

Применение проекционных методов многомерного анализа в вихревоковой толщинометрии

А. В. Егоров¹, В. В. Поляков^{1, 2}, Я. И. Борцова¹

¹Алтайский государственный университет, Барнаул,
Российская Федерация, e-mail:egav@bc.ru

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск,
Российская Федерация, e-mail: pvv@asu.ru

Проведены многочастотные вихревоковые измерения толщины немагнитных металлических материалов с диэлектрическими покрытиями. На основе метода главных компонент разделено влияние таких конкурирующих факторов, как удельная электропроводность, толщина металлической подложки и толщина диэлектрического слоя. С помощью метода проекций на латентные структуры по данным вихревоковых измерений определены численные значения толщин алюминиевых и медных пластин и диэлектрических покрытий.

Ключевые слова: метод вихревых токов, толщинометрия, многомерный анализ, метод главных компонент.

Разработка новых и совершенствование существующих методов измерения толщины элементов изделий и толщины нанесенных на них защитных покрытий является актуальной задачей современной толщинометрии. При косвенном неразрушающем контроле этих параметров металлических материалов наиболее распространены ультразвуковой метод и метод вихревых токов [1, 2]. Однако описанные методы имеют ряд недостатков, ограничивающих область применения методов. С помощью ультразвуковых толщинометров измеряется время прохождения акустического сигнала от датчика до противоположной поверхности изделия или до границы разделя между покрытием и подложкой. Для малых толщин длительность акустического импульса соизмерима со временем прохождения сигнала и данный метод практически неприменим. Указанного недостатка лишён вихревоковый метод, основанный на возбуждении вихревых токов в контролируемом объекте и измерении их характеристик датчиком [3]. При этом на параметры датчика одновременно влияет множество конкурирующих факторов, которые необходимо разделять для последующего учёта и компенсации [4].

Выходным сигналом измерительной информации, предназначенным для дальнейшей обработки, в вихревоковом параметрическом датчике является импеданс. На импеданс оказывают влияние различные входные факторы: электрические и магнитные свойства материала [5]; геометрические параметры и химический состав изделия [6, 7]; особенности измерительного устройства и режима измерений [8, 9]. Поэтому при вихревоковых измерениях важной и актуальной задачей является выделение измеряемой величины на фоне мешающих факторов, т. е. разделение влияющих факторов.

Эту задачу можно решать различными способами. Например, толщину диэлектрического покрытия на металле с достаточной точностью определяют в результате высокочастотных измерений (в мегагерцовом диапазоне), поскольку на этих ча-

стотах практически не сказывается влияние электропроводности и толщины металлической подложки. Таким образом, разделение факторов происходит аппаратным образом путём подбора режима измерений. При измерениях с достаточной точностью толщины металлизации на неметаллических материалах используют более низкие частоты, чтобы толщина скин-слоя была сопоставима с толщиной проводника. Однако в этом случае необходимо специально стабилизировать зазор между датчиком и измеряемым объектом, и разделение факторов осуществляется также аппаратно путём фиксации значения зазора.

В настоящей работе предлагается принципиально иной подход к разделению влияющих факторов при вихревоковых измерениях. Подход основан на обработке измерительного сигнала с помощью аппарата многомерного анализа данных [10]. Преимуществом этого подхода является возможность не только разделить факторы в процессе обработки данных (т. е. неаппаратным способом), но и измерить с достаточной точностью не одну, а одновременно несколько характеристик, регистрируемых на входе измерительного преобразователя [11–13]. При использовании вихревоковой толщинометрии в дополнение к традиционным измерениям толщины диэлектрического покрытия проводника появляется возможность одновременного измерения толщины покрытия и толщины проводящей металлической подложки под покрытием. Применимость такого подхода к задачам толщинометрии была рассмотрена в работе [14] на примере медных образцов с известной удельной электропроводностью. Основными влияющими факторами были толщины металлической подложки и диэлектрического покрытия. В настоящей статье описываемый подход распространён на случай одновременного измерения толщин при вариации трёх влияющих факторов – удельных электропроводностей разных материалов, толщин металлических образцов и диэлектрических покрытий.

