

УДК 621.143.17

НЕПРЕРЫВНЫЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ ШВОВ ТРУБ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА

© Швець С.Н., 2005

Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля

При контролі зварних швів використовується локальний магніточутливий елемент, що дозволяє охопити задану область контролю. Отримано його функцію перетворення при роботі у змінному магнітному полі

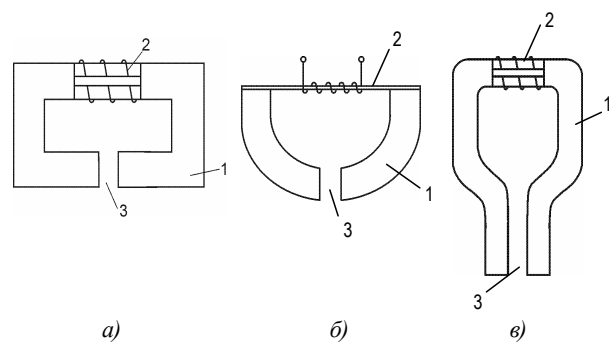
Вихретоковые методы дефектоскопии сварных труб позволяют проводить контроль всей поверхности трубы [1]. Из-за сложной разнородной структуры материала в области сварного шва трубы обнаружение дефектов вихретоковым методом затруднено. В настоящее время для контроля зоны сварного шва применяются магнитные дефектоскопы, использующие в качестве первичного преобразователя блок феррозондов [2]. Для повышения качества контроля область шва и околосшовную зону необходимо подмагничивать одновременно постоянным и переменным полем. Благодаря этому можно выявлять как поверхностные, так и подповерхностные дефекты контролируемой области и использовать при этом более простой по конструкции и охватывающий всю область контроля локальный магниточувствительный элемент (ЛМЭ). Одной из задач, которую необходимо решить при построении таких дефектоскопов, является расчет ЛМЭ.

Эквивалентная схема магнитной цепи магнитной системы ЛМЭ, варианты конструкции которого приведены на рис. 1, показана на рис. 2.

Величина магнитного потока $\Phi_0(x)$ является функцией координаты x . Эквивалентная схема магнитной цепи содержит магнитное сопротивление воздушного зазора R_g , сердечника ЛМЭ R_c и сопротивления магнитного модулятора, которое является функцией времени $R(t)$. Величина этих сопротивлений определяется формулами

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 S_g}; R_c = \frac{l_c}{\mu_0 \mu S_c}; R(t) = \frac{l_m}{\mu_0 \mu(t) S_m}, \quad (1)$$

где $l_g, l_c, l_m, S_g, S_c, S_m$ – длины и площади сечения воздушного зазора, сердечника ЛМЭ, модулятора; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; μ – относительная магнитная проницаемость материала сердечника; $\mu(t)$ – относительная магнитная проницаемость модулятора.



1 – магнитопровод; 2 – модулятор; 3 – немагнитный зазор

Рис. 1. Варианты конструкции ЛМЭ

Согласно схеме, приведенной на рис. 2, магнитный поток в сердечнике ЛМЭ Φ_c равен:

$$\Phi_c = \frac{\Phi_0 R_g}{R_c + R_g + R(t)}. \quad (2)$$

Магнитный поток в сердечниках модулятора (рис. 3) будет таким:

$$\Phi_a = \frac{S_m}{2} B(H + H_0); \Phi_b = \frac{S_m}{2} B(H - H_0), \quad (3)$$

где H – напряженность поля возбуждения, H_0 – напряженность информационного поля, B – индукция в стержнях модулятора.

