

## ПОГРЕШНОСТИ ТРЁХПАРАМЕТРОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ДВУХЧАСТОТНЫМ КОНТАКТНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ МЕТОДОМ

Себко В.П., д.т.н., проф.; Жулидов А.О., Филоненко Д.В.

Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"

Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Приборы и методы неразрушающего контроля" тел. (057) 707-63-80, E-mail: sebko@kpi.kharkov.ua, zhulidov@kpi.kharkov.ua.

*Розглянуто методику спільного визначення магнітної проникності  $\mu_r$ , питомої електричної провідності  $\sigma$  і радіуса  $a$  циліндричного провідного виробу контактним електромагнітним методом. Спочатку по заданих величинах  $\mu_r$ ,  $\sigma$  і  $a$  знаходять компоненти сигналу перетворювача, потім у ці компоненти вводяться апаратні похибки вимірів і виходять умовно обмірювані компоненти сигналу, по яких визначають умовно обмірювані значення  $\mu_{ry}$ ,  $\sigma_y$  і  $a_y$ . Після чого похибки вимірів знаходять по відхиленню параметрів  $\mu_{ry}$ ,  $\sigma_y$  і  $a_y$  від заданих величин  $\mu_r$ ,  $\sigma$  і  $a$ .*

*Рассмотрена методика совместного определения магнитной проницаемости  $\mu_r$ , удельной электрической проводимости  $\sigma$  и радиуса  $a$  цилиндрического проводящего изделия контактным электромагнитным методом. По заданным величинам  $\mu_r$ ,  $\sigma$  и  $a$  находят компоненты сигнала преобразователя, потом в эти компоненты вводятся аппаратные погрешности измерений и выходят условно измеренные компоненты сигнала, по которым определяют условно измеренные значения  $\mu_{ry}$ ,  $\sigma_y$  и  $a_y$  и погрешности измерений.*

К настоящему времени трёхпараметровый контроль цилиндрического и плоского изделий был рассмотрен в работах [1, 2]. В [2] были получены соотношения для определения по результатам эксперимента величин магнитной проницаемости  $\mu_r$ , удельной электрической проводимости  $\sigma$  и радиуса  $a$  цилиндрического изделия. Однако, поскольку соотношения, универсальные функции преобразования и алгоритм измерительных и расчётных операций является достаточно сложными, то для определения относительных значений погрешностей совместного измерения величин  $\mu_r$ ,  $\sigma$  и  $a$  цилиндрического изделия контактными электромагнитным методом весьма затруднено применение методики оценки погрешностей косвенных и совокупных измерений параметров изделий.

В данном случае необходимо создать методику расчёта относительных погрешностей измерений трёх параметров цилиндрического изделия с помощью контактного электромагнитного преобразователя КОНЭМП. Для этого на первом этапе методика предполагает решение прямой задачи контроля цилиндрического изделия, которая формируется так. По заданным значениям цилиндрического изделия и параметров КОНЭМП находят компоненты сигнала преобразователя. Затем в эти расчётные компоненты сигнала вводятся аппаратные погрешности измерительных приборов, включенных в схему с КОНЭМП и получают так называемые условно измеренные компоненты сигнала КОНЭМП. После этого решают обратную задачу, заключающуюся в том, что по условно измеренным компонентам сигнала преобразователя используя трёхпараметровый двухчастотный метод, описанный в [2], рассчитывают значения условно измеренных величин  $\mu_{ry}$ ,  $\sigma_y$  и  $a_y$ . Путём сравнения последних параметров изделия с заданными теми же параметрами, т.е.  $\mu_r$ ,  $\sigma$  и  $a$  находят погрешности измерения  $\mu_{ry}$ ,  $\sigma_y$  и  $a_y$ .

Рассмотрим последовательность расчётных операций решения прямой задачи. Пусть заданы следующие параметры изделия и КОНЭМП, т.е.  $a$ ,  $\mu_r$ ,  $\sigma$ ,

значения обобщённых параметров  $x_1$  и  $x_2$ , соответствующих частотам  $f_1$  и  $f_2$  изменения намагничивающего тока  $I$ , который протекает вдоль цилиндрического стержня радиуса  $a$ , внутренняя индуктивность стержня  $\mu_r \cdot L_0$

$$\mu_r \cdot L_0 = \frac{\mu_0 \cdot l}{8\pi} \cdot \mu_r, \quad (1)$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $l$  – длина стержня;  $R_0$  – сопротивление изделия постоянному току, т.е. при частоте  $f=0$ .

