{Э2}}^2 b_2^2.
\end{aligned}$$

Индуктивные сопротивления секций и полное индуктивное сопротивление ОВ через перемещение  $x$  можно определить, как:

$$\begin{aligned}
x'_1 &= \omega W_1'^2 \lambda (h'_{1S} + l_1) = m_x (H_1 - x); \\
x''_1 &= \omega W_1''^2 \lambda (h''_{1S} + l_2) = m_x k_{21}^2 (H_2 + x); \\
x_1 &= x'_1 + x''_1 = m_x (H_0 - k_0 x),
\end{aligned} \tag{5}$$

где

$$\begin{aligned}
H_1 &= h'_{1S} + l'_C; & H_2 &= h''_{1S}; & H_0 &= H_1 + k_{21}^2 H_2; & k_0 &= 1 - k_{21}^2; & k_{21} &= \frac{W_1''}{W_1'}; \\
h'_{1S} &= h'_1 + h'_2; & h''_{1S} &= h''_1 + h''_2; \\
W_1 &= W_1' + W_1'' = W_1'(1 + k_{21}); \\
m_x &= \frac{\omega W_1^2 \lambda}{(1 + k_{21})^2}; & W_1' &= \frac{W_1}{1 + k_{21}}; & W_1'' &= W_1 \frac{k_{21}}{1 + k_{21}}; \\
l'_C &= l_C - (h'_1 + h''_1 + h'_2 + h''_2 + h_9); & l_1 &= l'_C - x; & l_2 &= x.
\end{aligned}$$

Полные сопротивления секций и ОВ:

$$\begin{aligned}
\dot{Z}'_1 &= R'_0 + m'_1 \tau_1 + m'_2 \tau_2 + j m_x (H_1 - x); \\
\dot{Z}''_1 &= R''_0 + m''_1 \tau_1 + m''_2 \tau_2 + j m_x k_{21}^2 (H_2 + x); \\
\dot{Z}_1 &= \dot{Z}'_1 + \dot{Z}''_1 = R_0 + m_1 \tau_1 + m_2 \tau_2 + j m_x (H_0 - k_0 x)
\end{aligned}$$

Рассмотрим погрешность выходного напряжения  $U_2$ , обусловленную изменением температуры  $\tau = \tau_1 = \tau_2$  на величину  $\Delta \tau$ .

В этом случае:

$$R_1 = R_0 + m \tau, \tag{6}$$

где

$$\begin{aligned}
m &= m_1 + m_2 = r_0 \alpha_M + r_{\text{ЭО}} \Delta''_{\text{ОК}} b_2^2 k_{\text{Э}}^2; \\
r_0 &= r'_{10} + r''_{10}; & k_{\text{Э}}^2 &= k_{\text{Э1}}^2 + k_{\text{Э2}}^2 = W_1'^2 + W_1''^2; \\
R_0 &= r_0 \Delta'_{\text{ОК}} + r_{\text{ЭО}} \Delta''_{\text{ОК}} b_2^2 k_{\text{Э}}^2.
\end{aligned}$$

Абсолютная погрешность:

$$\Delta \delta_u = \gamma_u \Delta \tau,$$

где

$$\gamma_u = \frac{\partial U_2}{\partial R_1} \frac{\partial R_1}{\partial \tau}.$$

Поскольку:

$$\frac{\partial R_1}{\partial \tau} = m;$$

$$\frac{\partial U_2}{\partial R_1} = -\frac{2\omega MU_1 R_1}{R_1^2 + x_1^2},$$

то можно записать:

$$\gamma_u = -\frac{2\omega MU_1 m (R_0 + m\tau)}{(R_0 + m\tau)^2 + x_1^2};$$

$$\Delta\delta_u = -2\omega MU_1 \frac{m (R_0 + m\tau)\Delta\tau}{(R_0 + m\tau)^2 + x_1^2}.$$

Относительное значение погрешности:

$$\delta_u = \frac{\Delta\delta_u}{U_2} = -\frac{2m \Delta\tau}{\sqrt{1+Q_1^2}},$$

где  $Q_1$  – добротность ОБ:

$$Q_1 = \frac{x_1}{R_0 + m\tau} = \frac{x_1}{R_1}.$$

Отсюда видно, что с увеличением добротности  $Q_1$  погрешность  $\delta_u$  можно уменьшить.

