

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ СОВМЕСТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ, УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ ФЕРРОМАГНИТНОГО ИЗДЕЛИЯ КОНТАКТНЫМ РЕЗИСТИВНО-ИНДУКТИВНЫМ МЕТОДОМ

Себко В.В., канд. техн. наук, доцент каф. ХТПЭ НТУ "ХПИ"

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", каф. "Химическая техника и промышленная экология"

тел. (0572) 70-76-380, факс (0572) 70-76-602, e-mail: sebko@kpi.kharkov.ua.

Проведено розрахунок похибок контактної робочої перетворювача (КРП), реалізуючого резистивно-індуктивний метод, за допомогою розглянутої методики визначення похибок виміру параметрів ферромагнітного виробу $\delta\mu_{rt}/\mu_{rt}$, $\delta\rho_t/\rho_t$ і $\delta t/t$. Отримано залежності відносних похибок виміру параметрів виробу від температури.

Проведен расчёт погрешностей контактного рабочего преобразователя (КРП) реализующего резистивно-индуктивный метод, с помощью рассматриваемой методики определения погрешностей измерения параметров ферромагнитного изделия $\delta\mu_{rt}/\mu_{rt}$, $\delta\rho_t/\rho_t$ и $\delta t/t$. Получены зависимости относительных погрешностей измерения параметров изделия от температуры.

1. ВВЕДЕНИЕ

В современной литературе хорошо описана теория работы контактного электромагнитного преобразователя [1–10, 12, 14]. В работе [1] рассмотрен цилиндрический проводник по которому протекает переменный ток, при этом было показано уменьшение сопротивления при увеличении частоты тока за счет поверхностного эффекта. В работе [2] был рассмотрен проводник по которому протекает переменный синусоидальный электрический ток и было найдено полное сопротивление \dot{z} с активной и индуктивной частями выраженное через специальные функции Бесселя. В работах [3, 4] проведено разделение мнимой и действительной частей полного электрического сопротивления через функции Кельвина ber , bei , а также получено точное и приближенное выражение для нормированного сопротивления R_n и индуктивности L_n , найдены табличные и графические зависимости нормированных сопротивлений и индуктивностей от обобщенного магнитного параметра $R_n = f(x)$ и $L_n = f(x)$, также исследованы случаи высоких и низких частот. В работах [5, 6] те же самые исследования, проводились для вихретокового контактного контроля параметров трубчатых изделий. Таким образом в [1–6] были созданы двухпараметровые методы для контроля электромагнитных параметров цилиндрического и трубчатого изделия. В работе [7] рассмотрен экстремальный вихретоковый контактный метод контроля относительной магнитной проницаемости μ_r , удельной электрической проводимости σ и радиуса a ферромагнитных цилиндрических и трубчатых изделий. Контактный переменного-частотный метод, основанный на варьировании частоты тока для поддержания постоянным обобщенного магнитного параметра x для определения относительной магнитной проницаемости μ_r , удельного электрического сопротивления σ и температуры t рассмотрен в работе [8]. В работах [9, 10] описан контактный вихретоковый резистивно-индуктивный метод для совместного определения μ_{rt} , σ_t или ρ_t и t ферромагнитных цилиндрических изделий. Суть этого метода состоит в том, что вводятся две универсальные функции преобразования

$L_{int} = f(R_{nt})$ и $L_{ixt} = f(R_{nt})$ при этом по первой функции преобразования определяется μ_{rt} , а по второй функции преобразования определяется удельное электрическое сопротивление ρ_t , а затем зная ρ_t находят температуру изделия t . Достоинствами данного метода является то, что он дает возможность использовать эти функции преобразования, как совместно при определении μ_{rt} и ρ_t или σ_t , так и с отстройкой одного параметра от другого, если возникает необходимость раздельного определения μ_{rt} и ρ_t , в этом плане резистивно-индуктивный вихретоковый контактный метод, отличается от других вихретоковых контактных методов, метод также обеспечивает высокую точность и эффективность определения электромагнитных параметров, так как в данном случае оговаривается температура при которой измерялись эти параметры. В работах [9, 10] получены, также графические и табличные зависимости $L_{int} = f(R_{nt})$ и $L_{ixt} = f(R_{nt})$.

