

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРУБЫ С УЧЕТОМ ЕЕ НАГРЕВА

Себко В.В., к.т.н., доц.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Приборы и методы неразрушающего контроля"
тел. (057) 70-76-380, факс (057) 70-76-602, e-mail: sebko@kpi.kharkov.ua

У роботі розглянуто методика визначення температурного коефіцієнта α при використанні нового багатопараметрового методу визначення μ_r і ρ труби разом з температурою t у діапазоні зміни $\mu_r = [50 \dots 1000]$ й діапазоні зміни температур $t = [20^\circ \dots 180^\circ \text{C}]$. Отримано основні співвідношення для визначення електромагнітних параметрів ферромагнітних труб і температури, при якій визначалися ці параметри.

В работе рассмотрена методика определения температурного коэффициента α при использовании нового многопараметрового метода определения μ_r и ρ трубы совместно с температурой t в диапазоне изменения $\mu_r = [50 \dots 1000]$ и диапазоне изменения температур $t = [20^\circ \dots 180^\circ \text{C}]$. Получены основные соотношения для определения электромагнитных параметров ферромагнитных труб и температуры, при которой определялись эти параметры.

ВВЕДЕНИЕ

До настоящего времени известны научные работы [1 - 7] в области электромагнитных измерений, которые связаны с определением магнитной проницаемости μ_r и удельной электрической проводимости σ трубчатых изделий в продольных электромагнитных полях в диапазонах изменения $50 \leq \mu_r \leq 1000$. При этом, основным недостатком существующих методов измерения относительной магнитной проницаемости μ_r и удельной электропроводности σ , является то, что остается неизвестным при какой температуре эти параметры были определены. На сегодняшний день существует переменного-частотный электромагнитный метод для определения электрического сопротивления и температуры плоских немагнитных пластин, а также амплитудный и фазовый методы контроля электрического параметра ρ и температуры t плоского изделия [8, 9]. Однако следует отметить, что функции преобразования для трубы и пластин существенно отличаются, и в данном случае существует проблема определения магнитных и электрических параметров ферромагнитных труб при наличии текущей температуры. В свою очередь, определение электромагнитных параметров с учетом температуры на практике затруднено тем, что может быть неизвестен материал изделия, параметры которого необходимо определить, а следовательно неизвестен температурный коэффициент сопротивления (ТКС) α , который в данной статье предлагается определять экспериментальным и расчетным путем, то есть, зная начальную температуру t_1 , необходимо провести нагрев изделия, например, в самом преобразователе или муфельной печи до температуры t , а затем, пользуясь зависимостью удельного электрического сопротивления ρ от температуры t , получить аналитические выражения для определения ТКС α . Зная α и воспользовавшись справочной литературой [10] можно узнать материал изделия в том случае, если он неизвестен.

Актуальностью данных исследований является то, что параметры μ_r и σ проводящих магнитных изделий зависят от температуры и для точности измерения этих параметров необходимо учитывать температуру при

которой они измерялись, так как существующие методы, которые не оговаривают температуру [1 - 7] дают большую погрешность определения μ_r и σ .

Целью работы является проведение аналитических и экспериментальных исследований при реализации нового многопараметрового бесконтактного метода определения магнитной проницаемости μ_r , удельного электрического сопротивления ρ совместно с температурой t , в результате которых будут получены аналитические выражения для определения температурного коэффициента сопротивления α , а затем, зная α определить неизвестный материал трубчатого изделия. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- получить выражения для определения электромагнитных параметров трубы при наличии температуры;
- зная температуры t_1 и t получить аналитические выражения для определения α ;
- используя справочную литературу определить материал изделия и проанализировать результаты вычислений.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРУБЫ ПРИ НАЛИЧИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

В работах [1 - 7] были получены универсальные функции преобразования $K = f(x)$ и $\varphi = f(x)$, где K – комплексный параметр, характеризующий нормированную удельную ЭДС трансформаторного датчика ТВД на единицу μ_r ; параметр φ – фазовый угол величины K . Эти функции преобразования были получены при известных отношениях толщины стенки d к наружному радиусу a .

