

В.П. СЕБКО, д-р. техн. наук, НТУ "ХПИ",
И.В. ТЮПА, канд. техн. наук, НТУ "ХПИ",
Д.В. ФИЛОНЕНКО, НТУ "ХПИ"

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭКСТРЕМАЛЬНОГО ТРЕХПАРАМЕТРОВОГО МЕТОДА КОНТРОЛЯ ТРУБ

Розглянуто багатопараметровий електромагнітний метод, заснований на досягненні екстремуму чутливості (амплітудної і фазової) функції перетворення параметрів трубчатого виробу. Наведено електричну схему експериментальної установки для спільного визначення товщини труби, магнітну проникність та питому електричну провідність матеріалу труби. Отримано результати експериментальних досліджень.

Is reviewed manyparametrical an electromagnetic method, founded on reaching of extremum of sensitivity (amplitude and phase) function of transformation of parameters of a tubular article. The circuit diagram of installation for joint definition of thickness of a pipe, relative magnetic permeability and specific conductance of a material of a pipe is offered. Results of experimental researches are received.

Постановка проблемы и анализ последних исследований. В последнее время много внимания уделяется вопросам совместного многопараметрового контроля параметров материалов и изделий различных форм и типоразмеров одним и тем же измерительным преобразователем в одной и той же зоне контроля. Многопараметровые вихретоковые методы и преобразователи дают возможность получить достаточно полную информацию о параметрах объекта контроля, в частности, магнитные, электрические и геометрические параметры, а также тесно связанные с ними другие физические величины: структурный состав материала, наличие доминирующих примесей и включений, твердость, температура, механические напряжения и т.д. Для случая немагнитных и слабомагнитных материалов данные методы позволяют получить дополнительный геометрический параметр, например, диаметр прутка или толщину стенки трубы [1]. С целью совместного определения перечисленных величин для случая ферромагнитного материала образца целесообразно воспользоваться экстремальными электромагнитными методами контроля [2], в основе которых лежит достижение в процессе контроля экстремума универсальных функций преобразования, что дает возможность совместно определять относительную магнитную проницаемость, удельную электрическую проводимость и толщину стенки трубы.

Целью данной работы является проведение экспериментальных исследований контактного вихретокового экстремального трехпараметрового метода контроля трубчатых изделий, позволяющего измерять относительную магнитную проницаемость μ_r , удельную электрическую проводимость σ и толщину стенки трубчатого изделия d .

В работе [3] описана теория работы экстремального вихретокового метода контроля трубчатых изделий на основе контактного электромагнитного преобразователя для совместного определения относительной магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости трубчатых изделий. На рис. 1 представлены графические зависимости универсальных функций преобразования $dL_{nmax}/dx = f(x)$, которая проходит через вершины соответствующих максимумов кривых нормированной индуктивности, и дополнительной функциональной зависимости $d/a = f(x)$.

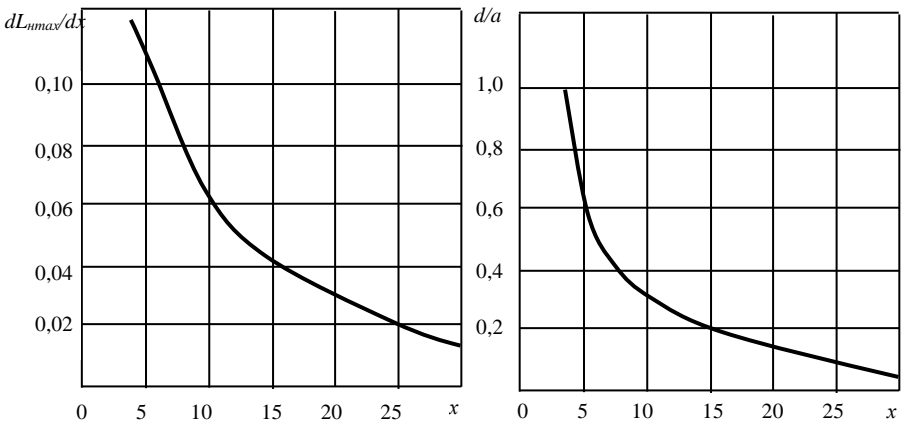


Рис. 1. Графики зависимостей функций $dL_{nmax}/dx = f(x)$ и $d/a = f(x)$

Выражение для дифференциала нормированной индуктивности имеет вид:

$$\frac{dL_{n\max}}{dx} = \frac{1}{\mu_r L_0} \frac{2\sqrt{f}}{a\sqrt{2\pi\mu_o\mu_r\sigma}} \frac{dL_i}{dx}. \quad (1)$$

Алгоритм измерительных и расчетных операций сводится к следующему. Вначале, плавно изменяя частоту намагничивающего тока (амплитуда и форма сигнала поддерживается постоянной), добиваемся экстремума функции dL_i/dx путем подачи выходного сигнала с выхода контактного электромагнитного преобразователя на дифференцирующее

устройство, после чего, по значению экстремума функции dL_i/dx и зависимости (1) определяем значение $dL_{H\max}/dx$, по которому находим величину обобщенного параметра x . Далее по функциональной зависимости $d/a = f(x)$ находим значение отношения толщины стенки трубы к ее диаметру d/a . На практике, для определения соответствующих значений удобнее пользоваться табличными значениями функциональных зависимостей.