Имея указанные заданные параметры, рассчитывают значения частот  $f_1$  и  $f_2$  изменения тока по формулам вида

$$f_1 = \frac{x_1^2}{2\pi \cdot a^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}; \quad (2)$$

$$f_2 = \frac{x_2^2}{2\pi \cdot a^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}. \quad (3)$$

Далее, воспользовавшись универсальными зависимостями нормированных параметров электрического сопротивления  $R_{in}$  стержня и внутренней индуктивности  $L_{in}$  его (см. работу [2]) от обобщённого параметра  $x$ , найдём по значениям  $x_1$  и  $x_2$  величины  $R_{in1}$ ,  $R_{in2}$ ,  $L_{in1}$  и  $L_{in2}$ . После этого определим величины электрических сопротивлений  $R_1$  и  $R_2$  стержня на частотах  $f_1$  и  $f_2$ , соответственно, т.е.

$$R_1 = R_{in1} \cdot R_0; \quad (4)$$

$$R_2 = R_{in2} \cdot R_0. \quad (5)$$

Затем определим внутренние индуктивности стержня  $L_{i1}$  и  $L_{i2}$  для частот  $f_1$  и  $f_2$  по формулам

$$L_{i1} = L_{in1} \cdot \mu_r \cdot L_0; \quad (6)$$

$$L_{i2} = L_{in2} \cdot \mu_r \cdot L_0, \quad (7)$$

после этого в итоге находят суммарные индуктивности  $L_1$  и  $L_2$  изделия по формулам

$$L_1 = L_{i1} + L_e; \quad (8)$$

$$L_2 = L_{i2} + L_e, \quad (9)$$

где  $L_e$  – внешняя индуктивность стержня, которая рассчитывается по формуле [3]

$$L_e = \frac{\mu_0 \cdot l}{2\pi} \cdot \left( \ln \frac{2 \cdot l}{a} - 1 \right). \quad (10)$$

Таким образом, в результате решения прямой задачи, находят компоненты сигнала преобразователя, т.е. величины  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $L_1$  и  $L_2$ . В эксперименте эти величины получены на  $R$ ,  $L$  мосту переменного тока. Теперь при решении обратной задачи введём в параметры  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $L_1$  и  $L_2$  аппаратные относительные погрешности  $\gamma_R$  и  $\gamma_L$ . При этом получают условно измеренные величины  $R_{1y}$ ,  $R_{2y}$ ,  $L_{1y}$  и  $L_{2y}$ , т.е.

$$R_{1y} = R_1 + \gamma_R \cdot R_1; \quad (11)$$

$$R_{2y} = R_2 - \gamma_R \cdot R_2; \quad (12)$$

$$L_{1y} = L_1 + \gamma_L \cdot L_1; \quad (13)$$

$$L_{2y} = L_2 - \gamma_L \cdot L_2. \quad (14)$$

Определяют условно измеренные значения  $R_{1ny}$  и  $R_{2ny}$

$$R_{1ny} = \frac{R_{1y}}{R_0}; \quad (15)$$

$$R_{2ny} = \frac{R_{2y}}{R_0}. \quad (16)$$

По зависимости  $R_{1n}$  и  $R_{2n}$  от  $x$  (табл. 1) [2] находят обобщённые условно измеренные параметры  $x_{y1}$ ,  $x_{y2}$  по которым, пользуясь зависимостью  $L_{in}$  от  $x$  (табл. 1) [2], определяют две нормированные внутренние условно измеренные индуктивности  $L_{in1y}$  и  $L_{in2y}$  (при  $x_{1y}$  и  $x_{2y}$ ). Для определения  $x_{1y}$  и  $x_{2y}$ , а также  $L_{in1y}$  и  $L_{in2y}$  применяют линейную интерполяцию на основании табл. 1 [2].

