

УДК 681.518

## ПРИМЕНЕНИЕ СИГНАЛОВ СПЕЦИАЛЬНОЙ ФОРМЫ В МНОГОЧАСТОТНЫХ ВИХРЕТОКОВЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ\*

А. В. Егоров<sup>1</sup>, В. В. Поляков<sup>1,2</sup>, А. А. Лепендин<sup>1</sup>, Я. И. Грачева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Алтайский государственный университет,  
656049, г. Барнаул, просп. Ленина, 61

<sup>2</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,  
634055, г. Томск, просп. Академический, 2/4  
E-mail: pvv@asu.ru

Предложен метод вихретоковых измерений, основанный на использовании возбуждающего сигнала специальной формы. Последующая цифровая обработка регистрируемого выходного сигнала делает возможным расчёт параметров измерительного датчика на различных частотах и построение экспериментального годографа системы датчик—контролируемый объект. Проведённые эксперименты для материалов с различными физическими и геометрическими характеристиками построения годографов показали, что предложенный метод обеспечивает надёжное разделение основных факторов, влияющих на результаты многочастотных вихретоковых измерений. Полученные результаты могут быть использованы в автоматизированных системах диагностики и неразрушающего контроля материалов и изделий.

*Ключевые слова:* автоматизация измерений, метод вихревых токов, диагностика материалов, цифровая обработка сигналов.

DOI: 10.15372/AUT20170304

**Введение.** Вихретоковые измерения являются одним из наиболее распространённых методов, используемых при автоматизированной диагностике материалов и конструкций [1]. С их помощью удаётся оценивать значения физических параметров [2], характеризующих состояние внутренней структуры металлических материалов, выявлять поверхностные и подповерхностные дефекты [3], обнаруживать возникающие в процессе эксплуатации трещины и определять их размеры и местоположение [4, 5]. Результаты вихретоковых измерений зависят от совместного действия большого числа факторов. К ним относятся физические свойства материала (электропроводность и магнитная проницаемость), форма и геометрические размеры контролируемого объекта, а также условия измерений [6, 7]. Кроме того, получаемые результаты зависят от конструктивных особенностей датчиков [8, 9].

При использовании вихретоковой диагностики, основанной на измерениях при одной частоте, сложно выделить контролируемый параметр и подавить влияние всех остальных факторов. Наибольшая информативность метода вихревых токов достигается при многочастотных измерениях, завершающихся построением и анализом годографов системы датчик—образец [10]. Такие годографы отражают совместное влияние практически всех факторов, существенных для диагностики материалов. Основной проблемой при многочастотных измерениях является точность определения параметров датчика в широком диапазоне частот. При достижении достаточной точности экспериментальные годографы позволяют разделить влияние различных факторов [11, 12]. В то же время при многочастотных вихретоковых измерениях обычно приходится использовать последовательный перебор частот. В результате повышение точности построения годографов требует увеличе-

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 17-08-00914).

ния числа отдельных измерений и достаточно существенных затрат времени. Кроме того, в процессе измерений мешающие факторы могут случайным образом изменяться, внося дополнительные искажения.

В данной работе рассмотрен метод построения экспериментальных годографов, позволяющий устранить отмеченные недостатки. Этот метод основан на возбуждении датчика сигналом специальной формы.

**1. Измерительное устройство.** Использовалась схема измерений, обеспечивающая возможность автоматизации эксперимента и реализующая одновременное определение параметров датчика на различных частотах. Блок-схема измерительно-вычислительного устройства приведена на рис. 1. Управляющее устройство 1 формировало массив данных, содержащих мгновенные значения возбуждающего вихревые токи сигнала. Этот массив подавался на вход формирователя сигнала 2, в состав которого входили тактируемый цифроаналоговый преобразователь с фильтром низкой частоты на выходе. Синтезированный таким образом аналоговый сигнал  $u_1(t)$  направляли на вход измерительной цепи, которая состояла из последовательно включённого параметрического датчика 3 ( $L$  — индуктивность,  $r$  — активное сопротивление) и образцового сопротивления  $R$ . Временные развёртки входного  $u_1(t)$  и выходного  $u_2(t)$  сигналов регистрировали синхронно с помощью аналогоцифровых преобразователей 4 и 5 соответственно. В результате получали массивы данных для входного  $\{u_n^{(1)}\}$  и выходного  $\{u_n^{(2)}\}$  сигналов, которые передавали управляющему устройству для дальнейшей обработки.

