

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ

УДК 620.1.08

DOI: 10.22213/2413-1172-2024-101-114

Метод двухпараметровой обработки сигналов вихретоковых измерительных преобразователей толщиномеров неэлектропроводящих покрытий на немагнитных металлических основаниях

М. В. Сясько, аспирант, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

Существующий известный амплитудный вихретоковый метод измерения толщины неэлектропроводящего покрытия на немагнитном металлическом основании не обеспечивает современные потребности в точности измерения. Сильное влияние на результат измерений оказывает изменение удельной электрической проводимости основания. Целью данного исследования является повышение достоверности измерений толщины неэлектропроводящих покрытий на немагнитных металлических основаниях за счет учета (подавления) влияния удельной электрической проводимости оснований. Для достижения указанной цели использован трехобмоточный трансформаторный скомпенсированный вихретоковый преобразователь. Его выходной сигнал в комплексном виде представлен действительной и мнимой составляющими на комплексной плоскости, что позволяет реализовать амплитудно-фазовый метод вихретокового неразрушающего контроля. Описан разработанный метод двухпараметровой обработки сигнала, основанный на алгоритме определения принадлежности точки многоугольнику. Для его реализации используется двухмерная градуировка толщиномеров с использованием нескольких образцовых оснований с разной удельной электрической проводимостью, которая на комплексной плоскости отображается в виде веерообразной сетки. Указанный алгоритм определяет, какому участку этой сетки принадлежит сигнал вихретокового преобразователя, а порядковый номер определяемого участка является одновременно мерой толщины покрытия и удельной электрической проводимости основания как независимых величин. Описана методика выбора количества градуировочных точек, основанная на выборе оптимального интервала между ними по критериям вероятности распределения результатов измерений. Разработана установка – имитатор толщины неэлектропроводящих покрытий, соединяемая двухсторонней связью с градуируемым толщиномером и реализующая его автоматическую градуировку. Приведены результаты испытания реализованного метода измерения толщины неэлектропроводящего покрытия на немагнитном металлическом основании, показавшие уменьшение отклонения результатов измерения толщины покрытия под влиянием удельной электрической проводимости основания на два порядка.

Ключевые слова: вихретоковый метод измерений, толщиномер покрытий, амплитудно-фазовый алгоритм, двухмерная градуировка.

Введение

Для измерения толщины h неэлектропроводящего покрытия на немагнитном металлическом основании регламентирован амплитудный метод вихретокового вида неразрушающего контроля (ГОСТ Р ИСО 2360–2021). Как известно, работа вихретоковых толщиномеров неэлектропроводящих покрытий основана на том, что высокочастотное электромагнитное поле, формируемое обмоткой W вихретокового преобразователя (ВТП), возбуждает вихревые токи в немагнитном металлическом основании под неэлектропроводящим покрытием, на которое установлен ВТП (рис. 1). При этом плотность вихретоковых токов и картина создаваемого ими электромагнитного

поля зависит от h , определяющего расстояние между обмоткой W и поверхностью немагнитного металлического основания. В свою очередь, изменение картины электромагнитного поля, окружающего обмотку ВТП, приводит к изменению комплексного сопротивления обмотки, которое используется в качестве информативного параметра – показателя толщины h покрытия на немагнитном металлическом основании, зависимость между которыми устанавливается посредством градуировки с использованием эталонов толщины покрытия [1].

В большинстве практических применений обмотка W является частью автогенераторной схемы, например, такой, как на рисунке 2 [2].

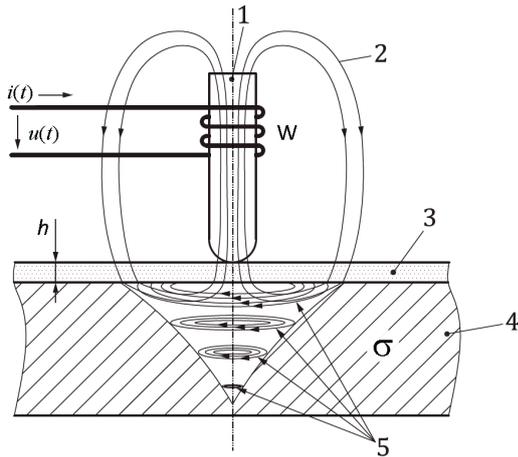


Рис. 1. Структура чувствительного элемента абсолютного однообмоточного вихретокового преобразователя и объекта контроля с неэлектропроводящим покрытием: 1 – сердечник с обмоткой W ; 2 – высокочастотное магнитное поле; 3 – неэлектропроводящее покрытие; 4 – немагнитное металлическое основание; 5 – вихревые токи; $i(t)$ – ток возбуждения; $u(t)$ – сигнал вихретокового преобразователя

Fig. 1. The structure of the sensing element of the absolute single-winding eddy-current probe and the test object with a non-conductive coating: 1 - core with winding W ; 2 - high-frequency magnetic field; 3 - non-conductive coating; 4 - non-magnetic base metal; 5 - eddy currents; $i(t)$ - excitation current; $u(t)$ - eddy-current probe signal

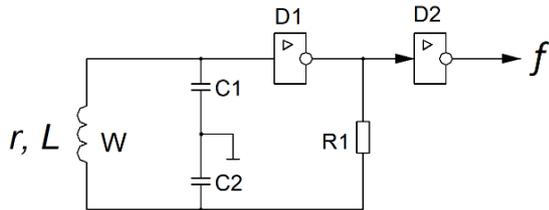


Рис. 2. Автогенераторная схема вихретокового преобразователя

Fig. 2. Oscillator circuit of the eddy-current probe

Выходным сигналом ВТП, реализованным на базе автогенераторной схемы, является резонансная частота f , которая определяется по формуле

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\left(\frac{C1C2}{C1+C2}\right)}}, \quad (1)$$

где $L = L_0 - L_{вн}(h)$ – индуктивность обмотки W ; L_0 – собственная индуктивность обмотки W при $h = \infty$; $L_{вн}(h)$ – вносимая индуктивность.

На результаты измерений оказывают влияние ряд мешающих параметров, в частности удельная электрическая проводимость основания σ [3–5]. На рисунке 3 приведена экспериментально снятая зависимость $f(h)$ при $\sigma = 5, 17$ и 58 МСм/м для серийно выпускаемого вихретокового преобразователя ПД1 толщиномера покрытий «Константа К6».

Как правило, градуировка толщиномера производится на образцовом основании (ОО), σ_0 которого соответствует некоему базовому (среднему) значению. Если при измерении h значение $\sigma_{ок}$ объекта контроля (ОК) отличается от σ_0 , то будет наблюдаться мультипликативное смещение $\Delta f(h, \sigma)$, которое является причиной возникновения отклонения результатов измерений $\Delta h(\sigma)$. Характер зависимости $\Delta h(\sigma)$ для вихретокового преобразователя ПД1 приведен на рисунке 4.

Типовые методики компенсации Δh предполагают проведение двухточечной калибровки электромагнитного толщиномера на основании, σ которого соответствует $\sigma_{ок}$, например, на ОК без покрытия ($h = 0$) и на нем же с установленной мерой толщины покрытия (пленкой), соответствующей диапазону измерения ($h = h_d$).

