

В.П. СЕБКО, д-р техн.наук,
В.В. СЕБКО,
О.Л. БАГМЕТ,
Е.Ю. МИНЕЕВА

ДВУХПАРАМЕТРОВЫЙ КОНТАКТНЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ НЕМАГНИТНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Описано двопараметровый контактный электромагнитный метод контроля немагнитных цилиндрических изделий. Для реализации метода используются две схемы: одна из них схема RL -моста переменного тока, другая схема с применением вольтметра, амперметра, фазометра (схема ВАФ).

Описан двухпараметровый контактный электромагнитный метод контроля немагнитных цилиндрических изделий. Для реализации метода используются две схемы: одна из них схема RL -моста переменного тока, другая схема с применением вольтметра, амперметра, фазометра (схема ВАФ).

Рассмотрен двухпараметровый вихретоковый контактный метод совместного определения радиуса a цилиндрического немагнитного изделия и его удельной электрической проводимости σ .

Реализация метода с помощью RL -мостовой схемы работающей на одной частоте тока. Для совместного определения величин a и σ цилиндрического изделия сначала определим величину нормированного электрического сопротивления R_H , как [1]

$$R_H = \frac{R_{\sim} \frac{R^{(1)}}{R^{(2)}}}{R_0}, \quad (1)$$

где $R^{(1)}$ и $R^{(2)}$ - сопротивления, необходимые для равновесия RL -моста, R_0 - сопротивление проводника переменного тока.

Затем, используя график зависимости x от R_H (рис. 1), найдем обобщенный параметр x , по которому на основании второй функции преобразования, т.е. зависимости нормированной внутренней индуктивности L_{in} , определим параметр L_{in} .

Далее по RL -мостовой схеме найдем суммарную индуктивность по формуле [1]:

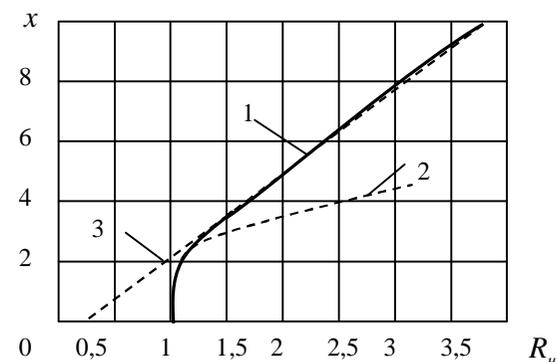


Рис.1. Зависимость обобщенного параметра x от величины R_H (сплошная линия, пунктирные линии характеризуют приближения низких $x < 1$ и высоких частот $x \approx 5$)

$$L_{\Sigma} = L_{\sim} \frac{R^{(3)}}{R^{(4)}}, \quad (2)$$

где $R^{(3)}$ и $R^{(4)}$ - сопротивления, необходимые для равновесия RL -моста.

Потом определим значение внутренней индуктивности L_i при $\mu_r = 1$, исходя из соотношения [1]:

$$L_i = L_{in} \cdot L_0, \quad (3)$$

где L_{in} - нормированная внутренняя индуктивность; L_0 - индуктивность немагнитного проводника такой же длины l при нулевой частоте.

После этого найдем значение внешней индуктивности L_e по формуле

$$L_e = L_{\sim} \frac{R^{(3)}}{R^{(4)}} - L_0 L_{in}. \quad (4)$$

Затем на основании формулы для внешней индуктивности проводника найдем радиус a цилиндрического изделия, исходя из выражения [3, 4]

$$a = 2l \exp \left[- \frac{2\pi \left(L_{\sim} \frac{R^{(3)}}{R^{(4)}} - L_0 L_{in} \right) + 1}{\mu_0 l} \right]. \quad (5)$$

Зная значение радиуса a , определим электрический параметр σ по формуле [1] - [4]:

$$S = \frac{x^2 \cdot \left(e^{\frac{L_0 \frac{R^{(3)}}{R^{(4)}} - L_0 L_{in}^{+1}}{m^l}} \right)^2}{2p f m_0 4l^2}. \quad (6)$$

Как видно из (6), величины a и σ зависят только от измеренных параметров $L_0 \frac{R^{(3)}}{R^{(4)}}$; f , известных величин L_0 ; l , рассчитанных значений x , L_{in} и констант μ_0 , π и т.д. Это указывает на осуществление параллельного цикла расчета.

