

## КОРРЕКТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ ТРЁХПАРАМЕТРОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ КОНТАКТНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ

Себко В.П., д.т.н., проф., Жулидов А.О., Москаленко О.И.,  
 Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"  
 Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Приборы и методы неразрушающего контроля"  
 тел. (057) 70-769-27

*У роботі розглянута методика розрахунку відносних погрешностей спільного виміру відносної магнітної проникності  $\mu_r$ , радіуса  $a$  й питомої електричної провідності  $\sigma$  циліндричного ферромагнітного стержня контактним електромагнітним перетворювачем; розглянуто розрахунок відносних погрешностей виміру механічних напруг з урахуванням погрешностей виміру величин  $\mu_r$  й  $\sigma$ .*

*В работе рассмотрена методика расчёта относительных погрешностей совместного измерения относительной магнитной проницаемости  $\mu_r$ , радиуса  $a$  и удельной электрической проводимости  $\sigma$  цилиндрического ферромагнитного стержня контактными электромагнитным преобразователем; рассмотрен расчёт погрешностей измерения механических напряжений с учётом погрешностей измерения величин  $\mu_r$  и  $\sigma$ .*

В настоящее время практический интерес представляют многопараметровые методы и средства для контроля материалов и изделий. В том числе широкое развитие получили электромагнитные методы и устройства контроля и, в частности, бесконтактные средства для определения магнитных, электрических и геометрических параметров цилиндрических и плоских изделий [1-3]. На практике бесконтактные методы связаны с использованием достаточно длинных электромагнитных преобразователей проходного типа и протяженных изделий. Описанный в [4] наряду с этим контактный электромагнитный метод имеет ряд преимуществ по сравнению с бесконтактным методом, его реализация не требует применения протяженных изделий и преобразователей и исключает из результатов измерений размагничивающий фактор. К преимуществам контактного метода можно также отнести простоту их реализации, надёжность и достаточно высокую точность измерений. В существующей литературе достаточно широко рассмотрены контактные методы, однако точностные характеристики, погрешности совместного измерения магнитной проницаемости, радиуса, электропроводности рассматривались путём решения прямой и обратной задачи расчёта контактного электромагнитного преобразователя (КОНЭМП) [5]. Тем не менее, необходимо было бы уточнить результаты расчёта погрешностей трёхпараметровых измерений, рассмотренных в работе [5], путём создания методики корректного определения погрешности измерения радиуса изделия  $a$ , магнитной проницаемости  $\mu_r$  и электропроводности  $\sigma$ . С этой целью рассмотрим основные функции преобразования КОНЭМП [5].

Относительная магнитная проницаемость объекта контроля (ОК) находится по формуле

$$\mu_r = \frac{L_2 - L_1}{(L_{in2} - L_{in1}) \cdot L_0}, \quad (1)$$

где  $L_1$  и  $L_2$  - суммарные индуктивности объекта контроля ОК (т.е. цилиндрического стержня) на двух частотах тока, протекающего вдоль стержня; индексы 1 и 2 соответствуют частотам  $f_1$  и  $f_2$ ;  $L_0$  - индуктивность

немагнитного ( $\mu_r=1$ ) ОК при нулевой частоте намагничивания;  $L_{in}$  - внутренняя нормированная удельная индуктивность ОК.

Радиус ОК определяется из выражения

$$a = \frac{2 \cdot l}{e^{\frac{2\pi \cdot \Delta L_e}{\mu_0 \cdot l}}}, \quad (2)$$

где  $l$  - длина стержня;  $\mu_0$  - магнитная постоянная  $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ ;  $e$  - основание натурального логарифма;  $\Delta L_e$  - значение внешней индуктивности [6]

$$\Delta L_e = L_1 - L_{i1}, \quad (3)$$

где  $L_{i1}$  - внутренняя индуктивность стержня.

Значение удельной электрической проводимости находят по формуле

$$\sigma = \frac{x_1^2}{2\pi \cdot a^2 \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_{ry}}, \quad (4)$$

где  $f$  - частота поля намагничивания;  $x$  - обобщенный параметр

$$x_1 = a \cdot \sqrt{2\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma \cdot f}, \quad (5)$$

Для анализа погрешностей измерений радиуса изделия, магнитной проницаемости и электропроводности воспользуемся методом обработки результатов косвенных измерений.