Схема (рис. 1) для измерения μ_r и σ совместно с температурой трубы включает в себя ТВД, имеющий две обмотки, намагничивающую и измерительную, генератор синусоидальных сигналов, амперметр А, два вольтметра V_1 и V_2 , опорный преобразователь ОП, частотомер Ч, образец О, нагреватель Н, осциллограф О, два платиновых термометра сопротивления ТСП, фазометр Ф [2 - 4].

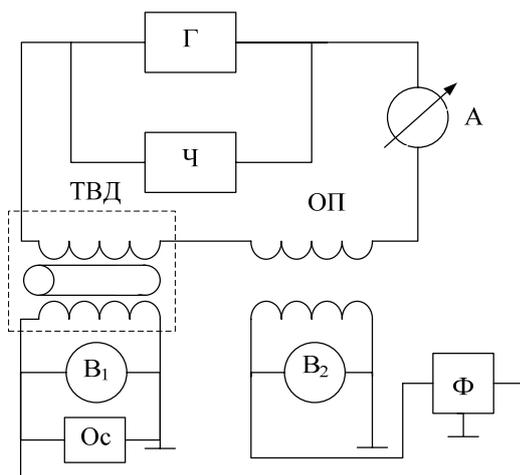


Рис. 1. Схема ТВД для измерения μ_r и σ при нагреве трубы

Вольтметр V_1 , подключаем к концам измерительной обмотки. Намагничивающая обмотка ТВД и первичная обмотка ОП запитывается от генератора Г. Намагничивающий ток измеряется с помощью амперметра А, а его частота – частотомером Ч, первый вольтметр V_1 определяет суммарную ЭДС ТВД, а второй вольтметр V_2 – ЭДС ТВД без изделия, т.е. E_0 [4]. Фазометром Ф определяли фазовый φ_0 ЭДС E_Σ по отношению к E_0 [1 - 7]. Значение E_0 определяется по формуле [4]

$$E_0 = 4,44 \cdot f \cdot W_n \cdot \pi \cdot a_n^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{I_n \cdot W_n}{l}, \quad (1)$$

где a_n – радиус измерительной обмотки; W_n и W_n – число витков намагничивающей и измерительной обмоток; I_n – намагничивающий ток; l – длина ТВД.

Суммарная ЭДС ТВД состоит из геометрической суммы E_1 и E_2 , где E_1 – ЭДС обусловленная магнитными потоками в воздушном зазоре между трубой и измерительной обмоткой ТВД, а ЭДС E_2 , связана с магнитным потоком в стенке трубы [1 - 4].

Значение ЭДС E_1 находят по формуле [1 - 7]

$$E_1 = E_0 \cdot \left(1 - \frac{a^2}{a_n^2}\right). \quad (2)$$

Алгоритм определения μ_r и σ следующий.

Сначала по измеренным значениям фазового угла φ_0 (между E_Σ и E_0 , см. рис. 1) и ЭДС E_Σ определяют угол φ параметра K (или ЭДС E_2). При этом [7 - 9]

$$\operatorname{tg} \varphi = -\frac{E_\Sigma \cdot \sin \varphi_0}{E_\Sigma \cdot \cos \varphi_0 - E_1}. \quad (3)$$

Затем по зависимости φ от x при известном отношении d/a находят параметр x , а далее на основании $K = f(x)$ определяют параметр K [5]. Затем параметр μ_r находят по формуле

$$\mu_{rt} = \frac{a_n^2 \cdot \sqrt{E_\Sigma^2 + E_1^2 - 2 \cdot E_\Sigma \cdot E_1 \cdot \cos \varphi_0}}{a^2 \cdot K}. \quad (4)$$

Значение σ определяют исходя из соотношения

$$\sigma_t = \frac{x^2 \cdot K \cdot E_0}{2\pi \cdot f \cdot a_n^2 \cdot \sqrt{E_\Sigma^2 + E_1^2 - 2 \cdot E_\Sigma \cdot E_1 \cdot \cos \varphi_0}}. \quad (5)$$

Удельное электрическое сопротивление трубчатого изделия выражается формулой

$$\rho_t = \frac{2\pi \cdot f \cdot a_n^2 \cdot \sqrt{E_\Sigma^2 + E_1^2 - 2 \cdot E_\Sigma \cdot E_1 \cdot \cos \varphi_0}}{x^2 \cdot K \cdot E_0}. \quad (6)$$

