

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДАТЧИКА МАЛЫХ ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ

**Ф. И. МАМЕДОВ, Р. Б. ДАДАШЕВА, Р. А. ГУСЕЙНОВ, Ш. Т. МАМЕДОВА,
К. Ф. АСАДОВА**

Сумгаитский государственный университет, Сумгаит, Азербайджан,
e-mail: esmerldo09@rambler.ru

Выполнен анализ энергетических показателей датчика трансформаторного типа для измерения малых линейных перемещений. На основе эквивалентной схемы замещения датчика получена аналитическая формула, позволяющая определить зависимость относительной погрешности датчика от его коэффициента полезного действия. Установлено, что при калибровке датчика необходимо учитывать одновременно потребляемую мощность от объекта измерения и информационную мощность, характеризующие его выходной сигнал.

Ключевые слова: энергетические показатели, электромагнитный датчик.

The power analysis of transformer type sensor for small linear displacements measurement is carried out. On the basis of an equivalent circuit of this sensor design the analytical formula is received, allowing to define the dependence of the sum of errors from its efficiency factor. It is established, that at calibration of the sensor is necessary to consider the simultaneous power consumption from the measurement object and the information power, characterizing its output signal.

Key words: power parameters, electromagnetic sensor.

При разработке измерительных приборов и устройств необходимо учитывать связь между их точностными и энергетическими показателями [1]. Попытки анализа энергетических процессов, происходящих в измерительных устройствах, предпринимались многими авторами [2, 3], однако прямая количественная связь между энергетическими и точностными показателями датчиков в приборостроении пока не используется.

Ниже приведены результаты исследования относительной погрешности в зависимости от коэффициента полезного действия датчика трансформаторного типа, предназначенного для измерения малых линейных перемещений, на основе учета его энергетических показателей.

Поскольку информация передается потоком энергии по цепи электромагнитного датчика, его конструирование связано с принципом обеспечения наиболее эффективной передачи энергии. Этот принцип, общий для любых энергетических или параметрических преобразователей, вытекает из теории четырехполюсников и является основой согласования их входных и выходных сопротивлений. Чтобы определить соотношения, характеризующие передачу энергии по цепи измерительных преобразователей, достаточно проанализировать работу указанного конкретного электромагнитного датчика.

Конструктивная схема исследуемого датчика представлена на рис. 1. Датчик состоит из П-образного неподвижного 3 и подвижного 2 (якорь) магнитопроводов, первичной обмотки возбуждения 4 и вторичной измерительной обмотки 1. Магнитопроводы выполнены из шихтованной электротехнической стали и имеют прямоугольные поперечные сечения.

На рис. 2 изображена эквивалентная схема замещения электромагнитной системы датчика, представляющая собой пассивный Т-образный четырехполюсник. Здесь L_1 , L_2 , M – соответственно индуктивности первичной, вторичной обмоток и взаимная индуктивность между этими обмотками; $k = w_1/w_2$ – коэффициент трансформации; w_1 , w_2 – числа витков первичной и вторичной обмоток; r_1 , r_2 , Z_n – омические сопротивления первичной и вторичной обмоток и комплексное сопротивление нагрузки; $\dot{U}_1$, $\dot{U}_2$, $\dot{I}_1$, $\dot{I}_2$ – комплекс-

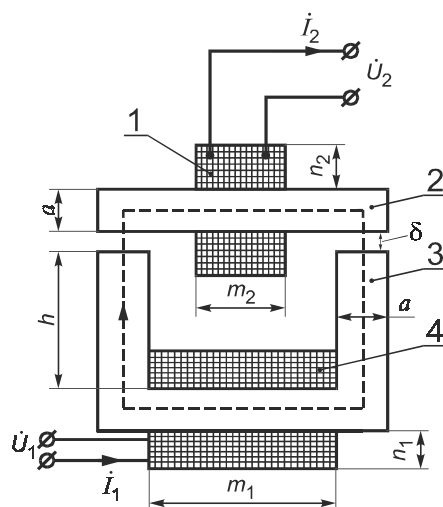


Рис. 1. Конструктивная схема датчика:

1 – измерительная (вторичная) обмотка; 2 – подвижный якорь; 3 – неподвижный магнитопровод; 4 – обмотка возбуждения (первичная)

