

ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ИНДУКТИВНО-ТОКОВИХРЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ В НАГРУЗОЧНОМ РЕЖИМЕ

Рассмотрим динамическую погрешность преобразователя как одну из разновидностей паразитных чувствительностей, применительно к схеме рис. 1.

Для определения величины динамической погрешности необходимо составить выражение передаточной функции преобразователя, которая является комплексной чувствительностью нагрузочного тока I_H к перемещениям якоря δ , происходящим с некоторой частотой Ω .

Будем считать, что индуктивность рамки нагрузочного прибора невелика $\omega L_H \ll R_H$ и сопротивление нагрузки есть активное сопротивление $Z_H \approx R_H$.

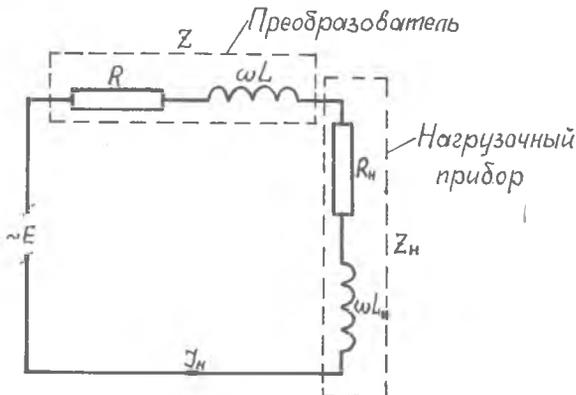


Рис. 1. Схема включения индуктивно-токовихревого преобразователя

Для указанной схемы можно записать следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d}{dt}(Li_n) + Ri_n + R_n i_n = E, \quad (1)$$

где $L = L(\delta)$ — индуктивность преобразователя, зависящая от зазора δ ;
 R — активное сопротивление преобразователя;
 i_n — ток нагрузки.

Для синусоидального питающего напряжения E мгновенные значения величин можно выразить через комплексы:

$$\left. \begin{aligned} E &= \dot{E} e^{j\omega t} \\ i_n &= \dot{I}_n e^{j\omega t} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где комплексное напряжение $\dot{E} = \text{const}$, а \dot{I}_n — комплексный нагрузочный ток, изменяющийся относительно медленно при медленных перемещениях якоря.

Подставляя (2) в (1) и учитывая, что

$$\frac{d}{dt}(\dot{L} \dot{I}_n e^{j\omega t}) = e^{j\omega t} \frac{d}{dt}(\dot{L} \dot{I}_n) + \dot{L} \dot{I}_n j\omega e^{j\omega t}, \quad (3)$$

находим:

$$(R + j\omega L + R_n) \dot{I}_n + \frac{d}{dt}(\dot{L} \dot{I}_n) = \dot{E}. \quad (4)$$

Если преобразователь работает при частотах перемещения якоря Ω на один или несколько порядков ниже частоты питания ω , то член вида $\frac{d}{dt}(\dot{L} \dot{I}_n)$ в уравнении (4) мал по сравнению с первым членом и в качестве первого приближения можно принять:

$$(R + j\omega L + R_n) \dot{I}_n \approx \dot{E}. \quad (5)$$

В тех случаях, когда скорость перемещения якоря относительно велика, можно воспользоваться уравнением второго приближения:

$$(R + j\omega L + R_n) \dot{I}_n = \dot{E} - \frac{d}{dt}(\dot{L} \dot{I}_n) = \dot{E}', \quad (6)$$

причем правую часть уравнения (6) можно выразить через уравнение первого приближения (5), приравняв $\dot{I}_n = \dot{I}'_n [1]$, тогда

$$\dot{E}' = \dot{E} - \frac{d}{dt}(\dot{L} \dot{I}'_n). \quad (7)$$

Рабочее изменение индуктивности преобразователя в функции перемещения можно представить для линейной части характеристики как

$$L(\delta) = L_0 \left(1 - \frac{\delta}{\delta_0} \right), \quad (8)$$

где L_0 — значение индуктивности, соответствующее начальному зазору δ_0 .

