

УДК 620.179.12

Себко В.В.

## ВИХРЕТОКОВЫЙ КОНТРОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ПАРАМЕТРОВ НЕМАГНИТНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

В литературе описаны методы и средства для определения геометрических и электрических параметров цилиндрических изделий. Однако даже выходные сигналы преобразователей зависят от изменения температуры окружающей среды и изделия, так же как и удельное электрическое сопротивление определяется температурой.

Поэтому задача определения электрических и геометрических параметров изделий является комплексной, т.е. необходимо определять одновременно, например, диаметр изделия, электропроводность и температуру, при которой найдены указанные параметры.

В связи с тем, что без знания диаметра или радиуса, нельзя определить температуру, возникает необходимость рассмотрения бесконтактных трёхпараметровых вихретоковых методов для совместного контроля диаметра  $d$ , удельного электрического сопротивления  $\rho$  и температуры  $t$  немагнитного цилиндрического изделия.

Целью работы является расчётное и экспериментальное совместное определение  $d$ ,  $\rho$  и  $t$  немагнитных цилиндрических изделий при реализации трёхпараметрового вихретокового метода. Основными задачами работы являются: исследования влияния температуры на средний по длине преобразователя диаметр изделия, получить выражения для определения температуры изделий в последовательном и параллельном цикле расчетов, разработать алгоритмы измерительных и расчётных операций для совместного определения  $d$ ,  $\rho_t$ ,  $t$  на базе известной схемы включения трансформаторного вихретокового датчика (ТВД).

В работах [2, 4, 5, 6] рассмотрен абсолютный и дифференциальный методы для определения радиуса и удельного электрического сопротивления немагнитных цилиндрических изделий и получены зависимости  $N = f(x)$  и  $\varphi_{\dot{a}i} = f(x)$ .

В этих же работах был введен комплексный параметр  $N$ , который характеризует собой удельную нормированную ЭДС ТВД. Воспользовавшись результатами работ [1–6] запишем выражение для параметра  $N$  и его фазы  $\varphi_{\dot{a}i}$

$$|\dot{N}| = \frac{|\dot{E}_{\dot{a}i}|}{E_0 \cdot \eta} = \sqrt{(1 - \operatorname{Re} \dot{K})^2 + (\operatorname{Im} \dot{K})^2}; \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_{\dot{a}i} = \frac{\operatorname{Im} \dot{K}}{1 - \operatorname{Re} \dot{K}}, \quad (2)$$

где  $E_0$  – ЭДС ТВД при отсутствии в нем изделия;  $\eta$  – коэффициент заполнения ТВД изделием,  $\eta = d^2/d_i^2$ ;  $d$  и  $d_i$  диаметры изделия и измерительной обмотки ТВД;  $\operatorname{Re} \dot{K}$  и  $\operatorname{Im} \dot{K}$  – реальная и мнимая части комплексного параметра  $\dot{K}$  [2,4,5,6].

Приведем алгоритм измерительных и расчетных операций по определению  $d$ ,  $\rho_t$ ,  $t$ , при использовании последовательного цикла расчёта, с учётом результатов работ

[4,5]. Измерив угол  $\varphi_{\text{âit}}$  и используя зависимость  $\varphi_{\text{âit}}$  от  $x$  [4,5], находим параметр  $x_t$  с учётом температуры, а затем, зная  $x_t$ , определяем параметр  $N_t$ , используя зависимость  $N = f(x)$  [4,5], после чего измерив  $E_0$  и  $E_{\text{âit}}$ , а также зная диаметр  $d_{\text{п}}$  вторичной обмотки ТВД, пользуясь выражениями (1) и (2), можно определить диаметр немагнитного изделия с учётом [2,4,5,6]

$$d_t = d_i \sqrt{\frac{E_{\text{âit}}}{E_0 \cdot N_t}}, \quad (3)$$

индекс "t" – означает, что данная величина берется с учётом температуры.