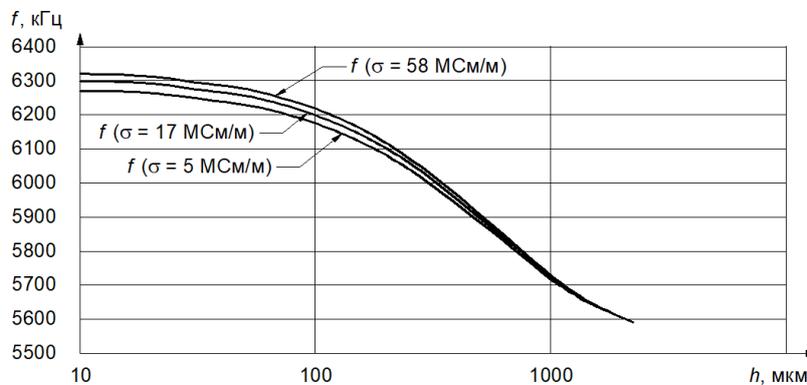


Рис. 3. Зависимость $f(h)$ для вихретокового преобразователя ПД1 при $\sigma = 5, 17$ и 58 МСм/м (градуировочные характеристики)

Fig. 3. Dependence $f(h)$ for eddy-current probe PD1 with $\sigma = 5, 17$ and 58 MSm/m (calibration characteristics)

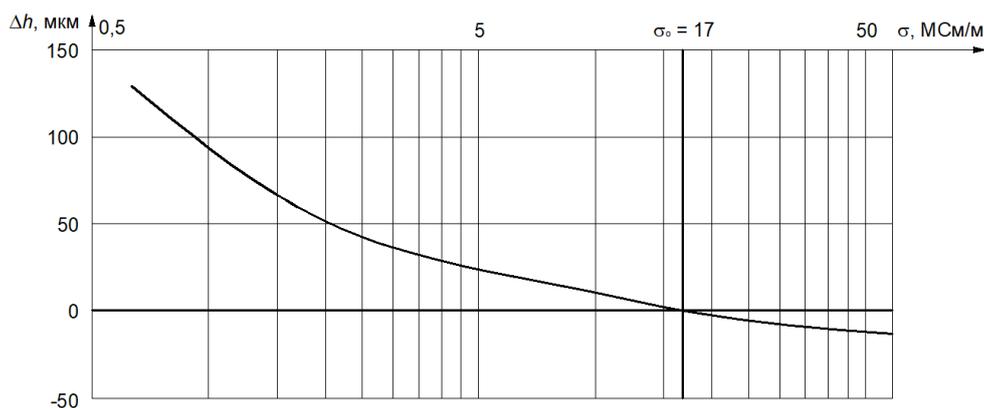


Рис. 4. Характер зависимости $\Delta h(\sigma)$

Fig. 4. The nature of the dependence $\Delta h(\sigma)$

Однако опыт эксплуатации электромагнитных толщиномеров [6, 7] показывает, что в ряде технологических процессах производства, а также при эксплуатации изделий самого широкого назначения, встречаются ситуации, в которых такой возможности нет, например:

- при измерении на полностью окрашенном изделии, на котором нет возможности снять покрытие с какого-нибудь участка поверхности для проведения калибровки ВТП (при входном контроле, в процессе эксплуатации и др.);
- когда значение σ имеет существенную девиацию по поверхности основания изделия или от изделия к изделию;
- при измерении на изделиях, имеющих разную температуру по поверхности, приводящую к вариации σ .

Проведенные ранее исследования, например [8], показывают, что влияние мешающих параметров приводит к возникновению существенных различий между заявляемыми и реально достижимыми метрологическими характеристиками толщиномеров покрытий.

Исходя из рассмотренного выше можно констатировать, что использование методов, регламентируемых нормативной документацией, например ГОСТ 31993–2013, технических средств и методик применения, не обеспечивают единства и требуемой точности измерения толщины неэлектропроводящих покрытий на немагнитных металлических основаниях и современных требований к погрешности измерений толщины лакокрасочных покрытий, регламентированных ГОСТ 31993–2013, и анодно-окисных покрытий, регламентированных ГОСТ 9.031–74.

Целью данной работы является повышение достоверности измерений толщины неэлектропроводящих покрытий на немагнитных металлических основаниях за счет учета (подавления)

влияния удельной электрической проводимости оснований путем решения комплексной проблемы совершенствования методов обработки сигналов вихретоковых преобразователей, конструкции вихретоковых толщиномеров, технологии моделирования вихретоковых преобразователей и метрологического обеспечения толщиномеров покрытий.

Материалы и методы исследования

Для достижения указанной цели представляет интерес использование трехобмоточного трансформаторного скомпенсированного ВТП и методики выделения информативных параметров, основанной на двухпараметровой обработке сигнала, содержащего действительную и мнимую составляющие на комплексной плоскости, с применением двухмерной градуировки, реализующих амплитудно-фазовый метод вихретокового вида неразрушающего контроля. Предложенный метод является амплитудно-фазовым методом вихретокового вида неразрушающего контроля, однако формулировка описания амплитудно-фазового метода, утвержденная в ГОСТ Р 55611-2013, п. 3.2.3 устарела. Ее следует сформулировать следующим образом: амплитудно-фазовый метод – это метод вихретокового неразрушающего контроля, основанный на измерении одного или нескольких комплексных параметров сигнала ВТП.

Многopараметровые измерения с применением вихретоковых преобразователей рассматривались авторами [9, 10]. В обоих случаях для обеспечения достаточной стабильности характеристик ВТП предполагается переход от параметрической к трансформаторной схеме ВТП.

Структурная схема трехобмоточного трансформаторного скомпенсированного ВТП представлена на рисунке 5.

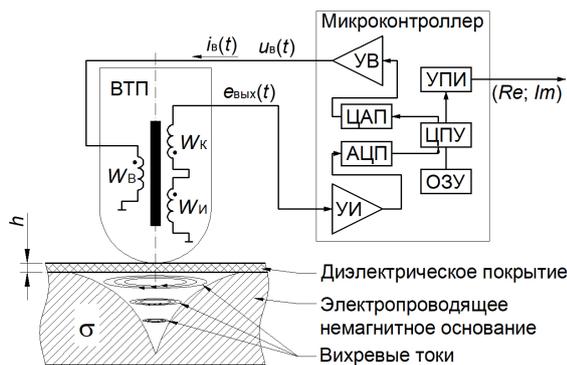


Рис. 5. Структурная схема трехобмоточного трансформаторного скомпенсированного вихретокового преобразователя

Fig. 5. Block diagram of a three-winding transformer compensated eddy-current probe

Он содержит: обмотку возбуждения W_b , по которой протекает ток возбуждения $i_b(t)$; встреч-

но включенные измерительную W_i и компенсационную W_k обмотки, для которых выходной сигнал $e_{\text{вых}}(t) = 0$ при $h = \infty$; микроконтроллер со встроенными ЦАП, усилителем возбуждения УВ, формирующими синусоидальное напряжение возбуждения фиксированной частоты, усилителем УИ, АЦП и вспомогательным цифровым модулем. Выходной сигнал ВТП в комплексном виде, представленный действительной и мнимой составляющими на комплексной плоскости $(Re; Im)$, передается с помощью устройства последовательного интерфейса связи УПИ на вход устройства обработки и представления результатов измерения.

Изменение выходного сигнала $\dot{E}_{\text{вых}}(h, \sigma)$ можно изобразить на комплексной плоскости в виде двух групп локальных годографов изменения h при фиксированном значении σ и изменения σ при фиксированном значении h (рис. 6).

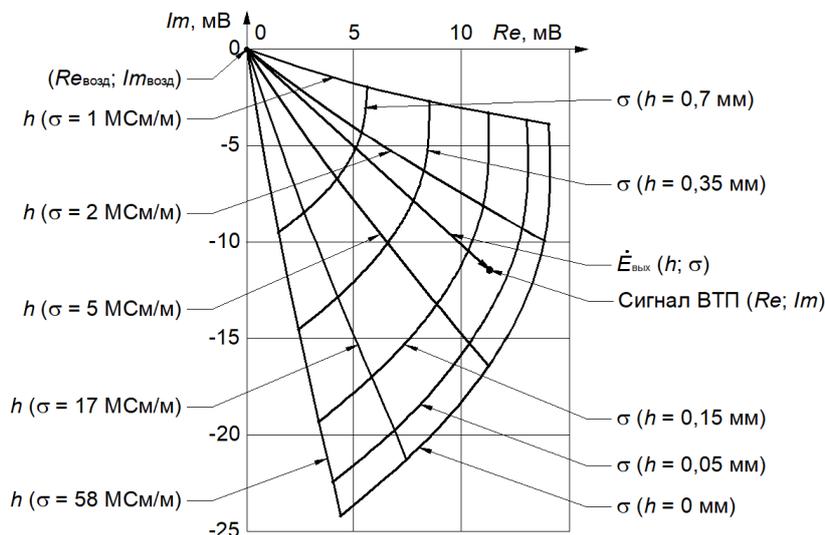


Рис. 6. Условное изображение локальных годографов сигнала вихретокового преобразователя на комплексной плоскости

Fig. 6. Conventional representation of local hodographs of the signal of an eddy current transducer on a complex plane

Метод двухпараметровой обработки сигналов вихретоковых преобразователей

Предлагаемый метод заключается в использовании двумерной градуировки [11, 12]. Вместо градуировки ВТП на одном ОО, значение σ которого соответствует некоему выбранному среднему значению, необходимо производить градуировку ВТП на наборе ОО, значения σ_i которых будут разными и будут перекрывать весь диапазон актуальных значений σ .