В существующей литературе недостаточно подробно описаны погрешности измерений магнитных и электрических параметров цилиндрического изделия контактными методами [6, 12, 16]. В связи с этим для развития теории погрешностей многопараметровых измерений необходимо дальнейшее проведение анализа погрешностей многопараметровых совместных измерений контактными методами. В этом плане представляет интерес определения погрешностей трёхпараметровых измерений контактным рабочим преобразователем реализующим резистивно-индуктивный метод.

Целью работы является оценка численных значений погрешностей многопараметрового совместного измерения относительной магнитной проницаемости μ_{rt} , удельного электрического сопротивления ρ_t и температуры t контактными рабочим преобразователем (КРП), реализующим резистивно-индуктивный метод. Основными задачами работы являются: 1) рассмотрение методики расчета погрешностей многопараметровых измерений применительно к резистивно-индуктивному контактному методу; 2) получить табличные и графические зависимости относительных погрешностей измерения параметров изделия

$\delta\mu_{rt}/\mu_{rt}$, $\delta\rho_t/\rho_t$ и $\delta t/t$ от температуры t ; 3) с целью определения численных значений погрешностей измерения μ_{rt} , ρ_t и t создать алгоритм расчётных процедур. Для определения относительных погрешностей измерения запишем основные соотношения описывающие резистивно-индуктивный метод. Относительную магнитную проницаемость μ_{rt} с учетом температуры t можно определить по формуле [9, 10]

$$\mu_{rt} = \frac{L_{it} \cdot 8\pi}{L_{int} \cdot \mu_0 \cdot l}, \quad (1)$$

где L_{int} – внутренняя индуктивность изделия с учетом воздействий на изделие температуры t ; l – длина изделия, μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м [1–5] или же [9, 10];

$$\mu_{rt} = \frac{8\pi \cdot U_{пкт} \cdot \sin \varphi_{кт}}{2\pi \cdot f \cdot I \cdot \mu_0 \cdot L_{int} \cdot l}, \quad (2)$$

где $U_{пкт}$ – падение напряжения на изделии с учетом компенсации и воздействия температуры; I – ток изделия; $\varphi_{кт}$ – угол сдвига по фазе, между током и падением напряжения при наличии компенсации [1]; индекс "i" – здесь и в дальнейшем означает что данная величина берется с учётом воздействия температуры.

Величину удельного электрического сопротивления ρ_t с учетом температуры определяют по формуле [9, 10]

$$\rho_t = \frac{8\pi \cdot U_{пкт} \cdot \sin \varphi_{кт}}{2\pi \cdot f \cdot I \cdot \mu_0 \cdot L_{int} \cdot l}, \quad (3)$$

где x – обобщенный магнитный параметр [3–10]; f – частота тока; d – диаметр изделия.

Зная ρ_t можно определить температуру контактным резистивно-индуктивным методом по формулам [9, 10]

$$t = \frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \cdot \left(\frac{\mu_0^2 \cdot l \cdot f \cdot a^2}{\rho_1 \cdot 4 \cdot L_{int} \cdot L_{it}} - 1 \right) + t_1, \quad (4)$$

или же через величину σ_t [9, 10]

$$t = \frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \cdot \left(\frac{\sigma_1 \cdot \mu_0^2 \cdot l \cdot f \cdot a^2}{4 \cdot L_{int} \cdot L_{it}} - 1 \right) + t_1, \quad (5)$$

Зависимости приведены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимости параметров L_{int} и L_{int} от $R_{нт}$		
$R_{нт}$	L_{int}	L_{int}
0,00000000	1,00000000	1,00000000
0,03999983	1,00000850	0,99999575
0,15998923	1,00013466	0,99993267
0,35987776	1,00067914	0,99966044
0,63931519	1,00214035	0,99892998
0,99739720	1,00520742	0,99739720
1,43227061	1,01074300	0,99463237
1,94067173	1,01974907	0,99013864
2,51746061	1,03330950	0,98338305
3,15524951	1,05250540	0,97384244
3,84425028	1,07830551	0,96106257
4,57246760	1,11144275	0,94472471
5,32631808	1,15229803	0,92470800
6,09165705	1,20081855	0,90113270
6,85506417	1,25649608	0,87437043
7,60513059	1,31841804	0,84501451
8,33345577	1,38538440	0,81381404
9,03513693	1,45606417	0,78158624
9,70681770	1,52915538	0,74912668

