

3. Морс Ф.М., Фемшбах Р. Методы теоретической физики. М., И.,-Л., 1972.

4. Денискин В.П., Никultzин В.С., Трахтенберг Л.И. Авторское свидетельство СССР № 240272, Б.И.№12, 1969.

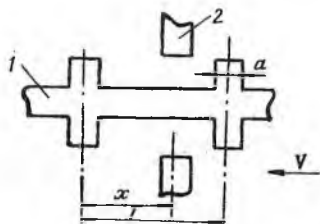
УДК 681.375.53

А.И.Никонов, И.И.Фефелов, И.С.Фролов

О ВЛИЯНИИ ДИНАМИЧЕСКОГО РЕЖИМА  
ЗУБЧАТЫХ ИНДУКТИВНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ  
НА ПОЛОЖЕНИЯ ГРАНИЦ СМЕНЫ КОДА

Анализ динамических свойств зубчатых преобразователей перемещений в код представляет интерес, прежде всего, с точки зрения определения допустимых величин скоростей движения их якорей или кодирующих дисков.

На рис. 1 изображены конструктивные элементы модулятора магнитной проводимости преобразователя накапливающего типа. Такая конструкция



Р и с.1. Рабочие зазоры преобразователя накапливающего типа: 1- шаг нанесения зубцов; а-длина зуба; х-внутришаговая координата центра пары подвижных зубцов 1, расположенных слева от пары неподвижных зубцов 2; V - скорость перемещения подвижной части

соответствует, кроме того, одному разряду преобразователя считывания (рис.2), где подвижная часть 4 образует рабочие зазоры с магнитопроводами считывающих элементов 1-3.

Рассмотрим мостовую схему [1], в плечо которой включена рабочая обмотка зубчатого преобразователя (рис. 3). Ее выход 1-2 через усилитель и детектор связаны со входом порогового устройства.

Обозначим

$$e(t) = E_m \cos \omega t, \quad (1)$$

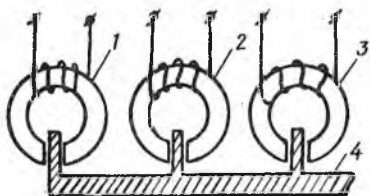
где  $E_m$  - амплитуда питающего напряжения частоты  $f = \frac{\omega}{2\pi}$  ;  
 $G_p(x)$  - проводимость магнитной цепи зубчатого преобразователя;  
 $G_s$  - магнитная проводимость компенсационного дросселя;  
 $Z$  - величина опорного сопротивления.

Добротность рабочей обмотки полагаем достаточно высокой. Известно [2], что на участках  $x \in [0, a]$ ,  $x \in (a, T-a)$ ,  $x \in [T-a, T]$  зависимость  $G_p(x)$  аппроксимируется непрерывными функциями, например:

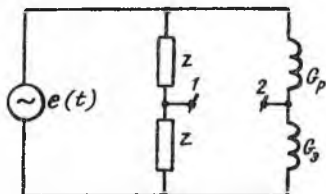
$$G_p = \frac{\alpha q + \beta}{q + \gamma}, \quad (2)$$

где  $\alpha, \beta, \gamma$  - некоторые постоянные,

$$q = x(T-x). \quad (3)$$



Р и с.2. Рабочие зазоры преобразователя считывания



Р и с.3. Мостовая схема считывания

Величину координаты границы смены кода  $x_M$  в случае  $V=0$  определяет уровень срабатывания порогового устройства  $U_r$ , приведенный с учетом коэффициентов детектирования и усиления к выходу I-2, т.е. величина  $x_M$  представляет собой решение уравнения, полученного простым преобразованием известного выражения для выходного напряжения мостовой схемы [1]:

$$G_p(x_M) = \frac{E_m + 2U_r}{E_m - 2U_r} G_3. \quad (4)$$

Допустим, что рабочие срабатывания порогового устройства осуществляются при однонаправленном движении якоря, например, при убывании уровня выходного напряжения схемы (см.рис.3) т.е. рассмотрим корень уравнения (4), находящийся в интервале  $(0; 0,5T)$ . Обозначив через  $\rho(G_p)$  функцию, обратную  $G_p(x)$ , имеем

$$x_M = \rho\left(\frac{E_m + 2U_r}{E_m - 2U_r} \theta_3\right). \quad (5)$$

Для  $G_p(x)$ , определяемой из равенства (2),

$$\rho(G_p) = \frac{1}{2} \left( T - \sqrt{T^2 - 4 \frac{\beta - G_p \gamma}{\alpha}} \right). \quad (6)$$

