

Научная статья

УДК 539.42

[https://doi.org/10.14258/izvasu\(2026\)1-02](https://doi.org/10.14258/izvasu(2026)1-02)

Вихретоковый контроль фольгированного стеклотекстолита

Денис Александрович Дмитриев¹, Александр Владимирович Егоров², Виктор Владимирович Поляков³

¹Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия, dmitriev.d.a@vc.asu.ru

²Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия, egav@bk.ru

³Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия, pvv@asu.ru

Original article

Eddy Current Control of Foiled Fiberglass

Denis A. Dmitriev¹, Alexander V. Egorov², Viktor V. Polyakov³

¹Altai State University, Barnaul, Russia, dmitriev@asu.ru

²Altai State University, Barnaul, Russia, egav@bk.ru

³Altai State University, Barnaul, Russia, pvv@asu.ru

Аннотация. Важной характеристикой фольгированного стеклотекстолита, используемого для производства печатных плат, является толщина проводящего слоя. Эффективным методом ее неразрушающего контроля являются многочастотные вихретоковые измерения. В настоящей работе приведены результаты таких измерений для образцов фольгированного стеклотекстолита с разными толщинами проводящего слоя. Описаны экспериментальные годографы системы «фольгированный слой — вихретоковый датчик». Рассмотрено влияние на годографы мешающих факторов различной природы. Отмечено, что результаты низкочастотных измерений зависят от произведения удельной электропроводности и толщины проводящего слоя и разделить эти факторы непосредственно по экспериментальным данным затруднительно. В связи с этим для задач вихретокового контроля предложена математическая обработка результатов измерений на основе проекционных методов многомерного анализа данных. Описаны особенности применения метода главных компонент для контроля толщины медных фольг с малыми толщинами. Показано, что при использовании образцов с известными характеристиками в качестве эталонных данных за счет проведенной математической обработки может быть достигнуто наглядное разделение контролируемых образцов по толщине проводящего слоя. Полученные результаты могут быть применены

Abstract. The conductive layer thickness is an important characteristic of foiled fiberglass used for printed circuit board production. The method of multi-frequency eddy current measurements is very effective for non-destructive testing of the conductive layer. This paper presents the results of such measurements of foiled fiberglass samples with different conductive layer thicknesses. Experimental hodographs of the "foil layer — eddy current sensor" system are described. The influence of interfering factors of various natures on hodographs is considered. It is noted that the results of low-frequency measurements depend on the product of the electrical conductivity and the conductive layer thickness, and it is difficult to separate these factors from the experimental data directly. Therefore, mathematical processing of measurements based on projection methods of multidimensional data analysis is proposed for eddy current control problems. Peculiarities of principal component analysis usage for eddy current control of copper foils with small thicknesses are described. It is shown that samples under eddy current control can be clearly distinguished by their conductive layer thickness through mathematical processing of measurement results when there are samples with known characteristics used as reference data. The obtained results can be used for further development of eddy current control of foiled fiberglass.

при проведении вихретокового контроля фольгированного стеклотекстолита.

Ключевые слова: метод вихревых токов, толщинометрия, многомерный анализ, метод главных компонент, фольгированный стеклотекстолит, печатные платы, медная фольга

Для цитирования: Дмитриев Д.А., Егоров А.В., Поляков В.В. Вихретоковый контроль фольгированного стеклотекстолита // Известия Алтайского государственного университета. 2026. № 1 (147). С. 22–29. [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2026\)1-02](https://doi.org/10.14258/izvasu(2026)1-02).

Введение

В современной электронике одними из наиболее распространенных изделий являются печатные платы, предназначенные для формирования электронных схем. Эти платы представляют собой диэлектрическую пластину, чаще всего стеклотекстолитовую, с нанесенным на ее поверхность проводящим слоем, обычно медной фольгой. Эксплуатационные свойства печатных плат существенно зависят от характеристик проводящего слоя, которые, в свою очередь, определяются толщиной металлической фольги и ее удельной электропроводностью. Толщина фольги влияет на величину электрического тока, пропускаемого через проводящие дорожки, а также на устойчивость плат к внешним механическим повреждениям. В зависимости от своего предназначения обычно применяется фольгированный стеклотекстолит с различной толщиной фольги, от тонкого слоя (15–30 мкм) для компьютерных устройств и бытовой электроники до достаточно толстого слоя (до 150 мкм) в промышленных установках. Толщина медного слоя является одним из контролируемых технологических параметров, при этом в зависимости от технологии нанесения медной фольги допускаются те или иные вариации по толщине медного слоя.

