

АНАЛИЗ ОСНОВНЫХ СООТНОШЕНИЙ БЕСКОНТАКТНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ПЛОСКОЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ОБМОТКОЙ

Бесконтактные функциональные преобразователи (БФП), благодаря отсутствию подвижных контактов, находят широкое применение в технике для моделирования, а также в качестве счетно-решающих элементов. Известные конструкции (1) с П-образным сердечником и распределенной измерительной обмоткой, число витков которой на единицу длины меняется по закону производной от требуемой зависимости, нетехнологичны в изготовлении, имеют низкую точность. Наиболее эффективны преобразователи, у которых в качестве измерительной используется плоская обмотка. Конструкция такого преобразователя показана на рис. 1.

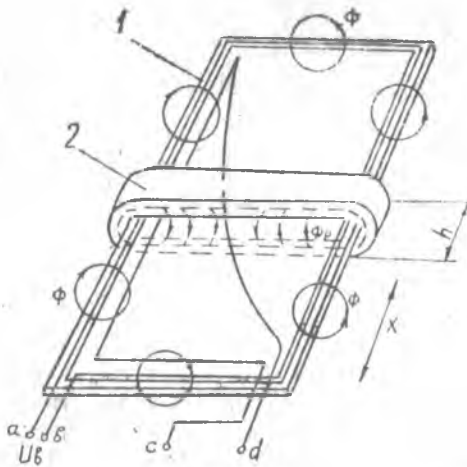


Рис. 1.

На изоляционную пластинку 1 по шаблону или методом печатного монтажа уложена плоская измерительная обмотка cd , контур которой меняется в соответствии с заданной функциональной зависимостью.

Одновременно по периметру пластинки 1 уложена обмотка возбуждения ab , создающая равномерный поток Φ . Замкнутый магнитопровод (конденсор) 2 может перемещаться вдоль пластинки 1, меняя тем самым потокоцепление между обмотками ab и cd . В зависимости от координаты x равномерный рабочий поток Φ_p прони-

зывает различную площадь обмотки cd , что и определяет значение выходной э. д. с.

На рис. 2 показана эквивалентная схема преобразователя, где R_1, R_2, L_1, L_2 — соответственно, активные и индуктивные сопротивления первичной и измерительной обмоток;

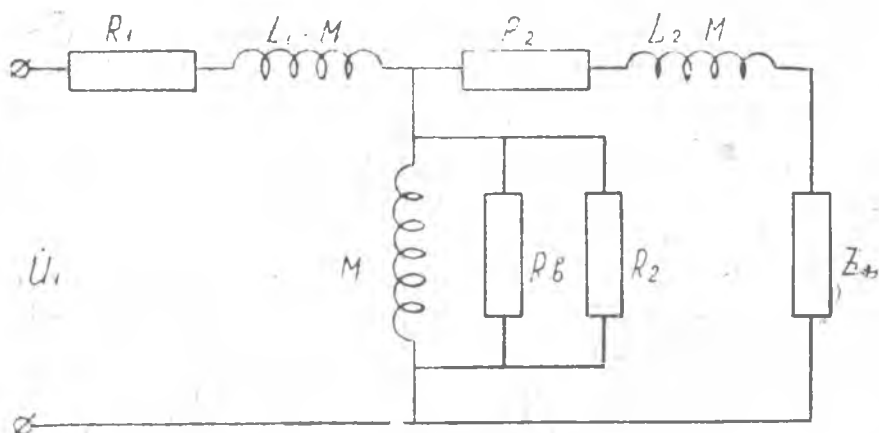


Рис. 2.

M — взаимоиנדуктивностъ обмоток;

Z_H — сопротивление нагрузки;

R_B, R_r — сопротивления на вихревые токи и гистерезис.

При промышленной частоте потери в стали малы и сопротивлениями R_B и R_r можно пренебречь.

Уравнения Кирхгофа запишутся следующим образом:

$$U_1 = R_1 I_1 + j\omega(L_1 - M)I_1 + j\omega(I_1 + I_2);$$

$$0 = R_2 I_2 + j\omega(L_2 - M)I_2 + j\omega M(I_1 + I_2) + Z_H I_2. \quad (1)$$

В режиме холостого хода, при $Z_H \rightarrow \infty$

$$U_1 = R_1 I_1 + j\omega L_1 I_1. \quad (2)$$

Полное активное сопротивление катушки определится:

$$R_1 = R_0 + R_\infty, \quad (3)$$

где R_0 — активное сопротивление постоянному току;

R_∞ — активное сопротивление катушки, обусловленное потерями в стали на вихревые токи и гистерезис,

$$R_\infty = x_m \cdot \operatorname{tg} \theta;$$

здесь x_{μ} — реактивное сопротивление катушки;

Θ — угол между потоком и намагничивающей силой.