10,35543792	1,60351538	0,71713559
10,97874016	1,67824223	0,68617126
11,58299607	1,75270190	0,65632430
12,17288575	1,82651390	0,62766476
12,75277355	1,89950781	0,60268306
13,32635213	1,97166830	0,57840070
13,32635213	2,04308046	0,55585960
14,46523214	2,11388280	0,53495681
15,03389465	2,18423147	0,51556566
15,60320689	2,25427592	0,49755124
16,17346510	2,32414456	0,48078077
16,17346510	2,39393846	0,46512986

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИЗДЕЛИЯ $\delta\mu_{rt}/\mu_{rt}$, $\delta\rho_t/\rho_t$, $\delta t/t$ С ПОМОЩЬЮ КРП, РЕАЛИЗУЮЩЕГО РЕЗИСТИВНО-ИНДУКТИВНЫЙ МЕТОД

Для получения формулы, описывающей величину погрешности измерения величины μ_{rt} , представим выражение (1) в виде функции произведения аргументов, которые имеют разные степени

$$\mu_{rt} = L_{it} \cdot 8\pi \cdot L_{int}^{-1} \cdot \mu_0^{-1} \cdot l^{-1}. \quad (6)$$

Пренебрегая в (6) постоянными величинами (8π , μ_0), запишем выражение для относительной погрешности $\delta\mu_{rt}/\mu_{rt}$ с учетом [12]

$$\frac{\delta\mu_{rt}}{\mu_{rt}} = \frac{\delta L_{it}}{L_{it}} - \frac{\delta L_{int}}{L_{int}} - \frac{\delta l}{l}, \quad (7)$$

где $\frac{\delta L_{it}}{L_{it}}$, $\frac{\delta L_{int}}{L_{int}}$ и $\frac{\delta l}{l}$ – относительные погрешности определения величин L_{it} , L_{int} и l .

Учитывая, что L_{int} является функцией $R_{нт}$ [9, 10], то соотношение для расчета погрешности запишем в виде $\frac{\delta L_{int}}{L_{int}}$ с учетом [12]

$$\frac{\delta L_{int}}{L_{int}} = \frac{\partial L_{int}}{\partial R_{нт}} \cdot \frac{R_{нт}}{L_{int}} \cdot \frac{\delta R_{нт}}{R_{нт}}, \quad (8)$$

где $\frac{\partial L_{int}}{\partial R_{нт}}$ – производная L_{int} по $R_{нт}$; $\frac{\delta R_{нт}}{R_{нт}}$ – относительная погрешность для определения $R_{нт}$, при этом производную нужно брать в виде приращения ΔL_{int} к $\Delta R_{нт}$ вблизи рабочей точки $x_t = x_{0t}$, $R_{нт} = R_{нт0t}$.

Используя результаты работ [3–6, 12, 6] погрешность $\frac{\delta R_{нт}}{R_{нт}}$ определим в виде

$$\frac{\delta R_{нт}}{R_{нт}} = \frac{\delta R_t}{R_t} - \frac{\delta R_{0t}}{R_{0t}}, \quad (9)$$

где $\frac{\delta R_t}{R_t}$ и $\frac{\delta R_{0t}}{R_{0t}}$ – относительная погрешность измерения R_t и R_{0t} .