Следующим шагом является определение удельного электрического сопротивления  $\rho_t$ , для этого предварительно измеряют частоту магнитного поля  $f_t$  и зная величины  $x_t$  и  $d_t$ , определяют  $\rho_t$

$$\rho_t = \frac{2 \cdot \pi \cdot d_t^2 \cdot \mu_0 \cdot f_t}{4x_t^2}. \quad (4)$$

Воспользовавшись линейной зависимостью  $\rho$  от температуры  $t$  [8,9]

$$\rho = \rho_1 + \frac{\rho_1 \cdot \alpha}{1 + \alpha \cdot t_1} \cdot (t - t_1). \quad (5)$$

А затем, приравняв формулы (4) и (5), получим выражение для определения температуры изделия в последовательном цикле

$$t = \frac{1 + \alpha \cdot t_1}{\alpha} \cdot \left( \frac{\pi \cdot d_t^2 \cdot \mu_0 \cdot f_t}{2 \cdot x_t^2 \cdot \rho_1} - 1 \right) + t_1. \quad (6)$$

Следовательно, при использовании трёхпараметрового вихретокового метода контроля параметров  $d$ ,  $\rho$  и  $t$  немагнитных цилиндрических изделий, при реализации последовательного цикла расчетов, сначала находим  $d_t$ , а затем удельное электрическое сопротивление  $\rho_t$ , которое связано известной функцией преобразования с температурой [9], а затем температуру  $t$ .

Рассмотрим последовательность действий определения геометрических, электрических и температурных параметров при использовании параллельного цикла.

В начале измеряем и определяем  $E_{\text{âit}}$ ,  $E_0$ ,  $f_t$ ,  $x_t$  и  $N_t$ . После выполнения измерительных операций, определяем диаметр  $d_t$  по формуле (3). Для того, чтобы определить удельное электрическое сопротивление  $\rho_t$ , нужно подставить (3) в (4).

$$\rho_t = \frac{\pi \cdot d_i^2 \cdot E_{\text{âit}} \cdot \mu_0 \cdot f_t}{2 \cdot E_0 \cdot N_t \cdot x_t^2}. \quad (7)$$

Приравняв (5) и (7), получим выражение для расчета текущей температуры  $t$  немагнитного цилиндрического изделия

$$t = \frac{1 + \alpha \cdot t_1}{\alpha} \left( \frac{\pi \cdot d_t^2 \cdot E_{\text{дйт}} \cdot \mu_0 f_t}{2 \cdot E_0 \cdot N_t \cdot X_t^2 \cdot \rho_t} - 1 \right) + t_1. \quad (8)$$

Результаты экспериментов по определению диаметра  $d_t$  и температуры медного и алюминиевого цилиндрических изделий сведены в таблицы 1 и 2. Эксперименты проводились на установке, собранной по схеме рис. 1 [2,4,5]. Следует отметить, что установка, схема которой показана на рис. 1 для реализации трёхпараметрового метода совместного определения диаметра  $d_t$ , удельного электрического сопротивления  $\rho_t$  и температуры  $t$  немагнитных цилиндрических изделий содержит греющее устройство ГУ, с помощью которого можно было изменять температуру образца [8], а также два платиновых термометра сопротивления ТСП, прикреплённых к поверхности изделия вблизи его обоих концов [8].

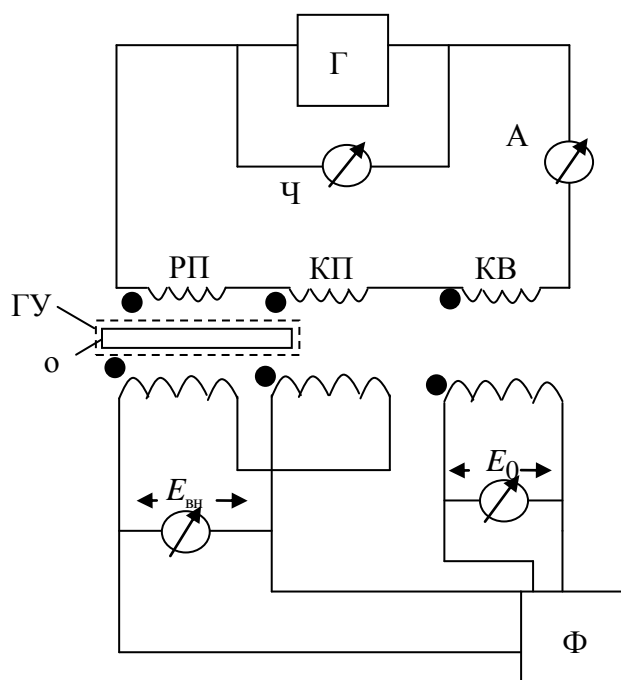


Рисунок 1 – ТВД для совместного измерения геометрических, электрических и температурных параметров немагнитных изделий