Определим величину тока первого приближения из уравнения (5) с учетом (8).

$$\dot{I}'_{\text{н}} = \frac{\dot{E}}{R + j\omega L + R_{\text{н}}} = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}_0 - j\omega L_0 \frac{\delta}{\delta_0}} = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}_0} \left(1 + \frac{j\omega L_0}{\dot{Z}_0} \cdot \frac{\delta}{\delta_0} \right), \quad (9)$$

где
$$\dot{Z}_0 = R + R_{\text{н}} + j\omega L_0. \quad (10)$$

В соответствии с этим уравнение (7) для случая $\frac{\delta}{\delta_0} < 1$ переписывается:

$$\dot{E}^1 \approx \dot{E} - \frac{\dot{E} L_0}{\delta_0 \dot{Z}_0} \left(\frac{j\omega L_0}{\dot{Z}_0} - 1 \right) \frac{d\delta}{dt}. \quad (11)$$

Теперь можно определить величину тока нагрузки $J_{\text{н}}$ из уравнения (6) второго приближения с учетом (11).

$$\dot{I}_{\text{н}} = \frac{\dot{E}^1}{\dot{Z}_0 - j\omega L_0 \frac{\delta}{\delta_0}} \approx \frac{\dot{E}}{\dot{Z}_0} \left(1 + \dot{a} \frac{\delta}{\delta_0} \right) \left[1 - \frac{\dot{a}}{\delta_0} \cdot \frac{j}{\omega} (1 - \dot{a}) \frac{d\delta}{dt} \right], \quad (12)$$

где
$$\dot{a} = \frac{j\omega L_0}{\dot{Z}_0}. \quad (13)$$

Приближенная передаточная функция преобразователя имеет вид

$$\dot{S}(p) = \dot{S}_{\delta(p)}^{i_{\text{н}}(p)} = \frac{\partial \dot{I}_{\text{н}}(p)}{\partial \delta(p)} \approx \frac{\dot{E}}{\dot{Z}_0} \frac{\dot{a}}{\delta_0} \left[1 - \frac{j}{\omega} (1 - \dot{a}) p \right]. \quad (14)$$

Полученная передаточная функция имеет комплексные коэффициенты, что характерно для систем на переменном токе, в которых внешний сигнал (в нашем случае помеха) модулирует рабочую частоту ω , накладываясь в виде огибающей [2].

На основании (14) можно записать амплитудно-фазовую характеристику преобразователя, сделав ряд подстановок из (10) и (13):

$$\left. \begin{aligned} T &= \frac{L_0}{R + R_{\text{н}}} \\ \dot{a} &= \frac{j\omega T}{1 + j\omega T} \\ \dot{Z}_0 &= (1 + j\omega T)(R + R_{\text{н}}) \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

$$\dot{S}(j\Omega) \approx \frac{bj\omega T}{(1 + j\omega T)^2} \left[1 + \frac{\Omega}{\omega} \left(1 - \frac{j\omega T}{1 + j\omega T} \right) \right], \quad (16)$$

где
$$b = \frac{\dot{E}}{\delta_0 (R + R_{\text{н}})}. \quad (17)$$

После выделения вещественной и мнимой части амплитудно-фазовая характеристика примет вид:

$$\dot{S}(j\Omega) \approx \frac{2b\omega^2 T^2}{(1 + \omega^2 T^2)^2} + \left[\frac{2b\omega T^2}{(1 + \omega^2 T^2)^2} - \frac{3b\omega^3 T^4 - b\omega T^2}{(1 + \omega^2 T^2)^3} \right] \Omega +$$

$$+ j \left\{ \frac{b\omega T - b\omega^3 T^3}{(1 + \omega^2 T^2)^2} + \left[\frac{bT - b\omega^2 T^3}{(1 + \omega^2 T^2)^2} - \frac{3b\omega^2 T^3 - b\omega^4 T^5}{(1 + \omega^2 T^2)^3} \right] \Omega \right\}. \quad (18)$$

