



МЕТОД МНОГОПАРАМЕТРОВЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ТОЛЩИНЫ, ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МАТЕРИАЛА И ТОЛЩИНЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

А. Я. ТЕТЕРКО¹, В. И. ГУТНИК¹, Г. Г. ЛУЦЕНКО², А. А. ТЕТЕРКО¹

¹Физ.-мех. ин-т им. Г. В. Карпенко НАН Украины. 79060, г. Львов, ул. Научная, 5. E-mail: skal@imp.lviv.ua

²УкрНИИ НК. 04071, г. Киев, ул. Набережно-Луговая, 8. E-mail: pev@ndt.com.ua

На основе концепции построения нелинейной обратной функции преобразования системы вихретоковый преобразователь-модуль обработки сигналов представлен метод многопараметрового контроля толщины, электропроводности материала и толщины защитного диэлектрического покрытия стенок и оболочек изделий из неферромагнитных материалов. Метод обеспечивает уменьшение до десятых долей процента оценку погрешностей контроля указанных параметров и соответственно повышение достоверности результатов диагностики состояния контролируемых объектов, а также характеризуется простотой его программной реализации в аппаратуре. Библиогр. 15, рис. 1.

Ключевые слова: нелинейная функция преобразования, модуль обработки сигналов, электропроводность материалов, оценка погрешности

В современной аппаратуре вихретокового (ВТ) контроля в задачах измерения толщины стенок и оболочек изделий и элементов конструкций, удельной электрической проводимости (УЭП) материала, а также толщины разного вида защитных покрытий реализуют так называемый метод измерения фазы информационного сигнала [1]. При этом информационный сигнал формируют с помощью векторного суммирования сигнала на выходе вихретокового преобразователя (ВТП) со вспомогательным сигналом компенсации таким образом, чтобы фаза информационного сигнала мало зависела от изменений зазора между ВТП и объектом контроля (ОК). Так как влияние зазора на сигнал ВТП является самым значительным мешающим фактором, то степень подавления его в информационном сигнале определяет основную составляющую методической погрешности ВТ измерений фазовым методом [1, 2]. Существует много способов такого формирования информационного сигнала, в частности, описанные в работах [3–5]. Однако нелинейный характер изменения сигнала ВТП при изменении зазора и других параметров в процессе контроля не позволяет в соответствии с указанным подходом, представляющим собой линейное преобразование сигнала ВТП, устранить указанную погрешность. Если на формирование сигнала ВТП в процессе контроля, например, толщины оболочки одновременно влияют три параметра, а именно: толщина, УЭП материала ОК и зазор или толщина диэлектрического покрытия, то методическая погрешность измерения толщины ОК еще возрастает. Поскольку обычно имеет ме-

сто естественное изменение УЭП материала ОК в пределах до 5...7 %, то практически настолько же увеличивается погрешность измерений.

Задачи мониторинга состояния стенок и оболочек ОК в процессе эксплуатации с целью прогнозирования скорости их коррозионного износа, степени деградации материала и других структурных повреждений материала элементов конструкций в авиации, энергетике и других областях, требуют существенного, до десятых долей процента, уменьшения погрешностей оценки измерения таких трех параметров, как толщина, УЭП материала и толщина диэлектрического покрытия. Так как влияние параметров системы «вихретоковый преобразователь-модуль обработки сигналов ВТП» (ВТП-МОС) имеет нелинейный и взаимозависимый характер [1], то решение задачи повышения точности многопараметрового контроля стенок и оболочек изделий современной техники и оборудования методами линейных преобразований сигнала ВТП оказывается невозможным. Решение указанной задачи многопараметрового ВТ контроля возможно на основе разработки нелинейных методов обработки сигнала вихретокового преобразователя [6-8].

