

ВОЗДЕЙСТВИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА МАГНИТНУЮ ПРОНИЦАЕМОСТЬ И УДЕЛЬНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ИЗДЕЛИЯ

Себко В.В., к.т.н., доц.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", каф. "Приборы и методы неразрушающего контроля"

тел. (0572) 40-09-27

У роботі розглянутий вплив температури на відносну магнітну проникність і питомий електричний опір провідного циліндричного виробу. Показано, що питомий електричний опір збільшується істотно більше (приблизно в 3 рази) у порівнянні з ростом магнітної проникності при одній і тій же температурі виробу, що нагрівається.

В работе рассмотрено влияние температуры на относительную магнитную проницаемость и удельное электрическое сопротивление проводящего цилиндрического изделия. Показано, что удельное электрическое сопротивление увеличивается существенно больше (примерно в 3 раза) по сравнению с ростом магнитной проницаемости при одной и той же температуре нагреваемого изделия.

В настоящее время широкое развитие в практике неразрушающего контроля приобретают методы и средства для совместного определения многих параметров материалов и изделий [1-3]. В этом плане заслуживают внимания электромагнитные методы и устройства для одновременного контроля магнитной проницаемости μ_r и удельной электрического сопротивления ρ сплошных цилиндрических проводящих изделий. Большой интерес представляет исследование зависимости указанных параметров цилиндрических проводящих изделий от их температуры. Необходимый контроль может быть проведен с помощью трансформаторного электромагнитного преобразователя, в котором создается переменное магнитное поле. Преимущество электромагнитного метода состоит в возможности измерения параметров не только на поверхности изделия, но и усредненных по его сечению. Кроме того, данный метод позволяет определять магнитный и электрический параметры одновременно в одной и той же зоне контроля. На современном период в литературе не рассматривался случай совместного измерения магнитной проницаемости и электропроводности при различных температурах изделия. В настоящей работе устанавливаются зависимости магнитной проницаемости и удельного электрического сопротивления образца от температуры.

Вначале будет рассмотрен метод определения магнитной проницаемости μ_r и удельного электрического сопротивления ρ в зависимости от температуры цилиндрических изделий с помощью трансформаторного электромагнитного преобразователя ТЭМП проходного типа.

Сложные функциональные связи между сигналами такого преобразователя и температурой изделия в существенной мере затрудняют использование такого метода в практике. Однако, если воспользоваться введенными специальными нормированными параметрами K и его фазы φ , то можно в значительной степени упростить реализацию электромагнитного метода применительно к температурным измерениям. Основная идея данной реализации состоит в том, что в сигналах

ТЭМП содержатся сведения о таких термозависимых параметрах изделия, как удельное электрическое сопротивление ρ и относительная магнитная проницаемость μ_r . Таким образом, измерив сигналы ТЭМП, по приведенной ниже методике, можно определить сразу оба интересующих параметра: μ_r и ρ .

Для исследования влияния температуры на параметры изделия применяется схема включения ТЭМП, представленная на рис. 1. Схема содержит генератор G синусоидальных сигналов, частотомер $Ч$, образцовое сопротивление R_0 , вольтметры V_1, V_2, V_3 , фазометр Φ , рабочий РП и опорный ОП преобразователя, образец O . Первичные обмотки РП и ОП включены последовательно-согласно, а вторичные их обмотки подключены к вольтметрам V_2, V_3 и фазометру Φ . Вольтметр V_2 измеряет суммарную эдс E_Σ измерительной обмотки РП. Вольтметром V_3 регистрируют эдс E_0 (здесь E_0 – эдс ТЭМП при отсутствии в нём образца; в данном случае РП и ОП – два идентичных преобразователя). Последнее позволяет для измерения E_0 не использовать РП в отсутствие образца O , то есть образец (изделие) может постоянно находиться внутри РП. При низких частотах до 1-1,5 кГц намагничивающий ток I можно измерять амперметром A , более в широком частотном диапазоне для определения I целесообразно пользоваться падением напряжения U_{R_0} на образцовом сопротивлении R_0 . При этом