Реализация контактного вихретокового метода контроля немагнитного цилиндрического изделия с помощью схемы с использованием вольтметра, амперметра, фазометра (ВАФ).

Здесь будет использован двухчастотный метод определения величин a и σ на частотах f_1 и f_2 изменения тока.

Схема установки ВАФ позволяет измерить продольный электрический ток I в стержне и падение напряжения U_n на нем, т.е. полное электрическое сопротивление Z . Кроме того, измеряется фазовый угол ϕ сдвига между током I и падением напряжения U_n . Активное сопротивление R в этой схеме найдем как

$$R = \operatorname{Re} \left(\dot{Z} \right), \quad (7)$$

где $\operatorname{Re} \left(\dot{Z} \right)$ – реальная часть комплексного полного сопротивления $\dot{Z} = \frac{U_n}{I}$.

Затем найдем нормированное сопротивление R_n по формуле

$$R_n = \frac{\operatorname{Re} \left(\dot{Z} \right)}{R_0} \quad (8)$$

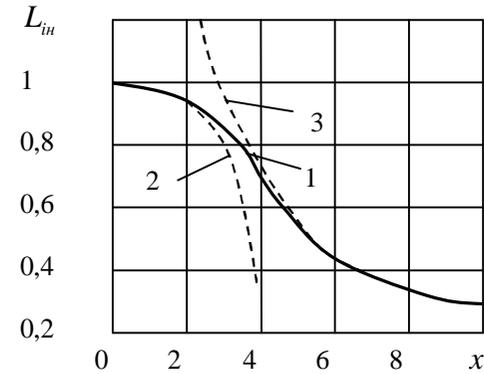


Рис. 2. Зависимость удельной внутренней нормированной индуктивности стержня от величины x (сплошная линия, пунктирные линии даны для приложений низких $x \in 1$ и высоких $x \in 5$ частот)

Используя универсальные функции преобразования, т.е. зависимости x от R_n и L_{in} от x (рис. 1 и 2), найдем величины x_1 , x_2 и L_{in1} , L_{in2} , соответствующих частотам f_1 и f_2 . На основе применения схем ВАФ найдем по результатам измерения суммарные индуктивности стержня, т.е. [1]:

$$L_{a1} = \frac{1}{2\pi f_1} \operatorname{Im} \dot{Z}_1, \quad (9)$$

$$L_{a2} = \frac{1}{2\pi f_2} \operatorname{Im} \dot{Z}_2, \quad (10)$$

где $\operatorname{Im} \dot{Z}_1$ и $\operatorname{Im} \dot{Z}_2$ – мнимые части полного комплексного сопротивления Z_1 и Z_2 на частотах f_1 и f_2 .

Проверим величину μ_r , она должна быть весьма близкой к 1 для немагнитного изделия, т.е.

$$\mu_r = \frac{\frac{1}{2\pi f_1} \operatorname{Im} \dot{Z}_1 - \frac{1}{2\pi f_2} \operatorname{Im} \dot{Z}_2}{(L_{in1} - L_{in2})L_0}. \quad (11)$$

