

В.П. СЕБКО, д-р. техн. наук, НТУ "ХПИ",
И.В. ТЮПА, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",
А.И. КОТУЗА, НТУ "ХПИ"

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ СИГНАЛА ТРЕХПАРАМЕТРОВОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

Розглянута методика розрахунку вносимого повного опору параметричного електромагнітного перетворювача з циліндричним виробом. Отримані формули для визначення параметрів перетворювача при різних температурах.

The design procedure of brought full resistance of the parametrical electromagnetic converter with a cylindrical product is considered. Formulas for definition of parameters of the converter are received at different temperatures.

Постановка проблемы и анализ литературы. Использование параметрического преобразователя для контроля магнитных и электрических параметров изделий посвящено много работ [1 – 3].

В литературе есть работы, в которых дана методика расчета сигнала вихретокового преобразователя с цилиндрическим изделием для двухпараметрового неразрушающего контроля [4, 5].

Однако, в существующей литературе не описана методика расчета параметров параметрического преобразователя для совместного определения магнитной проницаемости, удельного электрического сопротивления и температуры цилиндрического изделия. **Цель статьи – разработка такой методики.**

Порядок расчета следующий: задаемся значениями температуры в диапазоне 0 – 180°C. Находим значения $\mu_r(t)$ и $\rho(t)$ принимая линейные двухчленные зависимости $\mu_r(t)$ и $\rho(t)$ от t .

При этом [6]:

$$\rho(t) = \rho_1 + \frac{\rho_1 \cdot \alpha_\rho}{1 + \alpha_\rho \cdot t_1} (t - t_1); \quad (1)$$

$$\mu_r(t) = \mu_{r1} + \frac{\mu_{r1} \cdot \alpha_\mu}{1 + \alpha_\mu \cdot t_1} (t - t_1), \quad (2)$$

где α_ρ – температурный коэффициент сопротивления; α_μ – температурный коэффициент магнитной проницаемости цилиндрического изделия; ρ_1 и μ_{r1} – удельное сопротивление и магнитная проницаемость материала изделия при нормальной температуре $t_1 = 20^\circ\text{C}$. Зная $\rho(t)$ и $\mu_r(t)$ и добавив, задавшись радиусом a и обобщенным параметром x , находят частоту изменения зондирующего изделия магнитного поля по формуле

$$f = \frac{x^2 \cdot \rho(t)}{2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r(t) \cdot a^2}, \quad (3)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Далее определяем циклическую частоту

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f. \quad (4)$$

Затем находим индуктивность преобразователя по формуле

$$L = \mu_0 \cdot \frac{\pi a^2 \cdot W_n^2}{l}, \quad (5)$$

где W_n – число витков намагничивающей обмотки; l – ее длина.

Далее определим индуктивное сопротивление. При этом:

$$x = \omega \cdot L. \quad (6)$$

После этого находим параметр

$$x = \omega \cdot L \cdot \eta, \quad (7)$$

где η – коэффициент заполнения [1, 5],

$$\eta = \frac{a^2}{a_n^2}, \quad (8)$$

где a_n – радиус обмотки преобразователя.

Далее определим полное вносимое сопротивление обмотки параметрического электромагнитного датчика, как

$$\dot{z}_{\text{вн}} = -\omega \cdot L \cdot \eta \cdot \mu_r \cdot I_m \cdot K + i \cdot (1 - \mu_r \cdot R_e K) \cdot \omega \cdot L \cdot \eta \cdot \mu_r. \quad (9)$$

При этом модуль $\dot{z}_{\text{вн}}$ определяют по формуле [1]

$$|\dot{z}_{\text{вн}}| = \omega \cdot L \cdot \eta + \sqrt{(\mu_r \cdot I_m K)^2 + (1 - \mu_r \cdot R_e K)^2}. \quad (10)$$

Модуль вносимого нормированного полного сопротивления обмотки найдем по формуле

$$z_{\text{внн}} = \frac{z_{\text{вн}}}{\omega \cdot L \cdot \eta} \cdot \sqrt{(\mu_r \cdot I_m K)^2 + (1 - \mu_r \cdot R_e K)^2}. \quad (11)$$

Фазовый угол $z_{\text{вн}}$ рассчитаем из выражения [1]

$$\text{tg}\varphi_{\text{в}} = \frac{1 - \mu_r \cdot R_e K}{\mu_r \cdot I_m K}. \quad (12)$$

Примем данные для расчета: температура изменяется от 0 до 180°C. При этом возьмем точки $t = 20; 60; 100; 150^\circ\text{C}$. Комплексный параметр K , а также $\text{Im}K$ и $\text{Re}K$ приведены в [1 – 3].

Для нержавеющей стали:

$$\alpha_\rho = 0,0008344 \text{ 1/K}; \quad \alpha_\mu = \frac{0,0008344}{3} = 2,7813 \cdot 10^{-4} \text{ 1/K}.$$

При $t = 20^\circ\text{C}$ (нормальная температура):

$\rho_1 = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{0,135 \cdot 10^7} = 7,41 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$; $\mu_{r1} = 1,5$ при $t_1 = 20^\circ\text{C}$. Значение обобщенного параметра при $t = t_1$ равно 2,5, $t_1 = 20^\circ\text{C}$.

Исходные данные: $a = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $a_n = 19 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $l = 0,5 \text{ м}$; $W_n = 289$ витков; значение K , характеризующего удельный нормированный магнитный поток в изделии на единицу μ_r и его фазу, взято из таблицы работы [7]. Для $x = 2,5$: $K = 0,72724$; $\varphi = 31,26$ град.