Градуировочная характеристика будет иметь вид веерообразной сетки на плоскости, подобный локальным годографам на рисунке 6. В таблич-

ном виде градуировочная характеристика будет иметь вид, представленный в таблице 1.

Если сетка градуировочной характеристики будет достаточно частой, перед алгоритмом обработки измерительной информации ставится только задача определения, какому участку этой сетки соответствует точка сигнала $\dot{E}_{\text{вых}}(h, \sigma)$, полученного при измерении. Очевидно, что для эффективной работы предложенного метода необходим большой набор градуировочных точек (порядка нескольких сотен).

Блок-схема алгоритма, реализующего предлагаемый метод, изображена на рисунке 7.

Таблица 1. Двухмерная градуировочная таблица

Table 1. Two-dimensional calibration table

h	σ			
	σ_1	σ_2	-//-	
h_0	$Re\ h_0, \sigma_1;$ $Im\ h_0, \sigma_1$	$Re\ h_0, \sigma_2;$ $Im\ h_0, \sigma_2$	-//-	$Re\ h_0, \sigma$ -столбец; $Im\ h_0, \sigma$ -столбец
h_1	$Re\ h_1, \sigma_1;$ $Im\ h_1, \sigma_1$	$Re\ h_1, \sigma_2;$ $Im\ h_1, \sigma_2$	-//-	$Re\ h_1, \sigma$ -столбец; $Im\ h_1, \sigma$ -столбец
h_2	$Re\ h_2, \sigma_1;$ $Im\ h_2, \sigma_1$	$Re\ h_2, \sigma_2;$ $Im\ h_2, \sigma_2$	-//-	$Re\ h_2, \sigma$ -столбец; $Im\ h_2, \sigma$ -столбец
-//-	-//-	-//-	-//-	-//-
h -строка	Re -строка, $\sigma_1;$ Im -строка, σ_1	Re -строка, $\sigma_2;$ Im -строка, σ_2	-//-	Re -строка, σ -столбец; Im -строка, σ -столбец

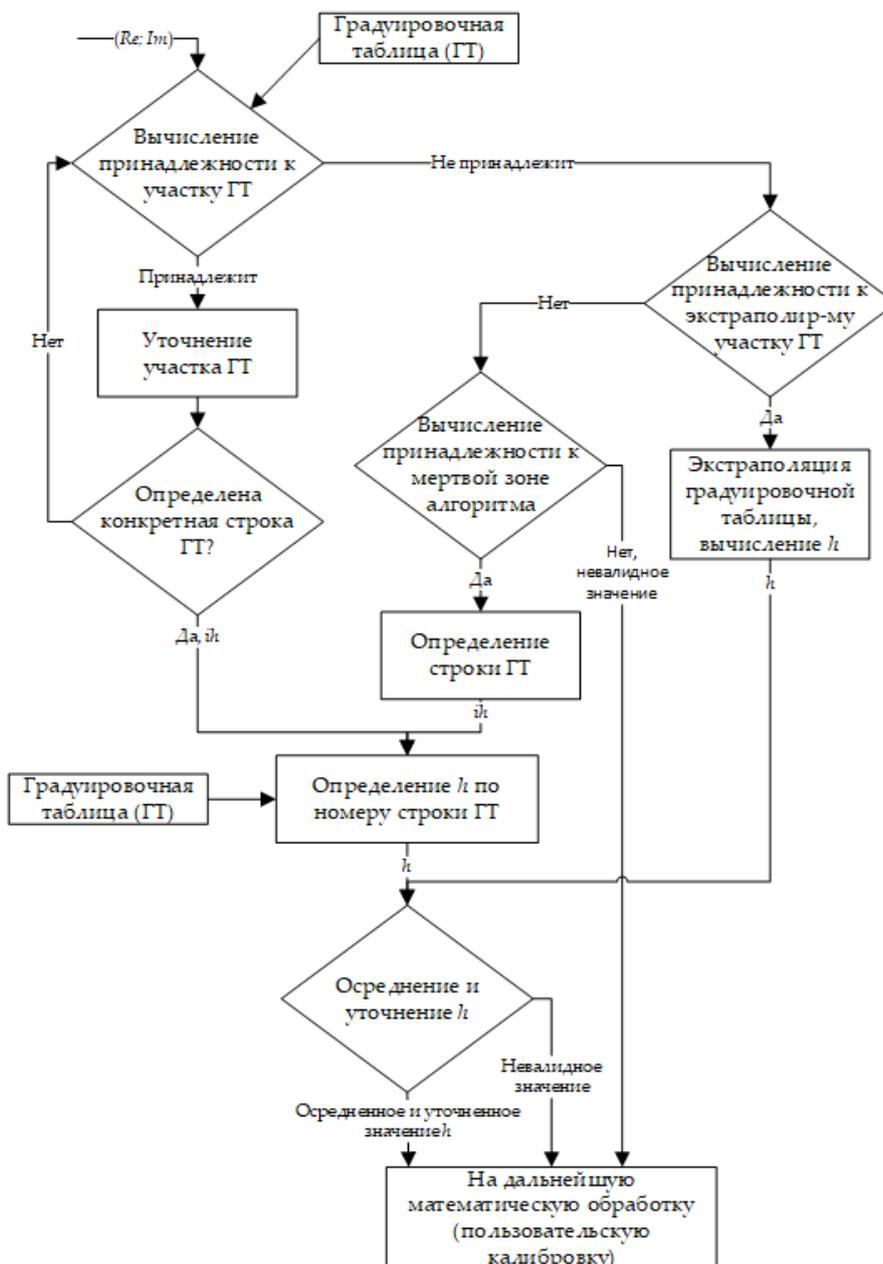


Рис. 7. Блок-схема алгоритма двухпараметровой обработки сигнала вихретокового преобразователя

Fig. 7. Block diagram of the algorithm for two-parameter signal processing of an eddy current transducer

Алгоритм определения принадлежности сигнала к одному из участков градуировочной характеристики [13], ограниченному на плоскости четырьмя линиями сетки, состоит из следующих действий.

1. Определяются начальные условия $n = 0$, где n – временная переменная.