В случаях, когда аппроксимирующая зависимость  $G_p(x)$  не имеет явно выраженной обратной функции, или при чрезмерной громоздкости записи последней [2] уравнение (4) решается известными приближенными методами [3].

С перемещениями якоря преобразователя в его обмотке возникает генераторная ЭДС, которая учитывается в уравнениях:

$$e(t) = \frac{d}{dt} [i(L_p + L_s)]; \quad (7)$$

$$U_{12}(t) = \frac{e(t)}{2} - L_s \frac{di}{dt}, \quad (8)$$

где  $U_{12}(t)$  - мгновенные значения выходного напряжения (рис. 3);  
 $i(t)$  - мгновенные значения тока обмотки преобразователя;  
 $L_p, L_s$  - индуктивности рабочей и компенсационной обмоток (рис. 3).

Функцию  $i(t)$  и ее производную находим путем решения равенства (7):

$$i(t) = \frac{E_m \sin \omega t}{\omega(L_p + L_s)}; \quad (9)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{E_m}{L_p + L_s} \cos \omega t - \frac{E_m L_p'}{\omega(L_p + L_s)} \sin \omega t, \quad (10)$$

причем

$$L_p' = \frac{dL_p}{dx} = \frac{1}{V} \frac{dL_p}{dt}. \quad (11)$$

Далее из выражения (8) получаем

$$U_{12}(t) = U_{gm} \cos(\omega t - \varphi); \quad (12)$$

$$\varphi = \arctg \frac{2V G_s G_p}{\omega(G_p^2 - G_s^2)}; \quad (13)$$

$$U_{gm} = \frac{E_m}{2} \frac{G_p - G_s}{G_p + G_s} \sqrt{1 + \left[ \frac{2G_s G_p' V}{(G_p^2 - G_s^2) \omega} \right]^2}. \quad (14)$$

В формуле (14)

$$G_p' = \frac{dG_p(x)}{dx}. \quad (15)$$

Предварительно обозначив

$$W = \frac{E_m}{2} \frac{G_p - G_s}{G_p + G_s}, \quad (16)$$

оггибающую выходных сигналов схемы (рис. 3) можно выразить также следующим образом:

$$U_{gm} = \sqrt{W^2 + \left(\frac{V}{\omega}\right)^2 (W')^2}, \quad (17) \text{ где } W' = \frac{dW}{dx}. \quad (18)$$

$$(18)$$

Координата границы смены кода  $x_{mq}$  в динамическом режиме находится из равенства (17) при  $U_{gm} = U_r$ .

Если величину  $x$  выразить явно из равенства (17) невозможно или сложно, тогда как функция  $P(G_p)$  является явной, то при вычислении значений  $x_{mq}$  целесообразно прибегнуть к итерационному процессу. За начальные приближения приняты:

$$W_0 = U_r, \quad x_0 = x_m = P\left(\frac{E_m + 2W_0}{E_m - 2W_0} G_3\right) \quad (19)$$

Далее по формулам

$$W_{i+1} = \sqrt{U_r^2 - \left(\frac{V}{\omega}\right)^2 [W'(x_i)]^2}; \quad (20)$$

$$x_{i+1} = P\left(\frac{E_m + 2W_{i+1}}{E_m - 2W_{i+1}} G_3\right) \quad (21)$$

последовательно находятся  $W_1, x_1, W_2, x_2$  и т.д.

