

*О.Л. БАГМЕТ*, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ", Харьков  
*М.Е. ПОЗНЯКОВА*, магістр, НТУ "ХПИ", Харьков

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО  
ДИАМЕТРОМЕРА**

Розглянуто метрологічні характеристики трансформаторного електромагнітного перетворювача (ТЕМП), що використовує для вимірювання діаметру немагнітного циліндричного провідного виробу змінно-частотний електромагнітний метод. Розраховано чутливість та похибки вимірювання діаметру за допомогою ТЕМП.

Рассмотрены метрологические характеристики трансформаторного электромагнитного преобразователя (ТЭМП), который использует для измерения диаметра немагнитного цилиндрического проводного изделия переменнo-частотный электромагнитный метод. Рассчитана чувствительность и погрешности измерения диаметра с помощью ТЭМП.

**Введение.** К настоящему времени в литературе рассмотрены многопараметровые электромагнитные методы и устройства для совместного измерения параметров цилиндрического изделия [1-2], Для определения диаметра цилиндрического проводящего немагнитного изделия может быть применен электромагнитный переменнo-частотный метод, имеющий преимущества в бесконтактности и простоте своей реализации.

Диаметромер, реализующий указанный электромагнитный метод, благодаря своей простоте и надежности может использоваться при разбраковке прутков из немагнитных сталей и слабомагнитных материалов, когда нужна калибровка изделий по диаметру, например, при отборе прутков для станков с ЧПУ.

**Цель работы** – исследование метрологических характеристик электромагнитного диаметромера, поиск возможности повышения точности измерения диаметра изделий с помощью переменнo-частотного электромагнитного метода.

**Основная часть.** На рис.1 показана схема включения трансформаторного электромагнитного преобразователя с исследуемым цилиндрическим изделием. Схема содержит генератор Г синусоидальных

сигналов, частотомер Ч, амперметр А, измеряющий намагничивающий ток  $I$  до частот 1500 Гц. Ток более высокой частоты определяется вольтметром В1 по падению напряжений  $U_{R0}$  на образцовом сопротивлении  $R_0$ . При этом  $I = U_{R0} / R_0$ .

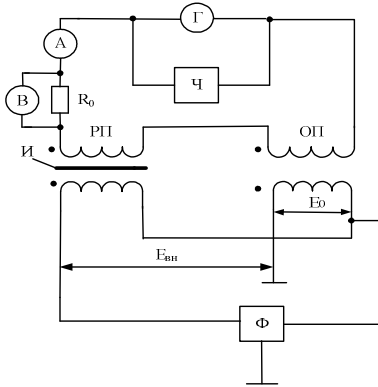


Рис. 1. Схема включения ТЕМП для измерения диаметра цилиндрического изделия.

Схема настраивается следующим образом. Во избежание нагрева изделия вихревыми токами напряженность  $H_0$  магнитного поля внутри преобразователя должна быть небольшой (порядка 50 – 200 А/м). При этом, эффективное значение намагничивающего тока  $I$  должно быть порядка 100 – 150 мА, ток определяется из формулы

$$I_{\text{эф}} = \frac{H_0 l_n}{\sqrt{2} \cdot W_1 C}, \quad (1)$$

где  $W_1$  - число витков намагничивающей обмотки,  $C$  – коэффициент, зависящий от отношения длины преобразователя к диаметру и при  $l_n/d=10$  равный 0,95;  $l_n$  – длина намагничивающей обмотки преобразователя.

Суть переменного-частотного метода состоит в поддержании постоянным значения фазового угла  $\varphi_{\text{вн}} = \varphi_{\text{вн1}} = \text{const}$  при изменении диаметра изделия путем изменения частоты  $f$  магнитного поля.  $\varphi_{\text{вн}}$  – фазовый угол вносимой ЭДС  $E_{\text{вн}}$  ТЭМП, обусловленной магнитным потоком в цилиндрическом изделии при внесении его в преобразователь. Параметр  $\varphi_{\text{вн1}}$  характеризует рабочую точку  $x_1$  на универсальной функции преобразования  $\varphi_{\text{вн}} = f(x)$ , здесь  $x$  – обобщенный электромаг-

Схема включает в себя рабочий РП и опорный ОП трансформаторный электромагнитный проходной преобразователь (ТЭМП). В РП помещается исследуемое изделие И. Фазометр Ф регистрирует фазовый угол  $\varphi_{\text{вн}}$  между вносимой ЭДС  $E_{\text{вн}}$  и ЭДС  $E_0$ , которая возникает на концах измерительной обмотки РП при отсутствии в нем изделия. Первичные обмотки РП, ОП включены последовательно–согласно, а вторичные обмотки РП и ОП соединены последовательно–встречно.

нитный параметр, характеризующий степень затухания магнитного поля в изделии, определяемый из соотношения

$$x = d/2\sqrt{2\pi f\mu_0\mu_r/\rho}, \quad (2)$$

где  $\rho$  – удельное электрическое сопротивление материала,  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м.