2. Проводится проверка нижней границы участка градуировочной таблицы по условию (2). Если условие выполняется, то производится инкрементация $n = n + 1$.

$$\begin{cases} \text{Im}_{h,\sigma} \leq \text{Im} \langle \text{Im}_{h+1,\sigma} \text{ или } \text{Im}_{h,\sigma} \geq \text{Im} \rangle \text{Im}_{h+1,\sigma} \\ \text{Re} \geq \frac{(\text{Re}_{h,\sigma} - \text{Re}_{h+1,\sigma})(\text{Im} - \text{Im}_{h,\sigma})}{\text{Im}_{h,\sigma} - \text{Im}_{h+1,\sigma}} + \text{Re}_{h,\sigma} \end{cases} \quad (2)$$

3. Проводится проверка верхней границы участка градуировочной таблицы по условию (3). Если условие выполняется, то производится инкрементация $n = n + 1$.

$$\begin{cases} \text{Im}_{h,\sigma+1} \leq \text{Im} \langle \text{Im}_{h+1,\sigma+1} \text{ или } \text{Im}_{h,\sigma+1} \geq \text{Im} \rangle \text{Im}_{h+1,\sigma+1} \\ \text{Re} \geq \frac{(\text{Re}_{h,\sigma+1} - \text{Re}_{h+1,\sigma+1})(\text{Im} - \text{Im}_{h,\sigma+1})}{\text{Im}_{h,\sigma+1} - \text{Im}_{h+1,\sigma+1}} + \text{Re}_{h,\sigma+1} \end{cases} \quad (3)$$

4. Проводится проверка правой границы участка градуировочной таблицы по условию (4). Если условие выполняется, то производится инкрементация $n = n + 1$.

$$\begin{cases} \text{Im}_{h+1,\sigma} \leq \text{Im} \langle \text{Im}_{h+1,\sigma+1} \text{ или } \text{Im}_{h+1,\sigma} \geq \text{Im} \rangle \text{Im}_{h+1,\sigma+1} \\ \text{Re} \geq \frac{(\text{Re}_{h+1,\sigma} - \text{Re}_{h+1,\sigma+1})(\text{Im} - \text{Im}_{h+1,\sigma})}{\text{Im}_{h,\sigma+1} - \text{Im}_{h+1,\sigma+1}} + \text{Re}_{h+1,\sigma} \end{cases} \quad (4)$$

5. Проводится проверка левой границы участка градуировочной таблицы по условию (5).

Если условие выполняется, то производится инкрементация $n = n + 1$.

$$\begin{cases} \text{Im}_{h,\sigma} \leq \text{Im} \langle \text{Im}_{h,\sigma+1} \text{ или } \text{Im}_{h,\sigma} \geq \text{Im} \rangle \text{Im}_{h,\sigma+1} \\ \text{Re} \geq \frac{(\text{Re}_{h,\sigma} - \text{Re}_{h,\sigma+1})(\text{Im} - \text{Im}_{h,\sigma})}{\text{Im}_{h,\sigma} - \text{Im}_{h,\sigma+1}} + \text{Re}_{h,\sigma} \end{cases} \quad (5)$$

6. Проводится проверка количества совпадения условий. Если $n = 1$ или $n = 3$, то это означает, что сигнал принадлежит анализируемому участку градуировочной характеристики.

Ввиду большого количества участков на градуировочной характеристике вычисление производится методом половинного сечения [14].

Выбор количества градуировочных точек

Оптимальным решением при обработке измерительной информации будет являться использование достаточно грубой градуировочной характеристики и проведение избыточного числа измерений с последующим осреднением. Это справедливо при том условии, что распределение вероятности результатов измерений практически соответствует нормальному (гауссову).

На рисунке 8 представлен пример графика плотности распределения результатов измерения. Вертикальными линиями сетки отмечены границы интервала градуировочной характеристики, а по оси абсцисс отложено значение информативного параметра $|\dot{E}_{\text{вых}}(h, \sigma)|$.

Для простоты примем, что при измерении приращение h на 1 мкм соответствует приращению $|\dot{E}_{\text{вых}}(h, \sigma)|$ на 1 мВ. В качестве примера ширина границ интервала градуировочной таблицы принята равной $16s$, где s – стандартное отклонение результатов измерения $|\dot{E}_{\text{вых}}(h, \sigma)|$, $s = 1$ мВ.

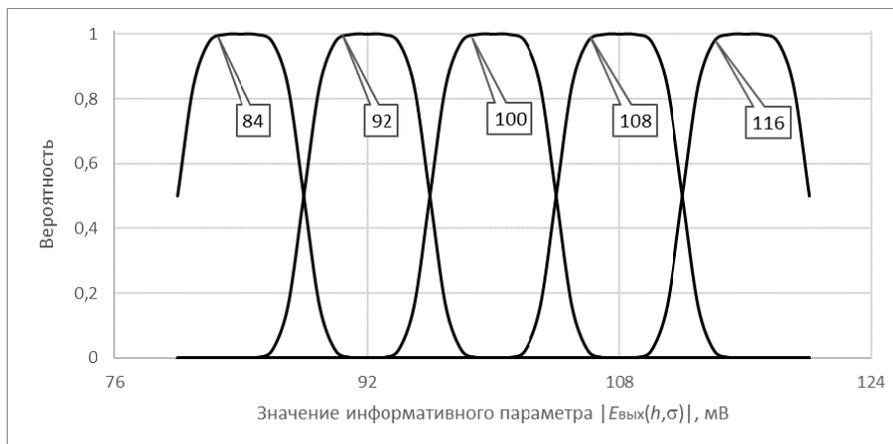


Рис. 8. Плотность распределения результатов измерения $|\dot{E}_{\text{вых}}(h, \sigma)|$

Fig. 8. Density of distribution of measurement results $|\dot{E}_{\text{вых}}(h, \sigma)|$

Рассмотрим для примера группу результатов измерения, для которой значение математического ожидания принято равным 100 мВ (линия 100 в середине графика).

В этом примере практически все результаты измерений попадут в границы этого интервала, и результат измерения будет соответствовать середине интервала градуировочной характеристики, середина которого соответствует $h = 100$ мкм. Если значение информативного параметра начнет изменяться (например, увеличиваться), результат измерения некоторое время будет сохранять свое значение 100 мкм, и лишь после существенного изменения значения информативного параметра начнет возрастать вероятность получения результата измерения, соответствующего следующему интервалу градуировочной характеристики со средним значением 116 мкм.

За пределами рассматриваемого интервала градуировочной характеристики расположены соседние интервалы, для которых графики распределения вероятности получения результата измерения, соответствующего соседним интервалам градуировочной характеристики, представлены другими линиями (с другим значением математического ожидания).

Если множество результатов измерений усредняется для получения одного прореженного результата измерений, зависимость значения прореженного результата измерений h от значения информативного параметра $|\dot{E}_{\text{вых}}(h, \sigma)|$ будет иметь ступенчатую форму, показанную на рисунке 9.

Отличие этой зависимости от идеальной (прямой) линии, являющееся отклонением результата измерений Δh , определяемым градуировочной характеристикой, также приведено на рисунке 9. Оно также имеет циклический характер, а его значение будет тем больше, чем больше интервал между точками градуировочной характеристики.

Выбор ширины интервалов градуировочной характеристики осуществляется исходя из требований к допускаемой погрешности и дискретности измерений. Очевидно, что в рассмотренном примере весь диапазон измерений следует разбить на поддиапазоны. Параметры поддиапазонов приведены в таблице 2, границы поддиапазонов, дискретность измерения в поддиапазонах и основная допускаемая погрешность измерений являются исходными данными, на основании которых рассчитана величина интервала градуировочной характеристики и число точек градуировочной таблицы в поддиапазоне.

На рисунке 10 приведена зависимость отклонения результата измерения h от значения информативного параметра $|\dot{E}_{\text{вых}}(h, \sigma)|$ при величине интервала градуировочной характеристики, указанной в таблице 2, в соответствующих поддиапазонах.

Общее число точек градуировочной характеристики, определенной по описанной методике для преобразователя, реализующего предложенный метод с заданными требованиями, составляет 153 точки на каждое ОО.