Относительную динамическую погрешность индуктивно-токовихревого преобразователя можно представить как

$$\xi(j\Omega) = \frac{\frac{\partial \dot{I}_H(j\Omega)}{\partial \delta(j\Omega)}}{\dot{I}_H(j0)} = \frac{\delta_0}{\dot{I}_H(j0)} \cdot \frac{\partial \dot{I}_H(j\Omega)}{\partial \delta(j\Omega)} = \frac{\delta_0}{\dot{I}_H(j0)} \cdot \dot{S}(j\Omega), \quad (19)$$

где $\dot{I}_H(j0)$ — величина нагрузочного тока при $\Omega = 0$.

$$\dot{I}_H(j0) = \frac{\dot{E}}{Z_s} \left(1 + \dot{a} \frac{\delta}{\delta_0} \right). \quad (20)$$

Для индуктивно-токовихревого преобразователя, имеющего следующие данные:

$$R = 33 \text{ ом}; R_H = 700 \text{ ом}; \delta_0 = 5 \text{ мм}; L_0 = 0,325 \cdot 10^{-3} \text{ гн};$$

$$T = 0,04 \cdot 10^{-5} \text{ сек}; \omega = 0,628 \cdot 10^5 \text{ гц} \text{ и } I_H(j0) = 0,003 \text{ а},$$

выражение (18) амплитудно-фазовой характеристики запишется:

$$\dot{S}(j\Omega) \approx 0,00084 + 0,00067 \cdot 10^{-5} \Omega + j0,015 + j0,024 \cdot 10^{-5} \Omega. \quad (21)$$

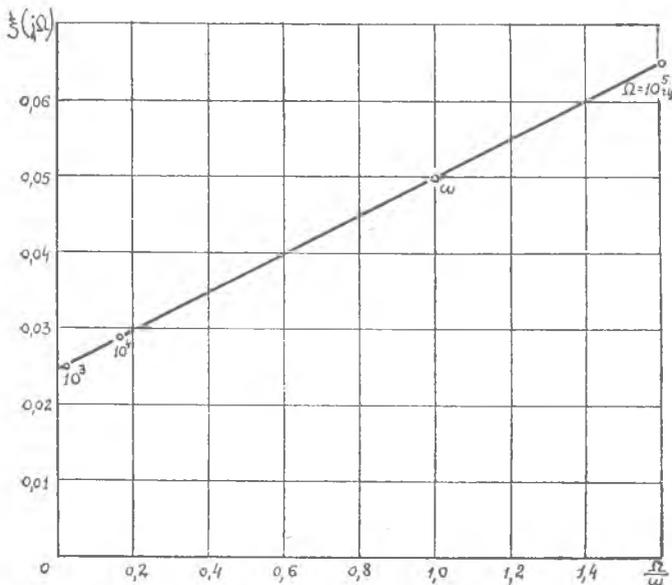


Рис. 2. Кривая изменения относительной динамической погрешности

На рис. 2 приведена расчетная кривая изменения относительной динамической погрешности $\xi(j\Omega)$ в зависимости от относительного изменения частоты перемещения якоря $\frac{\Omega}{\omega}$.

Из кривой видно, что с увеличением Ω относительная погрешность $\xi(j\Omega)$ увеличивается, однако при частотах $\Omega=0 \div 1000$ гц динамическая погрешность неизменна, а поэтому ею можно пренебречь, учтя ее в основной погрешности.

ЛИТЕРАТУРА

1. О. А. Коржавин. Магнитно-усилительные датчики линейных перемещений, кандидатская диссертация, Куйбышев, 1965.
2. А. А. Воронов. Основы теории автоматического регулирования, т. 2, М, 1966.