В данной работе на основе развития концепции построения нелинейной модели обратной функции преобразования (ОФП) системы ВТП-МОС представлен метод решения задачи повышения точности ВТ измерений толщины, УЭП материала ОК и толщины его диэлектрического покрытия [8, 9]. Отметим, что ОФП по каждому из контролируемых параметров есть функцией измеряемых



значений многомерного вектора информационных параметров системы ВТП–МОС и соответственно не требует решения системы нелинейных уравнений для определения параметров ОК как это осуществляется в работах [6, 7], что обеспечивает эффективную аппаратную реализацию метода.

Основные положения метода. Разработанная в ФМИ им. Г. В. Карпенко НАН Украины концепция решения задач повышения точности ВТ контроля базируется на построении модели прямой и/или обратной нелинейной функции преобразования системы ВТП–МОС [8]. Модель как прямой, так и обратной функции преобразования системы строят на основе единого подхода методами приближения функций многих переменных, которые представляют таблицей значений вектора параметров ОК $x_k = (x_{1k}, \dots, x_{nk})^T$, заданных в $k = 1, \dots, M$ точках области изменений параметров ОК, и соответствующих им измеренных значений вектора информационных параметров $y_k = (y_{1k}, \dots, y_{nk})^T$. При этом ОФП непосредственно ставит в соответствие заданному параметру ОК x_p , $i = 1, \dots, n$ некоторую нелинейную зависимость от составляющих вектора информационных параметров.

Для i -й составляющей вектора параметров ОК модель обратной функции преобразования представлена здесь в следующем виде:

$$x_{iN} = q_i^T g(y), \quad i = 1, \dots, n, \quad (1)$$

где N – размерность модели; $q_i^T = (q_{0i}, q_{1i}, \dots, q_{Ni})$ – вектор $(N+1)$ коэффициентов модели; $g(y) = (1, g_1(y), \dots, g_N(y))^T$ – вектор ортогональных функций.

Модель ОФП (1) линейна относительно вектора неизвестных коэффициентов. Для их определения строят массив входных данных $\{x_k, y_k\}$, $k = 1, \dots, M$, значений вектора параметров ОК и соответствующих им значений вектора информационных параметров в заданной области изменений параметров ОК. Предварительно модель ОФП, с целью оптимизации условий контроля, может быть построена и проанализирована на основании данных вычислений прямой задачи, соответствующей заданной задаче измерения параметров ОК [1]. При этом входные данные могут приниматься как точные или с заданной погрешностью. Номинальную ОФП реальной системы ВТП–МОС строят на основании данных физического эксперимента.

Система уравнений для определения вектора неизвестных коэффициентов модели ОФП методом наименьших квадратов [10] в матричной форме имеет такой вид:

$$x = Yq, \quad x = (x_1, \dots, x_M)^T, \quad (2)$$

где Y – матрица информационных параметров.

Модель ОФП (1) далее представлена нами

многомерным полиномом. Такая модель допускает произвольное разбиение интервалов изменения параметров ОК, что важно на практике при подготовке контрольных образцов, и, кроме того, удобна для аппаратной реализации и анализа. Отметим, что точность ОФП определяется точностью входных данных и точностью определения коэффициентов модели. В свою очередь точность определения коэффициентов зависит от размерности N модели ОФП и количества точек аппроксимации M в заданной области изменения параметров ОК. Если количество точек аппроксимации по каждому из указанных выше трех параметров возрастает до 11, то система (2) содержит достаточно большое число уравнений ($M = 11^3$), что ведет к снижению точности определения вектора коэффициентов модели ОФП [11, 12]. Однако возможны варианты построения моделей ОФП, которые приводят к уменьшению ее размерности. В данной работе снижение размерности ОФП трехпараметровой задачи ВТ контроля сводится к построению модели ОФП системы ВТП–МОС с переменными коэффициентами.