Далее, измерив на концах изделия падение напряжения на нем U_n и фазовый угол φ между током I и напряжением U_n , определяют сопротивление изделия R при частоте f по формуле

$$R = \frac{U_n}{I} \cos \varphi. \quad (2)$$

Затем определяем нормированное значение сопротивления, как

$$R_n = \frac{R}{R_0}, \quad (3)$$

где R_0 – сопротивление изделия постоянному току, т. е. при $f = 0$.

После этого, исходя из установленной зависимости нормированного сопротивления и зависимости нормированной индуктивности изделия от обобщенного параметра x , определяют величину L_n [3] (рис. 2).

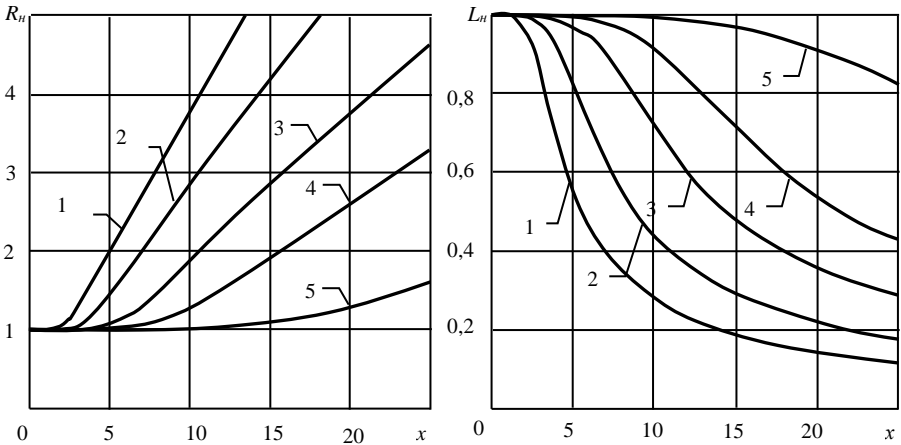


Рис. 2. Графики зависимостей нормированных параметров R_n и L_n

Воспользовавшись соотношениями для индуктивностей L_i и L_0 находим:

$$L_0 = \frac{\mu_0 l}{8\pi}; \quad (4)$$

$$L_i = L - L_e, \quad (5)$$

где L_e – индуктивность, связанная с внешним магнитным потоком, l – длина исследуемого образца,

$$L_e = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{a} - 1 + \frac{4a}{\pi l} - \frac{a^2}{l^2} \right). \quad (6)$$

Суммарную индуктивность L , относительную магнитную проницаемость μ_r и удельную электрическую проводимость σ определяют по формулам:

$$L = U_n \sin \varphi / (2\pi I f); \quad (7)$$

$$\mu_r = \frac{8\pi \left[\frac{U_n \sin \varphi}{2\pi f I} - \frac{\mu_0 l}{2\pi} \left(\ln \frac{2l}{a} - 1 + \frac{4a}{\pi l} - \frac{a^2}{2l^2} \right) \right]}{\mu_0 L_n l}; \quad (8)$$

$$\sigma = x^2 / (2\pi a^2 \mu_0 \mu_r f). \quad (9)$$

В работе [3] представлена реализующая этот алгоритм измерительных и расчетных операций установка с использованием вольтметра, амперметра и фазометра. Данная измерительная установка обладает рядом существенных недостатков:

– ввиду малых сопротивлений трубчатых образцов возникают трудности измерения малых падений напряжений на преобразователе, и как следствие из этого, неустойчивая работа фазометра и большие погрешности измерения индуктивности;

– необходимо применять мощные генераторы с устойчивыми выходными характеристиками.

Как видно из алгоритма осуществления измерительных и расчетных операций, основной задачей измерений является определение активного и реактивного сопротивления образца, с которым связаны нормированные параметры L_n и R_n .

На рис. 3 представлена мостовая схема установки для определения относительной магнитной проницаемости μ_r и удельной электрической проводимости σ , и толщины стенки трубчатого изделия, в которой отсутствуют перечисленные выше недостатки. В установку входят: мост переменного тока для измерения индуктивности типа ВМ401Е, гальванометр, частотомер ЧЗ-34 и генератор ГЗ-112. Условием равновесия моста переменного тока для измерения индуктивностей является выражение [4]

$$\frac{(R_1 + j\omega L_1)R_4}{1 + j\omega C_4 R_4} = R_2 R_3, \quad (10)$$

где R_1 и ωL_1 – активное и индуктивное сопротивления образца; R_2, R_3, R_4 и $1/\omega C_4$ – сопротивления плеч моста переменного тока.