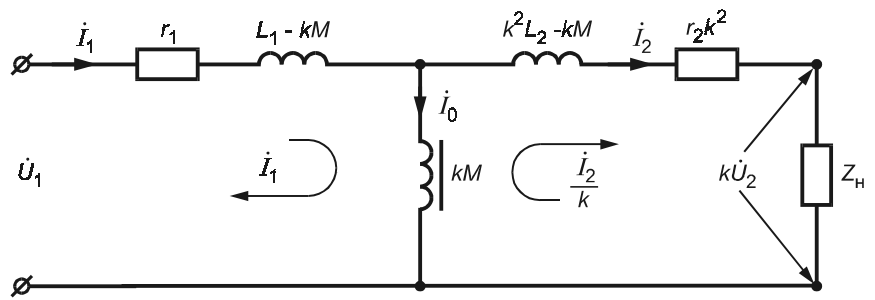


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения электромагнитной системы датчика

ные входные и выходные напряжения и силы токов. Этот четырехполюсник не содержит источники электрической энергии, и функциональная связь между входными и выходными величинами имеет вид

$$\dot{U}_1 / \dot{I}_1 = Z_{1\text{вх}}; \quad \dot{U}_2 / \dot{I}_2 = Z_{2\text{вых}}. \quad (1)$$

Входная и выходная полные комплексные мощности датчика

$$\dot{S}_1 = \dot{U}_1 \dot{I}_1; \quad \dot{S}_2 = \dot{U}_2 \dot{I}_2. \quad (2)$$

Применив законы Кирхгофа в схеме замещения, приведенной на рис. 2, запишем

$$Z_{1\text{вх}} = r_1 + j\omega(L_1 - kM); \quad Z_{2\text{вых}} = k^2 r_2 + j\omega(k^2 L_2 - kM); \quad (3)$$

$$L_1 = \frac{w_1^2 \mu \mu_0 S_c}{l + 2\mu\delta}; \quad L_2 = \frac{w_2^2 \mu \mu_0 S_c}{l + 2\mu\delta} = \frac{L_1}{k^2}; \quad M = \frac{w_1 w_2 \mu \mu_0 S_c}{l + 2\mu\delta} = \frac{L_1}{k},$$

где ω – частота питающего напряжения (тока); μ, μ_0 – магнитные проницаемости материала сердечника и вакуума; $S_c = ab$ – площадь поперечного сечения сердечника; l – средняя длина силовых линий; δ – воздушный зазор (см. рис. 1).

Далее из (1) – (3) после некоторых преобразований получим

$$\frac{\dot{S}_2}{\dot{S}_1} = \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 k^2 \frac{r_2 + j\omega L_2}{r_1 + j\omega L_1}$$

и модуль отношения мощностей

$$\frac{S_2}{S_1} = \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 \sqrt{\frac{r_2^2 + \omega^2 L_2^2}{r_1^2 + \omega^2 L_1^2}} k^2. \quad (5)$$

Согласно (1), (5) запишем

$$\frac{S_2}{S_1} = \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 \left(\frac{Z_{1\text{BX}}}{Z_{2\text{ВЫХ}}} \right)^2 k^2 \sqrt{\frac{r_2^2 + \omega^2 L_2^2}{r_1^2 + \omega^2 L_1^2}}.$$

С учетом (2) представим последнее выражение в виде

$$\frac{S_2}{S_1} = \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 \frac{1}{k^2} \sqrt{\frac{r_1^2 + \omega^2 L_1^2}{r_2^2 + \omega^2 L_2^2}}. \quad (6)$$

Для нахождения отношения U_2/U_1 применим закон электромагнитной индукции

$$\dot{U}_2 = -j\omega M \dot{I}_1 = -j\omega M \dot{U}_1 / Z_{1\text{BX}}$$

или с учетом (3)

$$\frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = -j\omega M k \sqrt{\frac{1}{a_{11} + j\omega a_{22}}} \frac{r_2 + j\omega L_2}{r_1 + j\omega L_1},$$

где $a_{11} = k^2 r_1 r_2 - \omega^2 [ML - (L_1 - kM)(k^2 L_2 - kM)]$;
 $a_{22} = M(r_1 + k^2 r_2) + k^2 r_2 (L_1 - kM) + r_1 (k^2 L_2 - kM).$

Модуль этого выражения

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\omega M}{k} \sqrt{\sqrt{\frac{r_2^2 + \omega^2 L_2^2}{(a_{11}^2 + \omega^2 a_{22}^2)(r_1^2 + \omega^2 L_1^2)}}}. \quad (7)$$