При производстве фольгированного стеклотекстолита, а также использовании стеклотекстолитовых заготовок для изготовления печатных плат возникает задача проведения неразрушающего контроля толщины проводящего слоя [1]. Отметим, что применение для решения этой задачи ультразвуковых толщиномеров не представляется возможным в связи с малой толщиной фольги и, как следствие, крайне малым временем прохождения акустического сигнала. В связи с этим более перспективным представляется привлечение для неразрушающего контроля вихретокового метода [2, 3]. Однако его использование также существенно усложняется как малой толщиной проводящего слоя, так и различными мешающими факторами. К таким факторам относятся электрические свойства покрытия, зависящие от технологии получения материала; вариации геометрических парамет-

Keywords: eddy current method, thickness measurement, multidimensional analysis, principal component method, foiled fiberglass, printed circuit boards, copper foil

For citation: Dmitriev D.A., Egorov A.V., Polyakov V.V. Eddy Current Control of Foiled Fiberglass. *Izvestiya of Altai State University*. 2026. No 1 (147). P. 22–29. (In Russ.). [https://doi.org/10.14258/izvasu\(2026\)1-02](https://doi.org/10.14258/izvasu(2026)1-02).

ров; условия и режим проведения вихретоковых измерений; различные факторы случайной природы, влияющие на результат контроля в реальных производственных условиях [4–6].

При проведении многочастотных вихретоковых измерений для тонких проводящих слоев (проводящих покрытий на диэлектрической основе, металлических фольг и т.п.) обычно используется мегагерцовый диапазон частот возбуждения [7]. Это обусловлено тем, что глубина скин-слоя d , характеризующая проникновение магнитного поля в металл [8–9], быстро уменьшается с ростом частоты:

$$d = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \mu \sigma}} \quad (1)$$

(здесь ω — циклическая частота возбуждающего поля, σ — удельная электропроводность, μ_0 — магнитная постоянная, μ — относительная магнитная проницаемость в случае меди с высокой точностью $\mu=1$). При мегагерцевых частотах эта величина сопоставима с толщиной проводящего слоя h , поэтому результаты измерений оказываются чувствительны к вариациям в его толщине. Для низкочастотных измерений, соответствующих килогерцовым частотам, глубина скин-слоя значительно больше контролируемой толщины, и чувствительность результатов измерений к этой величине теряется. В этом случае разделить влияние толщины проводящего слоя и его удельной электропроводности непосредственно по данным вихретоковых измерений не удастся, поскольку получаемый результат зависит только от произведения величин h и σ .

В то же время возможны ситуации, в которых приходится прибегать к контролю фольгированного стеклотекстолита при относительно низких частотах, например, в случае нанесения защитных диэлектрических покрытий, для выявления ряда дефектов печатных плат, при наличии именно низкочастотных устройств вихретокового контроля и т.п. В таких случаях может оказаться полезным привлечение математической обработки результатов измерений,

позволяющей разделить влияющие факторы. Одним из способов такой обработки является применение проекционных методов многомерного анализа данных [10]. Эти методы хорошо зарекомендовали себя при вихретоковом контроле различных характеристик изделий из немагнитных металлов и сплавов [11], в том числе толщины металлических листов и проводящих покрытий на диэлектрической основе [12]. В настоящей работе рассматривается возможность применения метода главных компонент для проведения вихретокового контроля толщины медной фольги, нанесенной на стеклотекстолит.

Материалы и метод измерений

В качестве образцов для исследования применялся фольгированный стеклотекстолит с медным по-

крытием различных промышленных марок, предназначенный для производства печатных плат. Толщина медного слоя h изменялась в зависимости от предназначения будущей печатной платы. Для определения этой величины использовалась оптическая микроскопия, с этой целью изготавливались срезы стеклотекстолитовой пластины, подвергавшиеся полировке. Типичный вид срезов приведен на рисунке 1. Измеренные значения h для разных образцов изменялись в достаточно широком интервале от 18 мкм до 60 мкм. Результаты измерений приведены в таблице для двух групп образцов — исходных, применявшихся в качестве эталонных, и тестовых, использовавшихся для апробации применяемого подхода (погрешность измерений ~10–12 %).

