

$$E_{12} = -j\omega\psi_{12} = -j\omega \int_0^l \Phi_{x2} W_{y2} dx_2 = -j\omega JM_{12}. \quad (33)$$

Из выражений (33), (28) можно определить взаимную индуктивность измерительной обмотки

$$M_{12} = \frac{1}{j} \int_0^l \Phi_{x2} W_{y2} dx_2 = -\frac{W_{y1} W_{y2} l^2}{2\mu l} \frac{\operatorname{ch} 2\beta - 1}{2\beta (\operatorname{sh} 2\beta + k_0 \operatorname{ch}^2 \beta)} = M. \quad (34)$$

Если  $\beta = 1$ ,  $k_0 = 1$ , то из (32) и (34)  $L = L_1$  и  $M = M_1$ .

Таким образом, использование на практике предложенной методики позволяет проектировать трансформаторные и индуктивные датчики с заданной статической характеристикой.

### Л и т е р а т у р а

1. Куликовский Л.Ф. Индуктивные измерители перемещений. М. - Л., ГЭИ, 1961.
2. Зарипов М.Ф. Преобразователи с распределенными параметрами для автоматики и информационно-измерительной техники. М., "Энергия", 1969.

И.А. Леманов

#### АНАЛИЗ МАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИНДУКТИВНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С УЧЕТОМ ПРОДОЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОТОКОВ РАССЕЯНИЯ

Учет продольных распределенных магнитных потоков рассеяния в индуктивных преобразователях повышает точность расчета их параметров.

На рис.1 представлена конструкция одного из широко распространенных индуктивных преобразователей перемещений [1], содержащих два дискообразных магнитопровода. Число витков возбуждающей (измерительной) и экранирующей обмоток принято одинаковым:  $W_1 = W_2 = W$ , один из сердечников является неподвижным, а второй при перемещении изменяет воздушный зазор  $f$ .

Пренебрегая нелинейностью характеристик магнитного сопротивления сердечника и потоками вытеснения в непосредственной близости от

воздушных зазоров, составим дифференциальные уравнения для потока  $\Phi_x$  и магнитодвижущей силы  $F_x$ , создаваемых распределенной вдоль сердечника обмоткой [2]. Изменения потока и МДС на элементарных участках магнитной линии  $dx$  составляют:

$$-d\Phi_x = F_x g dx; \quad (1)$$

$$-dF_x = \Phi_x z_\mu dx + \mathcal{I}W_y dx, \quad (2)$$

где  $g$  и  $z_\mu$  - соответственно удельные воздушная магнитная проводимость между сердечниками и магнитное сопротивление сердечников, выраженные через геометрические размеры конструкции;

$$g = \mu_0 \frac{\pi(2x+d_1)}{h}; \quad (3)$$

$$z_\mu = \rho_\mu \frac{2}{h_1 \pi(2x+d_1)}, \quad (4)$$

$\mu_0$  - магнитная проницаемость воздуха;  $\rho_\mu$  - удельное сопротивление материалов сердечника;  $\mathcal{I}W_y = f_z$  удельная МДС.

Используя итерационный метод решения дифференциальных уравнений, т.е. полагая вначале  $z_\mu = 0$ , из выражений (1) и (2) определим МДС и величину магнитного потока:

$$F_x = -f_z x + A_1; \quad (5)$$

$$\Phi_x = f_z \frac{\mu_0 \pi x^2}{h} \left( \frac{2}{3} x + \frac{1}{2} d_1 \right) - A_1 \frac{\mu_0 \pi x}{h} (x + d_1) + B_1. \quad (6)$$

Постоянные интегрирования определяются из краевых условий:

$$x=0; \quad \Phi_{x=0} \mathcal{Z}_{\mu 0} = F_{x=0}; \quad (7)$$

$$x=l; \quad \Phi_{x=l} \mathcal{Z}_{\mu 0} = F_{x=l}, \quad (8)$$

где  $\mathcal{Z}_{\mu 0}$  - магнитное сопротивление воздушного зазора.