Экспериментальный метод. При испытаниях материалов применялись многочастотные измерения, обеспечивавшие наибольшую информативность метода вихревых токов [15] и завершающиеся построением экспериментальных годографов системы «вихретоковый датчик–контролируемый образец». Эти годографы отражают совместное действие основных факторов, влияющих на результаты измерений. Методика получения годографов основана на использовании возбуждающего сигнала специальной формы с последующей цифровой обработкой регистрируемого выходного сигнала [9].

Структурная схема измерительного устройства приведена на рис. 1. В блоках G_1, G_2, \dots, G_N задаются гармонические сигналы с фиксированными частотами $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N$ соответственно. Эти сигналы складываются сумматором Σ и проходят через измерительную цепь, состоящую из вихретокового параметрического датчика S и образцового сопротивления R . Параметрический датчик представляет последовательное соединение двух идеальных элементов: эквивалентного активного сопротивления r , которое описывает возникающие в датчике потери энергии, и индуктивности L , характеризующей сцепленный с витками датчика магнитный поток при протекании электрического тока. Для определения параметров датчика служит двухканальный синхронный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) ADC . В первом канале Ch_1 оцифровывается сигнал, подаваемый на вход измерительной цепи, а во втором канале Ch_2 – выходной сигнал, снимаемый с образцового сопротивления. АЦП был синхронным для минимизации его влияния на сдвиг фаз между двумя сигналами. Оцифрованные сигналы поступали в блоки FFT , где выполнялись дискретные преобразования Фурье. При дальнейших расчётах использовали только те комплексные амплитуды, которые соответствовали частотам, максимально приближенным к значениям $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N$. Комплексные амплитуды входного сигнала обозначали $\dot{U}_1^{(IN)}, \dot{U}_2^{(IN)}, \dots, \dot{U}_N^{(IN)}$, амплитуды выходного сигнала – $\dot{U}_1^{(OUT)}, \dot{U}_2^{(OUT)}, \dot{U}_N^{(OUT)}$.

Реактивное X и активное r сопротивления параметрического датчика на частотах $\omega_n (n=1, 2, \dots, N)$ рассчитывались в блоке вычислителя CP по формулам

$$X(\omega_n) = \omega_n L(\omega_n) = R \left(\dot{U}_n^{(IN)} / \dot{U}_n^{(OUT)} \right) \sin(\phi_n^{(IN)} - \phi_n^{(OUT)});$$

$$r(\omega_n) = R \left[\left(\dot{U}_n^{(IN)} / \dot{U}_n^{(OUT)} \right) \cos(\phi_n^{(IN)} - \phi_n^{(OUT)}) - 1 \right],$$

где $\dot{U}_n^{(IN)}, \dot{U}_n^{(OUT)}$ и $\phi_n^{(IN)}, \phi_n^{(OUT)}$ – соответственно модули и фазы комплексных амплитуд $\dot{U}_n^{(IN)}, \dot{U}_n^{(OUT)}$.

Результаты многочастотных вихретковых измерений анализировались с помощью годографов изменения импеданса датчика $Z = r + jX$ на разных частотах ω_n . Для построения годографов рассчитывались относительные изменения активного $\Delta r(\omega_n)/X_0(\omega_n)$ и реактивного $\Delta X(\omega_n)/X_0(\omega_n)$ сопротивлений датчика, где $X(\omega_n), X_0(\omega_n), r(\omega_n), r_0(\omega_n)$ – реактивное и активное сопротивления датчика соответственно с образцом и без него на циклической частоте ω_n . Изменения активного и реактивного (при наличии образца) сопротивлений вихреткового датчика определяются как

$$\Delta r(\omega_n) = r(\omega_n) - r_0(\omega_n);$$

$$\Delta X(\omega_n) = X(\omega_n) - X_0(\omega_n).$$

Полученные годографы графически представляют в координатах $\Delta X/X_0(\Delta r/X_0)$.