Модель ОФП с переменными коэффициентами. Для трехпараметровой задачи ОФП системы ВТП–МОС, представленная многомерным полиномом (1), например, в виде полного куба, содержит $N = 20$ членов. Коэффициенты такой модели характеризуют чувствительность и ее изменение в заданной области измерения параметров ОК. Для уменьшения размерности модели ОФП нами предложена декомпозиция задачи построения ОФП путем сведения ее к двухпараметровым задачам, а именно: задачи построения частных ОФП для толщины оболочки и УЭП материала при заданных значениях зазора и задачи построения ОФП-2 для толщины диэлектрического покрытия (зазора) и УЭП материала, и далее на этой основе построение в целом двухпараметровой модели ОФП-1 системы с коэффициентами, зависящими от зазора [9].

Обозначим вектор параметров ОК рассматриваемой задачи, как это принято в ВТ контроле [1, 8], в безразмерных величинах:

$$x = (x_1, x_2, x_3)^T = (T, \beta, \alpha)^T, \quad (3)$$

где $\beta = R\sqrt{\omega\sigma\mu_0}$ – обобщенный параметр; σ – УЭП материала; $\omega = 2\pi f$ – частота тока возбуждения ВТП; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; R – эквивалентный радиус ВТП; $T = d/R$, d – толщина оболочки; $\alpha = h/R$, h – толщина диэлектрического покрытия или зазор между ВТП и поверхностью ОК.

Тогда модель ОФП-1 системы ВТП–МОС, представленная полным кубом с коэффициентами, зависящими от зазора, содержит вдвое мень-



ше членов. Для определения толщины оболочки ОФП-1 система будет иметь следующий вид:

$$T(\text{Re}, \text{Im}) = a_0 + a_1(\alpha)\text{Re} + a_2(\alpha)\text{Im} + a_3(\alpha)\text{Re Im} + a_4(\alpha)\text{Re}^2 + a_5(\alpha)\text{Im}^2 + a_6(\alpha)\text{Re}^2 \text{Im} + a_7(\alpha)\text{Re Im}^2 + a_8(\alpha)\text{Re}^3 + a_9(\alpha)\text{Im}^3, \quad (4)$$

где Re , Im – ортогональные компоненты информационного сигнала.

Модель ОФП-1 для определения УЭП материала оболочки будет отличаться коэффициентами, зависящими от зазора, а модели ОФП-2 представляют с постоянными коэффициентами в виде, аналогичном (4).

В соответствии с предлагаемым методом ВТП возбуждают одновременно токами двух частот. Первую из частот ω_1 выбирают из условия оптимальной чувствительности к толщине оболочки, вторую ω_2 – из условия оптимальной чувствительности к удельной электропроводности материала ОК и нечувствительности к изменению толщины оболочки. Условия оптимального выбора частот контроля согласно с общими положениями вихревого метода одновременно связаны с выбором эквивалентного радиуса R обмоток ВТП.

С целью формирования информационных сигналов u_1 и u_2 на каждой из частот, сигналы на выходе ВТП $u_{\text{ВТП1}}$ и $u_{\text{ВТП2}}$ компенсируют до нуля при установке его на контрольном образце с номинальными значениями толщины d_n , УЭП материала σ_n и зазора h_n . Тогда при установке ВТП на контролируемом объекте получают двухчастотный информационный сигнал, который представляет собой изменение сигнала ВТП относительно его

значений на контрольном образце:

