

УДК 620.179.12

В.В. СЕБКО, канд. техн. наук

ЭКРАННОЕ ТРУБЧАТОЕ МНОГОПАРАМЕТРОВОЕ ВИХРЕТОКОВОЕ УСТРОЙСТВО

Розглянуто екранний трубчастий багатопараметровий вихорострумований пристрій, за допомогою якого було визначено чотири параметри ферромагнітної труби: відносна магнітна проникність μ_r , питомий електричний опір ρ_s , температуру труби t і коефіцієнт згасання магнітного поля у трубчастому виробі h_s .

Рассмотрено экранное трубчатое многопараметровое устройство, с помощью которого определяются четыре параметра ферромагнитной трубы: относительная магнитная проницаемость μ_r , удельное электрическое сопротивление ρ_s , температура трубы t и коэффициент затухания магнитного поля в трубчатом изделии h_s .

The screen tubular mnogoparametrovoe device is considered, which four parameters of ferromagnetic pipe are determined by: relative permeance μ_r , specific electric resistance ρ_s , temperature of pipe of t and coefficient of fading of the magnetic field in tubular good of h_s .

1. Введение

На сегодняшний день известны научные работы, связанные с исследованием экранного действия различных металлических изделий, так, например, работа [1] посвящена созданию экранных устройств и приборов, предназначенных для уменьшения влияния внешних магнитных полей на результаты измерений. В свою очередь работа [5] связана с экранным действием труб в поперечных магнитных полях, так как ферромагнитные трубы, находящиеся в поперечном поле, имеют большой коэффициент размагничивания, и поэтому происходит существенное уменьшение магнитного поля внутри трубы. Работа [6] рассматривает затухание импульсного магнитного поля внутри трубчатого изделия весьма простым способом на основе эквивалентной схемы. В настоящее время разработано много методов и устройств контактных и бесконтактных для измерения магнитных и электрических параметров трубчатых изделий [3, 4, 7-11].

Так, например, в работах [3, 4, 7, 8, 11] рассмотрены двух- и трёхпараметровые электромагнитные бесконтактные методы контроля геометрических, магнитных и электрических параметров при исследовании различных диапазонов изменения магнитной проницаемости μ . Все методы в работах [3, 4, 7, 8, 11] реализуются с помощью трансформаторного вихретокового датчика (ТВД).

В работе [10] предложены двухпараметровые бесконтактные электромагнитные методы контроля параметров μ и σ трубчатых изделий, а также контроля электрических и геометрических параметров немагнитных труб. Эти методы реализуются на базе параметрического вихретокового датчика (ПВД).

Контактные двух- и трёхпараметровые методы контроля параметров магнитных и немагнитных трубчатых изделий, реализуемые с помощью контактного рабочего преобразователя (КРП) рассмотрены в работах [19, 20].

Экстремальный четырёхпараметровый метод контроля геометрических, электрических, магнитных и температурных параметров ферромагнитных цилиндрических стержней на базе ТВД рассмотрен в работе [16]. Следует отметить, что достоинством метода [16] является то, что он оговаривает температуру, при которой измерялись μ_r и σ .

Однако, эти методы [3, 4, 7, 8, 10, 11, 16, 19, 20] и устройства существенно затрудняют исследование экранных свойств трубы, так как не исследуют коэффициент затухания магнитного поля в трубе по отношению к наружному полю.

В работе [18] предложено экранное устройство для плоских изделий, которое состоит из двух накладных электромагнитных датчиков, между которыми находится ферромагнитный лист, причем перемещение в небольших пределах этого листа не влияет на результат измерений магнитных и электрических параметров, так как удаление листа от одного датчика приводит к уменьшению расстояния до другого датчика. Таким образом, оба эффекта работают так, что суммарный результат измерения не влияет на определение электромагнитных параметров и зависимых от них физико-механических величин. Однако до настоящего времени не рассматривалось экранное трубчатое устройство и многопараметровые вихретоковые экранные методы для контроля параметров ферромагнитных труб.

Целью настоящей работы является: совместное определение численных значений относительной магнитной проницаемости μ_r , удельной электрической проводимости σ_r , температуры трубы t и коэффициента затухания h_t магнитного поля в трубе при реализации экранного четырёхпараметрового вихретокового метода.