Измерение характеристик выполнялось при частотах от 100 Гц до 10 кГц на 30 фиксированных частотах ω_n . При испытаниях использовалась накладной параметрический датчик в виде катушки индуктивности, помещённой в полуброневой ферритовый сердечник диаметром 20 мм (феррит марки 2000МН).

Экспериментальные годографы. Исследования проводились для немагнитных металлов (меди и алюминия) с различными удельными электропроводностями σ . Удельные электропроводности σ образцов, измеренные четырёхточечным

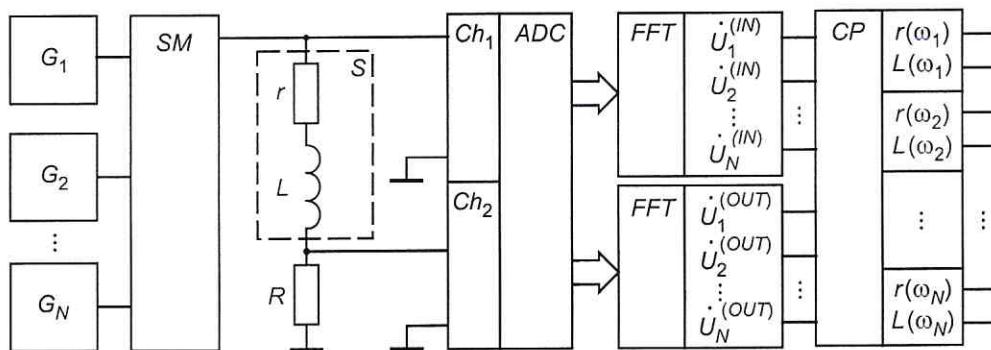


Рис. 1. Структурная схема измерительного устройства:

G_1, G_2, \dots, G_N – блоки задания гармонических сигналов; SM – сумматор; S – параметрический датчик; Ch_1, Ch_2 – каналы для оцифровки входных и выходных сигналов соответственно; ADC – аналого-цифровой преобразователь; FFT – блок дискретного преобразования Фурье; CP – блок вычислений

методом с погрешностью не более 10 %, составили (57 ± 5) и (31 ± 3) МСм/м для меди и алюминия соответственно. Образцы для испытаний имели вид плоскопараллельных пластин различной толщины. Толщина образцов d варьировалась в интервале 1,0–10,0 мм, чтобы можно было учитывать влияние скин-слоя на регистрируемые параметры. Покрытие моделировали с помощью диэлектрических прокладок различной толщины $h=0,1 \dots 0,8$ мм. Толщину образца и прокладок измеряли микрометром с приборной погрешностью 0,02 мм.

Типичные результаты измерений в виде экспериментальных годографов приведены на рис. 2. Годографы для меди и алюминия качественно одинаковы. При увеличении частоты сигнала экспериментальные точки смещаются вдоль оси $\Delta X/X_0$ из верхней части линии годографа в нижнюю часть. Это связано с тем, что с повышением частоты увеличивается скорость изменения магнитного потока, создаваемого датчиком, и плотность вихревых токов в металле, как следствие, уменьшается индуктивность датчика.

Аналогичным образом на результаты измерений влияет изменение удельной электропроводности. Положение экспериментальных точек на линии годографа для материалов с относительной магнитной проницаемостью $\mu=1$ при фиксированных геометрических характеристиках образца определяется обобщенным вихревоковым параметром $\beta=a(\mu\mu_0\sigma\omega)^{1/2}$ ($\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; a – эффективный радиус накладного параметрического датчика) [1]. В силу этого с увеличением σ происходит сдвиг экспериментальных точек вдоль линии годографа из верхней части к нижней части, т. е. для меди, обладающей большей электрической проводимостью, чем алюминий, соответствующие точки располагаются ниже.

Как следует из рис. 2, при увеличении толщины диэлектрического покрытия h форма линий годографа изменяется и эти линии приближаются к оси $\Delta X/X_0$. Это связано с уменьшением влияния датчика на металл подложки, что приводит к снижению воздействия на индуктивность датчика, а также к уменьшению плотности вихревых токов и активных потерь.