В рассматриваемой схеме измерений связь между входным  $u_1(t)$  и выходным  $u_2(t)$  сигналами описывали дифференциальным уравнением

$$\frac{du_2}{dt} + \frac{R+r}{L} u_2 = \frac{R}{L} u_1. \quad (1)$$

Для анализа спектра частот регистрируемых сигналов к формуле (1) применяли преобразование Фурье и получили выражение

$$\hat{U}_2 = \frac{R}{R+r+j\omega L} \hat{U}_1 = \dot{K}(j\omega) \hat{U}_1, \quad (2)$$

где  $\hat{U}_1$  и  $\hat{U}_2$  — фурье-образы функций  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$  соответственно;  $\dot{K}(j\omega)$  — комплексный коэффициент передачи на частоте  $\omega$  для измерительной цепи ( $j = \sqrt{-1}$ ).

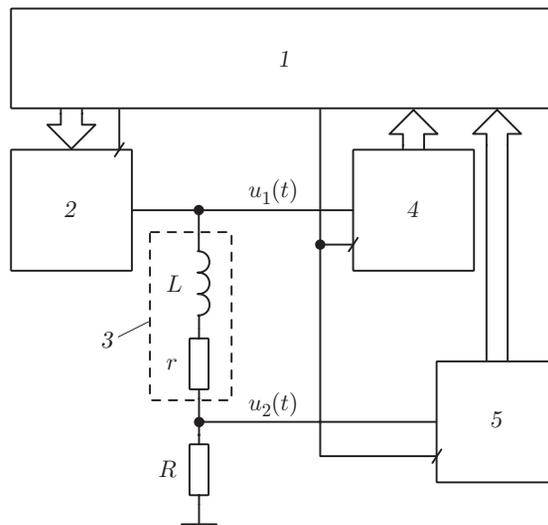


Рис. 1. Структурная схема измерений

**2. Модифицированный метод многочастотных измерений.** В соответствии с основной идеей предлагаемого подхода для одновременного измерения параметров датчика на вход измерительной цепи подавали сигнал  $u_1(t)$ , полученный путём суперпозиции  $M$  гармонических сигналов [13] с фиксированными частотами  $\omega_1, \dots, \omega_M$ :

$$u_1(t) = u_0 \sum_{m=1}^M \sin(\omega_m t), \quad (3)$$

где  $u_0$  — нормировочный коэффициент, ограничивающий максимальное значение сигнала  $u_1(t)$ . Согласно уравнениям (2) и (3) фурье-образ выходного сигнала записывали в виде

$$\hat{U}_2 = \sum_{m=1}^M \hat{K}(j\omega_m) \hat{U}_{1m}, \quad (4)$$

где  $\hat{U}_{1m}$  — фурье-образ функции  $u_0 \sin(\omega_m t)$ . Выражение (4) показывает, что выходной сигнал имеет линейчатый спектр, который содержит информацию о параметрах вихретокового датчика на соответствующих частотах.

Для определения характеристик датчика использовались экспериментальные массивы данных  $\{u_n^{(1)}\}$  и  $\{u_n^{(2)}\}$ , заданные с частотой дискретизации  $\omega_a$  и содержащие  $N$  элементов. Анализ спектра сигналов проводили с помощью дискретного преобразования Фурье [14], согласно которому комплексные амплитуды дискретных фурье-преобразований  $\dot{U}_k^{(1)}$  и  $\dot{U}_k^{(2)}$  для входного и выходного сигналов имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{U}_k^{(1)} = \sum_{n=0}^{N-1} u_n^{(1)} e^{-j(2\pi kn/N)}, \\ \dot{U}_k^{(2)} = \sum_{n=0}^{N-1} u_n^{(2)} e^{-j(2\pi kn/N)}. \end{cases} \quad (5)$$

Эти амплитуды соответствуют частоте

$$\omega_k = (\omega_a/N)k, \quad k = 0, 1, \dots, N-1. \quad (6)$$

В общем случае формирующие исходный сигнал частоты  $\omega_m$  не совпадают с набором частот дискретного преобразования Фурье  $\omega_k$  [15]. Влияние этого фактора проиллюстрировано рис. 2, на котором приведён дискретный спектр сигнала для двух случаев. В первом случае применяли частоты, совпадавшие с сеткой частот (6) в дискретном преобразовании Фурье, во втором случае частоты этому условию не удовлетворяли. На рисунке по оси абсцисс откладывались частоты  $f = \omega/2\pi$  (в логарифмическом масштабе), по которым раскладывался исходный сигнал, а по оси ординат — амплитуды  $A$ . Из рис. 2, *a* видно, что для первого случая значения амплитуд практически не изменяются. Для второго случая наблюдается существенный разброс амплитуд (рис. 2, *b*), что обусловлено несовпадением частот сигнала  $\omega_m$  и разложения  $\omega_k$ . Влияние данного эффекта при проведении вихретоковых измерений с построением экспериментального годографа требует специальной оценки.