В отличие от известных методов контроля параметров трубчатых изделий, рассматриваемый метод основан на том, что магнитная проницаемость μ_r , удельное электрическое сопротивление ρ_r , температура изделия t и коэффициента затухания h_t определяется по индукции магнитного потока, прошедшего через стенку трубы и пронизывающего измерительную обмотку электромагнитного датчика в середине трубы, причем измеряются ЭДС E_d и ее фазовый угол φ_{zr} , а известные методы определяют два и три параметра с помощью ТВД, расположенного снаружи трубы. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) исследовать экранное трубчатое четырёхпараметровое вихретоковое устройство, работающее на низких частотах;
- 2) создать алгоритм совместного определения относительной магнитной проницаемости μ_r , удельной электрической проводимости σ_r , температуры

трубы t и коэффициента затухания h_t магнитного поля в трубе при реализации экранного четырёхпараметрового вихретокового метода;

3) определить численные значения четырех параметров μ_{rt} , σ_t , t , h_t .

2. Экранное трубчатое четырёхпараметровое устройство

Воспользовавшись результатами работ [3, 4, 7-11], запишем формулу для определения магнитного потока Φ_{3t}

$$\Phi_{3t} = \pi \cdot a \cdot \mu_0 \cdot H_0 \cdot (1 + 2 \cdot (\mu_{rt} - 1)) \cdot d, \quad (1)$$

a – наружный радиус трубы; d - толщина стенки трубы; H_0 - напряженность магнитного поля вне трубы; индекс t - означает, что данная величина берется с учетом температуры.

Следует отметить, что Φ_{3t} - это магнитный поток в стенке и внутри трубы при условии ее тонкостенности $d/a \ll 1$, где d - толщина стенки; a – внешний радиус трубы. Поскольку в данном случае рассматриваются низкие частоты, необходимо учесть, что $d/\delta \ll 1$, где δ - глубина проникновения магнитного поля в стенку трубы. При этом берется длинный преобразователь соленоидального типа ($l/a \ll 1$, где l - длина намагничивающей катушки). В данном случае для определения параметров ферромагнитной трубы будем использовать экранное трубчатое вихретоковое устройство, включающее в себя трубу на которой находится намагничивающая обмотка, а в середине трубы находится электромагнитный вихретоковый датчик ЭВД с измерительной обмоткой.

Фазовый угол φ_{3t} потока Φ_{3t} с учетом [3, 4, 7- 11] находят по формуле

$$\operatorname{tg} \varphi_{3t} = \frac{d \cdot b}{\delta^2 \cdot \mu_{rt}}, \quad (2)$$

где b – внутренний радиус трубы.

Магнитная индукция трубы с учетом [2] выражается формулой

$$B_{3t} = \mu_0 \cdot H_0 \cdot [1 - 2 \cdot (\mu_{rt} - 1) \cdot d]. \quad (3)$$

Тогда запишем формулу для ЭДС E_{3t} малогабаритного электромагнитного вихретокового датчика ЭВД, который находится внутри трубы

$$E_{3t} = 4,44 \cdot f_t \cdot \pi \cdot a_d^2 \cdot W_d \cdot B_{3t}, \quad (4)$$

где a_d – радиус ЭВД; W_d – число витков ЭВД.

С учетом (4) найдем значение μ_{rt} в виде

$$\mu_{rt} = \frac{E_{3t} \cdot a}{2 \cdot 4,44 \cdot f_t \cdot \mu_0 \cdot H_0 \cdot S_d \cdot W_d \cdot d} - \frac{b}{2d} + 1, \quad (5)$$

где S_d – площадь поперечного сечения ЭВД.

Формула (2) дает возможность определить величину σ_t

$$\sigma_t = \frac{tg \varphi_{3t}}{\pi \cdot d \cdot b \cdot f_t \cdot \mu_0} \cdot \quad (6)$$

Выражение для ρ_t можно записать

$$\rho_t = \frac{\pi \cdot d \cdot b \cdot f_t \cdot \mu_0}{tg \varphi_{3t}} \cdot \quad (7)$$

$$t = \frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \cdot \left[\frac{\sigma_1 \cdot \pi \cdot d \cdot b \cdot \mu_0 \cdot f_t}{tg \varphi_{3t}} - 1 \right] + t_1 \cdot \quad (8)$$

При этом для определения температуры трубы впервые предлагается использовать условия постоянного значения глубины проникновения магнитного поля δ , а изменение температуры приводит к изменению величин μ_r и ρ , которые являются зависимыми от температуры, а изменение электромагнитных параметров, в свою очередь, компенсируется изменением частоты магнитного поля f_t , которая также зависит от температуры трубы и является выходной величиной.

