

## МОДЕЛЬ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ЦЕПИ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ С ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА НА НЕПОДВИЖНЫЙ

Н.Н. Васин

Измерительная цепь системы передачи аналогового сигнала термопары  $E_{тп}$  с вращающегося объекта на неподвижный (рис. 1) содержит передающую катушку  $L_{п1}$ , магнитное поле которой взаимодействует с приемной катушкой  $L_{п2}$ , приемно-компенсационную катушку  $L_{пк1}$ , в которой поле компенсирующей катушки  $L_k$  наводит постоянную э.д.с.  $E_n$  [1,2].

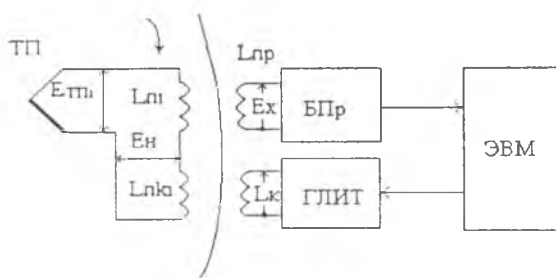


Рис. 1

В цепи протекает постоянный ток  $i = (E_{тп} - E_n)/r$ , где  $r$  - сопротивление обмоток катушек  $L_{п1}$ ,  $L_{пк1}$ , удлинительных проводов и внутреннего сопротивления ТП. Ток  $i$  создает магнитное поле передающей катушки  $L_{п1}$ . При прохождении  $L_{п1}$  между секциями приемной  $L_{п2}$  в последней наводится электрический сигнал  $E_x = d\Phi_n/dt = d/dt (M_{п1} \cdot I)$ , определяемый изменением потока взаимной индукции  $M_{п1}$  узла приемо-передачи (УПП) между передающей  $L_{п1}$  и приемной  $L_{п2}$  катушками. Когда при вращении объекта передающая катушка  $i$ -го канала находится между двумя секциями приемной, то соответствующая  $L_{пк1}$  находится между секциями компенсирующей. На  $L_k$  подается линейно изменяющийся ток с генератора ГЛИТ, при этом в  $L_{пк1}$  наводится постоянная э.д.с.  $E_n$ , амплитуда которой определяется скоростью изменения тока генератора ГЛИТ. Скорость нарастания тока ГЛИТ меняется по заданной программе и по скорости в момент компенсации, когда  $E_{тп} =$

$E_n = 0$ , судят о величине измеряемой э.д.с. Етп. Блок преобразования Бпр усиливает сигнал  $E_x$ , преобразует его в цифровой код и вводит в ЭВМ.

Простейшей моделью УПП является контур  $l_n$  с протекающим по нему током  $i$ , взаимодействующий с контуром  $l_{nр}$  (рис.2). Центр контура  $l_n$  движется по окружности радиуса  $R$  со скоростью  $V = R \cdot \omega = R \, d\varphi/dt$  и сам контур находится в плоскости  $R\varphi$ . Центр контура  $l_{nр}$  располагается над данной окружностью на высоте  $h$  и плоскость контура параллельна плоскости  $R\varphi$ . Магнитный поток, создаваемый контуром  $l_n$  в контуре  $l_{nр}$  будет равен

$$= \frac{\mu_0 i}{4\pi} \int \int \frac{d\vec{l}_i \cdot d\vec{l}_{i\delta}}{D} = \frac{\mu_0 i \cdot r_1 \cdot r_2}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{\cos(\alpha - \beta)}{D} d\alpha d\beta$$

$$\text{где } D = \sqrt{h^2 + r_1^2 + r_2^2 + c^2 + 2c(r_2 \cos\beta - r_1 \cos\alpha) - 2r_1 r_2 \cos(\alpha - \beta)}$$

$\alpha - \beta$  - угол между вектором  $d\vec{l}_i$  и проекцией  $d\vec{l}_{i\delta}$  на плоскость  $R\varphi$ ;  $d\vec{l}_i = r_1 \, d\alpha$ ,  $d\vec{l}_{i\delta} = r_2 \, d\beta$ ;  $r_1, r_2$  - соответственно радиусы передающего  $l_i$  и приемного  $l_{i\delta}$  контуров,  $c = 2R \sin \varphi/2$  расстояние между векторами  $d\vec{l}_i$  и  $d\vec{l}_{i\delta}$ .