Для расчёта параметров вихретокового датчика использовалась связь между комплексными амплитудами входного и выходного сигналов, следовавшая из соотношений (2) и (5):

$$\dot{U}_k^{(2)} = \frac{R}{R + r + j\omega_k L} \dot{U}_k^{(1)}. \quad (7)$$

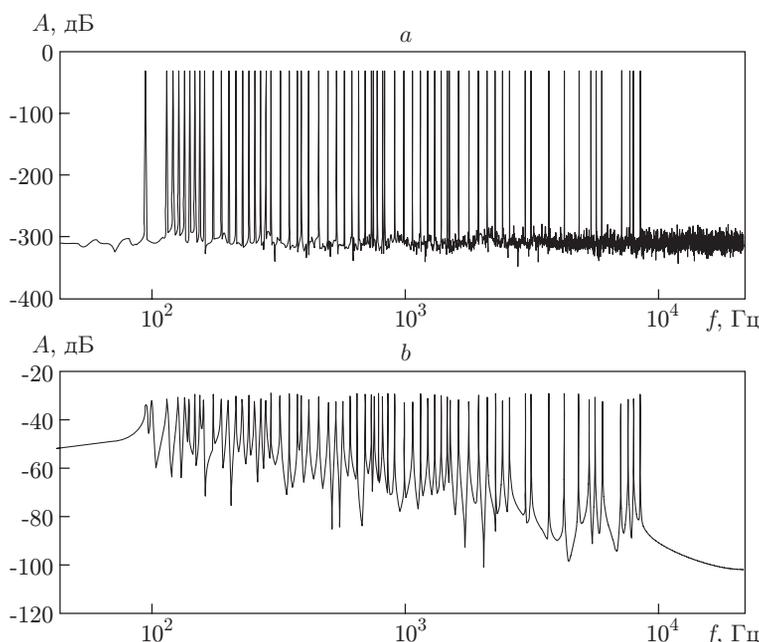


Рис. 2. Дискретный спектр сигнала: *a* — частоты соответствуют условию (6),  
*b* — произвольный набор частот

Из всей совокупности комплексных амплитуд  $\dot{U}_k^{(1)}$  и  $\dot{U}_k^{(2)}$  в расчётах учитывались только значения с индексами  $k(m)$ , которые соответствовали частотам  $\omega_1, \dots, \omega_M$ , применявшимся при формировании входного сигнала (3), и находились как ближайшее целое от величин  $N\omega_m/\omega_a$ . Согласно (7) параметры вихретокового датчика  $X$  и  $r$  на фиксированных частотах  $\omega_m$  вычислялись по формулам

$$X(\omega_m) = \omega_m L(\omega_m) = R(U_{k(m)}^{(1)}/U_{k(m)}^{(2)}) \sin(\varphi_{k(m)}^{(1)} - \varphi_{k(m)}^{(2)}), \quad (8)$$

$$r(\omega_m) = R[(U_{k(m)}^{(1)}/U_{k(m)}^{(2)}) \cos(\varphi_{k(m)}^{(1)} - \varphi_{k(m)}^{(2)}) - 1]. \quad (9)$$

Здесь  $U_{k(m)}^{(1)}$ ,  $U_{k(m)}^{(2)}$  и  $\varphi_{k(m)}^{(1)}$ ,  $\varphi_{k(m)}^{(2)}$  — амплитуды и начальные фазы, полученные из выражений (5).

При многочастотном вихретоковом контроле проводились измерения без образца и с контролируемым образцом. На каждой частоте рассчитывались изменения реактивного  $\Delta X(\omega_m) = X(\omega_m) - X_0(\omega_m)$  и активного  $\Delta r(\omega_m) = r(\omega_m) - r_0(\omega_m)$  сопротивлений датчика (где  $X(\omega_m)$  и  $r(\omega_m)$  — параметры датчика с образцом на фиксированной частоте  $\omega_m$ ,  $X_0(\omega_m)$  и  $r_0(\omega_m)$  — параметры датчика без образца) и строились годографы в координатах  $(\Delta X/X_0 - \Delta r/X_0)$  для наглядного представления результатов измерений.