На основании выражений (1, 2, 4), были получены формулы для относительных погрешностей измерения  $\mu_r$ ,  $a$ ,  $\sigma$  при доверительной вероятности 0,95 в виде

$$\frac{\delta \mu_r}{\mu_r} = 1,1 \cdot \sqrt{\left(C_{L2} \cdot \frac{\delta \cdot L_2}{L_2}\right)^2 + \left(C_{L1} \cdot \frac{\delta \cdot L_1}{L_1}\right)^2 + \left(\frac{\delta \cdot l_2}{l_2}\right)^2 + \left(C_{Lin2} \cdot C_{R2} \cdot \frac{\delta \cdot R_2}{R_2}\right)^2 + \left(C_{Lin1} \cdot C_{R1} \cdot \frac{\delta \cdot R_1}{R_1}\right)^2}; \quad (6)$$

$$\frac{\delta a}{a} = 1,1 \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta l}{l}\right)^2 + \left(C_1 \cdot \frac{\delta \cdot L_1}{L_1}\right)^2 + \left(C_2 \cdot \frac{\delta \cdot R_1}{R_1}\right)^2 +}$$

$$\frac{\delta\sigma}{\sigma} = 1,1 \cdot \sqrt{\frac{\left(C_3 \cdot \frac{\delta \cdot L_2}{L_2}\right)^2 + \left(C_4 \cdot \frac{\delta \cdot R_2}{R_2}\right)^2}{\left(C_5 \cdot \frac{\delta \cdot R_1}{R_1}\right)^2 + \left(C_6 \cdot \frac{\delta \cdot L_2}{L_2}\right)^2 + \left(C_7 \cdot \frac{\delta \cdot L_1}{L_1}\right)^2 + \left(\frac{\delta \cdot l}{l}\right)^2 + \left(C_8 \cdot \frac{\delta \cdot R_2}{R_2}\right)^2 + \left(\frac{\delta \cdot f}{f}\right)^2}}; \quad (7)$$

где  $\frac{\delta \cdot L_2}{L_2}$ ,  $\frac{\delta \cdot L_1}{L_1}$ ,  $\frac{\delta \cdot l}{l}$ ,  $\frac{\delta \cdot R_2}{R_2}$ ,  $\frac{\delta \cdot R_1}{R_1}$ ,  $\frac{\delta \cdot f}{f}$  - относительные погрешности измерения величин  $L_2$ ;  $L_1$ ;  $l$ ;  $R_2$ ;  $R_1$  и  $f$ ;  $C$  - коэффициенты влияния, они рассчитываются по следующим формулам:

$$C_{L1} = \frac{L_1}{L_1 - L_2}; \quad (9)$$

$$C_{L2} = \frac{L_2}{L_1 - L_2}; \quad (10)$$

$$C_{R1} = \frac{\partial L_{in1} \cdot R_{n1}}{\partial R_{n1} \cdot L_{in1}}, \quad (11)$$

здесь и далее дифференциалы  $\partial R_n$ ,  $\partial L_{in}$  и  $\partial x$  можно заменить их малыми приращениями, используя расчётные таблицы этих значений, (рис. 1, 2);