$$I = U_{R_0} / R_0. \quad (1)$$

Фазометром Φ измеряют угол φ_0 между E_0 и E_Σ . В целях определения температуры образца ТЭМП вместе с ним помещают в сосуд с нагреваемым маслом. Миниатюрный образец и ТЭМП быстро приобретают температуру масла, которая изменяется в диапазоне от 20°C до 150°C. Температура масла и образца измеряется ртутным термометром. Для магнитного образца комплексный параметр K определяют из выражения

$$K = \frac{E_2}{E_0 \mu_r \eta}, \quad (2)$$

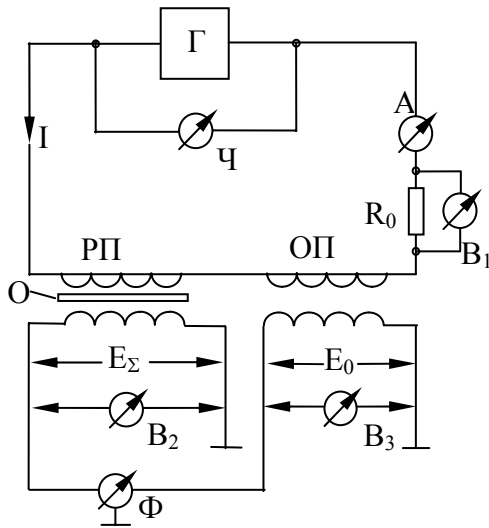


Рис. 1. Схема включения ТЭМП для контроля влияния температуры на μ_r и σ цилиндрического проводящего образца

где K выражает собой удельную нормированную эдс ТЭМП [1]; E_2 и E_0 – эдс ТЭМП, обусловленные магнитными потоками в изделии Φ_2 и Φ_0 внутри ТЭМП без изделия.

Эдс E_Σ представляет собой векторную сумму эдс E_2 и E_1 , т.е.

$$\vec{E}_\Sigma = \vec{E}_2 + \vec{E}_1, \quad (3)$$

где E_1 – часть суммарной эдс, обусловленная магнитным потоком Φ_1 в воздушном зазоре между изделием и измерительной обмоткой ТЭМП, радиуса;

$$E_1 = E_0(1 - \eta), \quad (4)$$

где η – коэффициент заполнения $\eta = a^2/a_{II}^2$, a_{II} – радиус измерительной обмотки ТЭМП.

Формула для определения эдс E_2 имеет вид

$$E_2 = \sqrt{E_\Sigma^2 + E_1^2 - 2E_1E_\Sigma \cos \varphi_0}, \quad (5)$$

где φ_0 – фазовый угол E_Σ .

Выражение для расчета фазового угла E_2 следующее:

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = -\frac{E_\Sigma \sin \varphi_0}{E_\Sigma \cos \varphi_0 - E_1}. \quad (6)$$

В табл. 1 представлены численные значения параметра K и его фазового угла φ_2 при различных значениях x .

Данные табл. 1 свидетельствуют о том, что наибольшие крутизны зависимости K и φ_2 от x наступают в диапазоне x от 0,7 до 4,5.

Обобщенный параметр x находят по формуле

$$x = a\sqrt{2\pi\mu_0\mu_r f/\rho}, \quad (7)$$

где μ_0 – магнитная постоянная; f – частота изменения поля.

Таким образом, измерения относительной магнитной проницаемости μ_r и удельного электрического сопротивления ρ в зависимости от температуры, реализуемые в установке, собранной по схеме рис. 1, связаны с использованием зависимости амплитуды параметра K и фазы φ_2 от x , т.е. $K = f(x)$ и $\varphi_2 = f(x)$. Порядок работы следующий: сначала устанавливают рабо-

чую точку на кривой $\varphi_2 = f(x)$, т.е. $x = x_1$, где x_1 значение обобщенного параметра, соответствующего начальной температуре изделия t_1 (как правило t_1 принимают равной 20°C). Достаточно большая крутизна зависимости K от x наблюдается в диапазоне $0,7 \leq x \leq 4,5$. Для этого при наличии в ТЭМП "холодной" детали (т.е. при $t = t_1$) в схеме рис. 1 устанавливают генератором любую частоту тока I (или напряженность поля H_0) и измеряют при этом E_Σ , E_0 и φ_0 . Затем используя формулу (4) находят значение E_1 . После этого по (5) с учетом значений, E_Σ , φ_0 и величины E_1 определяют E_2 . После этого рассчитывают по (6) значение φ_2 от x , находят последний. Если x не попадает в указанный благоприятный диапазон изменения, то эту процедуру путём изменения частоты f поля повторяют до тех пор, пока значение x_1 попадет при наличии холодного изделия (при t_1) в указанный диапазон, т.е. $0,7 \leq x \leq 4,5$. Далее по этому обобщенному параметру, пользуясь кривой $K = f(x)$ находят величину K при благоприятном значении x . После этого нагревают изделие до какой-то фиксированной температуры t . Измеряют E_Σ , E_0 и φ_0 , вычисляют E_1 , а затем находят φ_2 по (6) и по приведенному выше алгоритму определяют значения x и K при каждой фиксированной температуре.