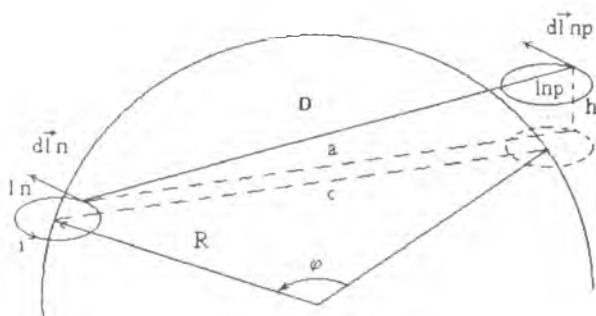


Рис.2

Численное интегрирование (1) при  $R=20$  и значениях  $r_1 = r_2=1$  для различных высот  $h$  дало результаты, приведенные на рис.3, где  $\dot{\Phi} = \dot{O} \cdot 4\pi/\mu_0 \cdot i$  - безразмерный поток. С уменьшением высоты  $h$  поток взаимной индукции резко возрастает. Для снижения данной зависимости рекомендуется использовать два контура приемной катушки  $l_{n1}, l_{n2}$ , которые устанавливаются по обе стороны от плоскости вращения передающей катушки. В этом случае уменьшение расстояния (по высоте) между  $l_{n2}$  и  $l_{i\delta}$  увеличивает расстояние (по высоте) между  $l_{n1}$  и  $l_{i\delta}$ . Смещение по высоте на 0.1 расстояния между приемными контурами приводит к

изменению потока на 2%. В приемном контуре  $I_{pr}$  наводится сигнал  $E_x$ , обусловленный изменением потока взаимной индукции контуров  $I_n$  и  $I_{pr}$ . При постоянном токе измерительной цепи  $i = (E_{тп} - E_n)/r$  сигнал  $E_x$  будет определяться изменением коэффициента связи между  $I_n$  и  $I_{pr}$ , форма которого соответствует форме зависимости  $\Phi=f(\varphi)$ , приведенной на рис.3. В случае постоянной скорости вращения

ротора  $\omega$  текущая фаза  $\varphi = \omega t$ , а сигнал  $E_x = -d\Phi/dt = -\omega d\Phi/d\varphi$ .

$$\frac{d\Phi}{d\varphi} = \frac{(\mu_0 i r_1 r_2)}{(4\pi)}$$

$$\iint_{\alpha, \beta} \frac{2R^2 \sin 2\varphi + 2R \cos \alpha (r_1 \cos \beta - r_2 \cos \alpha) \cos(\alpha - \beta)}{\sqrt{(r^2 + r_1^2 + r_2^2 + c^2 + 2\alpha(r_2 \cos \beta - r_1 \cos \alpha) - 2r_1 r_2 \cos(\alpha - \beta))}} d\alpha d\beta$$

Наведенный в приемной катушке информационный сигнал представляет собой симметричный двуполярный импульс  $E_x$ , зависящий от скорости вращения ротора  $\omega$ . Поэтому при изменении скорости, например на порядок, на столько же увеличивается и динамический диапазон сигнала  $E_x$ . Для устранения данной зависимости предварительно усиленный сигнал  $E_x$  интегрируется. Форма сигнала  $U_i$  после интегрирования аналогична форме зависимости  $\Phi=f(\varphi)$ , приведенной на рис.3. С изменением скорости вращения  $\omega$  сигнал  $U_i$  сжимается или растягивается, а амплитуда его остается без изменения. В системах с отрицательной обратной связью чувствительность и точность системы определяются, главным образом, чувствительностью и точностью преобразователя в цепи обратной связи. Основным элементом преобразователя обратной связи является узел компенсации, включающий компенсирующую и приемнокомпенсационную катушки (рис.4). Компенсирующая катушка состоит из четырех секций  $L_{k1}, L_{k2}, L_{k3}, L_{k4}$ , по которым протекает ток  $I$ . Витки всех секций компенсирующей катушки расположены вдоль линии, по которой движутся приемнокомпенсационные катушки  $L_{пк}$ . Поэтому магнитное поле, создаваемое компенсирующей катушкой, будет равномерным вдоль всего пути движения  $L_{пк}$ .