Параметры образцов:  $d = 38 \cdot 10^{-3}$  м;  $l = 0,52$  м;  $\rho = 1,75 \cdot 10^{-8}$  Ом·м;  $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3}$  1/К (медь);  $\rho = 2,6 \cdot 10^{-8}$  Ом·м;  $\alpha = 4,1 \cdot 10^{-3}$  1/К (алюминий). Параметры  $l_t = 0,50$  м;  $d_t = 38 \cdot 10^{-3}$  м.

В таблице 1 и 2 представлены результаты совместного измерения диаметра  $d_t$  и температуры  $t$  медного и алюминиевого цилиндрических изделий в диапазоне от 20–180 °С. Здесь же даны значения  $t'$  и  $d'$ , измеренные контрольными методами, и значения  $t_1$  и  $t_2$ , рассчитанные по формулам (6) и (8).

Таблица 1 – Экспериментальные и расчётные результаты одновременного совместного определения  $d_t$  и  $t$  медного цилиндрического изделия ( $x_1 = 3$ ;  $f_1 = 54,31$  Гц;  $E_0 = 62,35$  мВ;  $d = 38,0$  мм)

$t', ^\circ\text{C}$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$\varphi_{\text{ait}}, \text{град}$	$x_t$	$N_t$	$E_{\text{ait}}, \text{мВ}$	$d_t, \text{м}$
20	19,89	19,89	35,697	3,0000	0,616899	22,22	0,03802
30	29,85	29,85	36,620	2,9423	0,609149	21,94	0,03803
40	39,90	39,90	37,525	2,8878	0,601450	21,66	0,03802
50	49,87	49,87	38,412	2,8363	0,593807	21,39	0,03810
60	59,95	59,95	39,280	2,7874	0,586225	21,11	0,03806
70	69,89	69,89	40,130	2,7409	0,578707	20,84	0,03807
80	79,80	79,80	40,961	2,6967	0,571260	20,57	0,03805
90	89,88	89,88	41,774	2,6546	0,563887	20,31	0,03810
100	99,86	99,86	42,569	2,6144	0,556593	20,05	0,03803
110	109,90	109,90	43,346	2,5759	0,549381	19,79	0,03804
120	119,75	119,75	44,105	2,5391	0,542255	19,53	0,03805
130	129,73	129,73	44,846	2,5039	0,535218	19,28	0,03804
140	139,70	139,70	45,570	2,4700	0,528274	19,03	0,03802
150	149,68	149,68	46,278	2,4375	0,521424	18,78	0,03805
160	159,71	159,71	46,968	2,4063	0,514671	18,54	0,03806
170	169,80	169,80	47,642	2,3762	0,508016	18,30	0,03807
180	179,79	179,79	48,300	2,3473	0,501461	18,06	0,03803

Таблица 2 – Экспериментальные и расчётные результаты одновременного совместного определения  $d_t$  и  $t$  алюминиевого цилиндрического изделия ( $x_1 = 3$ ;  $f_1 = 82,1$  Гц;  $E_0 = 94,25$  мВ;  $d = 38,0$  мм)