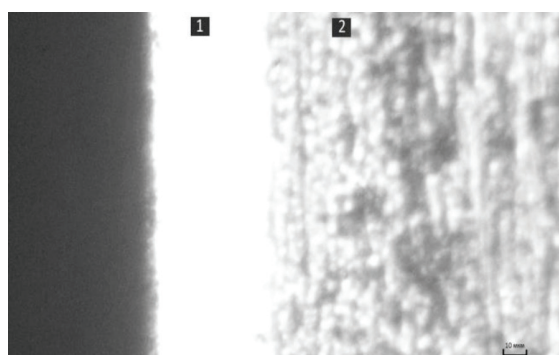


Рис. 1. Поперечный срез фольгированной стеклотекстолитовой пластины:
1 — медный слой, 2 — стеклотекстолитовая основа

Для измерения удельной электропроводности медных слоев применялся четырехточечный метод. В образцах фольгированного стеклотекстолита использовались различные виды фольг, полученные технологически разными способами и различавшиеся структурными характеристиками (размерами зерен, текстурой, остаточной пористостью, шероховатостью поверхности). Этим объяснялся разброс в значениях

измеренной удельной электропроводности σ , изменявшейся в интервале от 35 МС/м до 45 МС/м (с погрешностью измерений 7–8 %), а также то обстоятельство, что эти значения были меньшими, чем удельная электропроводность литой меди. Усредненные экспериментальные значения σ приведены в таблице для двух групп образцов.

Характеристики проводящего слоя фольгированного стеклотекстолита

Образец	Толщина фольги h , мкм	Электропроводность σ , МСм/м
Исходные		
1	16	36
2	19	30
3	48	35
4	46	39
Тестовые		
5	23	33
6	45	29
7	62	37
8	49	36

В работе использовался метод многочастотных вихретоковых измерений. Результаты этих измерений представлялись в виде экспериментальных годографов

системы «контролируемый образец — вихретоковый датчик». Для проведения измерений использовалась автоматизированная экспериментальная установка с на-

кладным параметрическим датчиком [13]. На рисунке 2 приведена фотография применявшегося датчика на образце фольгированного стеклотекстолита.

Для учета значимых в реальных условиях случайных факторов, обусловленных возможными различиями в прижиге накладного датчика к поверхности образца и изменениями в величине s зазора между дат-

чиком и поверхностью материала из-за вариаций шероховатости медного слоя, давление прижима изменяли случайным образом в интервале от 1 Н до 10 Н.

На рисунке 3 представлена схема вихретоковых измерений (рис. 3а — схема проведения испытаний, рис. 3б — накладной датчик и структура контролируемого образца).



Рис. 2. Внешний вид вихретокового датчика и контролируемого образца

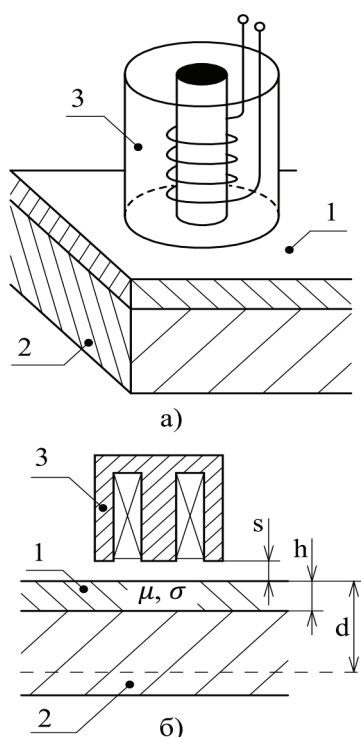


Рис. 3. Схема вихретоковых испытаний образцов фольгированного стеклотекстолита:
 а — схема проведения измерений, б — схема структуры накладного датчика и фольгированного стеклотекстолита; 1 — проводящий металлический слой, 2 — стеклотекстолитовая основа, 3 — накладной датчик

Вихретоковые испытания проводились в диапазоне частот $f=\omega/2\pi$ от 100 Гц до 10 кГц. Методика измерений, основанная на возбуждении сигнала со специально подобранным набором гармонических составляющих, была описана в работе [14].