Подставив (7) в (6) и используя соотношения для a_{11} и a_{22} , получим

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{\omega^2 L_1^2}{k^5 \sqrt{k^6 r_1^2 r_2^2 + \omega^2 L_1^2 (r_1 + k^2 r_2)^2}}. \quad (8)$$

Так как каждый параметр, входящий в (8), изменяется от различных воздействующих факторов и уровень выходного сигнала зависит от них, последнее соотношение характеризуется относительной погрешностью

$$\Delta\beta = 1 - \frac{S_2}{S_1} \frac{n^5}{\omega_n^2 L_{1n}^2} \sqrt{k^6 r_{1n}^2 r_{2n}^2 + \omega_n^2 L_{1n}^2 (r_{1n} + k^2 r_{2n}^2)}, \quad (9)$$

где индексом «н» обозначены номинальные значения соответствующих параметров.

Как следует из (9), относительная погрешность датчика уменьшается при увеличении выходной мощности S_2 (при постоянной входной мощности S_1). Относительная погрешность более чувствительна к коэффициенту трансформации k . С ростом k , r_{1n} и r_{2n} погрешность преобразования датчика уменьшается, с увеличением произведения $\omega_n L_{1n}$ – повышается.

Выразим омические сопротивления и индуктивности первичной и вторичной обмоток с учетом линейных размеров, указанных на рис. 1. Примем среднюю длину обмоток близкой к окружности и запишем

$$r_1 = 4K_1 Q_1 \rho (a + b + 2n_1) / (\pi d_1^4); \quad r_2 = 4K_2 Q_2 \rho (a + b + 2n_2) / (\pi d_2^4),$$

где $K_1 = Q_{1м}/Q_1$, $K_2 = Q_{2м}/Q_2$ – коэффициенты заполнения первичной и вторичной обмоток в окне магнитопровода; $Q_{1м}$, $Q_{2м}$ – площади, занимаемые медным проводом обмоток; Q_1 , Q_2 – площадь окна и полная площадь магнитопровода; ρ – удельное сопротивление материала провода (меди); n_1 , n_2 – толщина первичной и вторичной обмоток; d_1 , d_2 – диаметры провода обмоток.

Выразив числа витков через K_1 , Q_1 , d_1 , K_2 , Q_2 , d_2 и подставив их в (4), получим

$$L_1 = \frac{8K_1^2 Q_1^2 \mu \mu_0 ab}{\pi^2 d_1^4 (m + h + 2a + \mu \delta)};$$

$$L_2 = \frac{8K_2^2 Q_2^2 \mu \mu_0 ab}{\pi^2 d_2^4 (m + h + 2a + \mu \delta)} \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^4 \left(\frac{K_2 Q_2}{K_1 Q_1} \right)^2.$$

Если выполняются условия $d_1 \approx d_2 \approx d$, $K_1 \approx K_2 \approx K$, $Q_1 \approx Q_2 \approx Q$, то имеем $L_1 \approx L_2 \approx L$. Учитывая отклонение каждого параметра от номинального, находим $r_{1н} \approx r_{2н} \approx r_n$; $L_n = L_{1н}$. Тогда (9) примет вид

$$\Delta\beta = 1 - \frac{S_2}{S_1} \frac{\rho_n (a_n + b_n + 2n_n)(m_n + h_n + 2a_n + \mu_n \delta)}{2\omega_n K_n Q_n \mu_n \mu_0 a_n b_n} \times \\ \times \sqrt{1 + \left[\frac{\pi \rho_n (a_n + b_n + 2n_n)(m_n + h_n + 2a_n + \mu_n \delta)}{2\omega_n K_n Q_n \mu_n \mu_0 a_n b_n} \right]^2}. \quad (10)$$

