

УДК 620.179.14

Себко В.П., Котуза А.И.

**НОВЫЙ ТРЕХПАРАМЕТРОВЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА ОСНОВЕ
ВНОСИМОГО ПОЛНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДАТЧИКА**

Национальный технический университет “Харьковский политехнический институт”

Вихретоковым методом и реализующим его преобразователем уделялось в существующей литературе достаточно большое внимание [1–8]. Особый интерес вызывали работы, связанные с созданием методов и устройств для определения магнитных, электрических параметров и температуры металлических изделий, потому что указанные параметры являются температурозависимыми [6–8].

В настоящей работе рассмотрен вихретоковый метод и параметрический преобразователь для определения магнитной проницаемости μ_r , электропроводимости σ и температуры t на основе полученной зависимости вносимого полного электрического сопротивления $\dot{Z}_{\text{вн.н}}$ обмотки от его фазового угла сдвига $\varphi_{\text{аф}}$ и обобщенного параметра x от этого фазового угла параметрического температурного электромагнитного преобразователя (ПТЭМП).

Используем результаты работ [1–3] можно записать выражение для определения полго электрического сопротивления ПТЭМП.

$$\dot{Z}_{\text{аф.і}} = \omega \cdot \eta \cdot L \cdot \mu_r \cdot K \cdot \sin \varphi + j \cdot \omega \cdot \eta \cdot L \cdot \mu_r \cdot K \cdot \cos \varphi + j \cdot L \cdot \omega \cdot \eta. \quad (1)$$

Формулу (1) можно переписать в виде:

$$\dot{Z}_{\text{аф.і}} = \omega \cdot \eta \cdot L \cdot \mu_r \cdot K \cdot \sin \varphi + j \cdot \omega \cdot \eta \cdot L \cdot (1 - \mu_r K \cos \varphi), \quad (2)$$

или модуль нормированного полного вносимого сопротивления обмотки ПТЭМП выражается так [1–3]

$$Z_{\text{аф.і}}^* = \frac{\dot{Z}_{\text{аф.і}}}{\omega \cdot L \cdot \eta} = \sqrt{(1 - \mu_r K \cos \varphi)^2 + (\mu_r K \sin \varphi)^2} \quad (3)$$

Фазовый угол сдвига полного вносимого сопротивления находят по формуле [1 - 3]

$$\text{tg} \varphi_{\text{аф}} = - \frac{1 - \mu_r K \cos \varphi}{\mu_r K \sin \varphi}. \quad (4)$$

На рис. 1 и 2 представлены зависимости $|\dot{Z}_{\text{аф.і}}|$ от $\varphi_{\text{аф}}$ и x от $\varphi_{\text{аф}}$, где x – обобщённый параметр записывается по формуле:

$$x = a \sqrt{2\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}, \quad [1] \quad (5)$$

В таблице 1 представлены величины x , $\mu_r K \sin \varphi$, $(1 - \mu_r K \cos \varphi)$, K , φ при $\mu_r = 1,3$; $\mu_r = 1,5$; $\mu_r = 2$

Формулы (3)-(5) рис. 1, 2 и данные табл. 1 позволяют установить последовательность измерительных и расчетных действий для совместного измерения μ_r и σ цилиндрического изделия с помощью параметрического преобразователя. Для этого нужно по измеренным величинам $|\dot{Z}_{\dot{a}i \cdot i}|$ и $\varphi_{\dot{a}i}$ определить μ_r (см. рис. 1 и табл. 1). Затем, зная величину μ_r и $\varphi_{\dot{a}i}$ находят значение x [1-2], по которому, пользуясь ниже следующей формулой определяют удельную электрическую проводимость σ (или удельное электрическое сопротивление ρ), то есть

$$\sigma_{\dot{e}} = \frac{x^2}{2\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot a^2}, \tag{6}$$

Таблица 1 – Зависимости $(1-\mu_r K \cos \varphi)$, $\mu_r K \sin \varphi$ от $\varphi_{вн}$ и x от $\varphi_{вн}$