При частотах порядка 10 кГц глубина скин-слоя d для медных фольг с приведенными значениями удельной электропроводности составляет $\sim 800\text{--}900$ мкм, что на порядок превышает толщину фольг h . Именно это обстоятельство принципиально затрудняет контроль толщины проводящего слоя непосредственно по результатам низкочастотных вихретоковых измерений, которые, как отмечалось выше, зависят только от произведения величин h -и σ .

Экспериментальные годографы

При проведении вихретоковых испытаний непосредственно измерявшимся параметром выступало комплексное сопротивление вихретокового преобразователя. Полученные экспериментальные данные представлялись в виде годографов, описывавших зависимость между активным R и реактивным $X=\omega L$ (L — индуктивность преобразователя) сопротивлениями вихретокового преобразователя в диапазоне частот ω возбуждающего сигнала. Для наглядности эти зависимости графически представлялись в относительных координатах «изменения активного сопротивления датчика $\Delta R/X_0$ — изменения реактивного сопротивления $\Delta X/X_0$ », где $\Delta R=R-R_0$ и $\Delta X=\omega(L-L_0)$, R_0 , L_0 , X_0 — соответственно активное сопротивление, индуктивность и реактивное сопротивление при отсутствии образца.

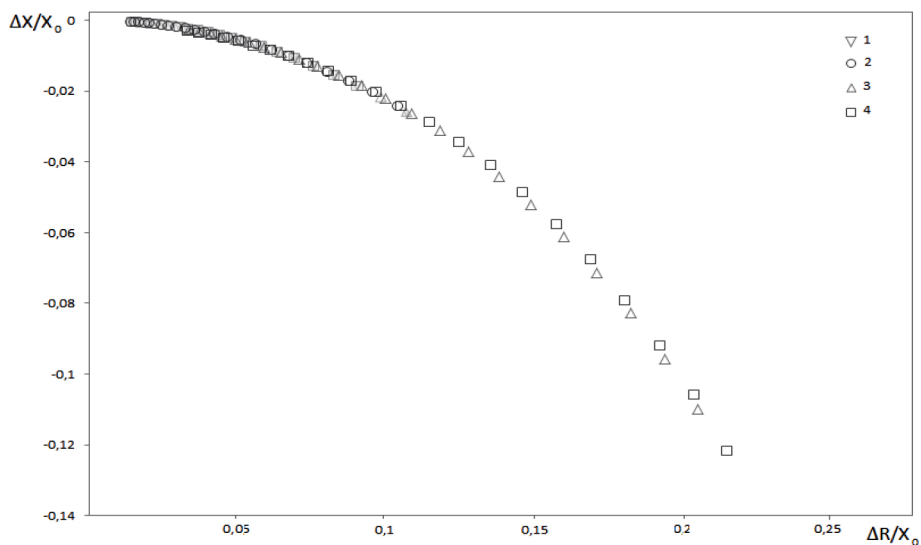


Рис. 4. Результаты вихретоковых измерений для фольгированных стеклотекстолитовых пластин. Толщина медного слоя h : 1 — 16 мкм, 2 — 19 мкм, 3 — 48 мкм, 4 — 46 мкм

На рисунке 4 приведены годографы системы «датчик — образец» для четырех разных марок фольгированного стеклотекстолита (точки с одинаковым обозначением относятся к исходным образцам одного вида, их характеристики представлены в таблице). Как видно из рисунка 4, экспериментальные точки для образцов с малыми толщинами сосредоточены в верхней части годографа, для более высоких значений h линия годографа охватывает заметно больший интервал изменения активного и реактивного сопротивлений. Это связано с тем, что при увеличении толщины проводящего слоя вихревые токи в слое увеличиваются, что приводит к росту активного сопротивления потерь и снижению индуктивности датчика при фиксированной частоте возбуждения.

Влияние разброса в значениях удельной электропроводности проявляется в сдвиге экспериментальных точек вдоль линии годографа. Данное обстоятельство обусловлено тем, что положение точки при постоянном значении толщины проводящего покрытия зависит только от обобщенного вихретокового параметра $\beta \sim \sqrt{\omega\sigma}$.