Таким образом, достижение условия  $\varphi_{\text{вн}} = \varphi_{\text{вн1}} = \text{const}$  при изменении радиуса изделия сводится к поддержанию с помощью изменения частоты  $f$  равенства  $x = x_1 = \text{const}$ . В этом случае для немагнитного изделия ( $\mu_r = 1$ ) при известной марке материала, а, следовательно, известном значении  $\rho$ , существует однозначная зависимость между радиусом изделия и частотой  $f$  намагничивающего тока.

$$d = 2 \frac{x\sqrt{\rho}}{\sqrt{2\pi\mu_0}}. \quad (3)$$

Данная схема не требует компенсации эффекта воздушного зазора, в связи с тем, что в ней используется в качестве параметров выходного сигнала вносимые значение ЭДС и ее фазы. Поэтому отпадает необходимость в измерении с помощью вольтметра ЭДС на измерительных обмотках преобразователей РП и ОП.

Рабочую точку  $x = x_1$  выбираем в оптимальном по погрешности и чувствительности режиме работы преобразователя  $1,5 \leq x \leq 4,5$ , что соответствует максимальной крутизне характеристики  $\varphi_{\text{вн}} = f(x)$ . Постоянство значения  $x = x_1$  достигается постоянством фазового угла  $\varphi_{\text{вн1}}$ , например,  $\varphi_{\text{вн1}} = 56,738$  град,  $\varphi_{\text{вн2}} = 35,697$  град,  $\varphi_{\text{вн3}} = 24,432$  град [3].

Перепишем зависимость (3) в виде

$$d = 2 \frac{K_1}{\sqrt{f}}, \quad (4)$$

где  $K_1$  – постоянный коэффициент для выбранной марки материала и значения рабочей точки  $x_1$ ;

$$K_1 = \frac{x\sqrt{\rho}}{\sqrt{2\pi\mu_0}}, \quad (5)$$

Оценим значения коэффициента  $K_1$  для исследуемых изделий из нержавеющей стали 1X18H10T, алюминия и меди. Удельная электропроводность этих материалов:  $\rho_{\text{стали}} = 72,8 \cdot 10^{-8}$  Ом м;  $\rho_{\text{алюм}} = 2,6 \cdot 10^{-8}$  Ом м;  $\rho_{\text{меди}} = 1,72 \cdot 10^{-8}$  Ом м

Таблица 1 – Значение коэффициента  $K_1$  для стали, алюминия и меди при различных  $x$

$x$	$K_1$		
	алюминий	сталь	медь
1	0,057413	0,303802	0,046697
2	0,114826	0,607605	0,093394
3	0,17224	0,911407	0,140091
4	0,229653	1,215209	0,186788
5	0,287066	1,519011	0,233485
6	0,344479	1,822814	0,280182
7	0,401893	2,126616	0,326879
8	0,459306	2,430418	0,373577
9	0,516719	2,734221	0,420274
10	0,574132	3,038023	0,466971

Не смотря на нелинейность, крутизна градуировочной характеристики ТЭМП для изделия из стали довольно велика, что говорит о высокой чувствительности преобразователя к изменению радиуса изделия.

Для расчета чувствительности использовалось соотношение:

$$S = \frac{\Delta f}{\Delta d} = \frac{f_{i+1} - f_i}{d_{i+1} - d_i},$$

где  $f_{i+1}$  и  $f_i$  – соответственно предыдущее и последующее значения частот, полученные по градуировочной характеристике ТЭМП;  $d_{i+1}$  и  $d_i$  – предыдущее и последующее значение радиуса.

На основании выражения (2) запишем формулу для электромагнитного параметра  $x$ , заменив  $\rho$  на  $\sigma$ , получим

$$x = \frac{d}{2} \sqrt{\mu_0 \mu_r \sigma \omega}, \quad (7)$$

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

Если  $\mu_r = 1$ , то формула (7) примет вид

$$x = \frac{d}{2} \sqrt{\mu_0 \sigma \omega}, \quad (8)$$

где  $\omega = 2\pi f$ .

Подставив значение  $\omega$  в формулу (8) получим:

$$x = \frac{d}{2} \sqrt{\mu_0 \sigma 2\pi f} \quad (9)$$

С формулы (9) выразим диаметр

$$d = \frac{2x}{\sqrt{\mu_0 \sigma 2\pi f}} \quad (10)$$

Продифференцировав (10), получим

$$\frac{\delta d}{d} = 2 \frac{\delta x}{x} - \frac{1}{2} \frac{\delta \sigma}{\sigma} - \frac{1}{2} \frac{\delta f}{f}, \quad (11)$$

$$\frac{\delta x}{x} = \frac{dx}{d\varphi_{\text{ВН}}} \cdot \frac{\varphi_{\text{ВН}}}{x} \cdot \frac{\delta\varphi_{\text{ВН}}}{\varphi_{\text{ВН}}} \quad (12)$$