Запишем формулу для определения температуры ферромагнитной трубы через величину ρ_t

$$t_\rho = \frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \cdot \left[\frac{\pi \cdot d \cdot b \cdot \mu_0 \cdot f_t}{\rho_t \cdot tg \varphi_{3t}} - 1 \right] + t_1 \cdot \quad (9)$$

Формулу для температуры через величину μ_r можно записать

$$t_\mu = \frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \cdot \left(\frac{E \cdot a_d}{4,44 \cdot f_t \cdot \mu_0 \cdot H_0 \cdot S_d \cdot W_d \cdot d \cdot \mu_{r1}} - \frac{b}{2d} \right) + t_1 \cdot \quad (10)$$

Коэффициент затухания синусоидального продольного поля h_t внутри трубы с учетом [2] можно найти по формуле

$$h_t = \frac{B_{3t}}{B_0}, \quad (11)$$

где B_0 - магнитная индукция в воздушном зазоре между обмоткой и трубой на поверхности изделия [2].

На основании (3) и (10) можно записать

$$h_t = b \cdot \left[\frac{1 + 2 \cdot (\mu_r - 1) \cdot \frac{d}{b}}{\mu_r \cdot a} \right], \quad (12)$$

Коэффициенты затухания можно также определить через величину напряженности магнитного поля H_{3t}

$$h_t = \frac{H_{3t}}{H_0} \cdot \quad (13)$$

Используя (3) и считая, что $H_{3r} = B_{3r}$ запишем формулу для определения коэффициента затухания в виде

$$h_i = \frac{H_0 \cdot b \cdot \left[1 + 2 \cdot (\mu_r - 1) \cdot \frac{d}{b} \right] \cdot l}{\sqrt{2} \cdot I_n \cdot W_n \cdot \mu_r \cdot a}, \quad (14)$$

где I_n - намагничивающий ток; l - длина соленоида.

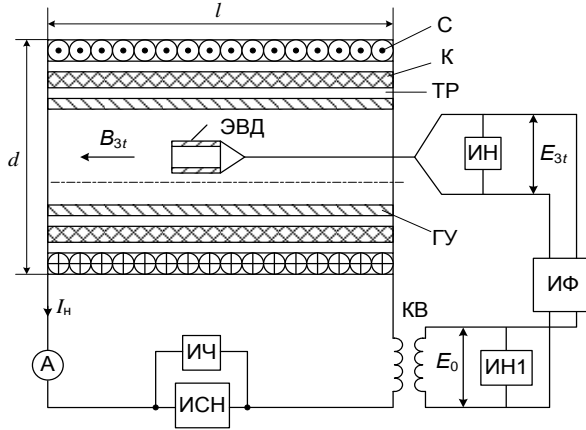
Схема включения экранного трубчатого многопараметрового вихретокового устройства представлена на рисунке. Схема включает в себя: К – каркас с намагничивающей обмоткой; С – соленоид; ГУ – греющее устройство для изменения температуры ферромагнитной трубы; ЭВД – экранный вихретоковый датчик, который находится в середине трубы; ИСН – источник синусоидального напряжения; ИЧ – измеритель частоты; КВ – катушка взаимоиנדуктивности; ТР – ферромагнитный трубчатый образец, измерители напряжения ИН и ИН1; А – амперметр.

В данном случае намагничивающая обмотка наматывается на трубу через каркас К (сам каркас выполнен из жаропрочных материалов: фарфора или стеклотекстолита).

Во время работы устройства измеритель напряжения ИН измеряет ЭДС, снимаемую с ЭВД, т.е. ЭДС E_{3r} . ЭДС E_0 снимается со вторичной обмотки катушки взаимоиנדуктивности КВ и регистрируется измерителем напряжения ИН1, а затем подается на измеритель фазового угла ИФ. При этом катушка взаимоиנדуктивности КВ дает возможность измерять фазовый угол φ_{3r} между ЭДС E_0 и E_{3r} , который регистрируется ИФ. Для изменения температуры ферромагнитной трубы ТР используется греющее устройство ГУ.