Найдем из выражения (5)

$$L = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{\pi \cdot (10 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 289^2}{0,5} = 6,588 \cdot 10^{-5} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Тогда значение частоты при $t = t_1 = 20^\circ\text{C}$ получим:

$$f = \frac{2,5^2 \cdot 7,41 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot \pi \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,5(10 \cdot 10^{-3})^2} = 3914,33 \text{ Гц}.$$

Тогда циклическая частота находится из (4): $\omega = 24582,006 \text{ Гц}$.

Найдем из таблицы работы [7] значения реальной и мнимой частей параметра K для $x = 2,5$ при $t = t_1$, причем $\text{Re } K = 0,621629$, $\text{Im } K = -0,377429$.

Найдем модуль полного вносимого электрического сопротивления исходя из (10)

$$|\dot{z}_{\text{вн}}| = 6,59 \cdot 10^{-5} \cdot 24582,006 \cdot 0,277 + \sqrt{(1,5 \cdot (-0,377429))^2 + (1 - 1,5 \cdot 0,621629)^2} = 0,25767579 \text{ Ом}.$$

При этом коэффициент заполнения равен

$$\eta = \frac{(10 \cdot 10^{-3})^2}{(19 \cdot 10^{-3})^2} = 0,277.$$

После определим модуль полного нормированного вносимого сопротивления обмотки преобразователя по формуле (11)

$$z_{\text{внн}} = \frac{0,25767579}{6,59 \cdot 10^{-5} \cdot 24582,006 \cdot 0,277} \cdot \sqrt{(1,5 \cdot (-0,377429))^2 + (1 - 1,5 \cdot 0,621629)^2} = 0,329748499.$$

И, наконец, фазовый угол вносимого полного сопротивления находят по формуле для $x = 2,5$

$$\varphi_{\text{в}} = \arctg \frac{1 - 1,5 \cdot 0,621629}{1,5 \cdot (-0,377429)} = -0,118766.$$

Значения $\mu_r(t)$ слабо зависят от t до 150°C для нержавеющей стали. А вот $\rho(t)$ изменяется (возрастает). При $t = 60; 100; 150^\circ\text{C}$; $\rho(60) = 22,06 \cdot 10^{-7}$; $\rho(100) = 36,72 \cdot 10^{-7}$; $\rho(150) = 55,02 \cdot 10^{-7}$.

Тогда: $f(60) = 11030,4 \text{ Гц}$; $f(100) = 17606,4 \text{ Гц}$; $f(150) = 24873,4 \text{ Гц}$ при условии, что $x = 2,5$; $\omega = 110568,2 \text{ Гц}$; $\omega = 156204,95 \text{ Гц}$.

Будем поддерживать состояние x постоянным и равным 2,5 путем изменения частоты f , при этом поддерживается постоянной фаза φ [3, 7].

В данном случае изменение $\mu_r(t)$ и $\rho(t)$ из-за температуры будет компенсироваться частотой f . Действительно, для того, чтобы поддерживать $x = 2,5 = \text{const}$, нужно иметь:

$$x = a \sqrt{2\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r(t)} / \sqrt{\rho(t)}. \quad (13)$$

Отсюда видно, что незначительное возрастание $\mu_r(t)$ и увеличение $\rho(t)$ можно компенсировать увеличением частоты f поля для того, чтобы поддерживать $x = 2,5 = \text{const}$. В таком случае, если считать, что $\mu_r(t) = 1,5$, то можно отметить, что все данные [3, 7] сохраняются такими же, а будут изменяться только частоты поля при $t = 60$, $t = 100$, $t = 150^\circ\text{C}$.

Выводы. Таким образом, рассмотрена методика расчета вносимого полного сопротивления и его фазового угла параметрического электромагнитного преобразователя с цилиндрическим изделием. Получены основные соотношения для определения параметров параметрического преобразователя при температурах 60; 100; 150°C.

Список литературы: 1. Горкунов Б.М., Себко В.П., Тодоров Е.И. Вихретоковый параметрический преобразователь с улучшенными характеристиками // Дефектоскопия. – 1985. – № 5. – С. 63 – 68. 2. Баштанников Л.А., Бондаренко В.И., Себко В.П., Тюпа И.В. Определение электромагнитных характеристик материала сплошных цилиндрических изделий // Дефектоскопия. – 1985. – № 8 – С. 5 – 9. 3. Себко В.П., Мохаммед Махмуд, Мохаммед Дарвиш. Теория работы параметрического электромагнитного преобразователя для контроля электромагнитных параметров и потерь мощности в цилиндрическом изделии // Вестник НТУ "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ", 2001. – № 5. – С. 151 – 156. 4. Себко В.П., Горкунов Б.М., Котуза А.И. Параметрический электромагнитный преобразователь температуры // Информационные технологии: наука, техника, образование, здоровье. Сборник научных трудов ХГПУ. – Харьков: ХГПУ, 1998. – Вып. 6. – Ч.2. – С. 301 – 303. 5. Себко В.П., Кириченко Р.И. Электромагнитный метод определения двух параметров проектного изделия на основе экстремума фазового угла преобразователя / Збірник наукових праць третьої конференції "Метрологія та вимірвальна техніка" (Метрологія – 2002). – Харьков, 2002. – № 9. – Т. 4. – С. 129–132. 6. Электрические измерения неэлектрических величин / Под ред. П.В. Новицкого. – Л.: Энергия. – 576 с. 7. Бондаренко В.И., Горкунов Б.М., Себко В.П. К оценке погрешностей проходным вихретоковым преобразователем при многопараметровых измерениях // Дефектоскопия. – 1984. – № 6. – С. 84–89. 8. Гончаров Б.В. Теория и практика безэталонных электромагнитных методов контроля. – М.: Машиностроение. – 1975. – 40 с.

Поступила в редакцию 21.10.2006