Зависимость годографов от толщины проводящей пластины (рис. 2) определяется прежде всего соотношением между толщиной d металла и глубиной скин-слоя вихревых токов, обусловленной их частотой. Так, при переходе от 100 Гц к 1 кГц в меди толщина уменьшается от 6,6 мм до 2,1 мм (меди) и от 8,3 мм до 2,6 мм (алюминий). Поэтому при толщине пластин значительно больше глубины скин-слоя практически не наблюдаются различия значений d на линиях годографа, и эти линии на высоких частотах постепенно сливаются.

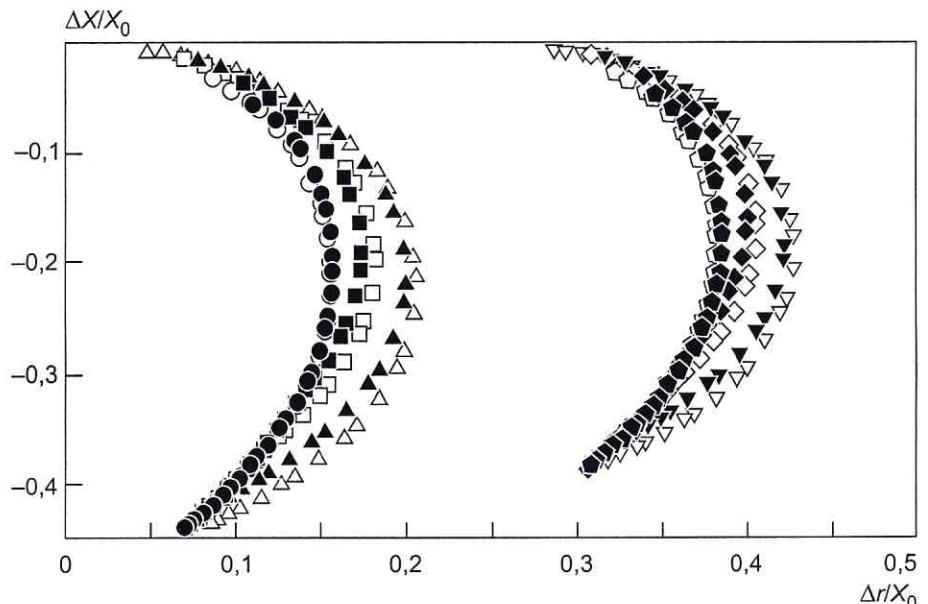


Рис. 2. Экспериментальные годографы системы датчик–образец при покрытиях различной толщины для пластин из алюминия и меди разных толщин:
 \triangle – 1,5 мм, \square – 3,0 мм, \circ – 7,0 мм (алюминий, толщина покрытия 0,2 мм); \blacktriangle – 1,9 мм, \blacksquare – 3,8 мм, \bullet – 7,5 мм (меди, толщина покрытия 0,2 мм); ∇ – 1,5 мм, \diamond – 3,0 мм, \circlearrowleft – 7,0 мм (алюминий, толщина покрытия 0,6 мм); \blacktriangledown – 1,9 мм, \blacklozenge – 3,8 мм, \blacklozenge – 7,5 мм (меди, толщина покрытия 0,6 мм); для покрытий толщиной 0,6 мм абсцисса $\Delta r/X_0 + 0,25$

Разделение влияющих факторов. При показанном на рис. 2 расположении экспериментальных точек достаточно затруднительно выделить влияние отдельных факторов на контролируемые характеристики. Для разделения влияющих факторов полученные годографы обрабатывались методом главных компонент [10]. В соответствии с этим методом для конкретного контролируемого образца весь годограф в многомерном пространстве описывался одной точкой. Координатами этой точки служили измеренные значения изменений активного $\Delta r/X_0$ и реактивного $\Delta X/X_0$ сопротивлений датчика при заданных частотах ω_n , формирующие так называемые векторы признаков. Для уменьшения размерности многомерного пространства и выявления латентных закономерностей переходили к новой системе координат, в которой первая ось (главная компонента PC_1) ориентировалась в направлении максимальной дисперсии экспериментальных точек, вторая ось (главная компонента PC_2) – в направлении дисперсии точек, следующей по величине, и т. д. Для графического представления результатов обработки использовали проекции на плоскости первых главных компонент.