На основании (7)–(9) найдем выражения для расчета относительной погрешности $\delta\mu_{rt}/\mu_{rt}$ при доверительной вероятности 0,95 согласно ГОСТ 8.207-76 в виде с учетом [12, 16]

$$\frac{\delta\mu_{rt}}{\mu_{rt}} = 1,1 \sqrt{\left(C_\mu \frac{\delta R_t}{R_t} \right)^2 + \left(C_\mu \frac{\delta R_{0t}}{R_{0t}} \right)^2 + \left(\frac{\delta L_{it}}{L_{it}} \right)^2 + \left(\frac{\delta l}{l} \right)^2}, \quad (10)$$

где C_μ – коэффициент влияния

$$C_\mu = \frac{\partial L_{iht}}{\partial R_{ht}} \cdot \frac{R_{ht}}{L_{iht}}. \quad (11)$$

Запишем выражения для ρ_t в виде произведений аргументов функции ρ_t в различных степенях.

При этом формулу (3) можно переписать в виде

$$\rho_t = 16\pi^2 \cdot L_{it} \cdot f \cdot a^2 \cdot L_{iht}^{-1} \cdot l^{-1}, \quad (12)$$

В этом случае формула для определения относительной погрешности измерения ρ_t , при исключении постоянных величин ($16\pi^2$) примет вид

$$\frac{\delta\rho_t}{\rho_t} = \frac{\delta L_{it}}{L_{it}} + \frac{\delta f}{f} + 2 \frac{\delta a}{a} - \frac{\delta L_{iht}}{L_{iht}} - \frac{\delta l}{l}, \quad (13)$$

где $\frac{\delta f}{f}$, $\frac{\delta a}{a}$ и $\frac{\delta L_{iht}}{L_{iht}}$ – относительные погрешности определения величин f , a и L_{iht} .

Запишем выражение для расчёта $\frac{\delta L_{iht}}{L_{iht}}$

$$\frac{\delta L_{iht}}{L_{iht}} = \frac{\partial L_{iht}}{\partial R_{ht}} \cdot \frac{R_{ht}}{L_{iht}} \cdot \frac{\delta R_{ht}}{R_{ht}}, \quad (14)$$

С учетом (13) и (9) выражение (14) можно представить как

$$\frac{\delta\rho_t}{\rho_t} = 1,1 \sqrt{\left(\frac{\delta L_{it}}{L_{it}}\right)^2 + \left(\frac{\delta f}{f}\right)^2 + \left(2 \frac{\delta a}{a}\right)^2 + \left(C_\rho \frac{\delta R_t}{R_t}\right)^2 + \left(C_\rho \frac{\delta R_{0t}}{R_{0t}}\right)^2 + \left(\frac{\delta l}{l}\right)^2}, \quad (15)$$

где C_ρ – коэффициент влияния

$$C_\rho = \frac{\partial L_{iht}}{\partial R_{ht}} \cdot \frac{R_{ht}}{L_{iht}}. \quad (16)$$

Воспользовавшись формулами (3) и (12) получим формулу для определения t цилиндрического ферромагнитного изделия для резистивно-индуктивного метода

$$t = \frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \cdot \left(\frac{16\pi^2 \cdot L_{it} \cdot a^2 \cdot f}{L_{iht} \cdot l \cdot \rho_1} - 1 \right) + t_1. \quad (17)$$

Воспользовавшись [8, 15] запишем в общем виде формулу для расчёта относительной погрешности измерения

$$\frac{\delta t}{t} = \frac{t'_\alpha \cdot \alpha}{t} \cdot \frac{\delta \alpha}{\alpha} = \frac{t'_1 \cdot t_1}{t} \cdot \frac{\delta t_1}{t_1} + \frac{t'_\rho \cdot \rho}{t} \cdot \frac{\delta \rho}{\rho} + \frac{t'_{\rho_1} \cdot \rho_1}{t} \cdot \frac{\delta \rho_1}{\rho_1}, \quad (18)$$

где знак "штрих" означает частные производные функции t , по аргументам указанным индексами при соответствующий производных; $\delta\alpha/\alpha$, $\delta t_1/t_1$ и $\delta\rho_1/\rho_1$ – относительные погрешности определения α , t_1 и ρ_1 .