Затем находим значения внутренних индуктивностей (условно измеренных)  $L_{i1y}$  и  $L_{i2y}$ , как

$$L_{i1y} = L_{in1y} \cdot \mu_{ry} \cdot L_0; \quad (17)$$

$$L_{i2y} = L_{in2y} \cdot \mu_{ry} \cdot L_0, \quad (18)$$

здесь условно измеренная относительная величина магнитной проницаемости находится по формуле

$$\mu_r = \frac{L_{2y} - L_{1y}}{(L_{in2y} - L_{in1y}) \cdot L_0}. \quad (19)$$

Далее определяют значения условно измеренных внешних индуктивностей  $L_{e1}$  и  $L_{e2}$  по формулам

$$L_{e1y} = \Delta L_{e1y} = L_{1y} - L_{i1y}; \quad (20)$$

$$L_{e2y} = \Delta L_{e2y} = L_{2y} - L_{i2y}. \quad (21)$$

После этого находят два значения условно измеренных радиусов  $a_{1y}$  и  $a_{2y}$  (с учётом (10) и (20), (21)) по формулам вида

$$a_{1y} = \frac{2 \cdot l}{e^{\frac{2\pi \cdot \Delta L_{e1y}}{\mu_0 \cdot l}} + 1}; \quad (22)$$

$$a_{2y} = \frac{2 \cdot l}{e^{\frac{2\pi \cdot \Delta L_{e2y}}{\mu_0 \cdot l}} + 1}, \quad (23)$$

где  $e$  – основание натуральных логарифмов.

И, наконец, зная величины параметров  $\mu_r$ ,  $a_{1y}$  и

$a_{2y}$ , рассчитывают два значения условно измеренных электрических параметров  $\sigma_{1y}$  и  $\sigma_{2y}$  с учётом (2) и (3) по формулам

$$\sigma_{1y} = \frac{x_{1y}^2}{2\pi \cdot a_{1y}^2 \cdot f_1 \cdot \mu_0 \cdot \mu_{ry}}; \quad (24)$$

$$\sigma_{2y} = \frac{x_{2y}^2}{2\pi \cdot a_{2y}^2 \cdot f_2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_{ry}}. \quad (25)$$

После всего этого находят относительные погрешности определения условно измеренных значений  $\mu_{ry}$ ,  $a_{1y}$ ,  $a_{2y}$ ,  $\sigma_{1y}$  и  $\sigma_{2y}$  по формулам

$$\gamma_{\mu_{ry}} = \frac{\mu_{ry} - \mu_r}{\mu_r} \cdot 100\%. \quad (26)$$

Относительные погрешности  $\gamma_{a1y}$  и  $\gamma_{a2y}$  определения радиусов  $a_{1y}$  и  $a_{2y}$  вычисляют по формулам

$$\gamma_{a1y} = \frac{a_{1y} - a}{a} \cdot 100\%; \quad (27)$$

$$\gamma_{a2y} = \frac{a_{2y} - a}{a} \cdot 100\%. \quad (28)$$

Относительные погрешности  $\gamma_{\sigma1y}$  и  $\gamma_{\sigma2y}$  определения условно измеренных параметров  $\sigma_{1y}$  и  $\sigma_{2y}$  находят по формулам

$$\gamma_{\sigma1y} = \frac{\sigma_{1y} - \sigma}{\sigma} \cdot 100\%; \quad (29)$$

$$\gamma_{\sigma2y} = \frac{\sigma_{2y} - \sigma}{\sigma} \cdot 100\%. \quad (30)$$

В (26)-(30)  $\mu_r$ ,  $a$  и  $\sigma$  – заданные величины в исходных параметрах к прямой задаче. Имеет находить средние относительные значения погрешностей определения условно измеренных величин  $a_{cp}$  и  $\sigma_{cp}$ , как

$$\gamma_{a_{cp}} = \frac{\gamma_{a1y} + \gamma_{a2y}}{2}; \quad (31)$$

$$\gamma_{\sigma_{cp}} = \frac{\gamma_{\sigma1y} + \gamma_{\sigma2y}}{2}. \quad (32)$$

Все эти операции вычислений прямой и обратной задач выполняются для разных пар значений  $x$ -ов (например  $x_1$  и  $x_2$ ;  $x_2$  и  $x_3$ ;  $x_3$  и  $x_4$  и т.д.), а затем результаты расчётов были сведены в табл. 1. По данным таблицы построены графики зависимостей (рис.1, 2)  $\gamma_{\mu_{ry}}$  от  $x_y$ ;  $\gamma_{a_{cp}}$  и  $\gamma_{\sigma_{cp}}$  от  $x_y$  (при этом на оси абсцисс откладывают значения  $x_1$ , затем  $x_2$ ; затем  $x_3$  и т.д. Индекс "cp" означает среднее значение).