Разложим функцию (3) в ряд Тейлора и ограничимся двумя первыми членами ряда. Тогда получим, что

$$\Phi_a(H) \approx \frac{S_m}{2} B(H + \frac{dB}{dH} H_0 + \dots); \quad (4)$$

$$\Phi_b(H) \approx \frac{S_m}{2} B(H - \frac{dB}{dH} H_0 + \dots),$$

откуда суммарное значение индукции будет таким:

$$\Phi_a(H) + \Phi_b(H) = S_m \frac{dB}{dH} H_0. \quad (5)$$

Таким образом, можно записать, что

$$B(H) = \frac{dB}{dH} H_0. \quad (6)$$

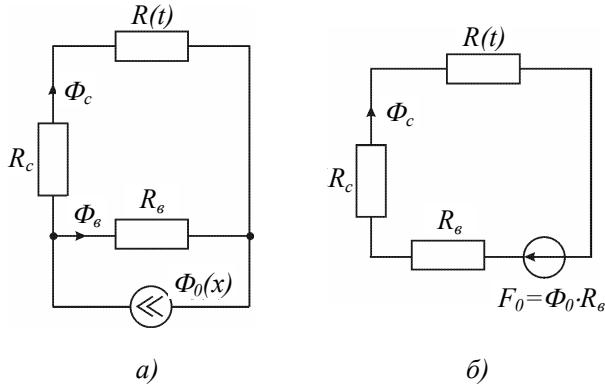


Рис. 2. Эквивалентные схемы магнитной цепи магнитной системы ЛМЭ

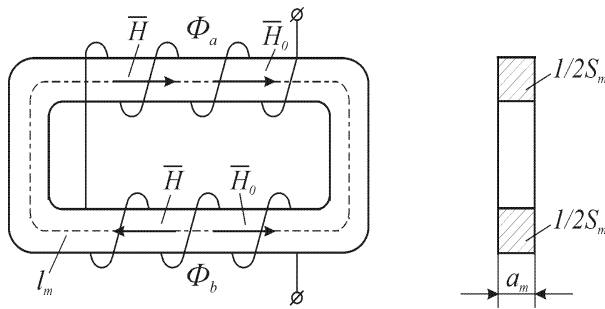


Рис. 3. Модулятор ЛМЭ

Разделим левую и правую часть (6) на H_0 . В результате получаем значение абсолютной магнитной проницаемости

$$\frac{B(H)}{H_0} = \frac{dB}{dH}.$$

Для малых значений измеряемого поля, когда $H_0 \ll H_m$ при арктангенсной аппроксимации петли гистерезиса можно записать выражение для относительной магнитной проницаемости для информационного магнитного потока:

$$B = \frac{2B_s}{\pi} \arctg(\sigma H); \mu_0 = \frac{dB}{\mu_0 dH} = \frac{2B_s}{\mu_0 \pi} \frac{\sigma}{1 + \sigma^2 H^2}. \quad (7)$$

При $H=0$ значение μ_0 должно быть максимальным и равняться начальной относительной магнитной проницаемости материала, то есть

$$\frac{2B_s}{\mu_0 \pi} \sigma = \mu_0 = \mu_m,$$

откуда $\sigma = \frac{\mu_0 \pi \mu_m}{2B_s}$, где μ_m – максимальное

значение магнитной проницаемости. Поэтому (7) можно записать так:

$$\mu_0 = \frac{dB}{\mu_0 dH} = \mu_m \frac{1}{1 + \sigma^2 H^2}; \mu_m = \frac{B_s}{\mu_0 H_s}. \quad (8)$$

Таким образом, магнитная проницаемость на участке модулятора по отношению к измеряемому потоку будет такой:

$$\mu_m = \frac{B}{H_0} = \mu_0.$$

Магнитный поток в сердечнике ЛМЭ с учетом (8) будет таким:

$$\begin{aligned} \Phi_c &= \Phi_0 \frac{R_g}{R_c + R_g + R(t)} = \Phi_0 \frac{R_g}{R_c + R_g + \frac{l_m}{\mu_0 S_m \mu(t)}} = \\ &= \Phi_0 \frac{R_g}{R_c + R_g + \frac{l_m}{\mu_0 S_m} \frac{1 + \sigma^2 H^2}{\mu_m}} = \Phi_0 \eta \frac{1}{1 + \beta \sigma^2 H^2}, \end{aligned}$$

где $\eta = \frac{R_g}{R_c + R_g + R_{m.min}}$; $\beta = \frac{R_{m.min}}{R_c + R_g + R_{m.min}}$;

$R_{m.min} = \frac{l_m}{\mu_0 S_m \mu_m}$ – минимальное значение

магнитного сопротивления модулятора.