$$u_1 = u_{\text{ВТП1}} - u_{n1}, u_2 = u_{\text{ВТП2}} - u_{n2}. \quad (5)$$

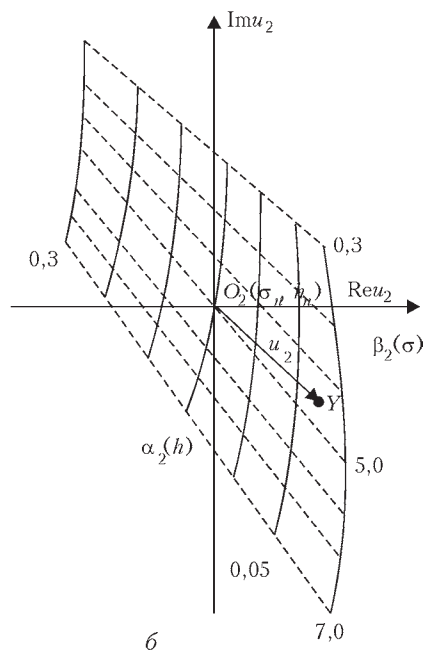
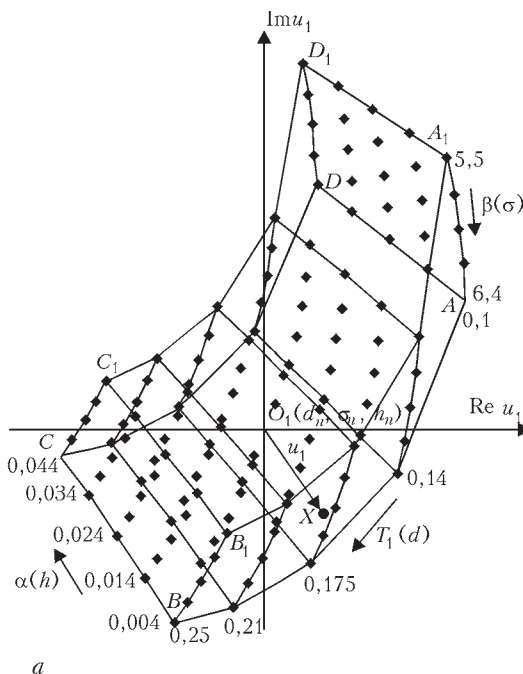
В процессе контроля измеряют ортогональные составляющие информационных сигналов u_1 и u_2 , на основании которых определяют параметры оболочки.

Обратные функции преобразования системы ВТП–МОС строят на основании данных калибровки, используя методы аппроксимации числовых функций. Для калибровки используют комплект контрольных образцов с известными значениями толщины и УЭП материала ОК в заданных диапазонах их изменений, а также комплект образцов зазора из диэлектрического материала в заданном диапазоне изменений толщины покрытия.

Построение ОФП системы с переменными коэффициентами. На рисунке, *a* в комплексной плоскости ($\text{Re}u_1, \text{Im}u_1$) представлен фрагмент области изменения информационного сигнала системы ВТП–МОС на частоте ω_1 при изменении относительного значения толщины оболочки $T_1 = d/R$, обобщенного параметра $\beta_1(\sigma)$ (как функции УЭП) и относительного значения зазора $\alpha_1 = h/R_1$ в заданной области изменения параметров ОК: $0,1 \leq T_1 \leq 0,25$; $5,5 \leq \beta_1 \leq 6,4$; $0,004 \leq \alpha_1 \leq 0,044$.

В результате компенсации сигнала ВТП на образце с номинальными значениями параметров ОК точка $O_1(d_n; \sigma_n; h_n)$ является началом координат при измерениях на первой частоте ω_1 ортогональных составляющих вектора информационного сигнала u_1 с концом в точке X области его изменений.

Аналогично вектор информационного сигнала u_2 , сформированный на второй частоте ω_2 , имеет начало в точке $O_2(\sigma_n; h_n)$ (рисунок, *б*) и конец в некоторой точке Y области его изменений. Пара-



Годографы информационных сигналов системы ВТП–МОС при изменении параметров ОК на частоте ω_1 (*a*) и ω_2 (*б*)



метрами, влияющими на формирование вектора информационного сигнала u_2 , являются обобщенный параметр $\beta_2(\sigma)$ и относительное значение зазора $\alpha_2 = h/R_2$. При этом из условия выбора частоты ω_2 изменения толщины ОК на сигнал ВТП не влияет. На частоте ω_2 область изменения параметров ОК выбрана такой: $3,0 \leq \beta_2 \leq 7,0$; $0,05 \leq \alpha_2 \leq 0,3$.

На рисунке, a точками обозначены значения параметров контрольных образцов. Комплект контрольных образцов толщины и УЭП материала ОК имеет P градаций по толщине d и Q градаций по УЭП σ и содержит $P \times Q$ образцов с различной комбинацией толщины и УЭП в заданных интервалах их изменений на ОК. Комплект контрольных образцов диэлектрических прокладок для моделирования толщины диэлектрического покрытия как зазора h имеет R градаций. Калибровку проводят последовательно на частоте ω_1 и ω_2 .