Взяв частные приращения по функции t (17) запишем формулу для расчета величины $\delta t/t$

$$\frac{\delta t}{t} = -C_\alpha \frac{\delta \alpha}{\alpha} + C_{t_1} \frac{\delta t_1}{t_1} + C_\rho^* \frac{\delta \rho}{\rho} - C_{\rho_1}^* \frac{\delta \rho_1}{\rho_1}, \quad (19)$$

$$C_\alpha = \frac{1}{\alpha t} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_1} - 1 \right); \quad (20)$$

$$C_{t_1} = \frac{\rho}{\rho_1} \cdot \frac{t_1}{t}; \quad (21)$$

$$C_\rho^* = \frac{1 + \alpha \cdot t_1}{\alpha \cdot t} \cdot \frac{\rho}{\rho_1}. \quad (22)$$

Тогда в соответствии с ГОСТ 8.207–76 запишем с учетом [15]

$$\frac{\delta t}{t} = 1,1 \sqrt{\left(C_\alpha \frac{\delta \alpha}{\alpha}\right)^2 + \left(C_{t_1} \frac{\delta t_1}{t_1}\right)^2 + \left(C_\rho^*\right)^2 \left(\frac{\delta L_i}{L_i}\right)^2 + \left(\frac{\delta f}{f}\right)^2 + \left(2 \frac{\delta a}{a}\right)^2 + \left(C_\rho \frac{\delta R}{R}\right)^2 + \left(C_\rho \frac{\delta R_0}{R_0}\right)^2 + \left(\frac{\delta l}{l}\right)^2 + \left(\frac{\delta \rho_1}{\rho}\right)^2} \quad (23)$$

Для того чтобы определить численные значения погрешностей измерений параметров изделия $\delta\mu_{rt}/\mu_{rt}$, $\delta\rho_t/\rho_t$ и $\delta t/t$ с помощью КРП реализующего контактный резистивно-индуктивный метод, приведём для данного случая алгоритм расчетных операций.

Сначала зная ρ_1 , μ_{r1} и a при нормальной температуре, а также используя функцию $L_{in} = f(x)$ [3–6], задаются значением x_1 в диапазоне от 3 до 5 и определяют частоту f [2–6]

$$f = \frac{x_1^2 \cdot \rho_1}{2\pi \cdot a^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r}, \quad (24)$$

индекс "1" означает, что x_1 и ρ_1 имеют отношение к нормальной температуре t_1 [1, 2] (т.е. 20 °С).

Затем, не меняя значения частоты f , а меняя дискретно только температуру, например нагревая изделие $t = 40^\circ\text{C}$, определяем значение $\rho_{40^\circ\text{C}}$ при текущей температуре 40°С с учетом [13] по формуле

$$\rho_{40^\circ\text{C}} = \rho_1 + \frac{\rho_1 \cdot \alpha}{1 + \alpha \cdot t} (40^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}). \quad (25)$$

Далее величину удельного сопротивления ρ_t при текущей температуре $t = 40^\circ\text{C}$ (т.е. $\rho_{40^\circ\text{C}}$) подставляем в формулу для x_t (при этом $x_t = x_{40^\circ\text{C}}$)

$$x_{40} = a \sqrt{2\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_{r40^\circ\text{C}} \cdot f} / \rho_{40^\circ\text{C}}. \quad (26)$$

Следовательно по формуле (26) определяем $x_{40^\circ\text{C}}$, а затем из таблицы 1, определяем значения $R_{n40^\circ\text{C}}$, $L_{in40^\circ\text{C}}$, $L_{inx40^\circ\text{C}}$. После этого задавшись параметрами изделия определяем погрешности $\delta\mu_{rt}/\mu_{rt}$, $\delta\rho_t/\rho_t$ и $\delta t/t$ для $t = 40^\circ\text{C}$, например по формулам (10), (15), (23) соответственно. Те же операции повторим для $t = 60, 80, 100, 180^\circ\text{C}$. В данном случае использовался образец, выполненный из стали А-20 с параметрами: $\rho_1 = 1,754 \cdot 10^{-8}$ Ом·м; $\alpha = 3 \cdot 10^{-3}$ 1/К; $\mu_r = 120$; $a = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м.