$t', ^\circ\text{C}$	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$\varphi_{\text{ait}}, \text{град}$	$x_t$	$N_t$	$E_{\text{ait}}, \text{мВ}$	$d_t, \text{м}$
20	19,89	19,89	35,697	3,0000	0,616899	33,58	0,03803
30	29,85	29,85	36,581	2,9447	0,609481	33,18	0,03802
40	39,90	39,90	37,448	2,8924	0,602110	32,78	0,03801
50	49,87	49,87	38,298	2,8428	0,594789	32,38	0,03810
60	59,95	59,95	39,132	2,7956	0,587524	31,99	0,03806
70	69,89	69,89	39,949	2,7507	0,580317	31,59	0,03807
80	79,80	79,80	40,748	2,7079	0,573174	31,20	0,03805
90	89,88	89,88	41,531	2,6671	0,566098	30,82	0,03810
100	99,86	99,86	42,298	2,6280	0,559092	30,44	0,03803
110	109,90	109,90	43,047	2,5906	0,552161	30,06	0,03804
120	119,75	119,75	43,781	2,5548	0,545307	29,69	0,03805
130	129,73	129,73	44,498	2,5204	0,538534	29,32	0,03804
140	139,70	139,70	45,199	2,4873	0,531844	28,95	0,03802
150	149,68	149,68	45,884	2,4555	0,525240	28,59	0,03805
160	159,71	159,71	46,554	2,4250	0,518723	28,24	0,03806
170	169,80	169,80	47,208	2,3955	0,512296	27,89	0,03807
180	179,79	179,79	47,856	2,3671	0,505959	27,55	0,03803

Данные таблиц 1 и 2 свидетельствуют о том, что значения диаметра и температуры, измеренные рассмотренным и контрольными методами, хорошо согласуются между собой.

Таким образом, рассмотрен вихретоковый трёхпараметровый метод совместного контроля диаметра  $d_t$ , удельного электрического сопротивления  $\rho_t$  и температуры  $t$  немагнитных цилиндрических изделий. Получены экспериментальные данные совместного определения параметров  $d_t$  и  $t$  для медного и алюминиевого образцов при реализации данного метода с помощью ТВД. Исследовано влияние температуры на средний по длине диаметр изделия и как видно из таблиц 1 и 2, и [3] с ростом температуры  $d$  и  $d'$  практически не изменяются, так как температурный коэффициент линейного расширения меди и алюминия весьма мал (порядка  $10^{-5}$ - $10^{-6}$  1/К).

Получены выражения для определения температуры  $t_1$  и  $t_2$  немагнитных цилиндрических изделий в последовательном и параллельном циклах расчетов. Для данного трёхпараметрового метода разработаны алгоритмы измерительных и расчетных операций совместного определения  $d_t$ ,  $\rho$  и  $t$ .

В этом случае перспективным направлением исследования является создание новых вихретоковых методов контроля геометрических, электрических и температурных параметров изделий разной формы различных веществ (химических жидкостей и плазменных газообразных сред).

#### Литература

1. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: Справочник / под редакцией В.В. Клюева. Кн. 2. –М.: Машиностроение, 1986. – 351 с.
2. Бондаренко В.И., Себко В.П., Тюпа В.И. Определение электромагнитных характеристик материала сплошных цилиндрических изделий. – Дефектоскопия, 1980. №8. – С. 5–9.
3. Сукачев А.П. Теоретические основы электротехники. ч.1. Физические основы электротехники. ХГУ. 1959.– 458 с.
4. Сомхиева О.С. К измерению радиуса и электропроводности изделий электромагнитным методом. // Вестник Харьковского государственного политехнического университета.– Харьков.– ХГПУ, 1998.– Вып. 17.– С. 123–125.
5. Себко В.П., Сомхиева О.С. Дифференциальный двухпараметровый электромагнитный преобразователь для контроля радиуса и электропроводности цилиндрических изделий. Вестник ХГПУ, вып. 24, 1999, С. 10–16.
6. Ду Хиан Янг. Дифференциальный трансформаторный электромагнитный преобразователь для контроля магнитных и электрических параметров изделий // Вестник Харьковского государственного политехнического университета.– Харьков: ХГПУ.– 1999.–вып. 37.– С. 61–63.
7. Себко В.П., Бабак В.П., Львов С.Г. Контактный двухпараметровый контроль цилиндрических изделий. Труды международной научно-технической конференции "Информационные технологии: наука, механика, образование, здоровье", 1997, ч.3, Харьков – Мишкольц (Венгрия).
8. Себко В.П., Багмет О.Л. Повышение точности измерений температуры цилиндрических изделий электромагнитным преобразователем. Вестник НТУ "ХПИ", Харьков: НТУ "ХПИ", 2003, т.1, №1, С. 28–31.
9. Спектор С.А. Электрические измерения физических величин.– Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 320 с.