Результаты расчётов в виде проекций на плоскости PC_1-PC_2 и PC_1-PC_3 приведены на рис. 3, а, б соответственно. Точки, описывающие образцы с близкими характеристиками (толщинами d , h и удельными электропроводностями), располагаются в одной области многомерного пространства. Эти точки формируют кластеры, размер которых определяется погрешностью измерений. Кластеры, описывающие медные и алюминиевые образцы и отличающиеся значениями удельной электропроводности, линейно разделены на обеих пло-

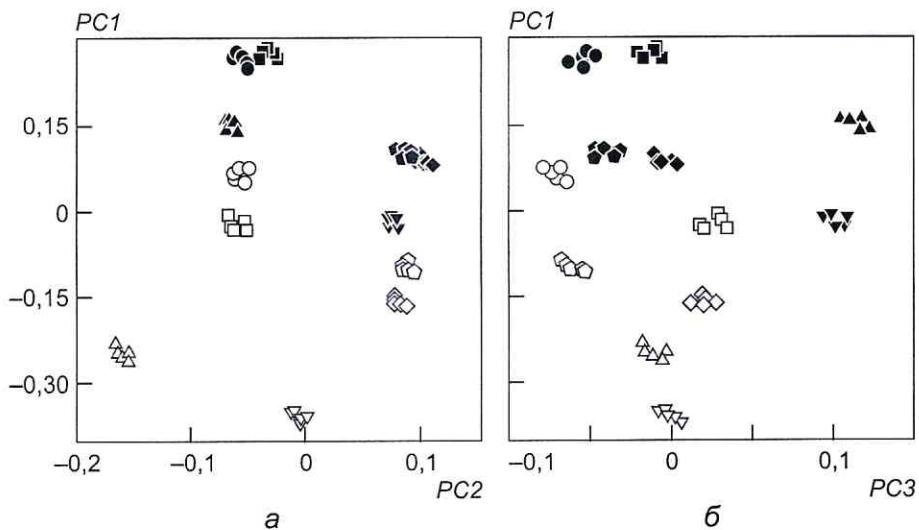


Рис. 3. Проекции результатов вихревоковых измерений на плоскости первых главных компонент PC1–PC2 (а) и PC1–PC3 (б); обозначения те же, что на рис. 2

Результаты тестовых измерений толщин металлической пластины d и диэлектрического покрытия h

Материал подложки	Результаты прогноза, мм		Результаты измерений, мм	
	d	h	d	h
Алюминий	1,40	0,21	1,43±0,05	0,2±0,03
	1,38	0,39	1,43±0,05	0,4±0,03
	1,43	0,58	1,43±0,05	0,6±0,03
	2,95	0,22	2,85±0,05	0,2±0,03
	2,74	0,41	2,85±0,05	0,4±0,03
	3,01	0,59	2,85±0,05	0,6±0,03
	4,21	0,19	4,29±0,05	0,2±0,03
	4,64	0,39	4,29±0,05	0,4±0,03
	4,07	0,57	4,29±0,05	0,6±0,03
Медь	1,78	0,22	1,87±0,05	0,2±0,03
	1,89	0,42	1,87±0,05	0,4±0,03
	1,85	0,59	1,87±0,05	0,6±0,03
	3,91	0,19	3,73±0,05	0,2±0,03
	3,98	0,38	3,73±0,05	0,4±0,03
	3,73	0,56	3,73±0,05	0,6±0,03
	5,98	0,22	5,59±0,05	0,2±0,03
	6,00	0,41	5,59±0,05	0,4±0,03
	6,61	0,59	5,59±0,05	0,6±0,03

скостях вдоль оси PC1. Аналогичное линейное разделение по толщине диэлектрического покрытия наблюдается на плоскости PC1–PC2; увеличение значений h привело к сдвигу кластеров вдоль оси PC2. Различие толщины металлических пластин более отчётливо проявляется в плоскости PC1–PC3, где кластеры не перекрываются даже при больших значениях d .