Таблица 1

Зависимости K и φ_2 от x

x	K	φ_2
0,1	0,001299	89,857
0,2	0,004999	89,427
0,3	0,011232	89,221
0,4	0,019996	88,854
0,5	0,031236	87,520
0,6	0,044928	86,544
0,7	0,061004	85,483
0,8	0,079525	83,830
0,9	0,100303	82,334
1,0	0,123216	80,540
1,1	0,148032	78,628
1,2	0,174744	76,529
1,3	0,202836	74,307
1,4	0,232206	71,970
1,5	0,262411	69,547
1,6	0,292997	67,023
1,7	0,323662	64,470
1,8	0,354045	61,884
1,9	0,383768	59,299
2,0	0,412459	56,740
2,1	0,439930	54,221
2,2	0,466006	51,762
2,3	0,490493	49,393
2,4	0,513307	47,108
2,5	0,534423	44,929
2,6	0,553946	42,857
2,7	0,571802	40,902
2,8	0,588220	39,054
2,9	0,603228	37,321
3,0	0,616921	35,697
3,1	0,629433	34,180
3,2	0,640811	32,772
3,3	0,651337	31,452
3,4	0,661135	30,212
3,5	0,670087	29,075

3,6	0,678238	28,008
3,7	0,685890	27,024
3,8	0,693081	26,097
3,9	0,699895	25,237
4,0	0,706135	24,437
4,1	0,712173	23,684
4,2	0,717818	22,980
4,3	0,723299	22,319
4,4	0,728439	21,698
4,5	0,733381	21,117
4,6	0,738166	20,567
4,7	0,742736	20,043
4,8	0,747192	19,556
4,9	0,751486	19,089
5,0	0,755610	18,646
5,1	0,759626	18,227
5,2	0,763482	17,828
5,3	0,767282	17,445
5,4	0,770942	17,078
5,5	0,774500	16,726
5,6	0,778043	16,390
5,7	0,781312	16,071
5,8	0,784612	15,761
5,9	0,787755	15,460
6,0	0,790873	15,176
6,1	0,793870	14,900
6,2	0,796796	14,632
6,3	0,799660	14,376
6,4	0,802428	14,128
6,5	0,805147	13,887
6,6	0,807768	13,654
6,7	0,810323	13,431
6,8	0,812820	13,212
6,9	0,815241	13,002
7,0	0,817612	12,798
7,1	0,819931	12,600
7,2	0,822178	12,409
7,3	0,824389	12,223
7,4	0,826530	12,041
7,5	0,828629	11,866
7,6	0,830670	11,694
7,7	0,832658	11,531
7,8	0,834624	11,369
7,9	0,836543	11,210
8,0	0,838383	11,058
8,1	0,840205	10,909
8,2	0,841958	10,768
8,3	0,843719	10,625
8,4	0,845412	10,488
8,5	0,847093	10,353
8,6	0,840693	10,224
8,7	0,850314	10,099
8,8	0,851869	9,974
8,9	0,853402	9,853
9,0	0,854903	9,735
9,1	0,856381	9,619
9,2	0,857791	9,507
9,3	0,859203	9,397
9,4	0,860598	9,289

Далее воспользовавшись формулой (2) вычисляют μ_r по формуле $\mu_r = \frac{E_2}{E_0 \eta K}$ и зная x на основании (7) получим выражение для расчета ρ при заданной

температуры в виде

$$\rho = \frac{2\pi a^2 \mu_0 \mu_r f}{x^2}. \quad (8)$$

Напряженность H_0 магнитного поля вне образца выбирают порядка 250-5000 А/м с тем, чтобы можно было избежать нагрева изделия вихревыми токами, а также для того чтобы находиться на начальном участке кривой намагничивания. Далее, находят эффективное значение тока I в намагничивающей обмотке

$$I = \frac{H_0 l}{\sqrt{2} W_1 C}. \quad (9)$$

где W_1 – число витков намагничивающей обмотки; l – ее длина; C – коэффициент, учитывающий степень однородности магнитного поля в соленоидальной катушке, он зависит от отношения ее длины к диаметру.