Приведенные на рисунке 4 данные свидетельствуют о том, что разделить образцы с разными толщинами медной фольги и различиями в значениях удельной электропроводности проводящего слоя непосредственно по годографам, представляющим результаты вихретоковых измерений, крайне затруднительно.

Применение метода главных компонент

Для разделения влияния различных характеристик металлических фольг, нанесенных на стеклотекстолит, была использована математическая обработка экспериментальных данных на основе метода главных компонент [15–17]. В соответствии с этим подходом экспериментальный годограф, описывавший результаты

вихретоковых измерений для конкретного образца во всем дискретном диапазоне частот, описывался точкой многомерного пространства. Координаты этой точки задавались значениями активного и реактивного сопротивления вихретокового преобразователя при каждой из фиксированных частот измерения. Все вихретоковые измерения представлялись совокупностью точек, при этом их расположение отражало закономерности влияния основных факторов на результаты измерений. Результаты измерений с близкими значениями таких влияющих факторов, как толщина проводящего слоя и его электропроводность, описывались кластерами из близко расположенных точек. Различные значения влияющих факторов приводили к формированию отдельно расположенных кластеров, отстоящих друг от друга тем дальше, чем больше были различия в свойствах материала, определяющих результаты вихретоковых измерений. Полученные при обработке результаты наглядно представлялись в виде двумерных проекций точек многомерного пространства на плоскости, координатные оси которых выбирались вдоль направлений, описывавших наиболее значимые закономерности в расположении точек, т.е. вдоль главных осей.

Математически изложенный подход сводился к следующему [6, 18]. Результаты измерений представлялись в виде матрицы X , элементами которой являлись экспериментальные значения активных и реактивных сопротивлений вихретокового преобразователя, полученные при конкретном измерении. Далее матрица X подвергалась разложению:

$$X = T P^T, \tag{2}$$

при этом выделялась матрица T , элементы которой описывали экспериментальные данные уже в новой

системе координат — в системе главных компонент (здесь транспонированная матрица \mathbf{P}^T образована элементами, задающими направления главных осей).

Результаты расчетов для исходных образцов приведены на рисунке 5 в виде проекций экспериментальных данных на плоскость первых главных компонент PC1–PC2. Точки 1–4 относятся к исходным образцам с характеристиками, приведенными в таблице, при этом каждая такая точка описывает результаты одного измерения для конкретного образца. Видно, что все точки разделились на отдельные неперекрывающиеся кластеры, соответствующие образцам с определенными значениями толщин медного слоя h и удельных электропроводностей σ . Разброс точек внутри кластера отражает влияние случайных факторов, задававшихся вариациями давления прижима датчика и тем самым — возможными случайными изменениями величины зазора s между датчиком и поверхностью образца.

Как видно из рисунка 5, кластеры 1 и 2 расположены вблизи друг от друга, что обусловлено близкими значениями толщин медного слоя (16 мкм и 19 мкм) для соответствующих образцов. Аналогично по этой же причине близки кластеры 3 и 4 (толщины фольги 48 мкм и 46 мкм). В то же время расхождение этих двух групп кластеров друг от друга обусловлено значительным различием в толщине проводящего слоя между образцами 1, 2 и 3, 4 соответственно. Таким образом, метод главных компонент позволяет наглядно разделить образцы с разными значениями величин h и σ .

Возможность применения метода главных компонент в задачах вихретокового контроля фольгированного стеклотекстолита исследовалась следующим образом. Полученные для группы исходных образцов (образ-

цы 1–4) данные в виде матриц \mathbf{P} и \mathbf{T} рассматривались как эталонные, задающие исходную математическую модель, определявшую пространство главных компонент. Другая группа образцов (образцы 5–8) рассматривалась как тестовая. Данные независимых вихретоковых измерений для тестовых образцов подвергались математической обработке в «эталонном» пространстве главных компонент, заданном матрицами \mathbf{P} и \mathbf{T} исходных образцов, и представлялись в виде проекций на ту же самую плоскость PC1–PC2. Результаты расчетов для тестовых образцов приведены на рисунке 5 в виде кластеров, образуемых совокупностями точек 5–8.