Таким образом, применение метода главных компонент позволило наглядно разделить три основных фактора, влияющих на результаты вихревоковых измерений.

Определение толщин металлической подложки и покрытия. Для количественного определения толщин металлической пластины d и диэлектрического слоя h применялся метод проекций на латентные структуры [10]. Согласно этому методу, переход в многомерном пространстве к новой системе координат, в отличие от метода регрессии на главные компоненты, осуществляется с использованием векторов признаков (в данном случае – характеристик экспериментальных годографов) совместно с априорно известными значениями прогнозируемых параметров для выделенной группы образцов. В рассматриваемой задаче такими параметрами являются независимо измеренные удельные электропроводности σ и толщины d , h , формирующие матрицу так называемых откликов. Со

вокупность этих экспериментальных данных составляет калибровочную (обучающую) выборку, с помощью которой строится калибровочная модель, описывающая зависимости между результатами вихревоковых измерений и контролируемыми параметрами. Предварительно полученные калибровочные зависимости далее применяются для расчёта толщин металлической подложки и диэлектрического покрытия образцов, не участвующих в построении калибровочной модели, т. е. выступающих в качестве контролируемых объектов с неизвестными значениями d , h .

При расчётах для построения калибровочных зависимостей использовали экспериментальные данные для группы образцов, свойства которых описаны выше (см. рис. 2, 3). Некалиброванные пластины из алюминия и меди с диэлектрическими покрытиями и значениями d и h рассматривали как тестовые образцы. Полученные для них вычисленные значения контролируемых толщин приведены в таблице. Значения, спрогнозированные методом проекций на латентные структуры, сопоставляли с результатами независимых измерений геометрических параметров d и h , также приведёнными в таблице.

Отметим, что предлагаемый метод позволил повысить точность измерений импеданса измерительного вихревокового датчика в используемом интервале частот 100–10000 Гц за счёт цифровой обработки сигналов, обусловившей уменьшение случайной погрешности до 0,1 %.

По данным таблицы установлено влияние отдельных факторов на результат измерений. Удельная электропроводность практически не повлияла на результаты прогноза толщин подложки и покрытия: отклонение результатов прогноза от результатов измерений в целом не превысило 8 % для алюминиевых образцов и 7 % для медных (за исключением образца толщиной 5,59 мм с покрытием толщиной 0,6 мм, для него это

отклонение составило 15 %, что, в принципе, указало на ограничение данного метода по толщине контролируемых пластин. Толщины металлических пластин и диэлектрических покрытий являлись контролируемыми величинами, при этом увеличение толщины металлического образца практически не сказывалось на точности определения толщины покрытия (см. таблицу), а увеличение толщины диэлектрического покрытия увеличивало погрешность прогнозируемой толщины образцов на 3–5 %.

Заключение. Предложенные методы обработки экспериментальных данных многочастотных вихревоковых измерений параметров металлических материалов с диэлектрическими покрытиями базируются на математическом аппарате многомерного анализа данных. Использование этих методов позволяет разделять влияющие факторы и измерять одновременно толщину металлических изделий с различными удельными электропроводностями и толщину нанесённых на эти изделия покрытий. При этом существенно расширяется спектр измерительных задач вихревоковой толщинометрии. Отметим, что с точки зрения метрологии рассматриваемые методы могут стать актуальной научной основой для разработки вихревоковых толщинометров нового поколения, которые с достаточной точностью могли бы одновременно измерять несколько характеристик (например, толщин металлического листа и нанесённого на него защитного покрытия).

Работа выполнена при поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-08-00914.