Полученная формула (10) позволяет анализировать относительную погрешность в зависимости от отношений мощностей, ширины воздушного зазора, номинальных геометрических размеров магнитопроводов, относительной магнитной проницаемости, удельного сопротивления обмотки, частоты питающего напряжения и площади обмотки. С ростом удельного сопротивления ρ медного провода обмотки значение $\Delta\beta$ уменьшается, а с повышением магнитной проницаемости μ материала магнитопровода – увеличивается. Рассматриваемый датчик является параметрическим. Подвижный якорь перемещается за счет энергии, получаемой от объекта измерения, и служит лишь для регулирования мощности S_2 выходного электрического сигнала. Чтобы обеспечить линейность рабочей характеристики датчика, начальную ширину δ зазора выбирают так, чтобы выполнялось неравенство

$$\delta_n \mu_n \gg (m_n + h_n + 2a_n).$$

При этом соотношение (10) принимает вид

$$\Delta\beta = 1 - \frac{S_2}{S_1} \frac{\rho_n (a_n + b_n + 2n_n) \delta_n \pi}{2\omega_n K_n Q_n \mu_n \mu_0 a_n b_n} \times \\ \times \sqrt{1 + \left[\frac{\pi \rho_n (a_n + b_n + 2n_n) \delta_n}{2\omega_n K_n Q_n \mu_n \mu_0 a_n b_n} \right]^2}. \quad (11)$$

Поскольку $K_n Q_n = m_n n_n$, после такой подстановки в (11) получим

$$\Delta\beta = 1 - \frac{S_2}{S_1} a_1 \sqrt{1 + a_1^2}, \quad (12)$$

где $a_1 = \left[\pi \rho_n (a_n + b_n + 2n_n) \delta_n \right] / (2\omega_n m_n n_n \mu_0 a_n b_n)$.

Для реальной конструкции магнитной системы датчика $a_1^2 \gg 1$. В результате (12) преобразуется к виду

$$\Delta\beta = 1 - a_1^2 S_2 / S_1. \quad (13)$$

На рис. 3, а, б приведены зависимости $\Delta\beta(a_1)$ и $\Delta\beta(\delta)$. Отношение S_2/S_1 в (13) можно рассматривать как коэффициент полезного действия датчика. Таким образом, проведенный анализ позволяет сделать вывод, что при квалитметрии электромагнитного датчика малых линейных перемещений возникает необходимость одновременно учитывать и потребляемую мощность от объекта измерения, и информационную мощность, характеризующую выходной сигнал датчика.

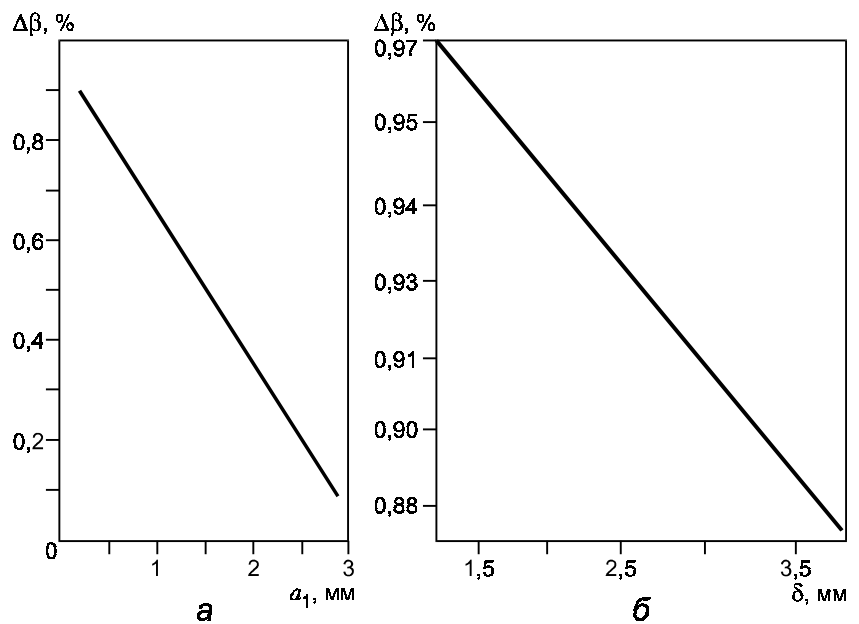


Рис. 3. Зависимости $\Delta\beta(a_1)$ и $\Delta\beta(\delta)$

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. **Проектирование** датчиков для измерения механических величин /Под ред. Е. П.Осадчего. М.: Машиностроение, 1979.
2. **Сидоров С. Н.** Энергетические процессы и показатели вентильного преобразователя в сети ограниченной мощности // Электротехника. 2002. № 5. С. 16 – 22.
3. **Михайлов П. Г.** Синтез информационно-энергетических моделей датчиков // Приборы и системы. Управление. Контроль. Диагностика. 2003. № 3. С.37 – 40.

Дата принятия 17.11.2009 г.