Процедура калибровки на первой частоте ω_1 состоит из R циклов при постоянных значениях зазора в заданном интервале его изменений $\{h_{\min}; h_{\max}\}$ и, таким образом, охватывает область из $M = P \times Q \times R$ точек значений параметров ОК. Рассмотрим один из циклов, например, первый при заданном минимальном значении зазора $h_1 = h_{\min}$ между ВТП и поверхностью контрольных образцов. Калибровка на этом цикле проводится по области ABB_1A_1A (рисунок, a). Программно формируют массив из $P \times Q$ заданных значений параметров контрольных образцов и соответствующих им измеренных значений ортогональных составляющих вектора u_1 информационного сигнала. При этом значения параметров контрольных образцов удобно представлять не в безразмерных величинах, а в реальном масштабе:

$$\langle d_k, \sigma_k; \text{Re}u_{1k}, \text{Im}u_{1k} \rangle, \quad k = 1, \dots, (P \times Q) \quad \text{при} \quad h_1 = h_{\min}. \quad (6)$$

На последующих циклах изменяют зазор до $h_R = h_{\max}$, при котором проводят калибровку по области DCC_1D_1D (рисунок, a), и формируют множество из R массивов типа массива (6). Для каждого массива из этого множества методом аппроксимации числовых функций строят R частных функциональных зависимостей толщины ОК от измеренных значений составляющих вектора u_1 информационного сигнала типа (4), что представим в таком общем виде:

$$d_i = f_i(\text{Re}u_1, \text{Im}u_1; A_i, h_i) \quad \text{при} \quad h_i = \text{const}, \quad i = 1, \dots, R. \quad (7)$$

В представлении (7) $A_i = (a_{0i}, \dots, a_{Ni})^T$ – вектор коэффициентов, который для каждой частной функции $f_i(*)$ различный в зависимости от зазора h_i . Для каждой из составляющих вектора коэффици-

ентов A_i на основании частных функциональных зависимостей (7) формируют $(N + 1)$ массивов значений составляющих вектора и соответствующих им значений зазора:

$$\langle a_{ki}, h_i \rangle, \quad k = 0, \dots, N, \quad i = 1, \dots, R, \quad (8)$$

и методом аппроксимации функций определяют составляющие вектора коэффициентов $A(h)$ в области $M = P \times Q \times R$ как функций зазора

$$A(h) = (a_0(h), \dots, a_N(h))^T, \quad h_{\min} \leq h \leq h_{\max}. \quad (9)$$

В результате получаем ОФП-1(d) системы для определения толщины оболочки по измеренным значениям вектора информационного сигнала u_1 и зазора:

$$d = f_1(\text{Re}u_1, \text{Im}u_1; A(h)), \quad (10)$$

которая в развернутом виде соответствует функции (4), где составляющие вектора коэффициентов $A(h)$ целесообразно представлять одномерным полиномом.

Аналогично на основании данных, представленных указанным выше множеством из R массивов типа (8), находят коэффициенты ОФП-1(σ) для определения УЭП по измеренным значениям вектора информационного сигнала u_1 и зазора

$$\sigma = f_2(\text{Re}u_1, \text{Im}u_1; C(h)). \quad (11)$$

Значение зазора в свою очередь определяют из ОФП-2(h) системы по результатам измерений составляющих вектора информационного сигнала u_2 .