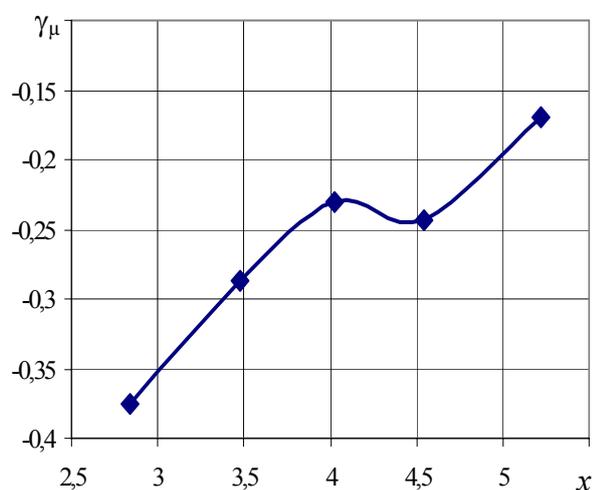
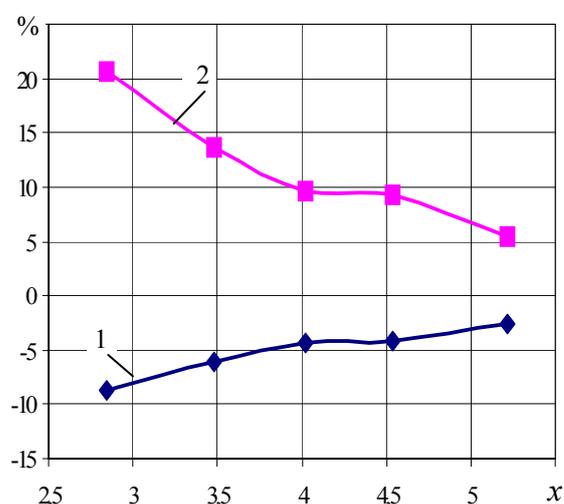
Из данных табл. 1 и графиков рис. 2 и 3 следует, что рациональный по погрешностям режим работы трёхпараметрового КОНЭМП наступает в диапазоне изменения  $x$  от 5,2 до 6,1. При этом относительные погрешности измерения величин  $\mu_{ry}$ ,  $\sigma_y$  и  $a_y$  изменяются в пределах по модулю (0,170 ÷ 0,243)%; (5,40 ÷ 9,2)% и (2,5 ÷ 4,2)%. Самая большая погрешность возникает при измерении величины  $\sigma$ .

Результаты расчёта погрешностей определения параметров  $\mu_r$ ,  $\sigma$  и  $a$ 

$x$	$f$ , Гц	$R_{н}$ , Ом	$L_{ин}$ , Гц	$R$ , Ом	$L_i \cdot 10^{-6}$ , Гн	$R_y$ , Ом	$x_y$
2,84	675,3852	1,2686	0,8686	0,0115	5,2551	1,2692	2,8421
3,48	1014,0827	1,4851	0,7686	0,0135	4,64996	1,4844	3,4780
3,48	1014,0827	1,4851	0,7686	0,0135	4,64996	1,4859	3,4820
4,02	1353,2156	1,6857	0,6832	0,0153	4,13323	1,6849	4,0177
4,02	1353,2156	1,6857	0,6832	0,0153	4,1332	1,6865	4,0223
4,54	1725,9436	1,8777	0,6104	0,0171	3,6928	1,8767	4,5374
4,54	1725,9436	1,8777	0,6104	0,0171	3,69275	1,8786	4,5426
4,98	2076,6991	2,0360	0,5581	0,0185	3,37633	2,0349	4,9771
5,22	2281,6861	2,1209	0,5330	0,0193	3,22454	2,1220	5,2230
6,10	3115,8357	2,4288	0,4577	0,0221	2,76902	2,4276	6,0965