Моделью узла компенсации, представленного на рис.4, являются четыре круговых контура  $I_{k1}, I_{k2}, I_{k3}, I_{k4}$  компенсирующей катушки и контур  $I_{пк}$  - приемнокомпенсационной (рис.5). Суммарное поле, создаваемое компенсирующими контурами, будет определяться алгебраической разностью полей контуров  $I_{k1}$  и  $I_{k3}$  верхней секции,  $I_{k2}$  и  $I_{k4}$  - нижней и суммой полей верхней и нижней секций. В ка-

честве допущения принимается, что поле является квазистационарным, т.е. скорость изменения тока в контуре невысока, токами смещения можно пренебречь и рассматривать поле постоянного тока, протекающего по контуру  $l_k$ .

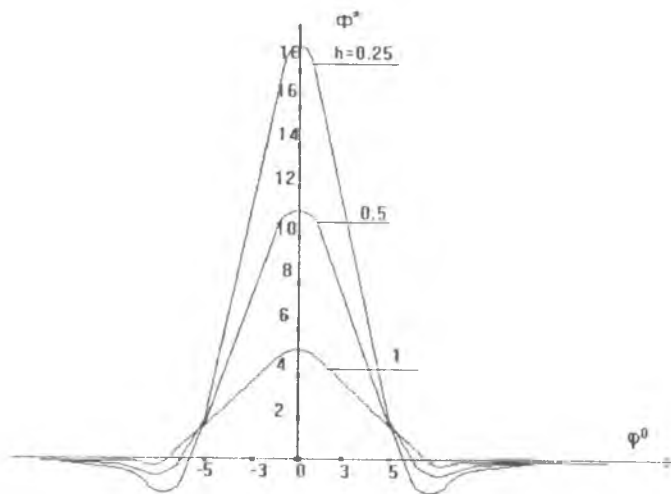


Рис.3

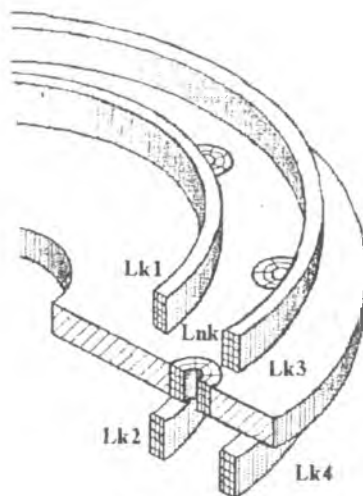


Рис.4

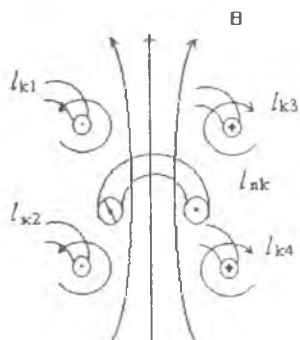


Рис.5

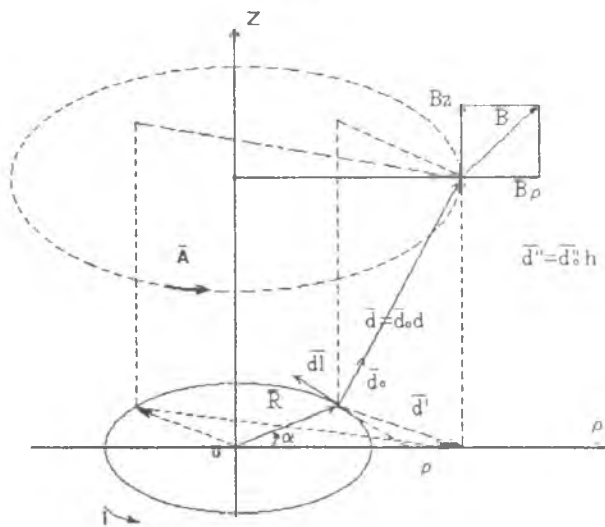


Рис.6

Наибольший интерес представляет составляющая  $B_z$ , поскольку контур приемнокомпенсационной катушки  $l_{nk}$  находится в плоскости, параллельной плоскости контура  $l_k$ . Через площадь контура  $l_{nk}$  будет протекать поток  $\Phi$  составляющей  $B_z$  магнитной индукции, нормальной к плоскости контура  $l_{nk}$ . Изменение потока  $\Phi$  во времени обуславливает наведенную э.д.с.  $E_n$  во втором контуре. Магнитная индукция в произвольной точке пространства от элемента  $dl$  контура с током равна

$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{[d\vec{l}\vec{d}_0]}{d^2}$ . Единичный вектор  $\vec{d}_0 = \vec{d}_0/d$ , где  $d$  - расстояние от элемента  $d\vec{l}$  контура с током  $I$  до точки, в которой определяется магнитная индукция (рис.6).