По формуле (12) найдем коэффициент влияния  $C_{\varphi_{\text{ВН}}}$ , заменив дифференциал функции приращением, результаты расчета запишем в таблицу (2).

$$C_{\varphi_{\text{ВН}}} = \frac{\Delta x}{\Delta\varphi_{\text{ВН}}} \cdot \frac{\varphi_{\text{ВН}}}{x} \quad (13)$$

Подставим выражения (12) и (13) в выражение (11):

$$\frac{\delta d}{d} = 2C_{\varphi_{\text{ВН}}} \frac{\delta\varphi_{\text{ВН}}}{\varphi_{\text{ВН}}} - \frac{1}{2} \frac{\delta \sigma}{\sigma} - \frac{1}{2} \frac{\delta f}{f} \quad (14)$$

Найдем суммарную погрешность измерения диаметра, которую рассчитана при доверительной вероятности  $P = 0,95$  согласно ГОСТ 8.207 – 76:

$$\gamma_d = 1,1 \sqrt{(2C_{\varphi_{\text{ВН}}})^2 (\gamma_{\varphi_{\text{ВН}}})^2 - \frac{1}{4} (\gamma_{\sigma})^2 - \frac{1}{4} (\gamma_f)^2}, \quad (15)$$

где  $C_{\varphi_{\text{ВН}}}$  – коэффициент влияния;  $\gamma_{\varphi_{\text{ВН}}} = 0,3\%$ , относительная погрешность измерения фазового угла с помощью фазометра;  $\gamma_{\sigma} = 0,2\%$ , относительная погрешность измерения удельной электрической проводимости с помощью моста постоянного тока;  $\gamma_f = 0,1\%$ , относительная погрешность измерения частоты с помощью частотомера.

Результаты расчета погрешности занесены в табл.2.

Таблица 2 – Результаты расчета погрешности диаметромера.

$C_{\text{ФВН}}$	$x_1$	$\Phi_{\text{ВН}}$	$x_1$	$\Phi_{\text{ВН}}$	$\gamma_a, \%$
-2,38991	1	80,54	0,9	83,91	1,572539
-1,19496	2	56,76	1,9	61,88	0,779023
-0,79664	3	35,69	2,9	39,05	0,511195
-0,59748	4	24,43	3,9	26,09	0,374667
-0,47798	5	18,64	4,9	19,55	0,290509
-0,39832	6	15,17	5,9	15,75	0,232349
-0,34142	7	12,79	6,9	13,21	0,188814
-0,29874	8	11,05	7,9	11,36	0,154111
-0,26555	9	9,73	8,9	9,97	0,124864
-0,23899	10	8,69	9,9	8,88	0,098768

На основании данных табл. 2 построены графики зависимости погрешности измерения диаметра, показанные на рис. 2.

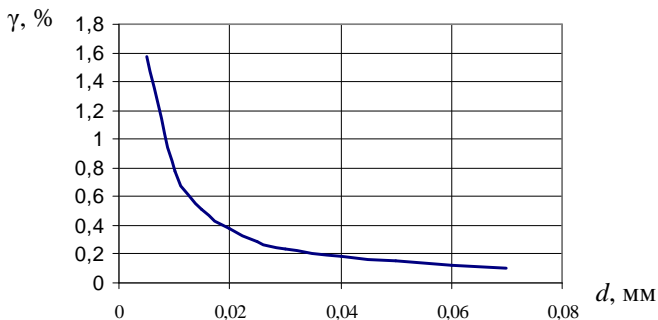


Рис. 2. Зависимость относительной погрешности измерения диаметра.

Таким образом, с помощью ТЭМП возможно измерять переменнo-частотным методом диаметр цилиндрического изделия для конкретной марки немагнитного или слабомагнитного материала с известным значением удельной электрической проводимости.

**Вывод.** В статье рассмотрены метрологические характеристики ТЭМП, который использует для измерения диаметра немагнитного цилиндрического проводящего изделия переменного-частотный электромагнитный метод. Рассчитана чувствительность и погрешности измерения диаметра с помощью ТЭМП.

**Список литературы:** 1. Себко В.П., Сиренко Н.Н., Горкунов Б.М. Определение магнитных, электрических и геометрических параметров цилиндрических изделий // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1992. – №2. – С.39-43. 2. Сандовский В.А., Носальская Н.И. Исследование возможности разбраковки прутковой стали по маркам методом вихревых токов в двухпараметровом варианте // Дефектоскопия. – 1983. – № 6. – С.30-34. 3. Багмет О.Л., Львов С.Г. Бесконтактное измерение радиуса цилиндрического изделия переменного-частотным электромагнитным методом // Вестник НТУ "ХПИ" – 2010. – №4. – С.136-141.

*Поступила в редколлегию 02.11.2011  
Рецензент д.т.н., проф. Гурин А.Г.*