Из уравнений левитаций:

$$\frac{1}{2} \lambda W_1^2 I_1^2 = \frac{1}{2} \lambda W_1^2 \frac{U_1^2}{R_1^2 + x_1^2} = k_o P_o,$$

получим:

$$x_1 = \sqrt{\frac{\lambda W_1^2 U_1^2}{2k_o P_o} - R_1^2}, \quad (7)$$

где  $P_o$  – сила тяжести ЛЭ;  $k_o$  – коэффициент, учитывающий силы тяжести силовводящего элемента  $P_c$  и дополнительной силы (сила упирания)  $P_a$ :

$$k_o = 1 + \frac{P_c + P_a}{P_o} = 1,2 \div 1,3$$

Подставив (23) в (37), находим текущее значение перемещений ЛЭ:

$$x = \frac{H_0}{k_0} - \frac{1}{k_0 m_x} \sqrt{\frac{\lambda W_1^2 U_1^2}{2k_o P_o} - R_1^2}$$

или с учетом (27):

$$x = \frac{H_0}{k_0} - \frac{1}{k_0 m_x} \sqrt{\frac{\lambda W_1^2 U_1^2}{2k_o P_o} - (R_0 + m\tau)^2}.$$

Абсолютная погрешность перемещения определяется аналогично:

$$\Delta\delta_x = \gamma_x \Delta\tau,$$

где

$$\gamma_x = \frac{\partial x}{\partial R_1} \frac{\partial R_1}{\partial \tau}.$$

Определяем:

$$\frac{\partial x}{\partial R_1} = \frac{2m(R_0 + m\tau)}{k_0 m_x \sqrt{\frac{\lambda W_1^2 U_1^2}{2k_\sigma P_\sigma} - (R_0 + m\tau)^2}} ;$$

$$\Delta \delta_x = - \frac{2m(R_0 + m\tau)\Delta\tau}{k_0 m_x \sqrt{\frac{\lambda W_1^2 U_1^2}{2k_\sigma P_\sigma} - (R_0 + m\tau)^2}} .$$

Относительное значение погрешности от изменений  $x$  будет определяться из выражения:

$$\delta_x = \frac{\Delta \delta_x}{x} = - \frac{2m(R_0 + m\tau)\Delta\tau}{\sqrt{\frac{\lambda W_1^2 U_1^2}{2k_\sigma P_\sigma} - (R_0 + m\tau)^2} \left[ H_0 m_x - \sqrt{\frac{\lambda W_1^2 U_1^2}{2k_\sigma P_\sigma} - (R_0 + m\tau)^2} \right]} .$$

Для состояния левитации подвижной части ЭМПП, т.е. когда ЛЭ не прижат к поверхности контролируемого объекта, общая погрешность будет равна:

$$\delta_T = \delta_u + \delta_x .$$

Анализ численных значений погрешностей  $\delta_u$  и  $\delta_x$  показывает, что температурная погрешность  $\delta_T$  при колебании температуры на  $\Delta\tau = (8 \div 12)^\circ C$  составляет не более 0,1%, если добротность  $Q_1 \geq 10$ .

1. *Сейдалиев И.М.* Расчет магнитной цепи электромеханического преобразователя толщины // Проблемы энергетики. - 2002. - №4. - с. 131-139.

## ELEKTROMEXANİKİ YERDƏYİŞMƏ ÇEVİRİCİLƏRİNİN DƏQİQLİK XARAKTERİSTİKALARININ TƏYİNİ

**SEYDƏLİYEV İ. M.**

Məqalədə seksiyalı təsirlənmə və ölçü dolağı daşıyan elektromexaniki yerdəyişmə çeviricisində çıxış xarakteristikası və temperatur xətalrı üçün analitik ifadələr alınmışdır. Bu məqsəd üçün dolaqların qızma temperaturlarının və maqnit hərəkət edici qüvvələrin tənliklərindən istifadə edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, təsirlənmə dolağının keyfiyyət əmsalının artması ilə çıxış signalının xətası azalır.

## DEFINITION OF ACCURACY CHARACTERISTICS OF ELECTROMECHANICAL TRAVEL CONVERTER

**SEIDALIYEV I. M.**

In work analytical expressions of the target characteristic and temperature errors of the electromechanical travel converter with section a winding of excitation and a measuring winding are received. With this purpose the equations of temperature and magnetic forces of windings are used. It is established, that with increase of winding quality of excitation winding the error of a target signal decreases.