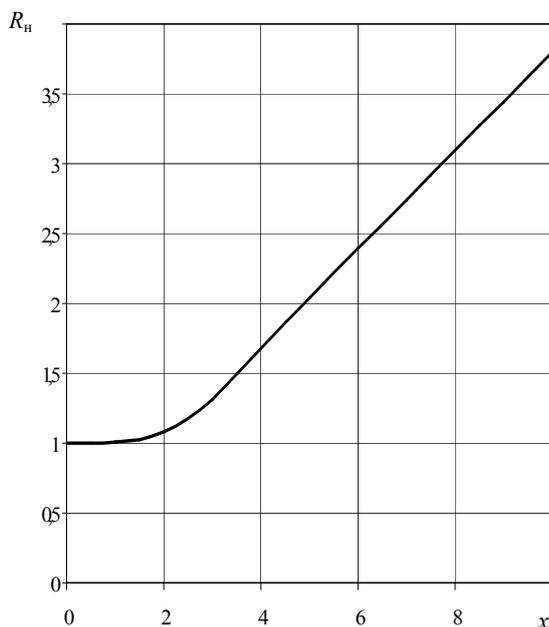


Рис. 1 Зависимость  $R_n$  от  $x$

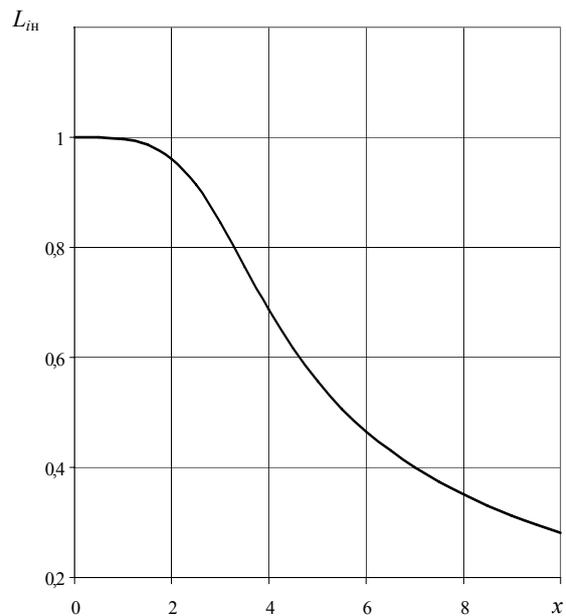


Рис. 2. Зависимость  $L_{in}$  от  $x$

$$C_{R2} = \frac{\partial L_{in2} \cdot R_{n2}}{\partial R_{n2} \cdot L_{in2}}; \quad (12)$$

$$C_{Lin1} = \frac{L_{in1}}{L_{in1} - L_{in2}}; \quad (13)$$

$$C_{Lin2} = \frac{L_{in2}}{L_{in1} - L_{in2}}; \quad (14)$$

$$C_1 = C_a \cdot (C^{**} - C_{L1}); \quad (15)$$

$$C_2 = C_a \cdot C^* \cdot C_{R1} \cdot (1 + C_{Lin1}); \quad (16)$$

$$C_3 = C_a \cdot C^* \cdot C_{L2}; \quad (17)$$

$$C_4 = C_a \cdot C_{Lin2} \cdot C^* \cdot C_{R2}; \quad (18)$$

$$C_5 = 2C_x - C_{Lin1} \cdot C_{R1} + 2C^* \cdot C_a \cdot C_{R1} \cdot (1 + C_{Lin1}); \quad (19)$$

$$C_6 = -(C_{L2} + 2C_a \cdot C^* \cdot C_{L2}); \quad (20)$$

$$C_7 = -C_{L1} + 2C_a \cdot (C^{**} - C_{L1}); \quad (21)$$

$$C_8 = C_{Lin2} \cdot C_{R2} - 2C_a \cdot C_{Lin2} \cdot C_{R2}; \quad (22)$$

$$C_x = \frac{\partial x_1 \cdot R_{n1}}{\partial R_{n1} \cdot x_1}; \quad (23)$$

$$C^* = \frac{L_{i1}}{L_1 - L_{i1}}; \quad (24)$$

$$C^{**} = \frac{L_1}{L_1 - L_{i1}}; \quad (25)$$

На рис. 1 и 2 представлены зависимости нормированных параметров  $R_n$  и  $L_{in}$  от  $x$ .

Используя приведенные формулы (6)-(22), были рассчитаны ожидаемые погрешности результатов измерений для пары точек  $x=2,84$  и  $x=3,48$  при использовании образца, выполненного из стали 9Х18 с радиусом  $a=2,5 \cdot 10^{-3}$  мм; и параметрами материала  $\mu_r=121$ ;  $\sigma=0,2 \cdot 10^7$  См/м; длина образца  $l=1$  м. При погрешностях измерения сопротивления и индуктивности 0,01 %, измерения частоты тока намагничивания

0,05 % и длины изделия 0,1 % получено следующие значения:  $\frac{\delta a}{a} = 1,07\%$ ,  $\frac{\delta \mu_r}{\mu_r} = 0,21\%$  и  $\frac{\delta \sigma}{\sigma} = 2,03\%$ .