Подставляя в уравнения (7) и (8) уравнения (5) и (6), найдем постоянные интегрирования:

$$A_1 = f_z \frac{3h + 2\mu_0 \pi l^2 \mathcal{Z}_{\mu 0}}{3\mu_0 \pi l \mathcal{Z}_{\mu 0}}; \quad (9)$$

$$B_1 = \frac{A_1}{\mathcal{Z}_{\mu 0}}. \quad (10)$$

Выражение (6) для потока  $\Phi_x$  в относительных единицах с учетом постоянных интегрирования (9) и (10) при  $d_1 \approx 0$  переписывается

в виде

$$\Phi_{x_0} = \frac{\Phi_x}{\Phi_{x=0}} = \frac{2k_\sigma X^3 - k_\sigma(2k_\sigma + 3)X^2 + 2k_\sigma + 3}{2k_\sigma + 3}, \quad (II)$$

где 
$$\Phi_{x=0} = \frac{f_z \ell}{2\alpha_{\mu\sigma}} \frac{4k_\sigma + 6}{3k_\sigma}; \quad (I2)$$

$$k_\sigma = \frac{\mu_0 \pi \ell^2}{h} \alpha_{\mu\sigma} = \frac{2\mu_0}{2\mu_s}, \quad (I3)$$

$\alpha_{\mu s}$  - магнитное сопротивление на пути потока рассеяния между сердечниками;  $X = \frac{x}{\ell}$  - относительная координата участка магнитной линии.

Анализируя полученное выражение (II), можно показать, что при  $X = 0 \div 1,0$  и  $k_\sigma = 0$   $\Phi_{x_0} = const$ .

На рис.2 показаны зависимости  $\Phi_{x_0} = f(X, k_\sigma)$ .

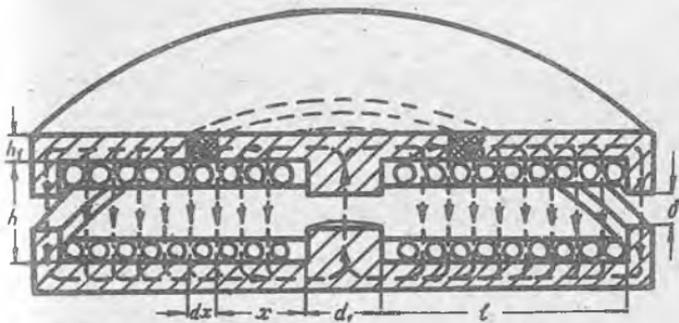


Рис.1. Конструкция преобразователя

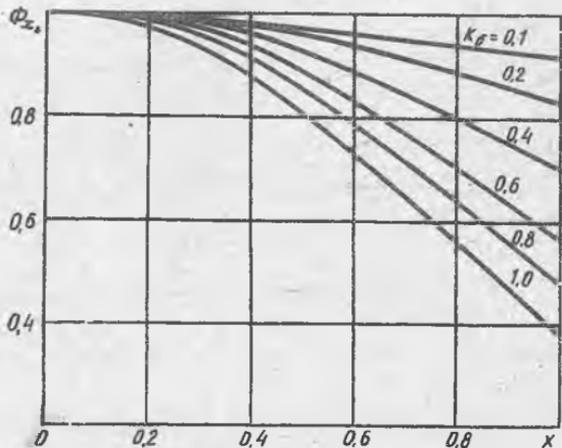


Рис.2. Графики зависимости  $\Phi_{x_0} = f(X, k_\sigma)$

Из графиков следует, что с увеличением координаты  $X$  и коэффициента  $k_0$  магнитный поток  $\Phi_{x_1}$  уменьшается. Таким образом, меняя  $X$  и  $k_0$ , можно подобрать соотношение размеров магнитопровода с необходимым для практики потокораспределением.