Анализ полученных данных проводился с привлечением независимо измеренных значений для толщин медной фольги и ее удельной электропроводности, приведенных для тестовых образцов в нижней части таблицы. Как следует из рисунка 5, кластеры точек 6 и 8, описывавшие тестовые образцы с толщинами фольг 45 мкм и 49 мкм соответственно, расположились вблизи друг от друга и в области кластеров точек для исходных образцов 3 и 4 с близкими значениями величины h . Тестовые точки 5 и 7 (значения h , равные 23 мкм и 62 мкм соответственно) сформировали кластеры, значительно отстоявшие от двух групп кластеров, образованных совокупностями точек 3, 4, 6, 8 и точек 1, 2. Кроме того, кластер точек 5, описывавший тестовые образцы с промежуточным значением толщины медного слоя, расположился между двумя указанными группами кластеров, относящимися к большим и меньшим толщинам. Рисунок 5 также показывает, что первая главная компонента PC1 ответственна за изменение толщины фольгированного слоя стеклотекстолита (увеличение значений h приводит к сдвигу результаты расчетов вдоль оси PC1).

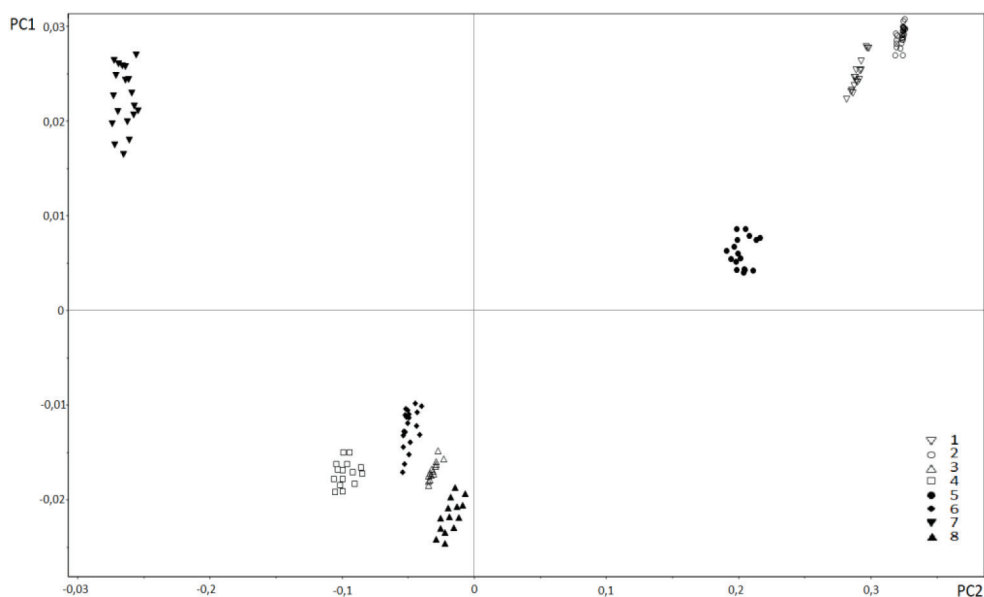


Рис. 5. Результаты математической обработки данных вихретоковых измерений по методу главных компонент. Толщина медного слоя h : 1 — 16 мкм, 2 — 19 мкм, 3 — 48 мкм, 4 — 46 мкм

Таким образом, обработка результатов низкочастотных вихретоковых измерений по методу главных компонент с построением математической модели по «эталонным» данным позволила разделить образцы фольгированного стеклотекстолита по толщине проводящего покрытия.

Заключение

В работе рассмотрена возможность применения многочастотных вихретоковых измерений для оцен-

ки толщины проводящего медного слоя фольгированного стеклотекстолита, применяющегося при производстве печатных плат. Показано, что использование математической обработки экспериментальных данных на основе метода главных компонент позволяет разделить образцы с разными толщинами проводящего слоя. Предложенный подход может найти свое применение в задачах неразрушающего вихретокового контроля эксплуатационных характеристик фольгированного стеклотекстолита.