Процедура калибровки на частоте ω_2 , в результате которой строят ОФП-2 системы, аналогична таковой процедуре на частоте ω_1 . Для калибровки используют Q образцов из комплекта контрольных образцов с различными значениями УЭП материала и R образцов для установки зазора из комплекта диэлектрических прокладок разной толщины. Формируют массив из $Q \times R$ заданных значений параметров контрольных образцов и соответствующих им измеренных значений ортогональных составляющих вектора u_2 информационного сигнала:

$$\langle \sigma_q, h_q; \text{Re}u_{2q}, \text{Im}u_{2q} \rangle, \quad q = 1, \dots, (Q \times R). \quad (12)$$

На основании данных массивов (12) находят векторы коэффициентов $V = (v_0, \dots, v_N)^T$ и $W = (w_0, \dots, w_N)^T$ ОФП-2 системы для определения зазора и УЭП материала по результатам измерений на частоте ω_2 :

$$h = f_3(\text{Re}u_2, \text{Im}u_2; V), \quad (13)$$

$$\sigma = f_4(\text{Re}u_2, \text{Im}u_2; W). \quad (14)$$



Представленная, например, полным кубом двумерная обратная функция преобразования системы для определения зазора ОФП-2(h) имеет вид:

$$h(\text{Re}u_2, \text{Im}u_2; V) = v_0 + v_1 \text{Re}u_2 + v_2 \text{Im}u_2 + v_3 \text{Re}u_2 \text{Im}u_2 + v_4 \text{Re}u_2^2 + v_5 \text{Im}u_2^2 + v_6 \text{Re}u_2^2 \text{Im}u_2 + v_7 \text{Re}u_2 \text{Im}u_2^2 + v_8 \text{Re}u_2^3 + v_9 \text{Im}u_2^3. \quad (15)$$

Аналогичным образом представляют и ОФП-2(σ) системы для определения УЭП материала ОК. Как отмечалось выше, значения параметров ОК при построении ОФП реальной системы целесообразно вносить в реальном масштабе. Кроме того, ОФП системы в ряде случаев удобно представлять в приращениях (изменениях) параметров ОК относительно их номинальных или других заданных значений [13]:

$$\Delta d_i = d_i - d_n, \quad \Delta \sigma_i = \sigma_i - \sigma_n, \quad \Delta h_i = h_i - h_n, \quad i = 1, \dots, M. \quad (16)$$

Особенности метода. Обратные функции преобразования системы ВТ контроля (10), (11), (13), (14), определяющие вектор параметров контролируемого объекта, ставят в соответствие каждому из параметров ОК функциональную зависимость от измеренных значений составляющих вектора информационного сигнала, представленную в виде аддитивных моделей типа (4) и (15). При этом декомпозиция задачи построения ОФП системы многопараметрового контроля позволяет уменьшить размерность составляющих ее моделей ОФП-1 и ОФП-2 с целью повышения точности их аппроксимации.

Предложенный подход в решении обратной задачи многопараметровых ВТ измерений параметров ОК существенно упрощает реализацию модуля обработки сигналов ВТП, в котором осуществляется формирование информационных сигналов (5), измерение ортогональных компонент этих сигналов и их функциональное преобразование. В отличие от сложностей фазового метода [1–5] процедура формирования информационных сигналов выполняется за один шаг компенсации сигнала ВТП на контрольном образце с номинальными значениями параметров ОК. Для формирования массивов данных (6), (12) в соответствии с процедурой калибровки системы и определения коэффициентов ОФП-1 и ОФП-2 в автономных приборах ВТ контроля следует использовать внешний ПК, что упрощает программную реализацию модуля обработки сигналов ВТП.

Для оценки потенциальной точности определения толщины УЭП материала ОК и толщины его диэлектрического покрытия на основе рассмо-

треного метода были построены модели ОФП-1 и ОФП-2 системы ВТП – МОС с использованием решения известной прямой задачи о поле кругового витка с переменным током над электропроводящей пластиной [1]. Значения параметров ОК задавали по $M = 11^3$ точкам в области $T = 0,1, \dots, 0,25$; $\beta = 2,0, \dots, 2,2$; $\alpha = 0,004, \dots, 0,044$. При этом приведенная погрешность оценки толщины ОК и зазора не превышала 0,05 %, а обобщенного параметра $\beta - 0,2$ %. Для ОФП-2, построенной по $M = 5 \times 6$ точкам в заданной области изменения параметров ОК, а именно: $\beta = 3, 4, 5, 6, 7$; $\alpha = 0,05; 0,1; 0,015; 0,2; 0,25; 0,3$, приведенные значения погрешностей не превышали 0,6 %. Видно, что с увеличением числа точек аппроксимации точность определения параметров ОК возрастает.