Эксперименты проводились при использовании миниатюрного трансформаторного датчика с параметрами: радиусы обмотки изделия $a=0,75$ мм, ТЭМП $a_{IT}=0,76$ мм, длина измерительной обмотки $l=40$ мм, числа витков намагничивающей обмотки $W_H=100$, измерительной обмотки $W_{и}=200$, длина намагничивающей обмотки $l_H=25$ мм. Напряжённость магнитного поля внутри ТЭМП без образца $H_0=3948$ А/м.

Масло нагревалось электрическим нагревателем, расположенным на дне сосуда. В качестве измерителя температуры масла применяется ртутный термометр, находящийся внутри масла. Цена деления ртутника составляла 1 град на деление, температурный диапазон его от 0 до 250°C. Приведенная погрешность ртутного термометра при отметке 150°C составляла 0.7%.

В табл. 2 приведены зависимости величины μ_r и ρ от температуры. На графиках рис. 2, 3 представлены те же зависимости. Как видно из данных табл. 2 и рис. 2, 3 зависимости параметров ρ и μ_r от температуры t имеют характер, близкий к линейному в диапазоне измерения температуры от 20 до 140°C. Приняв такие зависимости линейными, оценим влияние температуры t на относительную магнитную проницаемость μ_r и удельное электрическое сопротивление материала образца.

Воспользовавшись результатами работ [4,5], можно записать линейные зависимости ρ и μ_r от t в виде

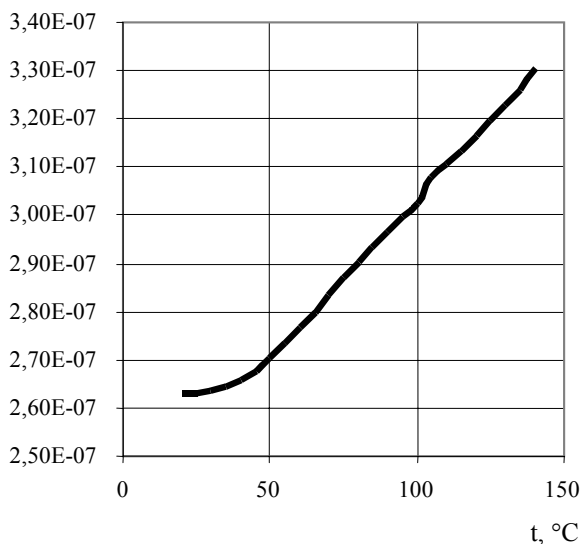
$$\rho_t = \rho_1 + \frac{\rho_1 \alpha_\rho}{1 + \alpha_\rho t_1} (t - t_1); \quad (10)$$

$$\mu_{rt} = \mu_{r1} + \frac{\mu_{r1} \alpha_\mu}{1 + \alpha_\mu t_1} (t - t_1), \quad (11)$$

где ρ_t и ρ_1 – удельные электрические сопротивления при любой величине t и при начальной температуре $t_1=20^\circ\text{C}$; α_ρ и α_μ – температурные коэффициенты сопротивления и магнитной проницаемости для параметров ρ и μ_r ; t – любая температура; μ_{rt} и μ_{r1} – магнитные проницаемости при любой t и при t_1 .