Магнитная индукция от всего контура  $\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \int \frac{[d\vec{l}\vec{d}_0]}{d^2} dl$   $[d\vec{l}\vec{d}_0] = [d\vec{l}\vec{d}] \wedge d$ .

Вектор  $d\vec{l} = R d\alpha$ , где  $R$  - радиус контура  $lk$ . Составляющая  $B_z$  определяется произведением проекции вектора  $\vec{d}$  на плоскость  $\rho\alpha$  полярной системы координат, поэтому составляющая  $B_z$  магнитной индукции

$$B_z = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{R^2 - R\rho \cos\alpha}{\sqrt{(R^2 + h^2 + \rho^2 - R\rho \cos\alpha)^3}}$$

Расчет выражения  $B_z$  проведен с использованием численных методов интегрирования.

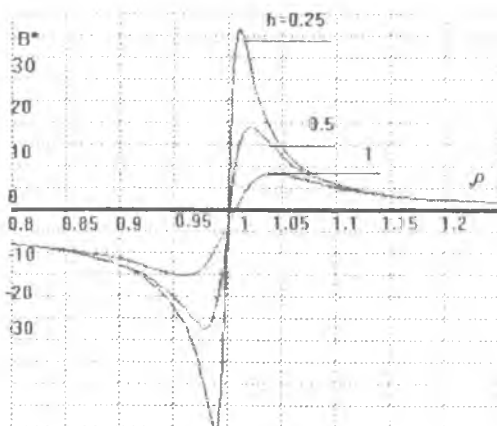


Рис.7

Результаты расчетов безразмерной индукции  $B^* = B_z \cdot 4\pi / \mu_0 I$  приведены на графиках рис.7, из которых следует, что при изменении координаты  $\rho$  магнитная индукция нарастает, достигая максимума при значениях  $\rho = (0.9 \dots 0.99)R$ , затем  $B^*$  переходит через ноль, проходит минимум и плавно уменьшается. На рис.8 приведены графики зависимости суммарной магнитной индукции четырех контуров  $lk1 \dots lk4$  в области, где размещается контур  $lnk$ . Контуры  $lk1, lk2$  имеют еди-

ничный радиус  $R=1$ , радиус контуров  $k_3, k_4$  составляет  $1.2R$ . По высоте верхняя и нижняя секции разнесены на  $0.2R$ .

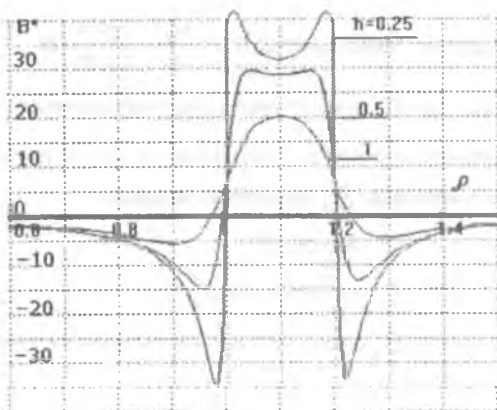


Рис. 8

Из графиков следует, что зависимость  $B^* = f(\rho)$  - вогнутая в верхней и нижней части области размещения  $l_{pk}$  и выпуклая в середине области. Поэтому можно предположить, при интегрировании магнитной индукции по объему катушки  $l_{pk}$  результат, т.е. поток  $\Phi$  не будет сильно изменяться при малых смещениях  $l_{pk}$  относительно исходного положения. Данное предположение подтверждается при экспериментальном исследовании устройства, конструкция узла компенсации которого достаточно инвариантная к смещению катушки  $l_k$  относительно исходного положения. Смещение катушки  $l_k$  на  $0.1$  своей толщины по высоте приводит к погрешности  $0.1\%$ , что вполне удовлетворяет требованиям к точности системы. Полученные результаты хорошо совпадают с экспериментальными данными.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Васин Н.Н. Авт. св. N 1619070, опубли. БИ, 1991, N1, стр. 122.
2. Васин Н.Н., Лиходедов А.П. Система для измерения сигналов термоэлектрических датчиков, расположенных на вращающихся объектах. Приборы и техника эксперимента, N2, 1992.