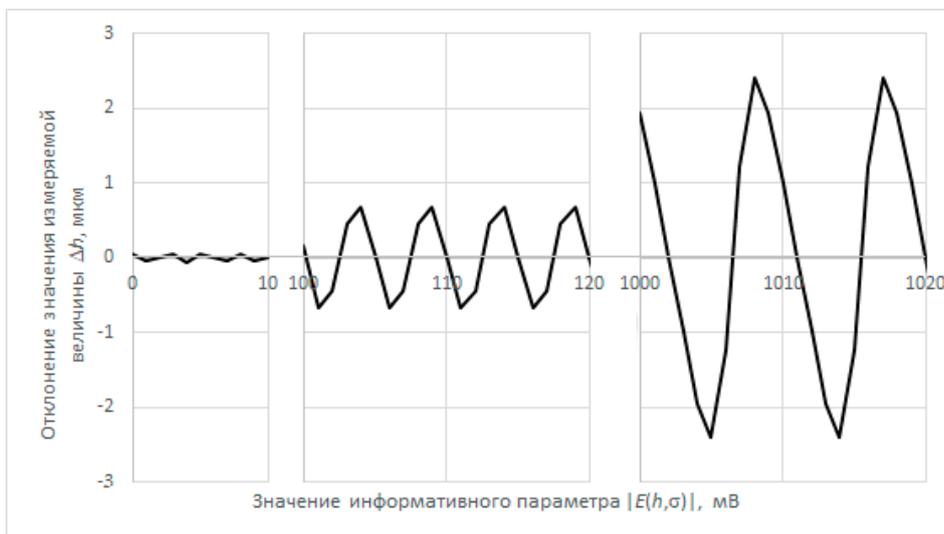
Рис. 9. Зависимость результата измерений h и отклонения результата измерений Δh от значения информативного параметра $|\dot{E}_{\text{вых}}(h, \sigma)|$

Fig. 9. Dependence of the measurement result h and the deviation of the measurement result Δh from the value of the informative parameter $|\dot{E}_{\text{вых}}(h, \sigma)|$

Таблица 2. Параметры поддиапазонов измерения толщины покрытия

Table 2. Parameters of the coating thickness measurement subranges

Границы, мкм	Дискретность измерения, мкм	Основная допустимая погрешность, мкм	Величина интервала градуировочной характеристики		Число точек в поддиапазоне, шт.
			s	мкм	
от 0 до 9,9	0,1	0,06	2,7	2,5	5
от 10 до 499	1	0,6	5	5	98
от 500 до 1500	10	2,5	9	20	50

Рис. 10. Зависимость отклонения результата измерения Δh от значения информативного параметра $|\dot{E}_{\text{вых}}(h, \sigma)|$ Fig. 10. Dependence of the deviation of the measurement result Δh on the value of the informative parameter $|\dot{E}_{\text{вых}}(h, \sigma)|$

Аналогичное исследование проведено в отношении выбора числа ОО. Для равномерного покрытия всего диапазона значений σ от 0,5 до 59 МСм/м, характерного для применяемых покрытий на немагнитных металлах, необходимо 13 ОО, значения σ которых расположены равномерно в логарифмическом масштабе и принимают следующие базовые значения: 0,5; 1; 2; 3,5; 5; 10; 15; 17; 25; 35; 40; 50 и 59 МСм/м [15].

Технология автоматической градуировки толщиномера неэлектропроводящих покрытий

Традиционно градуировка вихретоковых толщиномеров неметаллических покрытий выполняется с использованием комплекта диэлектрических пленок и пластин – мер толщины покрытий и эталонного ОО [16]. Проведение ручной двухмерной градуировки вихретоковых толщиномеров неэлектропроводящих покрытий на немагнитных металлических основаниях, реализующих предложенный метод измерения, с использованием комплекта диэлектрических пленок и пластин – мер толщины покрытий и комплекта эталонных ОО – практически невозможно. Необходимо использование средств автоматизации.

Для реализации автоматической градуировки описанного толщиномера покрытий предлагается использовать разработанную установку – имитатор толщины неэлектропроводящего покрытия (УИТП), представленный на рисунке 11.

УИТП состоит из прецизионного линейного актуатора, сервопривода, массивной несущей конструкции и программного обеспечения, обеспечивающих проведение автоматизированной процедуры двумерной градуировки.

Во время проведения градуировки ОО укладывается в ложемент. Производится перемещение ОО вниз до момента касания контактной поверхности ВТП, закрепленного в тисках. Определение момента касания производится с использованием сигнала, сформированного тензодатчиком. ОО подводится в точку, соответствующую значению нуля, после чего производится ступенчатое перемещение ОО вверх по заданной управляющей программе. Считывание сигнала ВТП и его запись в градуировочную таблицу производится во время остановки при достижении заданной позиции, по команде сервоконтроллера. Процедура градуировки завершается при достижении ОО положения, соответствующего пределу измерения ВТП.

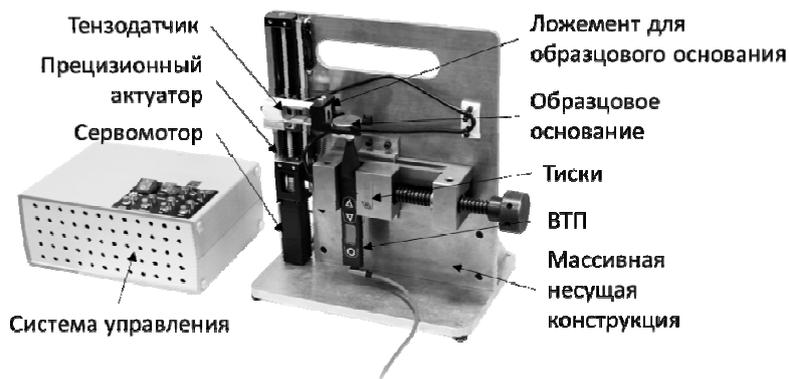


Рис. 11. Внешний вид установки-имитатора толщины неэлектропроводящего покрытия

Fig. 11. Appearance of the non-conductive coating thickness simulating system

На рисунке 12 изображена структурная схема УИТП. Сигнал тензодатчика подается на усилитель, содержащий абсолютный и дифференциальный каналы с логическими выходами. Сигналы через порты ввода-вывода передаются в микроконтроллер толщиномера, где помимо алгоритма обработки сигналов ВТП обрабатывается программа управления движением сер-

вомотора. Микроконтроллер толщиномера синхронизирует процессы управления и преобразования получаемой информации, формирует управляющие сигналы, которые по интерфейсу Step/Dir передаются в сервоконтроллер, который обеспечивает перемещение ОО на заданное расстояние и выдает сигнал о достижении заданной позиции.