Библиографический список

1. Ефимов А.Г., Бакунов А.С., Шубочкин А.Е. Применение вихретоковых средств неразрушающего контроля в промышленности // Территория NDT. 2015. № 3. С. 32–39.
2. García-Martín J., Gómez-Gil J., and Vázquez-Sánchez E. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing // *Sensors*. 2011. Vol. 11. No 3. P. 2525–2565. <https://doi.org/10/3390/s110302525>
3. Шубочкин А.Е. Развитие и современное состояние вихретокового метода неразрушающего контроля. М.: Издательский дом «Спектр», 2014. 288 с.
4. Атавин В.Г., Исхужин Р.Р., Терехов А.И. Измерение толщины токопроводящих покрытий с отстройкой от зазора и электропроводности основания // Дефектоскопия. 2016. Т. 52. № 5. С. 32–35. <https://doi.org/10.1134/S1061830916050028>
5. Чернышев А.В., Загорских И.Е., Шарандо В.И. Многочастотный метод контроля для вихретоковой толщинометрии // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. 2019. Т. 64. № 1. С. 118–126. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-1-118>
6. Егоров А.В., Поляков В.В. Многочастотный вихретоковый контроль листов конструкционной стали // Дефектоскопия. 2024. Т. 60. № 11. С. 46–55. <https://doi.org/10.31857/S0130308224110048>
7. Чернышев А.В. Выбор рабочей частоты вихретокового толщиномера с накладным преобразователем // Приборы и методы измерений. 2014. № 1 (8). С. 73–78.
8. Шкатов П.Н., Мякушев К.В. Обобщенная оценка глубины проникновения вихревых токов при вихретоковом контроле // Приборостроение и биотехнические системы. 2014. № 3 (305). С. 142–147.
9. Lakhdari A.E., Cheriet A., El-Ghoul I.N. Skin Effect Based Technique in EC-NDT for Thickness Measurement of Conductive Material // *IET Science, Measurement & Technology*. 2019. Vol. 13. No 2. P. 255–259. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5322>
10. Esbensen K.H., Geladi P. Principal Component Analysis: Concept, Geometrical Interpretation, Mathematical

Background, Algorithms, History, Practice. In: Brown E-CSD, Tauler R, and Beata Walczak, editors. *Compr. Chemom.*, Oxford: Elsevier, 2009. P. 211–260.

11. 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. Vol. 160. P. 8–12. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2016.11.007>

12. Егоров А.В., Поляков В.В., Борцова Я.И. Применение проекционных методов многомерного анализа в вихретоковой толщинометрии // Измерительная техника. 2019. № 7. С. 49–53. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-7-49-53>

13. Machado M.A. Eddy Currents Probe Design for NDT Applications: A Review // *Sensors*. 2024. Vol. 24. No 17. P. 5819. <https://doi.org/10.3390/s24175819>

14. Егоров А.В., Поляков В.В., Лепендин А.А., Грачева Я.И. Применение сигналов специальной формы в многочастотных вихретоковых измерениях // Автометрия. 2017. Т. 53. № 3. С. 28–35. <https://doi.org/10.15372/AUT20170304>

15. 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 Journal*. 2016 Vol. 16. No 9. P. 3147–3154. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2529721>

16. BinFeng Y., FeiLu L., and Dan H. Research on Edge Identification of a Defect Using Pulsed Eddy Current Based on Principal Component Analysis // *NDT E International*. 2007. Vol. 40. No 4. P. 294–299. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2006.12.005>

17. Эсбенсен К. Анализ многомерных данных. Избранные главы / пер. с англ. С.В. Кучерявского. Черноголовка: Изд-во ИПХФ РАН, 2005. 157 с.

18. Егоров А.В., Поляков В.В. Вихретоковой контроль металлических материалов с помощью проекционных методов многомерного анализа данных // Дефектоскопия. 2018. № 5. С. 55–62.

References

1. Efimov A.G., Bakunov A.S., Shubochkin A.E. Application of Eddy Current Non-Destructive Testing Equipment in Industry. *NDT Territory*. 2015. No 3. P. 32–39. (In Russ.).