При использовании линейной зависимости ρ от температуры t (диапазон $20^\circ \leq t \leq 180^\circ \text{C}$) воспользуемся формулой

$$\frac{\rho}{\rho_1} - 1 = \frac{\alpha \cdot t}{1 + \alpha \cdot t_1} - \frac{\alpha \cdot t_1}{1 + \alpha \cdot t_1}, \quad (7)$$

где ρ_1 – удельное электрическое сопротивление при $t = t_1 = 20^\circ \text{C}$; α – температурный коэффициент сопротивления. В таком случае получаем выражение для t с учетом (5) и (6) в виде

$$t = \frac{1 + \alpha \cdot t_1}{\alpha} \cdot \left(2\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot a_n^2 \times \frac{\sqrt{E_\Sigma^2 + E_1^2 - 2 \cdot E_\Sigma \cdot E_1 \cdot \cos \varphi_0}}{K \cdot x^2 \cdot E_0 \cdot \rho_1} - 1 \right) + t_1. \quad (8)$$

Во многих случаях температурный коэффициент α оказывается неизвестным (например для 10 марок меди или для марок стали Ст 3; Ст 20; Ст 40 и др.). Поэтому надо его определить экспериментально, зная ρ для двух температур для t_1 и t . Тогда используя (7), получим формулу для нахождения ρ при текущей температуре t

$$\rho = \rho_1 + \frac{\rho_1 \cdot \alpha}{1 + \alpha \cdot t_1} \cdot (t - t_1). \quad (9)$$

Отсюда

$$\rho = \frac{\rho_1 \cdot (1 + \alpha \cdot t_1) + \rho_1 \cdot \alpha \cdot (t - t_1)}{1 + \alpha \cdot t_1}. \quad (10)$$

Разделим левую и правую часть (10) на $(1 + \alpha \cdot t_1)$

$$\rho \cdot (1 + \alpha \cdot t_1) = \rho_1 \cdot (1 + \alpha \cdot t_1) + \rho_1 \cdot \alpha \cdot (t - t_1). \quad (11)$$

Упростим выражение (11)

$$\rho + \rho \cdot \alpha \cdot t_1 = \rho_1 + \rho_1 \cdot \alpha \cdot t_1 + \rho_1 \cdot \alpha \cdot t - \rho_1 \cdot \alpha \cdot t_1. \quad (12)$$

Получим

$$\rho + \rho \cdot \alpha \cdot t_1 = \rho_1 + \rho_1 \cdot \alpha \cdot t. \quad (13)$$

Отсюда

$$\rho \cdot \alpha \cdot t_1 - \rho_1 \cdot \alpha \cdot t = \rho_1 - \rho. \quad (14)$$

Получим выражение для нахождения α

$$\alpha = \frac{\rho - \rho_1}{t \cdot \rho_1 - t_1 \cdot \rho}. \quad (15)$$

Значения ρ и ρ_1 при температурах t и t_1 можно определить в муфельной печи имеющей контрольный термометр, либо в схеме рис. 1 при помещении двух ТСП (один на конце, а другой в середине трубчатого образца). При этом надо выждать определенное время для хорошего прогрева трубы.

Примеры определения α для никелевой и стальной труб для разных материалов приведены в табл. 2. Параметры преобразователя и образца: $a = 6$ мм; $d = 1,2$ мм; $l = 1$ м; $a_n = 8,1$ мм; $W_n = 300$; $W_n = 1050$.

Таблица 1

Выходные значения сигналов ТВД для значений

$$H_0 = 60 \text{ А/м}; \sigma = 0,61 \cdot 10^7 \text{ См/м}; I = 0,15 \text{ А};$$

$$\mu_r = 131; \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}; x = 4; d/a = 0,2;$$

$$t = t_1 = 20^\circ \text{С}$$

Материал	$f, \text{Гц}$	$\alpha \cdot 10^{-3}, 1/\text{К}$	$E_2, \text{В}$	$\varphi, \text{град}$
Никель	70	6,9	0,8896	11,127
Сталь		3,6	0,8896	11,127
Медь		4,33	0,8896	11,127