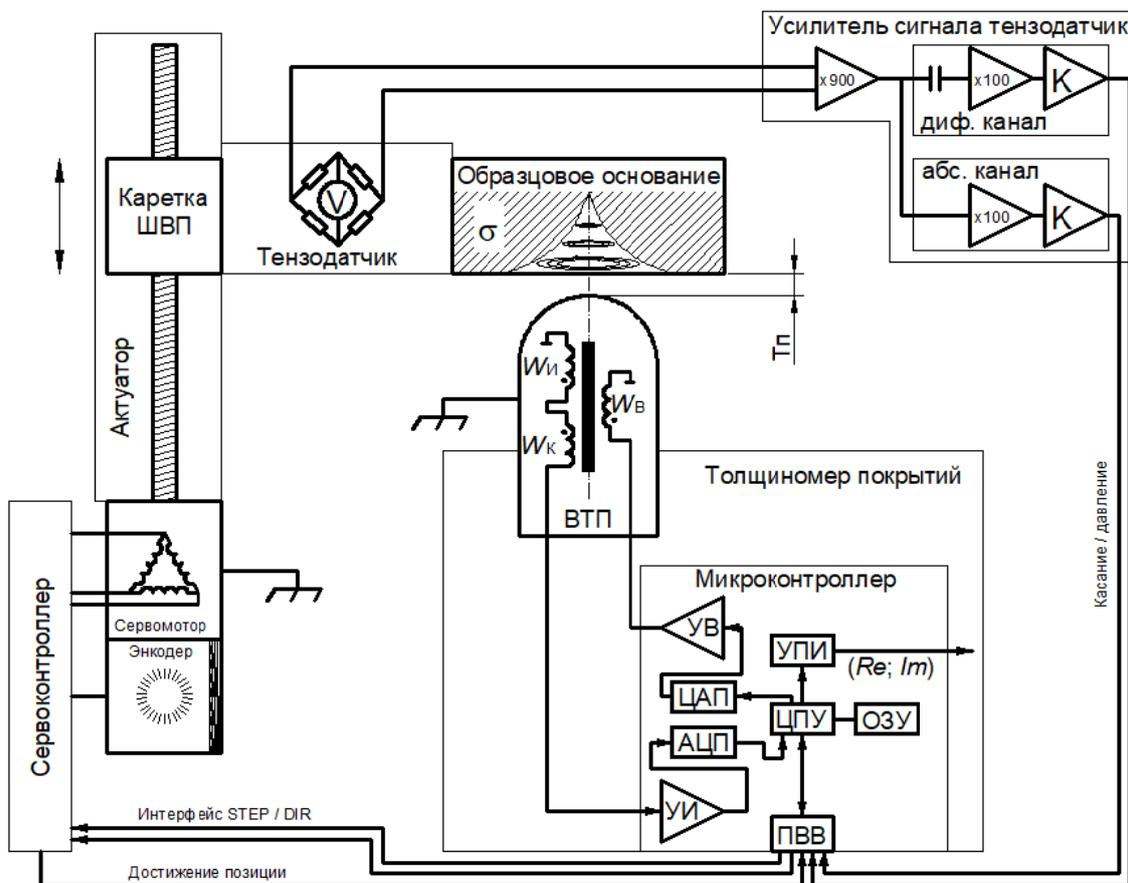


Рис. 12. Структурная схема установки – имитатора толщины диэлектрического покрытия

Fig. 12. Block diagram of non-conductive coating thickness simulating system

Очевидно, что метрологические характеристики УИТП будут во многом определять метрологические характеристики градуируемого толщиномера. Результаты оценки параметров точности УИТП приведены в [17].

Анализ результатов исследования

С целью оценки результатов проведено независимое испытание двухпараметрового алгоритма измерения толщины покрытия с применением конечно-элементной (КЭ) модели ВТП и испытаний толщиномера с применением мер толщины покрытия и набора ОО.

Для испытаний двухпараметрового алгоритма измерения толщины покрытия была разработана КЭ-модель измерительного преобразователя и процессов получения измерительной информации [18]. Испытания разделены на два этапа. На первом этапе проведена градуировка модели ВТП. Для этого использовалась модель ОО со значениями σ , соответствующими реаль-

ным ОО, применяемым для градуировки ВТП, перечисленные выше. При этом выбирались значения h имитаторов толщины покрытия в окрестности испытательных значений. Ввиду того что в целом алгоритм имеет высокую точность вычисления h , градуировка модели осуществлялась с разрешением 0,1 мкм, что существенно выше, чем необходимо для практических применений. Данные, полученные при градуировке модели ВТП, загружались в программу, реализующую описанный выше алгоритм.

На втором этапе проводилось испытание модели ВТП. Для этого использовалась модель ОО с равномерно изменяющимся в логарифмическом масштабе с малым шагом значением σ . Устанавливались (задавались) следующие испытательные значения h : 0, 10, 100, 1000 мкм. Результаты испытаний в виде зависимости отклонения $\Delta h(\sigma)$ в логарифмическом масштабе приведены на рисунке 13.

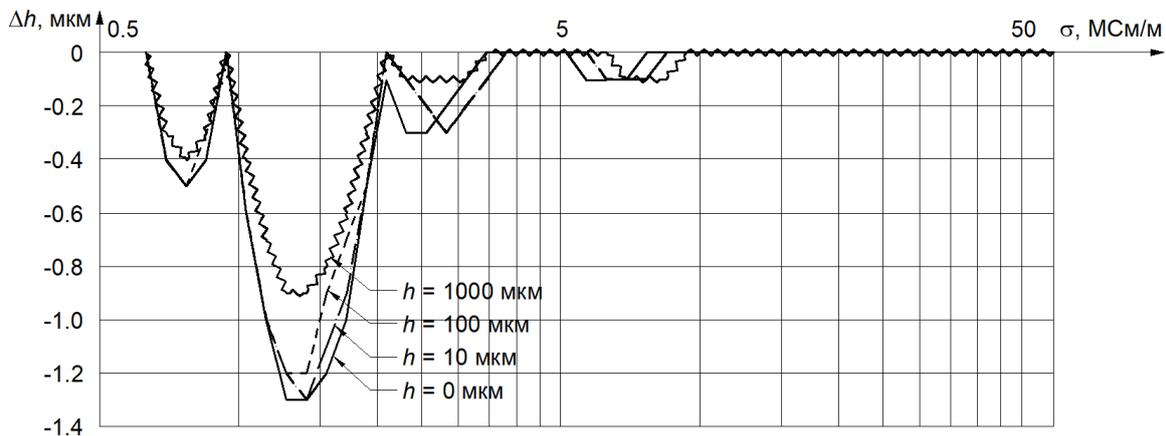


Рис. 13. Зависимость отклонения вычисленного значения $\Delta h(\sigma)$

Fig. 13. Dependence of the deviation of the calculated value $\Delta h(\sigma)$

Из данных, приведенных на рисунке 13, видно, что ожидаемо в окрестности градуировочных точек отклонение значения Δh минимально. Наибольшее отклонение Δh наблюдается при $\sigma \approx 1,4$ МСм/м. Это значение соответствует группе малолегированных титановых сплавов. Несмотря на то, что практическая значимость измерений толщины покрытия на таких основаниях не очевидна, добавление в градуировочную таблицу дополнительного ОО, имеющего удельную электрическую проводимость $\sigma \approx 1,4$ МСм/м существенно повысит качество градуировочной характеристики для данного типа ВТП. Результаты испытаний предложенной методики в сравнении с методиками, использующими амплитудный метод [19, 20], показывают уменьшение отклонения Δh под влиянием изменения σ примерно на

два порядка, что очевидно при сравнении данных, приведенных на рисунках 4 и 13.

Испытания толщиномера, реализующего метод двухпараметровой обработки сигнала, проводились с применением мер толщины покрытия МТП (в Государственном реестре средств измерений № 50316-12), в качестве ОО использовались меры удельной электрической проводимости СО-230 (в Государственном реестре средств измерений № 63172-16). Испытания толщиномера проводились путем проведения 10-кратных измерений толщины мер толщины покрытий МТ, уложенных на различные ОО. Результаты испытаний приведены на рисунке 14. В качестве показателя оценки точности измерения толщины покрытия по оси ординат приведен модуль наибольшего отклонения из 10 измерений.

Из рисунка 14 видно, что во всем диапазоне h отклонение показаний не превышает установленных в требованиях пределов допускаемой основной абсолютной погрешности измерения. В области значений $h \approx 500$ мкм на графике на-

блюдается характерный скачок. Он обусловлен тем, что градуировка толщиномера в диапазоне h свыше 500 до 1500 мкм производится с более грубым интервалом, нежели в диапазоне свыше 10 до 500 мкм.

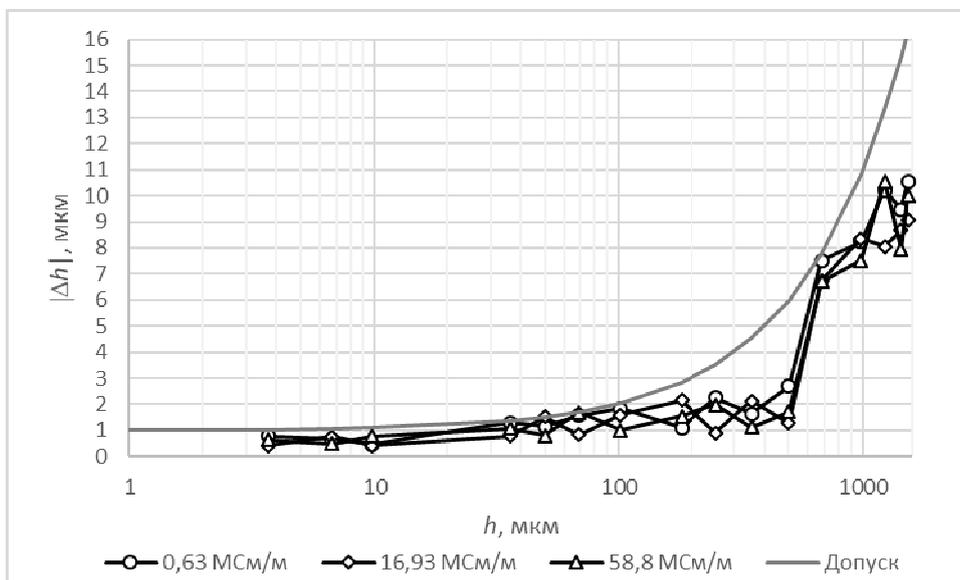


Рис. 14. Зависимость Δh от h

Fig. 14. Dependence of Δh of h

Аналогичный, но менее очевидный скачок наблюдается на этом графике в области значений $h \approx 10$ мкм. Этот скачок обусловлен тем, что градуировка толщиномера в диапазоне h от 0 до 10 мкм производится с меньшим интервалом, чем в диапазоне свыше 10 мкм до 500 мкм. Из рисунка 14 также видно, что выраженной зависимости $\Delta h(\sigma)$ не наблюдается.