2. García-Martín J., Gómez-Gil J., and Vázquez-Sánchez E. Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing. *Sensors*. 2011. Vol. 11. No 3. P. 2525–2565. <https://doi.org/10/3390/s110302525>

3. Shubochkin A.E. *Development and Current State of the Eddy Current Method of Non-Destructive Testing*. Moscow: Publishing House "Spectrum", 2014. 288 c. (In Russ.).
4. Atavin V.G., Iskhuzhin R.R., Terekhov A.I. Measuring the Depth of Conducting Coatings with Gap and Substrate-Conductivity Detuning. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2016. Vol. 52. No 5. P. 32–35. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S1061830916050028>
5. Chernyshev A. V., Zagorskiy I. E., Sharando V. I. Multi-Frequency Method of Control for Eddy Current Thickness Measurement. *Vestsi Natsyyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Seryya Fizika-technichnykh Navuk / Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical Series*. 2019. Vol. 64, No 1, P. 118–126. (In Russ.). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-1-118-126>
6. Egorov A.V., Polyakov V.V. Multi-Frequency Eddy Current Testing of Structural Steel Sheets. *Russian Journal of Non-destructive Testing*. 2024. Vol. 60. No. 11. P. 46–55. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0130308224110048>
7. Chernyshev A. V. Choosing of Operating Frequency of Eddy Current Thickness Meter with Superimposed Transducer. *Devices and Methods of Measurements*. 2014. No 1 (8). P. 73–78. (In Russ.).
8. Shkatov P.N., Myakushev K.V. Overall Assessment of the Penetration Depth Eddy Currents in the Eddy-Current Control. *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*. 2014. No 3 (305). P. 142–147. (In Russ.).
9. Lakhdari A.E., Cheriet A., El-Ghoul I.N. Skin Effect Based Technique in EC-NDT for Thickness Measurement of Conductive Material. *IET Science, Measurement & Technology*. 2019. Vol. 13. No 2. P. 255–259. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5322>
10. Esbensen K.H., Geladi P. Principal Component Analysis: Concept, Geometrical Interpretation, Mathematical Background, Algorithms, History, Practice. in: Brown E-CSD, Tauler R, and Beata Walczak, Editors. *Compr. Chemom.*, Oxford: Elsevier; 2009. P. 211–260.
11. 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. Vol. 160. P. 8–12. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2016.11.007>
12. Egorov A.V., Polyakov V.V., Bortsova Ya.I. Application of Projection Methods of Multidimensional Analysis in Eddy Current Thickness Measurement. *Measurement Techniques*. 2019. No 7. P. 49–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-7-49-53>
13. Machado M.A. Eddy Currents Probe Design for NDT Applications: A Review. *Sensors*. 2024. Vol. 24. No 17. P. 5819. <https://doi.org/10.3390/s24175819>
14. Egorov A.V., Polyakov V.V., Lependin A.A., Gracheva Ya.I. Using Signals of Special Form in Multi-Frequency Eddy Current Testing. *Avtometriya*. 2017. Vol. 53. No 3. P. 28–35. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/AUT20170304>
15. 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 Journal*. 2016 Vol. 16. No 9. P. 3147–3154. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2529721>
16. BinFeng Y., FeiLu L., Dan H. Research on Edge Identification of a Defect Using Pulsed Eddy Current Based on Principal Component Analysis. *NDT E International*. 2007. Vol. 40. No 4. P. 294–299. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2006.12.005>
17. Esbensen K. *Multivariate Data Analysis. Selected Chapters. (Translated from English by S.V. Kucheravsky)*. Chernogolovka: Publishing House of the Institute of Problems of Chemical Physics of the Russian Academy of Sciences, 2005. P. 157. (In Russ.).
18. Egorov A.V., Polyakov V.V. Eddy Current Testing of Metallic Materials Using Projection Methods. *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2018. No 5. P. 55–62. (In Russ.).

Информация об авторах

Д.А. Дмитриев, аспирант Института цифровых технологий, электроники и физики, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия;

А.В. Егоров, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информационной безопасности, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия;

В.В. Поляков, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры информационной безопасности, Алтайский государственный университет, Барнаул, Россия.

Information about the authors

D.A. Dmitriev, Postgraduate Student, Institute of Digital Technologies, Electronics and Physics, Altai State University, Barnaul, Russia;

A.V. Egorov, Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Associate Professor of the Department of Information Security, Altai State University, Barnaul, Russia;

V.V. Polyakov, Doctor of Sciences in Physics and Mathematics, Professor, Professor of the Department of Information Security, Altai State University, Barnaul, Russia.