В рамках данного метода возможны варианты, позволяющие существенно уменьшить объем эксперимента при калибровке системы. Так, для определения толщины d (а также УЭП материала) можно ограничиться построением частной функции ОФП-1 (7) при некотором заданном, например, максимальном значении зазора:

$$d_i = f_i^*(\text{Re}u_1, \text{Im}u_1; A(h^*)) \text{ при } h^* = h_i = \text{const}. \quad (17)$$

При этом обычно используют устройство фиксации положения ВТП при достижении им заданного значения зазора, который измеряют, например, с применением емкостного преобразователя [14]. В нашем случае значение зазора определяется ОФП-2(h) (15). Заметим, что применение устройства фиксации положения ВТП значительно усложняет конструкцию датчика. Для устранения этого недостатка можно воспользоваться идеей фиксации значений параметров информационных сигналов u_1 и u_2 в процессе приближения ВТП к поверхности ОК [15] в тот момент времени, когда зазор становится равным заданному значению.

Для обеспечения заданной точности контроля необходимо, чтобы ошибки входных данных при построении ОФП-1 и ОФП-2 были меньшими заданных ошибок определения параметров ОК. При этом изготовление и аттестация контрольных образцов для калибровки по толщине d и зазору h и обеспечение точности измерений информационных параметров не вызывает трудностей. Вместе с тем аттестация образцов с малыми погрешностями по УЭП σ проблематична из-за отсутствия соответствующих средств измерения.

Однако важной особенностью рассмотренного метода является то, что при построении ОФП-1(d) и ОФП-2(h) значение УЭП не вводят. Поэтому погрешность образцов по УЭП не влияет на точность определения толщины ОК d и покрытия (зазора) h . Вместе с тем влияние УЭП в ОФП-1(d) и ОФП-2(h) учитывается в результате того, что указанные функции построены по всем



точкам калибровки системы. Принимая во внимание то, что при диагностике степени деградации материала ОК в процессе эксплуатации интерес представляет изменение УЭП от некоторого первоначального значения, на практике повышение точности контроля изменений УЭП достигают методологическими приемами с использованием реперных зон на конструкции ОК [13] или другими подходами. Отметим также, что измерение УЭП согласно данному методу осуществляется на двух частотах и соответственно характеризуется различной глубиной проникновения вихревых токов. Поскольку структурные изменения материала ОК под действием нагрузок и среды в процессе эксплуатации развиваются с приповерхностного слоя, то измерение УЭП на основании обратных функций преобразования (11) и (14) может быть важной характеристикой при диагностике степени деградации материала ОК.

Выводы

Разработан метод построения модели нелинейной ОФП системы ВТП–МОС для измерения с малыми погрешностями толщины, удельной электропроводности ОК и толщины диэлектрического покрытия в задачах технической диагностики. С целью повышения точности аппроксимации ОФП по данным калибровки системы и соответственно точности вихретокового контроля, предложена декомпозиция задачи построения ОФП путем сведения ее к двухпараметровым задачам и построению моделей ОФП по параметрам ОК меньшей размерности. Оценка точности определения параметров ОК на основании их моделей ОФП, представленных двумерными кубичными полиномами, показала, что погрешности измерения параметров могут не превышать десятых долей процента. При этом использование указанного типа моделей ОФП системы существенно упрощает их аппаратную реализацию.

The concept of plotting the nonlinear inverse function of conversion of «eddy current transducer – signal processing module» system was used as the basis for presentation of the method of multiparametral control of thickness, electric conductivity of material and thickness of protective dielectric coating of the wall and shells of items from non-ferromagnetic materials. Method ensures reduction of evaluation of error in control of the above parameters to tens fractions of a percent and improvement of validity of the results of diagnostics of controlled object state, as is also characterized by simplicity of its program realization in the instrumentation. 15 References, 1 Figure.