Значения L_{i1} и L_{i2} найдем по формуле [1]

$$L_{i1} = L_{in1} \mu_r L_0; \quad (12)$$

$$L_{i2} = L_{in2} \mu_r L_0. \quad (13)$$

В таком случае значения внешней индуктивности при $\mu_r = 1$ будут записаны в виде:

$$L_{e1} = \frac{1}{2\pi f_1} \operatorname{Im} Z_1 - L_{in} L_0; \quad (14)$$

$$L_{e2} = \frac{1}{2\pi f_2} \operatorname{Im} Z_2 - L_{in} L_0. \quad (15)$$

Значения радиусов a_1 и a_2 , для разных частот f_1 и f_2 найдем по формулам:

$$a_1 = \frac{2l}{\frac{\frac{\pi}{\epsilon} \frac{1}{2\pi f_1} \operatorname{Im} Z_1 - L_{in} L_0 \frac{\pi}{\theta} + 1}{\mu_0 l}}; \quad (16)$$

$$a_2 = \frac{2l}{\frac{\frac{\pi}{\epsilon} \frac{1}{2\pi f_2} \operatorname{Im} Z_2 - L_{in} L_0 \frac{\pi}{\theta} + 1}{\mu_0 l}}. \quad (17)$$

В данном варианте значения удельных электрических проводимостей σ_1 и σ_2 на частотах f_1 и f_2 выражаются формулами

$$\sigma_1 = \frac{x_1^2 e^{\frac{\frac{\pi}{\epsilon} \frac{1}{2\pi f_1} \operatorname{Im} Z_1 - L_{in1} L_0 \frac{\pi}{\theta} + 1}{\mu_0 l}}}{2\pi f_1 \mu_0 4l^2}; \quad (18)$$

$$\sigma_2 = \frac{x_2^2 e^{\frac{\frac{\pi}{\epsilon} \frac{1}{2\pi f_2} \operatorname{Im} Z_2 - L_{in2} L_0 \frac{\pi}{\theta} + 1}{\mu_0 l}}}{2\pi f_2 \mu_0 4l^2}. \quad (19)$$

Формулы (17) и (18) дают возможность отметить, что они зависят только от измеряемых величин f_1 , f_2 , $\operatorname{Im} Z_1$ и $\operatorname{Im} Z_2$, рассчитанных L_{in1} и L_{in2} , x_1 и x_2 , известных параметров l и L_0 , констант μ_0 , π и не зависят друг от друга, т.е. σ от a и a от σ .

Определение величины магнитной проницаемости при известной электропроводности и радиусе изделия схемой ВАФ.

Применяем схему установки ВАФ для определения контактным вихрековым методом относительной магнитной проницаемости μ_r при известных удельной электрической проводимости σ и радиусе a изделия.

Величину R_H можно определить по формуле

$$R_H = \frac{\operatorname{Re} \frac{U_n}{I}}{\frac{1}{\sigma S}}, \quad (20)$$

где $\operatorname{Re} \frac{U_n}{I}$ – реальная часть полного сопротивления Z контактного вихрекового преобразователя.

По зависимости x от R_H (рис. 1) найдем параметр x , а по нему значение μ_r , как [1]

$$\mu_r = \frac{x^2(R_H)}{2\pi f a^2 \mu_0 \sigma}. \quad (21)$$

Здесь a и σ известные величины.

Для того, чтобы найти величину μ_r по зависимости L_{in} от функции $x(R_H)$ можно определить L_{in} по $L_{in} = f(x)$.

Определить величину L_i можно с помощью компенсации емкостью или индуктивностью внешней индуктивности. А, если не использовать компенсацию, то необходимо измерить полную индуктивность в схеме ВАФ по формуле [1]

$$L_i = \frac{1}{\omega} \frac{U_n}{I} \sin \varphi. \quad (22)$$

Затем найти значение L_i вычтя от L_Σ значение L_e . При этом [1-4]

$$\mu_r = \frac{L_\Sigma - L_e}{L_0 L_{in}}. \quad (23)$$

Можно проверить значение μ_r , используя соотношение [2]

$$\mu_r = \frac{x^2(L_{in})}{2\pi f a^2 \mu_0 \sigma}. \quad (24)$$

В круглых скобках указывается кривая $L_{in} = f(x)$.