Для синусоидального возбуждения можно записать, что

$$\Phi_c = \Phi_0 z \frac{1}{1 + \nu y^2 H_m^2 \sin^2 \omega t}. \quad (9)$$

Выходное напряжение ЛМЭ определяется выражением

$$u_2 = W_2 \frac{d\Phi_c}{dt} = \Phi_0 \eta W_2 \frac{\omega \beta \sigma^2 H_m^2 \sin 2\omega t}{(1 + \beta \sigma^2 H_m^2 \sin^2 \omega t)^2}, \quad (10)$$

где W_2 – количество витков выходной обмотки.

Зависимость (10) содержит только четные гармоники частоты возбуждения, амплитуды которых будут такими:

$$U_n = \frac{2n\omega\Phi_0\eta W_2}{\sqrt{1+\alpha}} \left[\frac{2+\alpha-2\sqrt{1+\alpha}}{\alpha} \right]^{\frac{n}{2}}, \quad (11)$$

где $n = 2, 4, 6, \dots$; $\alpha = \nu y^2 H_m^2$.

Если значение информационного потока велико, то для расчета функции преобразования магнитной системы следует применить другой метод аппроксимации петли гистерезиса материала модулятора.

При аппроксимации петли гистерезиса материала модулятора многочленом можем записать, что

$$B(H^*) = a_1 H^* + a_3 H^{*3} + a_5 H^{*5}, \quad (12)$$

где $H^* = H/H_{max}$ – напряженность магнитного поля приведенная к максимальной напряженности поля

H_{max} , до значения которого зависимость (12) определена, и при напряженности поля в сердечнике, создаваемого током возбуждения

$$H(t) = H_m \sin \omega t,$$

где $H_m = \frac{B_s}{\mu_0 m}$, m – проницаемость формы сердечника. Магнитная проницаемость и её производная равны соответственно:

$$\begin{aligned} \mu(H) &= \frac{B(H)}{\mu_0 H} = \frac{B(H^*)}{\mu_0 H^* H_{max}} = \\ &= \frac{1}{\mu_0 H_{max}} (\alpha_1 + \alpha_3 H^{*2} + \alpha_5 H^{*4}) = \\ &= \frac{1}{\mu_0} (\alpha_1 + \alpha_3 H_m^{*2} \sin^2(\omega t) + \alpha_5 H_m^{*4} \sin^4(\omega t)); \\ \mu'(H) &= \frac{\omega}{\mu_0 H_{max}} \left((\alpha_3 H_m^{*2} + \alpha_5 H_m^{*4}) \sin 2\omega t - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} \alpha_5 H_m^{*4} \sin 4\omega t \right). \end{aligned} \quad (13)$$

Выходное напряжение ЛМЭ в этом случае определяется следующим выражением:

$$\begin{aligned} u_2(t) &= \left[(\alpha_3 H_m^{*2} + \alpha_5 H_m^{*4}) \sin 2\omega t - \frac{1}{2} \alpha_5 H_m^{*4} \sin 4\omega t \right] \times \\ &\quad \times \mu_0 W_2 \Phi_0 k_m H_{max} \omega \left(a_1 + \frac{1}{2} \alpha_3 H_m^{*2} + \frac{3}{8} \alpha_5 H_m^{*4} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{2} (\alpha_3 H_m^{*2} + \alpha_5 H_m^{*4}) \cos 2\omega t + \frac{1}{8} \alpha_5 H_m^{*4} \sin 4\omega t + \mu_0 k_m H_{max} \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Амплитуда второй гармоники выходного сигнала может быть, с учетом (15), рассчитана по формуле