Приведем численные примеры определения параметров трубы и экранного датчика.

Примем исходные данные: число витков намагничивающей обмотки $W_i = 289$; внешний радиус трубы $a=55$ мм; внутренний радиус $b=52$ мм; длина трубы $l=1$ м; напряженность магнитного поля H_0 ; магнитная проницаемость трубы $\mu_r=110$; удельная электрическая проводимость трубы $\sigma_1=0,5 \cdot 10^7$ См/м; частота изменения магнитного поля $f=1000$ Гц; температурный коэффициент сопротивления материала трубы $\alpha_p=3,6 \cdot 10^{-3}$ 1/К; температурный коэффициент магнитной проницаемости $\alpha_\mu=1,2 \cdot 10^{-3}$ 1/К.



Электрическая схема включения вихретокового экранного устройства для определения четырех параметров ферромагнитной трубы

Параметры ЭВД: диаметр $d_d = 3 \cdot 10^{-3}$ м, $l_d = 10 \cdot 10^{-3}$ м, число витков измерительной обмотки $W_{и} = 1050$.

Найдем площадь S_d поперечного сечения датчика:

$$S_d = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi (3 \cdot 10^{-3})^2}{4} = 0,707 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2.$$

Толщина стенки трубы:

$$d = a - b = (55 - 52) \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Определим численное значение магнитного потока в середине трубы

$$\begin{aligned} \Phi_{3t} &= \pi \cdot a \cdot b \cdot \mu_0 \cdot H_0 \cdot \left[1 + 2 \cdot (\mu_r - 1) \cdot \frac{d}{b} \right] = \pi \cdot 55 \cdot 10^{-3} \times \\ &\times 52 \cdot 10^{-3} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 60 \times \left[1 + 2 \cdot (110 - 1) \cdot \frac{3 \cdot 10^{-3}}{52 \cdot 10^{-3}} \right] = 0,92 \cdot 10^{-5} \text{ Вб}. \end{aligned}$$

Воспользовавшись формулой для определения глубины проникновения δ [5-11], определим глубину проникновения магнитного поля в стенку трубы:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot 1000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 110 \cdot 0,5 \cdot 10^7}} = 0,68 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Определим ЭДС E_{3t} , которая создается магнитным потоком Φ_{23} :

$$E_{3t} = 4,44 \cdot 1000 \cdot 1050 \cdot 0,92 \cdot 10^{-5} = 42,9 \cdot 10^{-5} \text{ В}.$$

Величина ЭДС без трубы внутри измерительной обмотки с учетом [7- 11]

$$E_0 = 4,44 \cdot 1000 \cdot 1050 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 60 = 3 \text{ В}.$$

Магнитная индукция внутри трубы вычисляется:

$$B_{3r} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 60 \cdot 52 \cdot 10^{-3} \left[1 + 2(110-1) \frac{3 \cdot 10^{-3}}{52 \cdot 10^{-3}} \right]}{55 \cdot 10^{-3}} = 0,97 \cdot 10^{-3} \text{ Тл.}$$

Определим μ_{rt} , как

$$\mu_{rt} = \frac{42,9 \cdot 55 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 4,44 \cdot 1000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 60 \cdot 0,707 \cdot 10^{-5} \cdot 1050 \cdot 3 \cdot 10^{-3}} - \frac{52 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 3 \cdot 10^{-3}} + 1 = 110,37.$$

Определим $tg\varphi_{3r}$, как

$$tg\varphi_{3r} = \frac{3 \cdot 10^{-3} \cdot 52 \cdot 10^{-3}}{(0,68 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 110} = 3,067.$$

Рассчитаем численное значение удельной электрической проводимости

$$\sigma_t = \frac{3,067}{\pi \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot 52 \cdot 10^{-3} \cdot 1000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}} = 0,498 \cdot 10^7 \text{ См/м.}$$

С учетом [5- 11] запишем глубину проникновения δ , как

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho_t}{\mu_0 \cdot \mu_{rt} \cdot \omega_t}} = \sqrt{\frac{\rho_t}{\mu_0 \cdot \mu_{rt} \cdot \pi \cdot f_t}}, \quad (15)$$

где μ_{rt} , ρ_t и f_t зависят от температуры t .