Выводы

Исследования показали, что на результат измерения толщины неэлектропроводящего покрытия на немагнитном металлическом основании оказывает существенное влияние удельная электрическая проводимость основания, компенсация изменения которой путем калибровки нуля на непокрытом основании не всегда возможна.

Предложен двухпараметровый амплитудно-фазовый метод измерения толщины неэлектропроводящего покрытия на немагнитном металлическом основании, учитывающий удельную электрическую проводимость основания, реализованный с использованием двухмерной градуировки.

Предложена и обоснована методика выбора количества градуировочных точек. Диапазон измерения толщины покрытий разбит на три участка, для каждого участка определены кри-

терии точности измерений, на основе которых определен максимальный интервал между соседними градуировочными точками.

С целью практической реализации предложенного метода разработан и исследован комплекс средств метрологического обеспечения, включающий установку – имитатор толщины неэлектропроводящего покрытия и набор образцовых оснований с различными значениями удельной электрической проводимости. Программное обеспечение толщиномера покрытий, управляя установкой – имитатором толщины неэлектропроводящего покрытия, с которой он соединен посредством двухсторонней связи, производит автоматическую градуировку.

Разработан вихретоковый толщиномер, реализующий амплитудно-фазовый метод вихретокового вида неразрушающего контроля и двухпараметровую обработку сигналов, предназначенный для измерения толщины неэлектропроводящего покрытия на немагнитном металлическом основании с учетом удельной электрической проводимости материала основания, обеспечивающий метрологические характеристики, соответствующие современным требованиям производств в широком диапазоне вариации σ .

Библиографические ссылки

1. *Потапов А. И., Сясько В. А.* Неразрушающие методы и средства контроля толщины покрытий и изделий : справочное пособие. Санкт-Петербург. – СПб. : Гуманистика, 2009. 1100 с.

2. *Сясько В. А.* Измерение толщины неферромагнитных металлических покрытий на изделиях из цветных металлов с использованием вихретокового частотного метода // Дефектоскопия. 2010. № 12. С. 39–48.

3. *Сясько М. В., Соловьев И. П., Соломенчук П. В.* Методика измерения толщины неэлектропроводящего покрытия на немагнитном электропроводящем основании с автоматическим учетом влияния удельной электропроводности основания // Дефектоскопия. 2023. № 7. С. 58–60. DOI: 10.31857/S0130308223070060. EDN DWTPBN

4. *Атавин В. Г., Исхужин Р. Р., Терехов А. И.* Измерение толщины токопроводящих покрытий с отстройкой от зазора и электропроводности основания // Дефектоскопия. 2016. № 5. С. 32–35.

5. *Атавин В. Г., Узких А. А., Исхужин Р. Р.* Отстройка от электропроводности основания при измерении толщины токопроводящих покрытий методом вихревых токов // Дефектоскопия. 2018. № 1. С. 58–64. EDN YLUOUC

6. Перспективные материалы и покрытия для производства и ремонта газотурбинных двигателей и установок / А. Ахметгареева, Л. Балдаев, И. Мазиллин, С. Югай // Газотурбинные технологии. 2022. № 2(185). С. 30–34. EDN ZXOVCP

7. *Benzarti Z., Khalfallah A.* (2024) Recent Advances in the Development of Thin Films. Coatings, vol. 14, no. 878. DOI: 10.3390/books978-3-7258-1856-3

8. *Сясько В. А., Ивкин А. Е.* Обеспечение достоверности результатов измерений толщины металлических покрытий магнитными и вихретоковыми методами в условиях машиностроительных производств // Метрология. 2011. № 2. С. 3–12.

9. *Gogolinskiy K.V., Syasko V.A.* (2020) Metrological Assurance and Standardization of Advanced Tools and Technologies for nondestructive Testing and Condition Monitoring (NDT4.0). Research in Nondestructive Evaluation, vol. 31, no. 5-6, pp. 325-339. DOI: 10.1080/09349847.2020.1841863. EDN JSZFNC

10. *Зыбов В. Н.* Моделирование функции преобразования первичного преобразователя в задачах многофакторных измерений // Измерительная техника. 2006. № 4. С. 26–31.

11. Патент № 2808437 С1 Российская Федерация, МПК G01N 27/90. Вихретоковый преобразователь тангенциального типа с активным экранированием : № 2023116472 / А. Е. Горбунов, А. Е. Ивкин, В. А. Сясько ; заявитель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». EDN LXQONI

12. Измерение электромагнитных параметров мер толщины металлических покрытий / В. А. Сясько, С. С. Голубев, Я. Г. Смородинский [и др.] // Дефек-

тоскопия. 2018. № 10. С. 25–36. DOI: 10.1134/S0130308218100044. EDN YMRUOT

13. *Ласло М.* Вычислительная геометрия и компьютерная графика на С++ : пер. с англ. М. : БИНОМ, 1997. 304 с.

14. *Кудж С. А., Цветков В. Я.* Сравнительный анализ : монография. М. : МАКС Пресс, 2020. 144 с. ISBN 978-5-317-06393-1. EDN UHKSMW

15. Вихревой контроль глубины проплавления торцевых сварных швов стальных пластин резистивных элементов коммутирующей аппаратуры / П. В. Соломенчук, В. А. Сясько, Т. М. Гурьева [и др.] // Сварка и диагностика. 2021. № 6. С. 43–47. DOI: 10.52177/2071-5234_2021_06_43. EDN LGGJJK

16. *Gogolinskiy K.V., Syasko V.A.* (2019) [Actual metrological and legal issues of non-destructive testing]: Journal of Physics: Conference Series: electronic collection, St Petersburg, 02-05 июля 2019 года. St Petersburg: IOP Publishing, vol. 1379, p. 012045. DOI: 10.1088/1742-6596/1379/1/012045. EDN GYJQAN

17. *Сясько М. В., Соловьев И. П., Соломенчук П. В.* Технологии автоматической градуировки и поверки двухпараметровых вихретоковых толщиномеров диэлектрических покрытий // Дефектоскопия. 2024. № 6. С. 46–50.

18. *Сясько М. В., Соловьев И. П., Соломенчук П. В.* Повышение точности конечно-элементного моделирования высокочастотного вихретокового преобразователя // Контроль. Диагностика. 2024. № 6. С. 4–14. DOI: 10.14489/td.2024.06.pp.004-017

19. *Сясько В. А., Гнивуш И. С., Мусихин А. С.* Влияние мешающих параметров при электроискровом контроле лакокрасочных покрытий // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2023. Т. 26, № 2. С. 26–33. DOI: 10.22213/2413-1172-2023-2-26-33. EDN RDDWKE.

20. *Сясько В. А., Голубев С. С., Ивкин А. Е.* Опыт разработки средств измерения толщины функциональных покрытий огнестрельного стрелкового оружия // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2019. Т. 22, № 3. С. 11–18. DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-11-18. EDN XNAYRV.