Другой способ решения заключается в том, что обе части уравнения (14) возводятся в квадрат, после чего имеем

$$[2U_r(G_p + G_3) - E_m(G_p - G_3)] [2U_r(G_p + G_3) + E_m(G_p - G_3)] (G_p + G_3)^2 - \left(\frac{2E_m G_3 G_p' V}{\omega}\right)^2 = 0. \quad (22)$$

Решением (22), соответствующим координате  $x_{mq}$ , является такое, которое при  $V = 0$  обращается в  $x_m$ . К уравнению (22) в том случае, когда оно не решается точно, применимы приближенные методы [3].

Если расчетная формула для  $G_p(x)$  имеет вид (2), то равенство (22) есть уравнение 4-й степени относительно  $q$ :

$$A(B - Cq)(D - Eq)^2(q - q_0) + F\left(q - \frac{T^2}{4}\right)\left(\frac{V}{\omega}\right)^2 = 0, \quad (23)$$

где

$$A = (2U_r + E_m)G_3 - (E_m - 2U_r)\alpha; \quad (24)$$

$$B = (E_m + 2U_r)\beta - (E_m - 2U_r)G_3\gamma; \quad (25)$$

$$C = (E_m - 2U_r)G_3 - (E_m + 2U_r)\alpha; \quad (26)$$

$$D = \beta + G_3\gamma; \quad (27)$$

$$E = -(\alpha + G_3); \quad (28)$$

$$F = 16(\beta - \alpha\gamma)^2 E_m^2 G_3^2; \quad (29)$$

$$q_0 = x_m(T - x_m). \quad (30)$$

Для приближенного вычисления  $q$  используется итерационная формула (начальное приближение -  $q_0$ ):

$$q_{i+1} = q_0 + \frac{F(0,25T^2 - q_0)}{A(B - Cq_i)(D - Eq_i)^2 \left(\frac{\omega}{V}\right)^2 + F} \quad (31)$$

Величина  $x_{нд}$  получена из выражения (3):

$$x_{нд} = 0,5(T - \sqrt{T^2 - 4q}) \quad (32)$$

Необходимое для нахождения  $x_{нд}$  с точностью  $\delta x_{нд} < \epsilon$  количество приближений  $n$  определяется путем оценки (с использованием метода математической индукции) разности  $q - q_n$ :

$$n > \frac{\epsilon q_0 + \epsilon q [(T - 2x_0)x_0] + \epsilon q (1 - K) - \epsilon q (q_1 - q_0)}{\epsilon q K} \quad (33)$$

причем

$$K = F \left( \frac{T^2}{4} - q_0 \right) \frac{|A \left( \frac{\omega}{V} \right) (D - Eq_0) (3CE \frac{T^2}{4} - CD - 2BE)|}{\left[ A(B - C \frac{T^2}{4}) (D - E \frac{T^2}{4})^2 \left( \frac{\omega}{V} \right)^2 + F \right]^2}; \quad (34)$$

$$x_0 = x_{нд}(q_0) \quad (35)$$

Относительные изменения координаты  $x_{нд}$ , рассчитанные для исходных данных:

$$a = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \quad T = \frac{19\pi}{12} 10^{-3} \text{ м}; \quad f = 800 \text{ Гц}; \quad E_m = 6 \text{ В}$$

и получившие экспериментальное подтверждение, составляют:

$$\text{для } V = 0,2 \text{ м/с} - 0,12 \%,$$

$$\text{для } V = 1 \text{ м/с} - 2,5 \%.$$

Приведенные расчетные соотношения целесообразно использовать, в частности, при разработках индуктивных кодирующих устройств с заданными параметрами воздействия динамического режима для определения влияния его на точность отсчета.

## Л и т е р а т у р а

1. А г е й к и н Д.И. и др. Датчики контроля и регулирования. М., "Машиностроение", 1965.

2. С р и б н е р Л.А. Точность индуктивных преобразователей перемещений. М., "Машиностроение", 1975.

3. Б р о н ш т е й н И.Н., С е м е н д я е в К.А. Справочник по математике. М., Физматгиз, 1962.