Примем условие, что $\delta = \delta_1 = 0,68 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, которое характеризуется $\delta = const = 0,68 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

В таком случае частота f будет компенсировать изменение величин μ_{rt} , ρ_t для того, чтобы поддерживать значение глубины проникновения магнитного поля в трубчатый образец постоянным $\delta = const = 0,68 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

То есть f_t запишется как

$$f_t = \frac{\rho_t}{\mu_0 \cdot \mu_{rt} \cdot \delta_1^2}. \quad (16)$$

Определим температуру t_p и t_μ по формулам (9) и (10).

Приведем расчет четырех параметров ферромагнитного трубчатого изделия: μ_{rt} , ρ_t , t , h_t . При этом электромагнитные параметры и коэффициенты затухания h_t определяем при различных температурах.

При $t=20^\circ\text{C}$ имеем $\rho_1=2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м}$; $f=1000 \text{ Гц}$; $\mu_{r1}=110$.

При $t=40^\circ\text{C}$

$$\rho_{40} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left(1 + \frac{3,6 \cdot 10^{-3} \cdot (40 - 20)}{1 + 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot 20} \right) = 2,13 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

$$\mu_{r40} = 110 \cdot \left(1 + \frac{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot (40 - 20)}{1 + 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 20} \right) = 112,6;$$

$$f_{40} = \frac{2,13 \cdot 10^{-7}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 112,6 \cdot \pi (0,68 \cdot 10^{-3})^2} = 1036 \text{ Гц};$$

$$t_p = \frac{1 + 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot 20}{3,6 \cdot 10^{-3}} \cdot \left[\frac{2,13 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 10^{-7}} - 1 \right] + 20 = 39,36 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_\mu = \frac{1 + 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 20}{1,2 \cdot 10^{-3}} \cdot \left[\frac{112,6}{110} - 1 \right] + 20 = 40,17 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

При $t=80^\circ\text{C}$

$$\rho_{80} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left(1 + \frac{3,6 \cdot 10^{-3} \cdot (80 - 20)}{1 + 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot 20} \right) = 2,4 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

$$\mu_{r80} = 110 \cdot \left(1 + \frac{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot (80 - 20)}{1 + 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 20} \right) = 117,7;$$

$$f_{80} = \frac{2,4 \cdot 10^{-7}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 117,7 \cdot \pi (0,68 \cdot 10^{-3})^2} = 1117 \text{ Гц};$$

$$t_p = \frac{1 + 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot 20}{3,6 \cdot 10^{-3}} \cdot \left[\frac{2,4 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 10^{-7}} - 1 \right] + 20 = 79,56 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_\mu = \frac{1 + 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 20}{1,2 \cdot 10^{-3}} \cdot \left[\frac{117,7}{110} - 1 \right] + 20 = 79,73 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

При $t=100^\circ\text{C}$

$$\rho_{100} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left(1 + \frac{3,6 \cdot 10^{-3} \cdot (100 - 20)}{1 + 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot 20} \right) = 2,54 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

$$\mu_{r100} = 110 \cdot \left(1 + \frac{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot (100 - 20)}{1 + 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 20} \right) = 120,3;$$

$$f_{100} = \frac{2,54 \cdot 10^{-7}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 120,3 \cdot \pi (0,68 \cdot 10^{-3})^2} = 1156 \text{ Гц};$$

$$t_p = \frac{1 + 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot 20}{3,6 \cdot 10^{-3}} \cdot \left[\frac{2,54 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 10^{-7}} - 1 \right] + 20 = 100,4 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$t_\mu = \frac{1 + 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 20}{1,2 \cdot 10^{-3}} \cdot \left[\frac{120,3}{110} - 1 \right] + 20 = 99,9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

При $t=150^\circ\text{C}$

$$\rho_{150} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left(1 + \frac{3,6 \cdot 10^{-3} \cdot (150 - 20)}{1 + 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot 20} \right) = 2,87 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

$$\mu_{r150} = 110 \cdot \left(1 + \frac{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot (150 - 20)}{1 + 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 20} \right) = 126,8;$$

$$f_{150} = \frac{2,87 \cdot 10^{-7}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 126,8 \cdot \pi (0,68 \cdot 10^{-3})^2} = 1240 \text{ Гц};$$

$$t_p = \frac{1 + 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot 20}{3,6 \cdot 10^{-3}} \cdot \left[\frac{2,87 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 10^{-7}} - 1 \right] + 20 = 149,53 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_\mu = \frac{1 + 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 20}{1,2 \cdot 10^{-3}} \cdot \left[\frac{126,8}{110} - 1 \right] + 20 = 150,33 \text{ }^\circ\text{C}.$$