Индуктивность обмотки определится через параметры конденсатора

$$L = \frac{\omega_1^2}{\sqrt{2}} \left(\frac{1}{R_{\mu\epsilon}} + \sigma_s \right), \quad (4)$$

где ω_1 — число витков первичной обмотки;

$R_{\mu\epsilon}$ — эквивалентное сопротивление конденсатора;

σ_s — проводимости рабочим потокам и потокам выпучивания.

Значение σ_s определится из рис. 3:

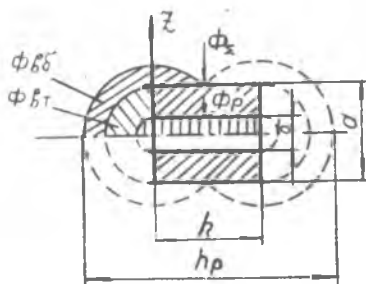


Рис. 3.

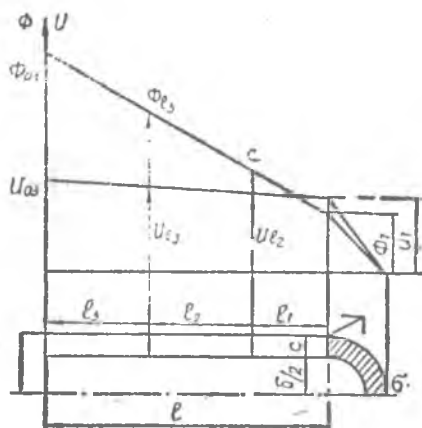


Рис. 4.

$$\sigma_s = \sigma_p + \sigma_{\delta T} + \sigma_{\delta\delta},$$

где σ_p , $\sigma_{\delta T}$, $\sigma_{\delta\delta}$ — проводимости соответственно рабочему потоку, потоку выпучивания с торца конденсатора и с поверхности.

Их значения определяются аналитическим путем, или путем построения картины поля [2].

Эквивалентное сопротивление конденсатора определится из рис. 4,

$$R_{\mu\epsilon} = R_{\mu c} + R_T = \rho_k \frac{2l}{s} + \frac{1}{\mu_0 \frac{h}{\pi} \ln \left(1 + \frac{2c}{\delta} \right)}. \quad (5)$$

Подставляя в (2) значения сопротивлений и индуктивности, получим:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 (R_0 + R_{\sim}) + j\omega \dot{I}_1 \frac{\omega_1^2}{\sqrt{2}} \left(\frac{1}{R_{\mu\epsilon}} + \sigma_s \right). \quad (6)$$

Отсюда ток возбуждения при холостом ходе:

$$\dot{I}_{1\text{в}} = \frac{\dot{U}_1}{(R_0 + R_{\sim}) + j\omega \omega_1^2 \left(\frac{1}{R_{\mu\epsilon}} + \sigma_s \right)}. \quad (7)$$

Э. д. с. в измерительной обмотке

$$E_2 = -j\omega\omega_{II} \Phi_p' \int_x^{x+h} f(x) dx. \quad (8)$$

Суммарный магнитный поток, пронизывающий плоскую измерительную обмотку, равен:

$$\Phi_p' = I_1 \omega_1 \sigma_s. \quad (9)$$

Подставляя (9) в (8), получим:

$$E_2 = -j\omega\omega_1\omega_2 I_1 (\sigma_p + \sigma_{вТ} + \sigma_{в6}) \int_x^{x+h} f(x) dx,$$

где $f(x)$ — уравнение контура измерительной обмотки.

Подставляя значение тока возбуждения при холостом ходе получим:

$$E_2 = -j\omega\omega_1\omega_2 \frac{U_1 (\sigma_p + \sigma_{вТ} + \sigma_{в6}) \int_x^{x+h} f(x)}{(R_0 + R_{\sim}) + j\omega\omega_1^2 \left(\frac{1}{R_{\mu\epsilon}} + \sigma_s \right)}. \quad (10)$$

Закон изменения $f(x)$ определится при решении уравнения:

$$\int_x^{x+h} f(x) dx = \varphi(x), \quad (11)$$

где $\varphi(x)$ — заданная функциональная зависимость.

Пусть $\varphi(x) = x^2$. Первообразная для $f(x)$ запишется

$$f(x) = [F(x)]' \quad (12)$$

Выразим $F(x)$ через полином на степень выше заданной зависимости:

$$F(x) = ax^3 + bx^2 + cx.$$

Раскрывая интеграл (11), получим:

$$F(x+h) - F(x) = x^2.$$

Определив коэффициенты a , b , c и учтя равенство (12), получим:

$$f(x) = \frac{x^2}{h} - x + \frac{h}{6} \quad (13)$$

Отсюда видно, что значение $f(x)$ зависит от ширины конденсора h , которую с учетом потоков выпучивания необходимо определять по формуле

$$h_p = h + 2\delta (g_{т.р} + g_{z.6}) \quad (14)$$

Значение δ определяется по Ротерсу (2) и равно 0,52. Значение g_{z6} определяется из графика рис. 5 для соответствующего $\frac{z}{\Gamma}$.