Литература

1. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник / Под ред. В. В. Клюева, Ф. Р. Соснина, А. В. Ковалева. М.: Машиностроение, 2003. 656 с.
2. Шубочкин А. Е. Развитие и современное состояние вихревокового метода неразрушающего контроля. М.: Издательский дом «Спектр», 2014. 288 с.
3. Голубев С. С., Смирнова Н. И., Складановская М. И. Обеспечение единства измерений толщины металлических покрытий вихревоковыми фазовыми толщинометрами при их градуировке и поверке // Измерительная техника. 2017. № 6. С. 25–28.
4. Дякин В. В., Сандовский В. А. Теория и расчет накладных вихревоковых преобразователей. М.: Наука, 1981. 136 с.

Application of projection methods for multivariate analysis in eddy current thickness measurement

Aleksandr V. Egorov¹, Viktor V. Polyakov^{1, 2}, Yana I. Borcova¹

¹Altai State University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: egav@bc.ru

²Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the RAS, Tomsk, Russian Federation, e-mail: pvv@asu.ru

Multi-frequency eddy current measurements were carried out for sheet samples of nonmagnetic metallic materials with dielectric coatings. Based on the principal component method, the influence of such competing factors as the specific electrical conductivity, the thickness of the metal substrate and the thickness of the dielectric layer is separated. Using the method of projections on latent structures, the numerical values of the thicknesses of aluminum and copper plates and dielectric coatings are determined from eddy current measurements.

Key words: eddy current method, thickness measurement, multivariate data analysis, principal component method.

5. Garcia-Martin J., Gomez-Gil J., Vazquez-Sanchez E. Non-destructive techniques based on eddy current testing // Sensors (Basel). 2011. V. 11(3). P. 2525–2565.
6. Lulu Tian, Yuhua Cheng, Chun Yin, Xuegang Huang, Bo Zhang, Libing Ba. Data-driven method for the measurement of thickness/depth using pulsed eddy current // Sensors and Materials. 2017. V. 29. No. 9. P. 1325–1338.
7. Кудрявцев И. А., Гудков С. А., Селиванов Н. В. Устройство вихревокового контроля чистоты рабочей жидкости // Измерительная техника. 2018. № 2. С. 51–54.
8. Yang H. C., Tai C. C. Pulsed eddy-current measurement of a conducting coating on a magnetic metal plate // Measurement Science and Technology. 2002. V. 13. P. 1259–1265.
9. Егоров А. В., Поляков В. В., Лепендин А. А., Грачева Я. И. Применение сигналов специальной формы в многочастотных вихревоковых измерениях // Автометрия. 2017. Т. 53. № 3. С. 28–35.
10. Esbensen K. H., Geladi P. Principal Component Analysis: Concept, Geometrical Interpretation, Mathematical Background, Algorithms, History, Practice / Ed. Tauler R., and Beata Walczak. Compr. Chemom., Oxford: Elsevier, 2009. P. 211–260.
11. Егоров А. В., Поляков В. В. Применение метода главных компонент при вихревоковом контроле алюминиевых сплавов // Дефектоскопия. 2015. № 10. С. 42–48.
12. Shokralla S., Morelli J. E., Krause T. W. Principal components analysis of multifrequency eddy current data used to measure pressure tube to calandria tube gap // IEEE Sensors J. 2016. V. 16. No. 9. P. 3147–3154.
13. Egorov A. V., Kucheryavskiy S. V., Polyakov V. V. Resolution of effects in multi-frequency eddy current data for reliable diagnostics of conductive materials // Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 2017. V. 160. P. 8–12.
14. Егоров А. В., Поляков В. В. Применение метода главных компонент при вихревоковом контроле металлических материалов с диэлектрическим покрытием // Известия Алтайского государственного университета. 2017. № 4. С. 33–38.
15. Egorov A. V., Polyakov V. V., Salita D. S., Kolubaev E. A., Psakhie S. G., Chernyavskii A. G., Vorobei I. V. Inspection of aluminum alloys by a multi-frequency eddy current method // Defence Technology. 2015. V. 11. P. 99–103.

Дата принятия: 30.05.2019.