Электродвижущая сила самоиндукции в распределенных витках обмотки возбуждения определится из выражения

$$E_{11} = -j\omega\psi_{11} = -j\omega \int_0^l \Phi_{x_1} W_{y_1} dx_1 = -j\omega J_1 l. \quad (I4)$$

Электродвижущая сила взаимной индукции с распределенными витками экранной обмотки определится как

$$E_{12} = -j\omega\psi_{12} = -j\omega \int_0^l \Phi_{x_2} W_{y_2} dx_2 = -j\omega JM. \quad (I5)$$

Если на сердечниках с одинаковым числом витков намотка выполнена идентично, то  $W_{y_1} = W_{y_2} = W_y$ . Из рис. I видно, что для  $dx_1 = dx_2 = dx$   $\Phi_{x_1} = \Phi_{x_2} = \Phi_x$ . Следовательно,  $E_{11} = E_{12} = E$ , а  $L = M$ .

Из выражения (I4) и (I5) с учетом (II) можно выразить индуктивность и взаимную индуктивность как

$$L = M = \frac{1}{J} \int_0^l \Phi_x W_y dx = \frac{W_y^2 l^2}{18 \alpha_{\mu 0}} \frac{18 + 6k_0 - k_0^2}{k_0}. \quad (I6)$$

При более точном расчете параметров индуктивного преобразователя необходимо учитывать влияние на поток  $\Phi_{x_1}$  распределенного магнитного сопротивления сердечника ( $z_{\mu} \neq 0$ ).

Вторая производная от потока  $\Phi_x$  из формулы (I) с учетом равенства (2) дает дифференциальное уравнение второго порядка с правой частью [2]:

$$\frac{d^2 \Phi_x}{dx^2} = \frac{d\Phi_x}{dx} \frac{1}{g} \frac{dg}{dx} + g(\Phi_x z_{\mu} - f_z). \quad (I7)$$

Подставляя (3) и (4) в (I7), получим

$$\frac{d^2 \Phi_x}{dx^2} = \frac{d\Phi_x}{dx} \frac{2}{2x^2 + d_1} + \Phi_x \frac{2\mu_0 \rho_{\mu}}{hh_1} - f_z \frac{\pi \mu_0}{h} (2x + d_1). \quad (I8)$$

Используя метод квадратур, можно определить поток  $\Phi_x$ .

Постоянные интегрирования рассчитываются из краевых условий (7) и (8).

## Выводы

1. В работе предложена методика расчета магнитных и электрических параметров индуктивных преобразователей с учетом продольных распределенных магнитных воздушных проводимостей и магнитных сопротивлений сердечников.

2. Использование на практике предложенной методики позволит

проектировать индуктивные преобразователи с заданной статической характеристикой и необходимой точностью.

### Л и т е р а т у р а

1. З а р и п о в М.Ф., С т а р о б и н с к и й Н.М., Л и м а н о в И.А. Дифференциальный индуктивный датчик перемещений. Авторское свидетельство № 403955. Бюллетень № 43, 1973.
2. З а р и п о в М.Ф., Л и м а н о в И.А. Индуктивные датчики с улучшенными метрологическими характеристиками. Уфа, 1974.

В.Г. Никитин

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ОЦЕНКИ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Трансформаторные преобразователи перемещения в электрический сигнал нашли широкое применение в информационно-измерительных системах благодаря высокой надежности, точности и взаимозаменяемости [1].

Среди известных конструкций преобразователей наиболее предпочтительна конструкция с магнитной цепью, показанной на рис.1. [2]. В рабочем зазоре магнитной цепи распределение магнитного поля практически линейное, что и обуславливает высокие метрологические характеристики такого преобразователя.

В настоящее время наиболее распространенной оценкой точности преобразователей перемещения является степень нелинейности их характеристики. Однако такая оценка недостаточна, поскольку она не отражает основные свойства преобразователей.

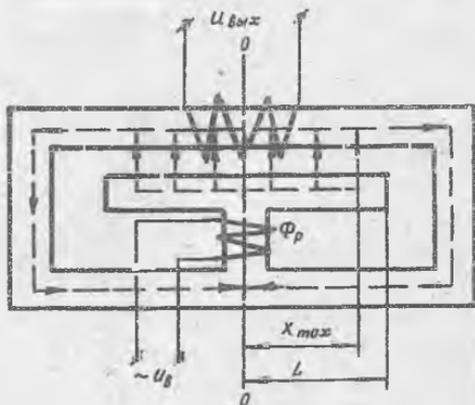


Рис.1