Как известно, [7] электромагнитные методы контроля можно использовать для определения величины механических напряжений  $\sigma_m$  металлического изделия, в частности, при нагрузке путём растяжения металлического прутка. При этом используется зависимость магнитной проницаемости или электропроводности от величины  $\sigma_m$  растяжения. Тогда относительную погрешность измерения  $\sigma_m$  можно определять, в зависимости от используемой измеряемой величины  $\mu_r$  или  $\sigma$ , из выражения

$$\frac{\delta \sigma_m}{\sigma_m} = \frac{\partial \sigma_m}{\partial \mu_r} \cdot \frac{\mu_r}{\sigma_m} \cdot \frac{\delta \mu_r}{\mu_r} \quad (26)$$

или

$$\frac{\delta \sigma_m}{\sigma_m} = \frac{\partial \sigma_m}{\partial \sigma} \cdot \frac{\sigma}{\sigma_m} \cdot \frac{\delta \sigma}{\sigma}, \quad (27)$$

где  $\frac{\partial \sigma_m}{\partial \mu_r}$  и  $\frac{\partial \sigma_m}{\partial \sigma}$  - производные механического напряжения  $\sigma_m$  по магнитной проницаемости  $\mu_r$  и электропроводности  $\sigma$ . Эти производные берутся в рабочих точках зависимостей  $\sigma_m$  от  $\mu_r$  и  $\sigma_m$  от  $\sigma$ . Значения  $\mu_r$ ,  $\sigma_m$  и  $\sigma$  так же берут в этих рабочих точках. Производные можно заменить отношениями относительных приращений соответствующих величин, т.е.  $\frac{\Delta \sigma_m}{\Delta \mu_r}$  и

$\frac{\Delta \sigma_m}{\Delta \sigma}$  вблизи рабочих точек зависимостей  $\sigma_m$  от  $\mu_r$  и  $\sigma$ .

Для того же образца при воздействии на него нагрузки растяжения 2,26 МПа ( $\mu_r=149$ ) рассчитано значение погрешности  $\frac{\delta \sigma_m}{\sigma_m} = 0,38\%$ . При использовании зависимости  $\sigma_m$  от  $\mu_r$ .

Таким образом, в работе рассмотрена методика расчёта относительных погрешностей совместного измерения относительной магнитной проницаемости  $\mu_r$ , радиуса  $a$  и удельной электрической проводимости  $\sigma$  цилиндрического ферромагнитного стержня контактным электромагнитным преобразователем. Показано, что при использовании двух частот намагничивающего тока, протекающего вдоль стержня можно достигнуть относительных погрешностей измерения величин  $a$ ,  $\mu_r$  и  $\sigma$  равных 1,07 %; 0,21 % и 2,03%.

Такие погрешности получаются при довольно жёстких требованиях к погрешностям измерений аргументов функций  $a$ ,  $\mu_r$  и  $\sigma$ . На основании установленных зависимостей механического напряжения от величины  $\mu_r$ , рассчитана погрешность определения величины  $\sigma_m$ , которая составляет 0,38%.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Себко В.П., Горкунов Б.М., Тодоров Е.И. Вихретоковый параметрический преобразователь с улучшенными характеристиками. Дефектоскопия, 1985, №5. – с. 63-68.
- [2] Себко В.П., Сиренко Н.Н. Трёхпараметровый контроль цилиндрических изделий. Дефектоскопия, 1991, №7. – С.36-42
- [3] Себко В.П., Горкунов Б.М., Гудакова М. Характеристики вихретокового преобразователя для многопараметровых измерений. Харьков: Ден. в УкрНИИНТИ, 1985, №542, Ук-Д85. – С. 8.
- [4] Себко В.П., Горкунов Б.М., Львов С.Г. Математическая модель контактного двухпараметрового электромагнитного преобразователя // Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции "Современные приборы, материалы и технологии для технической диагностики и неразрушающего контроля промышленного оборудования". Харьков, 1998. – С.131-133
- [5] Себко В.П., Титова Н.В., Епихин А.В. Определение погрешностей многопараметровых измерений контактным электромагнитным преобразователем Вестник НТУ "ХПИ", №42, 2004. – С. 110.
- [7] Себко В.П., Горкунов Б.М., Львов С.Г., До Дык Нгуен. О влиянии механических напряжений на магнитные и электрические параметры изделий // Труды Международной научно-технической конференции "Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье". Ч.3., Харьков, Мишкольц (Венгрия), Магдебург (Германия) – 1997. – С.177-179.

Поступила 17.03.2005