$$U_{2m} = \frac{\left[\alpha_3 H_m^{*2} + \frac{1}{2} \alpha_5 H_m^{*4} \right] \cdot \mu_0 W_2 \Phi_0 k_m H_{max} \omega}{\left(a_1 + \frac{1}{2} \alpha_3 H_m^{*2} + \frac{3}{8} \alpha_5 H_m^{*4} + \mu_0 k_m H_{max} \right)^2}. \quad (16)$$

При проведении численного эксперимента выполнен расчет магнитной системы со следующими геометрическими размерами: $l_g = 8$ мм; $S_g = 64$ мм²; $l_m = 10$ мм; $S_m = 32$ мм²; $l_c = 200$ мм; $S_c = 64$ мм².

В результате были получены графики выходного напряжения измерительной обмотки (с числом витков $W_2=100$) ЛМЭ при арктангенсной аппроксимации основной кривой намагничивания (рис. 4).

Зависимость (10) содержит только четные гармоники частоты возбуждения, амплитуды которых определяются согласно (11). На рис. 5 показаны 2, 4 и 6-ая гармоники выходного сигнала ЛМЭ при изменении величины амплитуды

напряженности намагничивающего поля H_m .

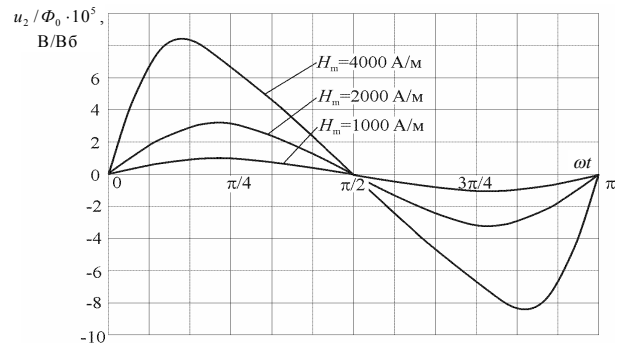


Рис. 4. Графики выходного напряжения измерительной обмотки ЛМЭ при арктангенсной аппроксимации основной кривой намагничивания

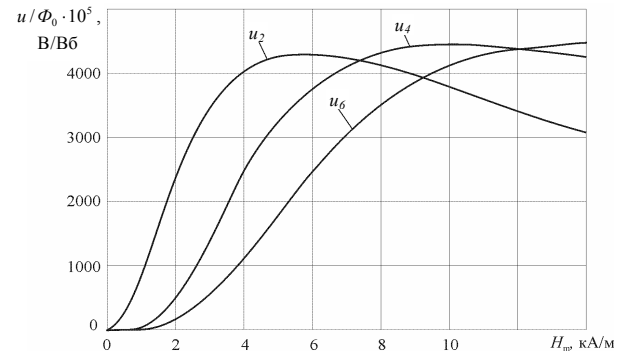


Рис. 5. Амплитуды гармонических составляющих выходного сигнала ЛМЭ при возбуждении его синусоидальным полем $\omega t = 6,28 \cdot 10^3$ амплитудой H_m

Приведенные результаты численных экспериментов показывают, что магнитная система с модулятором, встроенным непосредственно в магнитопровод информационного потока, обладает следующими преимуществами:

- 1) имеет более высокий коэффициент преобразования по мощности выходного сигнала по сравнению с феррозондом;
- 2) мощность возбуждения ниже, чем у стержневого феррозонда.

1. Тетерко А.Я., Назарчук З.Т. Селективна вихрострумова дефектоскопія. – Львів: НАН України, Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка. – 2004. – 248 с. 2. Троїцький В.А. Магнітопорошковий контроль сварних з'єдинень і деталей машин. – К.: Фенікс. – 2002. – 300 с.