Определение величины удельной электрической проводимости в схеме ВАФ вихрековым контактным методом:

Значение R_H найдем по формуле

$$R_H = \frac{Z \cos \varphi}{\frac{1}{\sigma S}}. \quad (25)$$

Затем параметр x определим из зависимости x от R_H , а по x найдем величину σ по формуле при $\mu_r = 1$

$$\mu_r = \frac{x^2(R_H)}{\omega 2\pi a^2 \mu_0}. \quad (26)$$

В круглых скобках указывается кривая $R_H = f(x)$.

Определим значение L_i , применив компенсацию внешней индуктивности. Если не применять компенсацию, то надо измерить суммарную индуктивность стержня, т.е.

$$L_i = \frac{1}{\omega} Z \sin \varphi. \quad (27)$$

Тогда значение L_i найдем по формуле

$$L_i = L_{\Sigma} - L_e. \quad (28)$$

После этого по зависимости L_{in} от x найдем величину x , при этом

$L_{in} = L_i / L_0$ в случае $\mu_r = 1$. По значению x найдем величину σ по формуле [2]

$$\sigma = \frac{x^2(L_{in})}{2\pi f a^2 \mu_0}. \quad (29)$$

Нахождение величины магнитной проницаемости RL-мостовым методом:

Величину R_H определим по формуле

$$R_H = \frac{R_{\sim} \frac{R^{(1)}}{R^{(2)}}}{R_0}. \quad (30)$$

Затем по зависимости x от R_H , найдем величину x (рис. 1), а по нему значение μ_r , как [2]

$$\mu_r = \frac{x^2(R_H)}{\omega a^2 \mu_0 \sigma}. \quad (31)$$

Для определения μ_r по 1-ой зависимости, можно по x найти L_{in} (рис. 2). Если использовать компенсацию, то величину L_i можно измерить сразу. После этого, вычтя из L_{Σ} значение L_e , получим формулу для внутренней индуктивности. В таком случае величину μ_r найдем по формуле [2]

$$\mu_r = \frac{x^2(L_{in})}{\omega a^2 \mu_0 \sigma}. \quad (32)$$

В данном случае исследован контактный вихретоковый двухпараметровый метод совместного контроля радиуса a , удельной электрической проводимости σ цилиндрического немагнитного изделия, дан алгоритм и приведе-

ны соотношения для определения указанных параметров объекта контроля. Метод также распространен на случай, когда известно значение магнитной проницаемости изделия, при этом неразрушающий контроль проводится RL-мостом переменного тока. Также с помощью схемы, использующей вольтметр, амперметр, фазометр, рассмотрен двухпараметровый вихретоковый контактный контроль одновременного определения радиуса a и удельной электрической проводимости σ цилиндрического немагнитного изделия, при этом применяется известный метод использующий частоты f_1 и f_2 изменения тока, приведены основные соотношения для расчета удельной электрической проводимости и радиуса цилиндрического изделия. Показано, что схема вольтметра, амперметра, фазометра сложнее при создании, а также в эксплуатации, мостовая схема проще и работать на ней удобней.

Список литературы: 1. Себко В.П., Львов С.Г. Контактный метод определения электромагнитных параметров изделий // Украинський метрологічний журнал. – Харків: ДНВО "Метрологія". – 1998. – С. 314-316. 2. Львов С.Г. Параметрический электромагнитный двухчастотный метод контроля // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ – 1999. – Вып. 37. – С. 35-37. 3. Себко В.П., Бондаренко В.Е. Измерение радиуса и удельного электрического сопротивления немагнитных цилиндрических изделий контактным электромагнитным преобразователем // Матеріали 4-ї Науково-технічної конференції "Неруйнівний контроль та технічна діагностика". – Київ. – 2003. – С. 373-378. 4. Себко В.В., Себко В.П., Филоненко Д.В. Экстремальный трехпараметровый контактный электромагнитный метод с учетом воздействия температуры на изделие // Украинський метрологічний журнал. – Харків. – 2006. – Вып. 2. – С. 16-19.

Поступила в редколлегию 10.05.08