Таблица 2

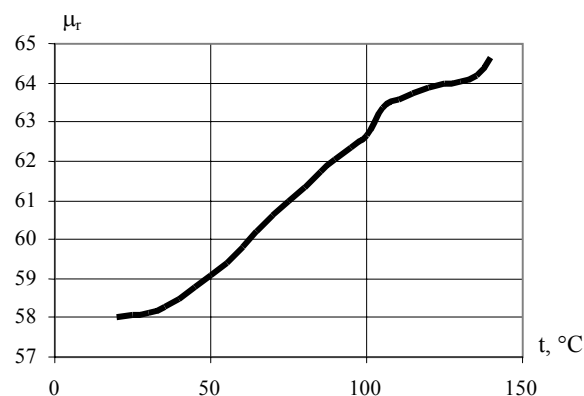
Зависимости μ_r и ρ от t			
x	$t, ^\circ\text{C}$	μ_r	$\rho \cdot 10^{-7}, \text{Ом}\cdot\text{м}$
2,425	20	58,018	2,6289
2,424	25	58,048	2,6320
2,424	30	58,125	2,6372
2,423	35	58,293	2,6465
2,421	40	58,492	2,6590
2,419	45	58,767	2,6767
2,413	50	59,072	2,7029
2,406	55	59,393	2,7335
2,399	60	59,803	2,7684
2,394	65	60,197	2,7993
2,388	70	60,621	2,8335
2,379	75	60,953	2,8692
2,372	80	61,314	2,9028
2,369	85	61,735	2,9321
2,362	90	62,049	2,9639
2,355	95	62,364	2,9960
2,349	100	62,647	3,0248
2,343	105	63,362	3,0768
2,335	110	63,554	3,1075
2,327	115	63,718	3,1351
2,319	120	63,867	3,1641
2,311	125	64,001	3,1946
2,299	130	64,035	3,2281
2,291	135	64,185	3,2578
2,284	140	64,642	3,3034

 $\rho, \text{Ом}\cdot\text{м}$ Рис. 2. Зависимость параметра ρ от температуры t

Из формул (10) и (11) найдём величины α_ρ и α_μ .
При этом

$$\alpha_\rho = \frac{\rho_t - \rho_1}{\rho_1(t - t_1)} \left/ \left(1 - \frac{t_1(\rho_t - \rho_1)}{\rho_1(t - t_1)} \right) \right.; \quad (12)$$

$$\alpha_\mu = \frac{\mu_{rt} - \mu_{r1}}{\mu_{r1}(t - t_1)} \left/ \left(1 - \frac{t_1(\mu_{rt} - \mu_{r1})}{\mu_{r1}(t - t_1)} \right) \right. \quad (13)$$

Рис. 3. Зависимость параметра μ_r от температуры t

Взяв из табл. 2 значения измеренных по указанному выше алгоритму ρ_t при 140°C , т.е. $\rho_t = 3,3034 \cdot 10^{-7}$ Ом·м, ρ_t при $t_1 = 20^\circ\text{C}$, т.е. $\rho_t = 2,6289 \cdot 10^{-7}$ Ом·м, $\mu_r = 64,642$ при $t = 140^\circ\text{C}$ и $\mu_r = 58,018$ при $t_1 = 20^\circ\text{C}$ и подставив эти значения в (12) и (13), найдём, что температурный коэффициент сопротивления α_ρ составляет $2,876$ 1/К, а температурный коэффициент магнитной проницаемости $\alpha_\mu = 0,9514 \cdot 10^{-3}$ 1/К.

Отсюда видно, что величина α_ρ примерно в 3 раза больше, чем α_μ . Это свидетельствует о том, что температура гораздо ощутимей воздействует на величину ρ , чем на параметр μ_r . Поэтому во многих случаях воздействие температуры на величину μ_r можно не учитывать в указанном температурном диапазоне.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гончаров Б.В. Теория и практика безэталонных электромагнитных методов контроля. – М.: Машиностроение, 1975. – 40 с.
- [2] Бондаренко В.И., Горкунов Б.М., Себко В.П., Тюпа В.И. Бесконтактное измерение электромагнитных характеристик цилиндрических изделий. – Измерительная техника, 1984, № 6, с. 57-58.
- [3] Себко В.П., Сиренко Н.Н. Трёхпараметровый контроль цилиндрических изделий. – Дефектоскопия, 1991, № 7. – с. 36-42.
- [4] Себко В.В., Машнёва И.В., Багмет О.Л., Москаленко И.И. Расчёт характеристик электромагнитного преобразователя температуры. – Измерительная техника, 1997, № 1, с. 57-60.
- [5] Себко В.В. Малогабаритный электромагнитный преобразователь температуры. – Труды научно-технической конференции "Метрологическое обеспечение в области электрических, магнитных и радиоизлучений" (Метрология в электронике 97), Харьков 1997, т. 2. – с. 187-189.

Поступила 29.07.2003