Значение координаты потоков выпучивания определится

$$Z = \frac{a - \delta}{2} + \frac{h}{2}.$$

Для учета влияния изменения магнитного сопротивления стали вдоль длины конденсора разобьем всю длину на ряд участков (рис. 4), каждый из которых примем за пассивный четырехполюсник с постоянным комплексным магнитным сопротивлением.

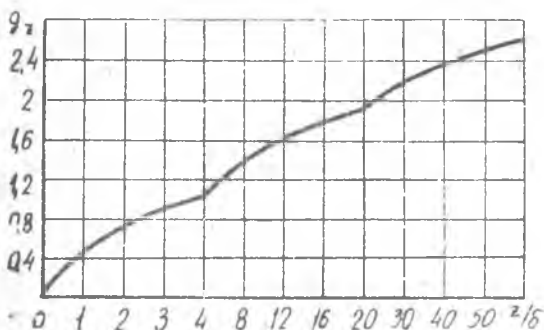


Рис. 5.

$$U_{e_1} = \Phi_{e_1} \cdot Z_{\mu e_1} = \Phi_{e_1} \cdot \frac{1}{\sigma_1}.$$

На длине первого участка l_1 по индукции e_1 В = $\frac{\Phi_{e_1}}{S_1}$ определим комплексное магнитное сопротивление конденсора и магнитную проводимость

$$Z_{\mu 1} = 2\rho_{z_1} \frac{l_1}{S_1}; \quad \sigma_{s_1} = \sqrt{2} \rho_0 g l,$$

где q — удельная проводимость на единицу длины.

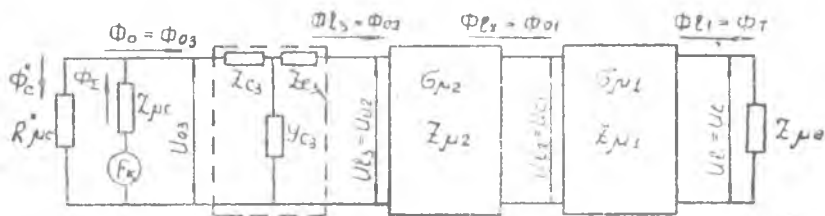


Рис. 6.

Значение потока и магнитного напряжения на входе первого четырехполюсника или на выходе второго определится из выражений

$$\Phi_{o_1} = \frac{U_0}{Z_{n_1}} \left(1 + \sigma_s Z_{\mu e_1} + \frac{1}{2} \sigma_{s_1} Z_{\mu 1} \right) = \Phi_{e_1};$$

$$\dot{U}_{01} = \dot{\Phi}_{e_1} \cdot \dot{Z}_{m_1} = \dot{U}_{e_2},$$

где \dot{Z}_{m_1} — эквивалентное сопротивление четырехполюсника, определяемое через параметры конденсора.

$$\dot{Z}_{m_1} = \left(2 + \frac{1}{2} \dot{Z}_{\mu_1} \sigma_{s_1} \right) \left(\frac{1}{2} \dot{Z}_{\mu_e} + \dot{Z}_{\mu_{e_1}} \right) - \dot{Z}_{\mu_{e_1}}$$

Здесь Z_{me} — комплексное сопротивление стали на длине l_1 .

По известным значениям $\dot{\Phi}_{e_2}$ и \dot{U}_{e_2} определим входные величины для второго четырехполюсника

$$\dot{\Phi}_{02} = \frac{\dot{U}_{02}}{\dot{Z}_{m_2}} \left(1 + \sigma_{s_2} \dot{Z}_{\mu_{e_2}} + \frac{1}{2} \sigma_{s_2} \dot{Z}_{\mu_{e_2}} \right) = \dot{\Phi}_{e_3};$$

$$\dot{U}_{02} = \dot{\Phi}_{e_3} \dot{Z}_{m_2} = \dot{U}_{e_3}.$$

Аналогично и для третьего четырехполюсника:

$$\dot{\Phi}_{03} = \frac{\dot{U}_{03}}{\dot{Z}_{m_3}} \left(1 + \sigma_{s_3} \dot{Z}_{\mu_{e_3}} + \frac{1}{2} \sigma_{s_3} \dot{Z}_{\mu_{e_3}} \right)$$

$$\dot{U}_{03} = \dot{\Phi}_{e_3} \cdot \dot{Z}_{m_3}.$$

Общий поток определится как сумма потоков всех четырехполюсников. На рис. 4 показано распределение потока и магнитного напряжения, вдоль длины конденсора, выполненного из Армко. При заданном значении потока в зазоре $B_p = 0,2$ тл., величине воздушного зазора $\delta = 5$ мм и длине конденсора $l = 80$ мм поток и магнитное напряжение распределились по линейному закону.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Троицкий «Электромеханические функциональные преобразователи». Электротехника № 12, 1963.

2. Б. К. Буль. «Основы теории и расчета магнитных цепей». Энергия, М.-Л., 1964