В результате преобразования (10) выражения для R_1 и L_1 примут вид:

$$R_1 = R_2 R_3 / R_4; \quad (11)$$

$$L_1 = R_2 R_3 C_4. \quad (12)$$

В начале находится сопротивление образца на нулевой частоте R_0 . Далее генератором Г устанавливается частота намагничивающего переменного тока и с помощью переключателей переменных сопротивлений плеч моста добиваются условий равновесия, т.е. отсутствия тока в измерительной диагонали моста, которое фиксируется гальванометром Г. После этого по полученным формулам (11) и (12) находят значения активного сопротивления образца R и индуктивного сопротивления L .

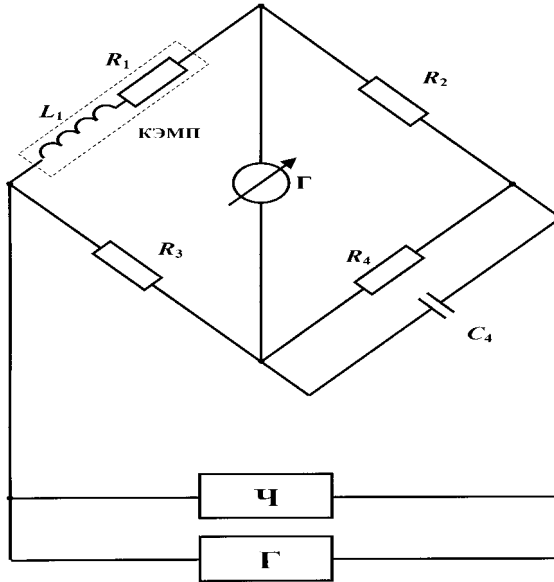


Рис. 3. Электрическая схема экспериментальной установки

В таблице приведены результаты измерения относительной магнитной проницаемости μ_r и удельной электрической проводимости σ трубчатых изделий, изготовленных из различных марок сталей и с различными геометрическими параметрами с использованием мостовой схемы включения преобразователя, выполненные на частотах, соответствующих максимальным значениям чувствительности функций преобразования R_H и L_H .

Сравнение данных, полученных рассмотренным и контрольными методами (баллистическим на кольцевом отрезке трубы для контроля магнитной проницаемости μ_r и мостовым при контроле удельной электрической проводимости σ), показало, что расхождение результатов контроля не превышает 2%, что существенно выше, чем на установке с использованием измерительной схемы амперметра, вольтметра и фазометра.

Результаты экспериментальных исследований ферро-магнитных трубчатых изделий на установке в схеме моста переменного тока.

Параметры изделия	x	f , Гц	R , Ом	L , мкГн	d , мм	μ_r	σ , 10^6 См/м
А 20 $a=20$ мм	24	800	0,0013	5,045	2	120,6	5,5
Ст 3 $a=25$ мм	32	800	0,0009	5,115	1,7	110,0	6,7
9Х18 $a=10$ мм	15	5000	0,0110	2,734	2	75,5	1,6
Ст 30 $a=37$ мм	32	80	0,0007	9,101	2,5	180,3	4,0
У 7 $a=10$ мм	27	1000	0,0083	5,935	0,8	117,0	3,9

Выводы. Таким образом, в данной работе путем введения дополнительных функциональных зависимостей между электромагнитными и геометрическими параметрами объекта контроля, на основе ранее разработанного контактного электромагнитного преобразователя для контроля относительной магнитной проницаемости и удельной электрической проводимости трубчатых изделий, без существенного изменения схемы и методики проведения измерительных и расчетных операций, удалось одновременно определить дополнительный геометрический параметр – толщину стенки трубчатого изделия, что дает возможность существенно расширить возможности и области применения контактного вихретокового экстремального метода неразрушающего контроля трубчатых изделий.

Список литературы: 1. *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. 2. *Себко В.П., Фам Туан Хунг.* Экстремальный электромагнитный метод контроля параметров трубчатых проводящих изделий // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – Харьков: ХГПУ. – 2000. – Вып. 102. – С. 109 – 112. 3. *Себко В.П., Тюпа И.В., Филоненко Д.В.* Вихретоковый экстремальный трехпараметровый контроль трубчатых изделий // 36. науч. трудов НТУ "ХПИ". – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2004. – Вып. 102. – С. 109 – 112. 3. *Себко В.П., Тюпа И.В.* Двухпараметровый электромагнитный метод контроля магнитной проницаемости и электропроводности трубчатых изделий // Украинський метрологічний журнал. – 2001. – Вып.2. – С. 12 – 14. 5. Электрические измерения / Под ред. Е.С. Полищук. – К.: Вища шк., 1984. – 360 с.

Поступила в редакцию 31.09.2004