Продолжение таблицы 1

$x$	$L_{ин}$ , Гн	$\mu_{ry}$	$a_y$ , мм	$\sigma_y \cdot 10^6$ , См/м	$\gamma \cdot \mu_{ry}$ , %	$\gamma \cdot \sigma_{ср y}$ , %	$\gamma \cdot a_{ср y}$ , %
2,84	0,8683	120,5466	2,281	2,41462	-0,375	20,571	-8,751
3,48	0,7689		2,281	2,40823			
3,48	0,7683	120,6525	2,349	2,27470	-0,287	13,605	-6,042
4,02	0,6835		2,349	2,26948			
4,02	0,6828	120,7218	2,391	2,19385	-0,230	9,569	-4,357
4,54	0,6107		2,391	2,18890			
4,54	0,6100	120,7060	2,395	2,18637	-0,243	9,194	-4,186
4,98	0,5584		2,395	2,18138			
5,22	0,5327	120,7945	2,437	2,11046	-0,170	5,402	-2,513
6,10	0,4579		2,437	2,10562			

Рис. 1. Зависимость погрешности  $\gamma_{\mu r y}$  в зависимости от значений величины  $x$ Рис. 2. Зависимости погрешностей  $\gamma_{\sigma_{ср y}}$  (1) и  $\gamma_{a_{ср y}}$  (2) от значений величины  $x$ 

Это связано с тем, что погрешности измерения параметра  $\sigma$  включают в себя величины погрешностей определения  $a_y$  и  $\mu_{ry}$  (см. (24) и (25)).

Приведём конкретный пример расчёта относительных погрешностей условно измеренных величин  $\mu_{ry}$ ,  $a_{ср y}$  и  $\sigma_{ср y}$ . Пусть заданы значения параметров стержня и КОНЭМП. При этом  $x_1=5,22$ ;  $x_2=6,1$ ;

$a=2,5 \cdot 10^{-3}$  мм;  $\mu_r=121$ ;  $\sigma=0,2 \cdot 10^7$  См/м; ток  $I=0,7$  А;  $R_0=0,0091$  Ом;  $L_0=0,5 \cdot 10^7$  Гн;  $l=1,0$ , материал образца СТ9Ч18.

Определим частоты изменения тока по (2) и (3) (прямая задача);  $f_1=2281,6$  Гц;  $f_2=3115,835738$  Гц. Используя зависимость  $R_{н}$  и  $L_{ин}$  от  $x$  (см. табл. 1 [2]), найдём  $R_{н1}=2,120927$  (для  $x_1$ )  $R_{н2}=1,488012$  (для  $x_2$ ).

После этого по формулам (4) и (5) при известном  $R_0=0,0091$  Ом определим  $R_1=19,30044 \cdot 10^{-3}$  Ом;  $R_2=22,102364 \cdot 10^{-3}$  Ом. А по формулам (6) и (7) с учётом того, что  $L_0=0,5 \cdot 10^{-7}$  Гн и  $\mu_r=121$  найдём, что  $L_{i1}=3,224 \cdot 10^{-6}$  Гн,  $L_{L2}=2,769 \cdot 10^{-6}$  Гн. Исходя из (10) найдём значения внешней индуктивности  $L_e=1,14 \cdot 10^{-6}$  Гн. Тогда определим, что  $L_1=4,361 \cdot 10^{-6}$  Гн, а  $L_2=3,905 \cdot 10^{-6}$  Гн. При решении обратной задачи введём относительные погрешности  $\gamma_R$  и  $\gamma_L$ , равные 0,05 % и 0,05 %, соответственно. Тогда по формулам (11)-(14) получим  $R_{1y}=19,31 \cdot 10^{-3}$  Ом;  $R_{2y}=22,091 \cdot 10^{-3}$  Ом;  $L_{1y}=4,359 \cdot 10^{-6}$  Гн;  $L_{2y}=3,908 \cdot 10^{-6}$  Гн. Затем по (15) и (16) определим значения  $R_{1ny}=2,122$ ;  $R_{2ny}=2,428$ . После этого, используя табл. [2], т.е. зависимость  $R_n=f(x)$  и  $L_n=f(x)$  найдём параметры  $x_y$  и  $L_{iny}$  для двух частот, т.е.  $x_{1y}=5,223$ ;  $x_{2y}=6,096$  и  $L_{iny1}=0,533$ ;  $L_{iny2}=0,767$ . Величину  $\mu_r$  найдём по (19), т.е.  $\mu_{ry}=120,794$ . Далее по (20) и (21) рассчитаем  $L_{e1}=\Delta L_{e1}$  и  $L_{e2}=\Delta L_{e2}$ . Тогда  $\Delta L_{e1}=1,142 \cdot 10^{-6}$  Гн; а  $\Delta L_{e2}=1,142 \cdot 10^{-6}$  Гн. Затем по (22) и (23) рассчитаем численные значения  $a_{1y}=2,437 \cdot 10^{-3}$  м и  $a_{2y}=2,437 \cdot 10^{-3}$  м. И, наконец, вычислим параметры  $\sigma_{1y}$  и  $\sigma_{2y}$ , при этом исходя из (24) и (25) имеем  $\sigma_{1y}=2,110 \cdot 10^6$  См/м;  $\sigma_{2y}=2,106 \cdot 10^6$  См/м. В таком случае относительные погрешности  $\gamma_{\mu ry}=-0,17$  %;  $\gamma_{a1y}=-2,51$  %;  $\gamma_{\sigma 1y}=-2,51$  % (26)-(30). Используя (31) и (32) найдём, что  $\gamma_{aсry}=-2,51$  %, а  $\gamma_{\sigma сry}=5,40$  %.