References

1. Potapov A.I., Syasko V.A. (2009) [Non-Destructive Methods and Means of Thickness Control of Coatings and Products/SCIENTIFIC]. Methodological and Reference Manual; Humanistic Studies: St. Petersburg, Russia, 2009, pp. 203-213 (in Russ.).

2. Syasko V.A. (2010) [Measurement of the thickness of non-ferromagnetic metal coatings on non-ferrous metal products using the eddy current frequency method]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, no 12, pp. 39-48 (in Russ.).

3. Syasko M.V., Soloviev I.P., Solomenchuk P.V. (2023) [Technique for measuring the thickness of a non-conductive coatings on a non-magnetic electrically conductive base metals with automatic take account of the influence of the specific electrical conductivity of the base metal]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*,

- no. 7, pp. 58-60 (in Russ.). DOI: 10.31857/S0130308223070060. EDN DWTPBN
4. Atavin V.G., Iskhuzhin R.R., Terekhov A.I. (2016) [Measuring the thickness of conductive coatings with separation from the gap and electrical conductivity of the base]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, no. 5, pp. 32-35 (in Russ.).
5. Atavin V.G., Uzkikh A. A., Iskhuzhin R. R. (2018) [Detuning from the electrical conductivity of the base when measuring the thickness of conductive coatings by the eddy current method]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, no. 1, pp. 58-64 (in Russ.). EDN YLUOUC
6. Akhmetgareeva A., Baldaev L., Mazilin I., Yugai S. (2022) [Promising materials and coatings for the production and repair of gas turbine engines and installations]. *Gazoturbinnye tekhnologii*, no. 2, pp. 30-34 (in Russ.). EDN ZXOBCP
7. Benzarti Z., Khalfalla, A. (2024) [Recent Advances in the Development of Thin Films]. *Coatings*, vol. 14, no. 878 (in Russ.).
8. Syasko V.A., Ivkin A.E. (2011) [Ensuring the reliability of the results of measurements of the thickness of metalcoatings by magnetic eddy current methods in the conditions of machine-building industries]. *Metrologiya*, no. 2, pp. 3-12 (in Russ.).
9. Gogolinskiy K.V., Syasko V.A. (2020) Metrological Assurance and Standardization of Advanced Tools and Technologies for nondestructive Testing and Condition Monitoring (NDT4.0). Research in Nondestructive Evaluation, vol. 31, no. 5-6, pp. 325-339. DOI: 10.1080/09349847.2020.1841863. EDN JSZFNC
10. Zybov V.N. (2006) [Modeling of the transformation function of the primary educator in the tasks of multi factorial measurements]. *Izmeritel'naya tekhnika*, no. 4, pp. 26-31 (in Russ.).
11. Gorbunov A.E., Ivkin A.E., Syasko V.A. (2023) Patent No. 2808437 C1 Russian Federation. IPC G01N 27/90: Tangential-type eddy current transducer with active shielding. St. Petersburg Mining University, 2023 (in Russ.). EDN LXQONI
12. Syasko V.A., Golubev S.S., Smorodinsky Ya.G. (2018) [Measurement of electromagnetic parameters of measures of thickness of metal coatings]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, no. 10, pp. 25-36 (in Russ.). DOI: 10.1134/S0130308218100044. EDN IMROOT
13. Laszlo M. (1997) [Computational Geometry and Computer Graphics in C++]. Moscow: Binom Publ., 1997, 304 p. (in Russ.).
14. Kudzh S.A., Tsvetkov V.Ya. (2020) [Comparative analysis]. Moscow: MAKS Pres Publ., 2020, 144 p. (in Russ.). ISBN: 978-5-317-06393-1.
15. Solomenchuk P.V., Syasko V.A., Guryeva T.M. (2021) [Eddy current control of penetration depth of end welds of steel plates of resistive elements of switching equipment]. *Svarka i diagnostika*, no. 6, pp. 43-47 (in Russ.). DOI: 10.52177/2071-5234_2021_06_43. EDN LGGJJK
16. Gogolinskii K.V., Syasko V. A. (2019) [Actual metrological and legal issues of non-destructive testing]: Journal of Physics: Conference Series: electronic collection, St Petersburg, 02-05 июля 2019 года. St Petersburg: IOP Publishing, vol. 1379, p. 012045. DOI: 10.1088/1742-6596/1379/1/012045. EDN GYJQAN
17. Syasko M.V., Solovyov I.P., Solomenchuk P.V. (2024) [Technologies for automatic calibration and verification of two-parameter eddy current thickness gauges for dielectric coatings]. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, no. 6, pp. 46-50 (in Russ.).
18. Syasko M.V., Solovyov I.P., Solomenchuk P.V. (2024) [Improving the accuracy of finite element modeling of a high-frequency eddy current converter]. *Kontrol'. Diagnostika*, no. 6, pp. 4-14 (in Russ.). DOI: 10.14489/td.2024.06.pp.004-017
19. Syasko V.A., Gnivush I.S., Musikhin A.S. (2023) [Influence of interfering parameters in electric spark testing of paint and varnish coatings]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, vol. 26, no. 2, pp. 26-33 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2023-2-26-33. EDN RDDWKE.
20. Syasko V.A., Golubev S.S., Ivkin A.E. (2019) [Experience in developing means for measuring the thickness of functional coatings of firearms]. *Vestnik IzhGTU imeni M. T. Kalashnikova*, vol. 22, no. 3, pp. 11-18 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2019-3-11-18. EDN XNAYRV.

Method of Two-Parameter Signal Processing from Thickness Gauge Eddy-Current Measuring Transducers of Non-Conductive Coatings on Non-Magnetic Metal Bases

M.V. Syasko, Post-graduate, St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

The well-known existing amplitude-sensitive eddy-current method for measuring the thickness of a non-conductive coating on a non-magnetic base metal does not meet modern requirements for measurement accuracy, in particular, when measurement result is highly influenced by a change in the specific electrical conductivity of the base metal. The purpose of this study is to increase the reliability of thickness measurements of non-conductive coatings on non-magnetic base metals by taking into account (suppressing) the influence of the base metal specific electrical conductivity. To achieve this goal, a three-winding transformer compensated eddy-current probe was used. Its output signal is represented in a complex form by real and imaginary components on a complex plane, which makes it possible to implement the amplitude-phase-sensitive method of eddy-current non-destructive testing. The developed method of two-parameter signal processing based on the algorithm for determining point belonging to a polygon is described. The implementation of the latter is realized by a two-dimensional calibration of the thickness gauge with several reference bases with different specific electrical conductivity, displayed on the complex plane in the form of a fan-shaped grid. The specified algorithm determines which section of this grid the eddy-current probe signal belongs to, while the or-

der number of the determined section reflects both the coating thickness and the specific electrical conductivity of the base metal as independent quantities. The method of selecting the number of calibration points is described, based on choosing the optimal interval between them according to the criteria of probability of measurement result distribution. The non-conductive coating thickness simulating system has been developed, connecting by two-way communication with a graduated thickness gauge and implementing its automatic calibration. The test results of the applied method for measuring the thickness of a non-conductive coating on a non-magnetic base metal are presented, that showed a decrease in the deviation of the coating thickness measurement results under the influence of the base metal specific electrical conductivity by two orders of magnitude.

Keywords: eddy current measurement method, thickness gauge, amplitude-phase algorithm, two-dimensional calibration.

Получено 12.08.2024

Образец цитирования

Сясько М. В. Метод двухпараметровой обработки сигналов вихрековых измерительных преобразователей толщиномеров неэлектропроводящих покрытий на немагнитных металлических основаниях // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. 2024. Т. 27, № 4. С. 101–114. DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-101-114

For Citation

Syasko M.V. (2024) [Method of Two-Parameter Signal Processing from Thickness Gauge Eddy-Current Measuring Transducers of Non-Conductive Coatings on Non-Magnetic Metal Bases]. *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*, vol. 27, no. 4, pp. 101-114 (in Russ.). DOI: 10.22213/2413-1172-2024-4-101-114