x	μ_r	$1-\mu_r K \cos \varphi$	$\mu_r K \sin \varphi$	$Z_{вн. н}$	$\text{tg} \varphi_{вн}$	K	φ , град	$\varphi_{вн}$, град
1	1,3	-0,2737	-0,158	0,31602	-0,239	0,98728	7,07	-13,441
1,5	1,3	-0,1808	-0,3196	0,36716	-0,1434	0,94098	15,144	-8,1618
2	1,3	-0,0059	-0,4484	0,4484	-0,0046	0,84716	24,024	-0,2614
2,5	1,3	0,19188	-0,4907	0,52684	0,15755	0,72724	31,256	8,95348
3	1,3	0,35129	-0,468	0,58513	0,32429	0,61529	35,805	17,9674
1	1,5	-0,4697	-0,1823	0,50378	-0,4016	0,98728	7,07	-21,879
1,5	1,5	-0,3624	-0,3687	0,51704	-0,2767	0,94098	15,144	-15,469
2	1,5	-0,1607	-0,5173	0,54172	-0,1177	0,84716	24,024	-6,7154
2,5	1,5	0,06756	-0,5661	0,57016	0,05223	0,72724	31,256	2,98998
3	1,5	0,25149	-0,5399	0,59564	0,21769	0,61529	35,805	12,2812
1	2	-0,9595	-0,243	0,98984	-0,7799	0,98728	7,07	-37,951
1,5	2	-0,8166	-0,4916	0,95317	-0,57	0,94098	15,144	-29,683
2	2	-0,5476	-0,6898	0,8807	-0,3563	0,84716	24,024	-19,609
2,5	2	-0,2433	-0,7549	0,79309	-0,1641	0,72724	31,256	-9,3209
3	2	0,00198	-0,7199	0,71993	0,00148	0,61529	35,805	0,08496

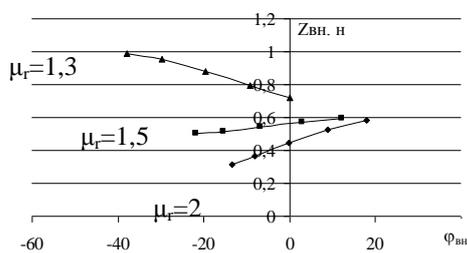


Рисунок 1 – Зависимость $Z_{вн}$ от μ_r

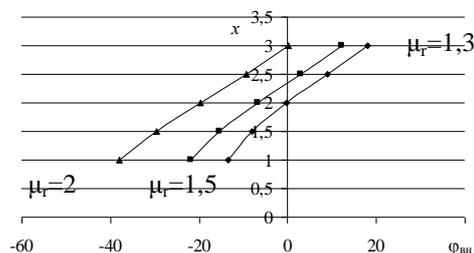


Рисунок 2 – Зависимость x от $\varphi_{вн}$

$$\rho_{\dot{e}} = \frac{2\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot a^2}{x^2}. \tag{7}$$

Воспользовавшись линейной зависимостью ρ от температуры t вида [6]

$$\frac{\alpha(t-t_1)}{1+\alpha t_1} = \frac{\rho(t)}{\rho_1} - 1. \quad (8)$$

Тогда на основании (8) получим формулу для температуры изделия

$$t = \frac{1+\alpha t_1}{\alpha} \left(\frac{\omega \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot a^2}{\rho_1 x^2} - 1 \right) + t_1 \quad (9)$$

На рис. 3 представлена схема включения ПТЭМП с цилиндрическим изделием [1–5]. Она содержит генератор Г синусоидальных сигналов, частотомер Ч, амперметр А, образцовое $R_{о\acute{a}}$ и основное $R_{о\text{с}}$ сопротивления, вольтметры V_1, V_2 , рабочий РВПД и компенсационный КВПД преобразователи, образец О, фазометр Ф.

Величину $Z_{вн}$ находят по формуле

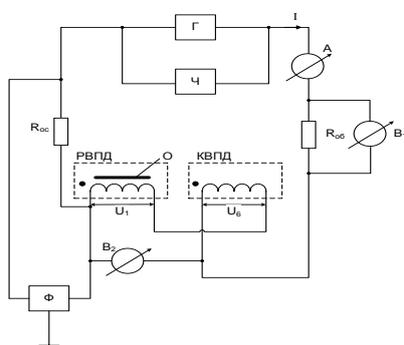


Рисунок 3 – Схема включения вихретокового параметрического датчика

$$Z_{\acute{a}i} = \frac{U_1}{I} - \frac{U_0}{I} = \frac{\Delta U}{I} \quad (10)$$

Эту же величину $Z_{вн}$ можно определить по мостовой схеме R, L – моста переменного тока [1–3]. В данном случае фазовый угол определяют в схеме рис. 1 фазометром, а в мостовой схеме [1–3]

$$\text{tg} \varphi_{\acute{a}i} = \frac{\omega L - \omega L_{\acute{y}\acute{e}\acute{a}}}{R - R_{\acute{y}\acute{e}\acute{a}}} \quad (11)$$