При $t=180^\circ\text{C}$

$$\rho_{180} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left(1 + \frac{3,6 \cdot 10^{-3} \cdot (180 - 20)}{1 + 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot 20} \right) = 3,07 \cdot 10^{-7} \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

$$\mu_{r180} = 110 \cdot \left(1 + \frac{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot (180 - 20)}{1 + 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 20} \right) = 130,6;$$

$$f_{180} = \frac{2,54 \cdot 10^{-7}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 130,6 \cdot \pi (0,68 \cdot 10^{-3})^2} = 1287 \text{ Гц};$$

$$t_p = \frac{1 + 3,6 \cdot 10^{-3} \cdot 20}{3,6 \cdot 10^{-3}} \cdot \left[\frac{3,07 \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 10^{-7}} - 1 \right] + 20 = 179,31 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$t_\mu = \frac{1 + 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 20}{1,2 \cdot 10^{-3}} \cdot \left[\frac{130,6}{110} - 1 \right] + 20 = 179,8 \text{ }^\circ\text{C}.$$

При $t=20^\circ\text{C}$

$$h_t = \frac{52 \cdot 10^{-3} \cdot \left[1 + 2 \cdot (110 - 1) \cdot \frac{3 \cdot 10^{-3}}{52 \cdot 10^{-3}} \right]}{110 \cdot 55 \cdot 10^{-3}} = 0,1167.$$

При $t=40^\circ\text{C}$

$$h_t = \frac{52 \cdot 10^{-3} \cdot \left[1 + 2 \cdot (112,6 - 1) \cdot \frac{3 \cdot 10^{-3}}{52 \cdot 10^{-3}} \right]}{112,6 \cdot 55 \cdot 10^{-3}} = 0,1165.$$

При $t=80^\circ\text{C}$

$$h_t = \frac{52 \cdot 10^{-3} \cdot \left[1 + 2 \cdot (117,7 - 1) \cdot \frac{3 \cdot 10^{-3}}{52 \cdot 10^{-3}} \right]}{117,7 \cdot 55 \cdot 10^{-3}} = 0,1162.$$

При $t=100^\circ\text{C}$

$$h_t = \frac{52 \cdot 10^{-3} \cdot \left[1 + 2 \cdot (120,3 - 1) \cdot \frac{3 \cdot 10^{-3}}{52 \cdot 10^{-3}} \right]}{120,3 \cdot 55 \cdot 10^{-3}} = 0,1158.$$

При $t=150^\circ\text{C}$

$$h_t = \frac{52 \cdot 10^{-3} \cdot \left[1 + 2 \cdot (126,8 - 1) \cdot \frac{3 \cdot 10^{-3}}{52 \cdot 10^{-3}} \right]}{126,8 \cdot 55 \cdot 10^{-3}} = 0,1157.$$

При $t=180^\circ\text{C}$

$$h_t = \frac{52 \cdot 10^{-3} \cdot \left[1 + 2 \cdot (130,6 - 1) \cdot \frac{3 \cdot 10^{-3}}{52 \cdot 10^{-3}} \right]}{130,6 \cdot 55 \cdot 10^{-3}} = 0,1155.$$

Определим ток в намагничивающей обмотке

$$I_H = \frac{H_0 \cdot l}{\sqrt{2} \cdot W_H} = \frac{60 \cdot 1}{\sqrt{2} \cdot 289} = 0,147 \text{ A.}$$

Определим относительные погрешности измерения величин температур t_p и t_μ , используя известные формулы для расчета погрешностей [17] и с учетом [14, 15].