Примем характерные значения относительных погрешностей измерения [6, 11, 16]: $\delta a/a = 0,2\%$, $\delta\alpha/\alpha = 0,25\%$, $\delta t_1/t_1 = 0,2\%$, $\delta\rho_1/\rho_1 = 0,2\%$; $\delta L_{it}/L_{it} = 0,2\%$, $\delta R_t/R_t \approx \delta R_{0t}/R_{0t} = 0,2\%$, $\delta l/l = 0,25\%$, $\delta f/f = 0,1\%$.

В табл. 2 представлены результаты расчетов значений относительных погрешностей измерений $\delta\mu_{rt}/\mu_{rt}$, $\delta\rho_t/\rho_t$ и $\delta t/t$ при различных значениях температур. На рис. 1 а, б, в приведены графические зависимости $\delta\mu_{rt}/\mu_{rt}$, $\delta\rho_t/\rho_t$ и $\delta t/t$ от t .

Таблица 2

Результаты расчетов значений $\delta\mu_{rt}/\mu_{rt}$, $\delta\rho_t/\rho_t$ и $\delta t/t$ при различных значениях температур

$t, ^\circ\text{C}$	x_t	R_{nt}	L_{nt}	L_{nxt}	$\delta\mu_{rt}/\mu_{rt}$	$\delta\rho_t/\rho_t$	$\delta t/t$
20	3,00	1,318418	0,845015	7,605131	0,4201	0,8534	15,570
40	2,92	1,292972	0,857023	7,307318	0,4168	0,8858	8,5205
60	2,84	1,268416	0,868684	7,006462	0,4136	0,9208	6,2091
80	2,77	1,250630	0,877175	6,779157	0,4114	0,9578	5,0819
100	2,71	1,227811	0,888117	6,474376	0,4086	1,0054	4,4651
120	2,65	1,211405	0,896019	6,244895	0,4066	1,0454	4,0418
140	2,59	1,200819	0,901133	6,091657	0,4054	1,0841	3,7468
160	2,54	1,185479	0,908562	5,861676	0,4036	1,1405	3,5889
180	2,49	1,170805	0,915690	5,631857	0,4019	1,1982	3,4821

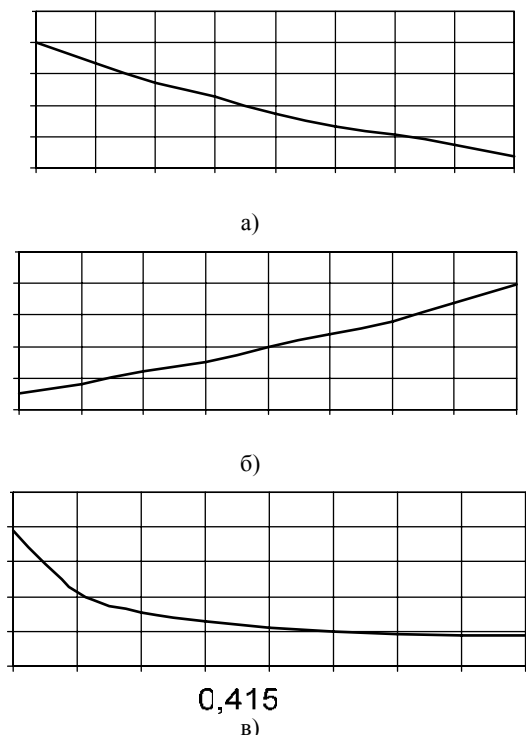


Рис. 1. Зависимость $\delta\mu_{rt}/\mu_{rt}$ (а), $\delta\rho_t/\rho_t$ (б) и $\delta t/t$ (в) от температуры