Таблица 2

Расчетные значения температурного коэффициента α и параметров труб

Материал	$\rho \cdot 10^{-7}, \text{Ом}\cdot\text{м}$	μ_r^*	$\sigma \cdot 10^7, \text{См/м}$	$t, ^\circ\text{С}$	$\alpha^* \cdot 10^{-3}, 1/\text{К}$
Никель	0,915	138,37	0,4921	60	6,9
	1,032			100	
Сталь	1,98	137,14	0,5827	60	3,6
	2,22			100	
Медь	1,99	1,01	5,712	60	4,33
	2,27			100	

где α^* и μ_r^* – значения ТКС и относительной магнитной проницаемости, найденные по формулам (9) и (4) соответственно.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Таким образом, используя известные схемы включения трансформаторного вихретокового датчика (ТВД) разработан новый вихретоковый метод определения электромагнитных параметров трубчатого изделия совместно с температурой, с помощью которого получены соотношения для определения температурного коэффициента сопротивления (ТКС), что в свою очередь позволяет определить материал трубчатого изделия в том случае, если он не был известным. Также в работе получены аналитические выражения для определения магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости при наличии температуры. Следует отметить, что исследования проводились в рациональном диапазоне изменения $\mu_r = [50 \dots 1000]$. Практической значимостью, в данном случае, является создание нового метода совместного контроля электромагнитных параметров и температуры ферромагнитных трубчатых изделий.

Научной новизной данной работы следует считать предложенную методику экспериментального определения и полученные аналитические выражения для расчета температурного коэффициента сопротивления α , что в свою очередь позволяет определить марку материала исследуемого трубчатого изделия, которая может быть неизвестна [10]. Следует отметить, что расчетные данные α^* хорошо согласуются с данными по α , взятыми из справочной литературы для никеля и стали (табл. 1). Небольшие отличия по ТКС α которые могут возникать в справочных данных и данных, полученных в результате расчетов α других материалов могут быть связаны с наличием примесей.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Себко В.П., Пантелеев М.С. Бесконтактное измерение диаметра и удельной электрической проводимости цилиндрических изделий. Журнал "Заводская лаборатория", №9, из-во "Металлургия", 1987, С. 48-50.
- [2] Себко В.П., Пантелеев М.С. Бесконтактное измерение магнитных и электрических параметров трубчатых изделий в переменных магнитных полях. Тезисы докладов VII Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы магнитных измерений и магнитоизмерительной аппаратуры", Ленинград, 1989, С. 146, 147.
- [3] Себко В.П., Константин Б. Бесконтактное определение параметров трубчатых немагнитных изделий. Дефектоскопия, №5, 1992г., С. 36-41.
- [4] Себко В.П., Хоменко В.Г. К расчету компонентов сигналов электромагнитного преобразователя с трубчатым проводящим изделием. Вестник ХГПУ, Харьков, ХГПУ, 2000, вып. 92, С. 76-80.
- [5] Себко В.П., Горкунов Б.М., Мохаммад Махмуд Дарвиш. Автоматизированная установка для бесконтактного контроля параметров изделия. – Вестник национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Тематический выпуск Т. 4. – Харьков: НТУ"ХПИ", № 9, 2002. С. 123-128.
- [6] Горкунов Б.М., Сомхиева О.С., Ду Хуан Янг Дифференциальный электромагнитный преобразователь с цилиндрическим проводящим изделием // Збірник наукових праць II міжнародної науково-технічної конференції "Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія 99)". – Харків: ХДНДІМ. – 1999. – Т.1. – С. 220-223.
- [7] Ду Хуан 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.
- [8] Себко В.П., Хасан Муссу Диаб. Переменно-частотный электромагнитный метод бесконтактного определения удельной электрической сопротивляемости и температуры плоского изделия, – материалы конференции "Неруйнівний контроль та технічна діагностика", Київ, 2003, С. 54-59.
- [9] Себко В.П., Хасан Муссу Диаб. Амплитудный и фазовый методы определения температуры электромагнитным преобразователем с плоским изделием. Технічна електродинаміка, тематичний випуск, 2002, ч. 3, С. 109-112.
- [10] Справочник металлиста. В 5-ти томах Т.2. Под ред. А.М. Малова М., "Машиностроение", 1977, с. 748.

Поступила 5.06.2006