Keywords: method of multiparametral eddy current changes, control of coating thickness, parameter control error, diagnostics of controlled object state

1. *Незрушающий контроль*. Справочник в 8-ми т. Т. 2. Вихретоковый контроль, кн. 2 / Под ред. В. В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2006. – 954 с.
2. *Гордиенко В. И., Рыбачук В. Г., Тетерко А. Я.* Влияние зазора на точность фазовых измерителей удельной электрической проводимости // *Техн. электродинамика*. – 1988. – № 5. – С. 96–101.
3. *А. с. 298880 СССР, МКИ G 01 N 27/04, G 01 r 27/02.* Способ контроля удельного сопротивления электропроводных изделий / В. П. Денискин, А. С. Попов, Л. И. Трахтенберг. – № 1359833/18-10; Заявл. 25.08.69; Опубл. 16.03.71, Бюл. № 11.
4. *А. с. 828062 СССР, МКИ G 01 N 27/90.* Способ электромагнитного контроля и устройство для его осуществления / А. С. Бакунов, Е. Г. Беликов, Ю. Я. Останин. – № 2784589/25-28; Заявл. 22.06.79; Опубл. 07.05.81, Бюл. № 17.
5. *Пат. UA 98206 C2, МПК G01N 27/90.* Спосіб вимірювання електропровідності немагнітних матеріалів / В. М. Учанин. – Заявка № а 2010 10467; Заявл. 30.08.2010; Опубл. 25.04.2012, Бюл. № 8.
6. *Федосенко Ю. К.* Основы нелинейной теории многопараметрового вихретокового контроля металлических объектов // *Дефектоскопия*. – 1981. – № 6. – С. 38–45.
7. *Федосенко Ю. К.* Численный анализ систем уравнений нелинейной теории многопараметрового вихретокового контроля металлических объектов // *Там же*. – 1981. – № 7. – С. 18–23.
8. *Тетерко А. Я., Назарчук З. Т.* Селективна вихрострумова дефектоскопія. – Львів: Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка НАН України, 2004. – 248 с.
9. *Пат. UA 102446 C2, МПК G01N 27/90.* Спосіб вихрострумових селективних вимірювань параметрів оболонок / А. Я. Тетерко, Г. Г. Луценко, В. І. Гутник. – Заявка № а 201113535; Заявлено 17.11.2011; Опубл. 10.07.2013. Бюл. № 13.
10. *Лоусон Ч., Хенсон Р.* Численное решение задач методом наименьших квадратов. – М.: Наука, 1986. – 232 с.
11. *Новицкий В. П., Зограф И. А.* Оценка погрешностей результатов измерений. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 302 с.
12. *Беклемешев Д. В.* Дополнительные главы линейной алгебры. – М.: Наука, 1983. – 333 с.
13. *Діагностика технічного стану авіаконструкцій після довготривалої експлуатації* / О. П. Осташ, Д. С. Ківа, В. М. Учанин та ін. // *Техн. діагностика и неразруш. контроль*. – 2013. – № 2. – С. 15–22.
14. *US Pat. 6593738, G 01N 27/72, G 01B 007/10, G 01R 033/12.* Method and apparatus for measuring thickness of conductive films with use of inductive and capacitive sensors / Kesil B., Margulis D., Gershenson E.(UA). – Publ. 07.05.2003.
15. *Пат. UA 103657 C2, МПК G01N 27/90, G01R 33/12.* Вихрострумовий спосіб вимірювання питомої електропровідності немагнітних матеріалів / А. Я. Тетерко, В. М. Учанин, В. І. Гутник, О. А. Тетерко. – Заявка №а 2011 10735; Заявл. 06.09.2011; Опубл. 11.11.2013. Бюл. № 21.

Поступила в редакцию
12.05.2014