Как видно из табл. 2 и рис. 1 а, б, в, что для КРП реализующего резистивно-индуктивный метод относительные погрешности $\delta\mu_{rt}/\mu_{rt}$ уменьшаются при увеличении температуры, погрешности $\delta\rho_t/\rho_t$ возрастают с ростом температуры и относительные погрешности $\delta t/t$ уменьшаются при возрастании температуры, например, при $t = 180^\circ\text{C}$ $\delta\mu_{rt}/\mu_{rt} = 0,4\%$, $\delta\rho_t/\rho_t = 1,2\%$, $\delta t/t = 3,4\%$ для данного метода.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Таким образом, рассмотрена методика оценки относительных погрешностей измерения магнитной проницаемости, удельного электрического сопротивления и температуры цилиндрического изделия КРП реализующего резистивно-индуктивный метод. Получены численные значения относительных погрешностей измерений параметров ферромагнитного изделия $\delta\mu_{rt}/\mu_{rt}$, $\delta\rho_t/\rho_t$ и $\delta t/t$. Найлены табличные и графические зависимости относительных погрешностей измерения параметров изделия от температуры.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Нейман Л.Р., Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1958, ч. 3. – 232 с.
- [2] Ландау Л.Д., Лившиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. – М.: Гос. Изд-во физико-математической литературы, 1959. – 532 с.
- [3] Львов С.Г. Определение параметров ферромагнитных конструкционных прутков // Збірка наукових праць ХДПУ "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я". – Харків: ХДПУ, Вип. 7, ч.3. – 1999. – С. 124–126.
- [4] Себко В.П., Львов С.Г., Котуза А.И., Гугнин В.Н. Определение метрологических характеристик контактного электрического преобразователя // Труды научно-технической конференции с международным участием "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". Харьков: Основа – 1997. – С. 324–325.
- [5] Тюпа И.В. К расчету ожидаемых значений сигналов контактного двухпараметрового электромагнитного преобразователя // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ, 1999. – Вып. 37. С. 44–46.
- [6] Себко В.П., Тюпа И.В. Анализ погрешностей контактного электромагнитного преобразователя для контроля трубчатых изделий // Український метрологічний журнал. – 2000. – Вип. 3. – С. 17–19.
- [7] Себко В.П., Тюпа И.В., Филоненко Д.В. Многопараметровый экстремальный электромагнитный метод контроля труб. Матеріали праць ХІІ міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" НТУ "ХПІ", Харків, 2004, С. 398–399.
- [8] Себко В.П. Москаленко О.И., Себко В.В. Определение компонентов сигналов контактного вихретокового преобразователя температуры. – Вестник ХГПУ. Харьков, ХГПУ, 2000, вып. 92 С. 59–63.
- [9] Себко В.В. Контактный многопараметровый вихретоковый преобразователь на основе резистивно-индуктивного метода. – Наукові праці ІІІ Міжнародної науково-технічної конференції "Метрологія та вимірвальна техніка" (Метрологія 2002). – Харків, 2002, Т. 1, С. 213–217.
- [10] Патент України UA 14958 U G01K11/00 Спосіб сумісного неруйнівного контролю електромагнітних параметрів і температури циліндричних виробів. / Себко В.В. НТУ "ХПІ". – Заявл. 04.10.2005; Опубл. 15.06.2006, Бюл. № 6.
- [11] Алукер Ш.М. Электрические измерения. Москва, изд-во "Колос" 1972 - 347 с.
- [12] Себко В.П., Титова Н.В., Епихин А.В. Определение погрешностей многопараметровых измерений контактным электромагнитным преобразователем // Вестник Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". – Харьков: НТУ "ХПИ", 2004, № 42, С. 110–117.
- [13] Спектор С.А. Электрические измерения физических величин. – Л.: Энергоатомиздат, 1987 – 320 с.
- [14] Себко В.П., Титова Н.В., Подлежный Н.И. Дифференциальный контактный метод определения магнитного и электрического параметров цилиндрического изделия. – Технічна електродинаміка, – 2004, – Ч.1. – с. 53–56.
- [15] Багмет О.Л. Погрешности измерительного преобразователя для контроля температуры в широком диапазоне её измерения // Вестник НТУ "ХПИ", – Харьков, – НТУ "ХПИ". Вип. 37. – 1999. – С. 25-27.
- [16] Львов С.Г., Глоба С.Н. Анализ погрешностей контактного электромагнитного преобразователя для контроля цилиндрических изделий. // Вестник НТУ "ХПИ", – 2003, – "Електроенергетика і преобразовательна техніка", вып. 1, – С. 72-76.

Поступила 09.10.2006