Величину $Z_{\acute{a}i.i}^*$ находят по формуле

$$Z_{\acute{a}i.i}^* = \frac{Z_{\acute{a}i.i}}{\omega L_0 \eta} \quad (12)$$

Приведем конкретный пример измерения μ_r, σ и t . Пусть измерены значения $Z_{\acute{a}i.i} = 0,52 \hat{\text{I}} \hat{\text{I}}$, нормированные значения $Z_{\acute{a}i.i}^* = 8,2 \hat{\text{I}} \hat{\text{I}}$, измеренный угол $\varphi_{\acute{a}i} = -15,47 \hat{\text{a}}\hat{\text{d}}\hat{\text{a}}$. Величину μ_r находим из табл. 1 и графика рис. 1, значения x определяем из графика рис. 2 и табл. 1. Значения μ_r и σ (или ρ) определяемые контрольными методами [2] составляют $\mu_r = 1,5$; $\sigma = 1,25 \cdot 10^7 \hat{\text{N}}\hat{\text{I}} / \hat{\text{I}}$; $\rho = 8 \cdot 10^{-8} \hat{\text{I}} \hat{\text{I}} \cdot \hat{\text{I}}$. Контроль по табл. 1 и графику рис. 1 $\mu_r = 1,51$, величину σ , и t находят по формулам (6), (7) и (9)

соответственно $\sigma = 1,242 \cdot 10^7 \text{ Н} \cdot \text{м}^{-1}$, $\rho = 8,05 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ $t = 20,1^{\circ}\text{C}$. При температуре $t = 60^{\circ}\text{C}$ экспериментальным методом находят удельное электрическое сопротивление $\rho = 9,94 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ (формула (8)) и при $t = 100^{\circ}\text{C}$, для данного метода $\rho = 1,19 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Параметр x при температуре $t = 60^{\circ}\text{C}$ равен $x = 1,35$, а при $t = 100^{\circ}\text{C}$ $x = 1,24$ и тогда по формулам (8) и (9) $t = 60,05^{\circ}\text{C}$ и $t = 100,9^{\circ}\text{C}$

Исходные данные установки РВПД и КВПД – два идентичных параметрических преобразователя: $R = 0,001 \text{ Ом}$; $L = 0,412 \text{ мГн}$; $\omega = 2\pi f = 26521/\text{с}$; $a = 6 \text{ мм}$; $a_1 = 25 \text{ мм}$; $\eta = 0,058$; $L_{\text{уэа}} = 0,42 \text{ мГн}$; $R_{\text{уэа}} = 0,024 \text{ Ом}$ РВПД, ТКС никеля – $\alpha = 6,9 \cdot 10^{-3} \text{ 1/К}$.

Таким образом, рассмотрен электромагнитный метод измерения электромагнитных параметров и температуры цилиндрических проводящих изделий, основанный на использовании зависимостей нормированного вносимого сопротивления от его фазового угла сдвига и обобщенного параметра от этого фазового угла параметрического вихретокового преобразователя. Приведен конкретный пример контроля магнитной проницаемости, электропроводности и температуры проводящего цилиндрического изделия.

Литература

1. Баштанников Л.А., Себко В.П., Тюпа В.И. Определение магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости материала трубчатых изделий. – Дефектоскопия, 1985. – №5. – С. 57–63.
2. Баштанников Л.А., Бондаренко В.И., Себко В.П., Тюпа В.И. Определение электромагнитных характеристик материала силовых цилиндрических изделий. – Дефектоскопия. – 1980. – №5. – С. 5–9.
3. Себко В.П., Мохаммад Махмуд Мохаммад Дарвиш. Расчет ожидаемых сигналов параметрического электромагнитного преобразователя с проводящим изделием. – Вестник национального технического университета «Харьковский политехнический институт». – Вып. 10. – Харьков: «НТУ «ХПИ», 2001. – С. 407–409.
4. Себко В.П., Ду Хиан Янг. Дифференциальный многопараметровый контроль цилиндрических изделий // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 61. – С. 343–344.
5. Себко В.П., Горкунов Б.М., Котуза А.И. Электромагнитный параметрический преобразователь для определения физико-механических величин. – Труды I^{ой} международной технической конференции «Метрология в механике-98». Харьков. – 1998. – С. 139–141.
6. Себко В.П., Горкунов Б.М., Багмет О.Л. Бесконтактный контроль температуры изделий и сред электромагнитными методами. Вестник Харьковского государственного политехнического университета. ХГПУ. – 1998. – С. 351, 352.
7. Себко В.П., Хасан Мусса Диаб. Амплитудный и фазовый методы определения температуры электромагнитным преобразователем с плоским изделием // Технічна електродинаміка. Тем. вип. – Київ: – 2002. – Ч.3. – С. 109–112
8. Себко В.П., Москаленко О.И. Выбор рационального образца проволоки электромагнитного датчика температуры сред // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків. – 2005. – № 42. – с. 21–26.