На рис. 3 показана мостовая схема включения КОНЭМП для измерения параметров изделия.

Схема содержит образец (изделие), представленный на рис. 3 как электрическое сопротивление  $R$  и внутренняя индуктивность  $L_i$ , регулировочное сопротивление  $R_p$  и индуктивность  $L_p$ , ограничительное сопротивление  $R_{огр}$ , сопротивления моста  $R_2$  и  $R_3$ , генератор  $\Gamma$  синусоидальных сигналов и частотомер  $\text{Ч}$ .

Для уравнивания моста используются сопротивления  $R_2$  и  $R_3$ . Сопротивление  $R_{огр}$  служит для ограничения тока в цепи нуль-индикатора. Частотомер предназначен для определения частоты тока  $I$ , сила которого измеряется амперметром  $A$ .

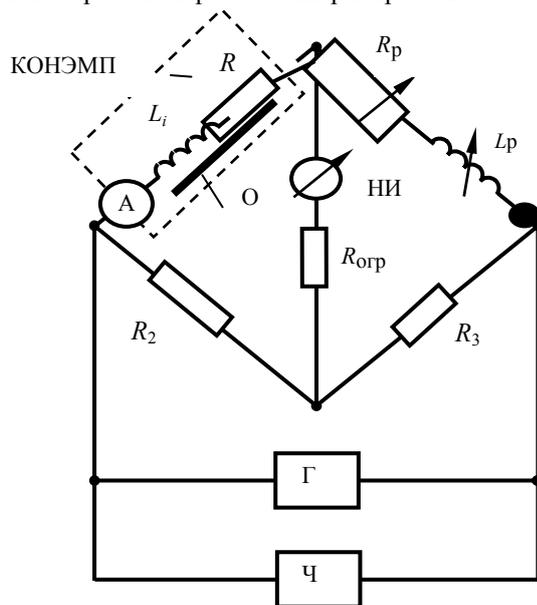


Рис. 3. Схема включения КОНЭМП

Таким образом, рассмотрена методика совместного определения магнитной проницаемости  $\mu_r$ , удельной электрической проводимости  $\sigma$  и радиуса  $a$  цилиндрического проводящего изделия контактным электромагнитным методом. Методика состоит в том, что сначала по заданным величинам  $\mu_r$ ,  $\sigma$  и  $a$  находят компоненты сигнала преобразователя, затем в эти компоненты вводятся аппаратные погрешности измерений и получаются условно измеренные компоненты сигнала, по которым определяют условно измеренные значения  $\mu_{ry}$ ,  $\sigma_y$  и  $a_y$ . После чего погрешности измерений находят по отклонению параметров  $\mu_{ry}$ ,  $\sigma_y$  и  $a_y$  от заданных величин  $\mu_r$ ,  $\sigma$  и  $a$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Себко В.П., Сиренко Н.Н. Трёхпараметровый контроль цилиндрических изделий. – Дефектоскопия. 1991, № 7. – с. 36-42.
- [2] Себко В.П., Филоненко Д.В. Трёхпараметровый контактный электромагнитный преобразователь. – Технічна електродинаміка.: Тематичний випуск, 2004, ч.1.-с.53-56.
- [3] Калантаров П.Л., Вейтлин Л.А. Расчёт индуктивностей. Справочная книга. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488с.

Поступила 29.10.2004