Так, например, при $t=80^\circ\text{C}$

$$\gamma_{t_p} = \frac{t_p - t}{t} \cdot 100\% = \frac{79,56 - 80}{80} \cdot 100\% = -0,55\% ;$$

$$\gamma_{t_\mu} = \frac{t_\mu - t}{t} \cdot 100\% = \frac{79,73 - 80}{80} \cdot 100\% = -0,3375\%$$

Результаты расчетов γ_{t_p} и γ_{t_μ} для этой и других температур приведены в таблице

Результаты расчетов электромагнитных параметров, температуры и коэффициента затухания ферромагнитной трубы при реализации экранного вихретокового четырёхпараметрового метода								
t , $^\circ\text{C}$	ρ_t , Ом·м	μ_{rt}	f_t , Гц	t_p , $^\circ\text{C}$	t_μ , $^\circ\text{C}$	h_t	γ_{t_p} , %	γ_{t_μ} , %
20	$2 \cdot 10^{-7}$	110	1000	20	20	0,1167	0	0
40	$2,13 \cdot 10^{-7}$	112,6	1036	39,36	40,17	0,1165	-1,6	0,425
80	$2,4 \cdot 10^{-7}$	117,7	1117	79,56	79,73	0,1162	-0,55	-0,3375
100	$2,54 \cdot 10^{-7}$	120,3	1156	100,4	99,9	0,1158	0,4	-0,1
150	$2,87 \cdot 10^{-7}$	126,8	1240	149,53	150,33	0,1157	-0,31	0,22
180	$3,07 \cdot 10^{-7}$	130,6	1287	179,31	179,8	0,1155	-0,38	-0,11

В таблице приведены результаты определения величин ρ_t , μ_{rt} , f_t , t_p , t_μ , h_t при разных температурах трубы. Левая колонка таблицы содержит данные

определения температуры контрольным методом (использовался платиновый терморезистор ПТ).

3. Обсуждение результатов исследований

В настоящей статье с помощью экранного трубчатого многопараметрового вихретокового устройства, реализующего экранный четырёхпараметровый бесконтактный вихретоковый метод, определены совместно следующие параметры ферромагнитного тонкостенного трубчатого изделия: относительная магнитная проницаемость μ_{r1} , удельное электрическое сопротивление ρ_1 , температура трубы t и коэффициент затухания синусоидального продольного магнитного поля в ферромагнитном трубчатом изделии h_1 .

Исследования экранного трубчатого устройства, реализующего четырёхпараметровый вихретоковый метод, проводились при условии постоянства глубины проникновения магнитного поля в образец, т.е. $\delta = const$ для определения температуры, а также связанных с ней термозависимых электромагнитных параметров и коэффициента затухания магнитного поля в трубчатом изделии h_1 , который также зависит от температуры.

Материалы, связанные с совместным определением величин μ_{r1} , ρ_1 , t и h_1 с помощью экранного трубчатого многопараметрового вихретокового устройства являются новизной работы.

Список литературы: 1. *Каден Г.* Электромагнитные экраны в высокочастотной механике и технике электросвязи. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1957.- 327 с. 2. *Кифер И.И.* Испытания ферромагнитных материалов. - М.: Энергия. - 1969. - 360 с. 3. *Бондаренко В.И., Себко В.П., Тюпа В.И.* К расчету переменного магнитного потока в проводящем объекте. // Вестн. Харьк. политехн. ин-та. - 1980. - №168. - Вып. 7.- С. 12-14. 4. *Баитанников Л.А., Себко В.П., Тюпа В.И.* Определение магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости материала трубчатых изделий // Дефектоскопия. - 1985.- №5.- С. 57-63. 5. *Николаенко А.Т.* Намагничивание металлических труб поперечными полями // Дефектоскопия. - 1983.- №12.- С. 48-56. 6. *Себко В.П., Беззапонная В.М.* О диффузии затухающих магнитных полей в металлическую камеру // Электротехника и электромеханика. НТУ "ХПИ". - Харьков: 2005.- №4.- С. 61-63. 7. *Пантелеев М.С.* К теории измерений электромагнитных параметров трубчатых изделий в переменных магнитных полях // Вестн. Харьк. политехн. ин-та. - 1988. - №251. - Вып. 15.- С. 48-50. 8. *Себко В.П., Хоменко В.Г.* Электромагнитный многопараметровый метод контроля трубчатых изделий //Техническая электродинамика, Тематический выпуск.- ч.2.-1999.- С. 39-42. 9. *Себко В.П., Хоменко В.Г.* К расчету компонентов сигналов электромагнитного преобразователя с трубчатым изделием. // Вестн. ХГПУ. - 2000. - Вып. 92.- С. 76-100. 10. *Себко В.В., Мохаммад Махмуд Мохаммад Дарвиш.* К теории работы параметрического электромагнитного преобразователя для контроля электромагнитных параметров и потерь мощности в цилиндрическом изделии // Вестн. НТУ "ХПИ". - Харьков. - 2001. - Вып. 5.- С. 151-156. 11. *Себко В.П., Фам Туанг Хунг.* Экстремальный электромагнитный метод контроля параметров трубчатых проводящих изделий. // Вестн. ХГПУ. - 2000. - Вып. 102.- С. 109-112. 12. *Спектор С.А.* Электрические измерения физических величин. - Энергоатомиздат, 1987. - 320 с. 13. *Себко В.П., Пантелеев М.С.* К вопросу измерения магнитной проницаемости ферромагнитных изделий в различных температурных режимах. - Локальные автоматизированные системы автоматки. - Київ: Наукова думка, - 1983, - С. 109-113. 14. *Багмет О.Л.* К теории электромагнитного преобразователя температуры. Сборник научных трудов ХГПУ "Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье". - Вып.7.- ч.3.-Харьков. -1999. - С. 86-88. 15. *Котуза А.И.* Бесконтактное измерение температуры цилиндрических изделий вихретоковым преобразователем. - Вестник ХГПУ. - 1999. - Вып.24.- С. 38-40. 16. *Себко В.В.*

Многофункциональное вихреговое устройство для измерения радиуса, магнитной проницаемости, удельного электрического сопротивления и температуры цилиндрического проводящего изделия. – Технічна електродинаміка. – Київ. – Інститут електродинаміки НАНУ. – 2002. – Технічний вип. ч.3. - С. 101-104. 17. Чинков В.М. Основы метрології та вимірювальної техніки / Навчальний посібник/. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2005.- 524 с. 18. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий. Справочник / Под ред В.В. Клюева. Кн.2.- М.: Машиностроение, 1986. – 351 с. 19. Себко В.П., Тюпа И.В. К теории работы контактного электромагнитного преобразователя для контроля параметров трубчатых изделий // Вестник ХГПУ.- Харьков, 1999.- вып.24.- С. 109-113. 20. Себко В.П., Тюпа И.В., Филоненко Д.В. Исследование электромагнитного трехпараметрового метода контроля труб. // Вестн. НТУ "ХПИ". - Харьков. - 2004. - Вып. 46.- С. 161-163.

Поступила в редколлегию 07.11.06

УДК 621.396

А.С. МАЗМАНИШВИЛИ, д-р физ.-мат. наук, **А.Ю. СИДОРЕНКО**,
Д.А. СТАРУШКИН

ДИСКРЕТНЫЙ КВАДРАТИЧНЫЙ ФУНКЦИОНАЛ КАЧЕСТВА И ЭФФЕКТИВНОЕ КОЛИЧЕСТВО ЕГО КОМПОНЕНТ

Розглянуто метод контролю якості випадкових процесів із застосуванням дискретного квадратичного функціоналу. Отримана і проаналізована залежність ефективної кількості підрахунків адитивного критерію, тобто обсягу вимірювань, від коефіцієнта кореляції.

Введение. В теории оценивания и принятия решений принято использовать статистические функционалы определенного вида. На их основе строят выборочные критерии, формулируют условные и безусловные законы распределения и рассчитывают соответствующие квантили [1, 2, 3]. Эти критерии образуются из элементов (компонент) наблюдаемой выборки, при этом её отсчеты предполагаются независимыми [3, 4]. Между тем на практике условие независимости отсчетов может не выполняться или по условиям эксперимента может отсутствовать информация о степени статистической связи между ними.

В данной работе в качестве математической модели будет рассматриваться дискретный квадратичный функционал:

$$J_x = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n^2, \quad (1)$$

где $\{x_n\}$ – последовательность отсчетов; N – количество отсчетов в выборке; h – шаг измерений, $h = L/N$; L – длина интервала измерений. С целью изучить влияние коррелированности отсчетов будет предполагать, что выборка образована из отсчетов случайного процесса $x(l)$, обладающего свойствами нормального марковского процесса (НМП) [5,6]. В качестве проверки для используемого в данной работе функционала качества (1) можно выбрать хорошо известный в математической статистике критерий χ^2 Пирсона, который образован из независимых нормальных отсчетов [3].