**3. Результаты измерений для проходного датчика.** При проверке предложенного подхода были проведены измерения для проходного параметрического датчика, представлявшего собой длинный соленоид, внутрь которого помещался исследуемый цилиндрический образец. Такой выбор датчика и исследуемого образца обусловлен тем, что именно для этого случая известна теоретическая зависимость магнитного потока в образце от частоты возбуждающего тока, позволяющая рассчитать теоретический годограф системы датчик—образец и сопоставить его с экспериментальными результатами. Согласно [1] комплексная амплитуда магнитного потока  $\dot{\Phi}$  в длинном цилиндрическом образце, поме-

щённом внутрь соленоида, находится из уравнений Максвелла и описывается выражением

$$\dot{\Phi} = 2\mu\eta \frac{1}{\sqrt{jy}} \frac{I_1(\sqrt{jy})}{I_0(\sqrt{jy})} \dot{\Phi}_0. \quad (10)$$

Здесь  $\dot{\Phi}_0$  — комплексная амплитуда магнитного потока при отсутствии образца в соленоиде;  $I_0(\sqrt{jy})$  и  $I_1(\sqrt{jy})$  — модифицированные функции Бесселя первого рода нулевого и первого порядков соответственно;  $\mu$  — относительная магнитная проницаемость материала, из которого изготовлен образец;  $y = 0,5d\sqrt{\mu_0\mu\sigma\omega}$  — обобщённый вихретоковый параметр ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная,  $\sigma$  — удельная электрическая проводимость материала,  $\omega$  — частота возбуждающего синусоидального тока, протекающего через обмотки соленоида);  $\eta = d^2/D^2$  — коэффициент заполнения датчика образцом ( $d$  и  $D$  — диаметры образца и датчика). Используемые для построения годографа величины  $\Delta X/X_0$  и  $\Delta r/X_0$  связаны с комплексной амплитудой магнитного потока в образце следующей формулой [16]:

$$\dot{\Phi} = (\Delta X/X_0 + \eta - j(\Delta r/X_0))\dot{\Phi}_0. \quad (11)$$

В учёт (11) теоретические координаты годографа могут быть рассчитаны по системе уравнений

$$\begin{cases} \Delta X/X_0 = \text{Re}(\dot{\Phi}/\dot{\Phi}_0) - \eta, \\ \Delta r/X_0 = -\text{Im}(\dot{\Phi}/\dot{\Phi}_0), \end{cases} \quad (12)$$

где величина  $\dot{\Phi}$  определялась из (10).

Результаты расчётов для немагнитных материалов ( $\mu = 1$ ) для трёх различных значений коэффициента заполнения датчика образцом  $\eta$  ( $\eta = 0,5; 0,63; 0,7$ ) приведены на рис. 3 в виде кривых  $a, b, c$ . Верхняя часть годографов описывает низкие частоты (малые значения  $y$ ), по мере увеличения частоты линия годографа смещается вниз. Как видно из рисунка, рост коэффициента заполнения проявляется в усиливающемся расхождении нижних участков годографа в связи с увеличением влияния образца на датчик.

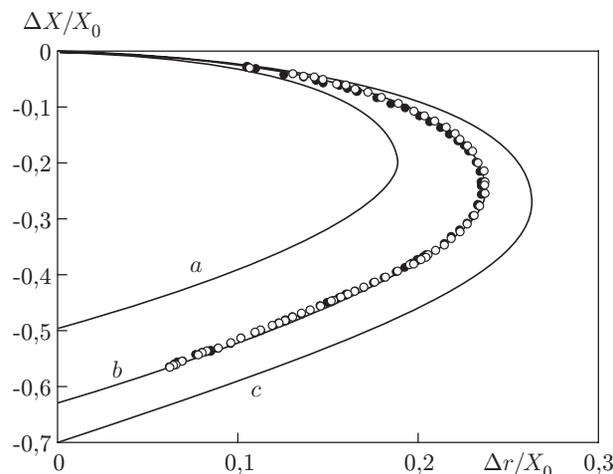


Рис. 3. Годографы для проходного параметрического датчика (○ — измерения для сигнала с набором частот согласно условию (6), ● — измерения для сигнала с произвольным набором частот)

Экспериментальные измерения проводились на датчике с эффективным диаметром  $D = 29$  мм и длиной 240 мм. Цилиндрический образец был изготовлен из алюминиевого сплава Д16 с относительной магнитной проницаемостью  $\mu = 1$  и удельной электрической проводимостью  $\sigma = 22 \pm 1$  МСм/м, диаметр образца составлял  $d = 23$  мм ( $\eta = 0,63$ ), длина равнялась 410 мм. Применяемое в измерительной схеме сопротивление  $R = 50$  Ом. При формировании входного сигнала (3) были взяты  $M = 64$  значения частоты из диапазона от 90 Гц до 9 кГц. Для оценки влияния эффекта, связанного с несовпадением частот возбуждающего сигнала  $\omega_m$  с частотами  $\omega_k$  из формулы (6), применяли два варианта измерений. В первом (см. рис. 2, *a*) использовались частоты, отвечающие условию (6), при этом значение  $\omega_a$  определялось частотой дискретизации аналого-цифровых преобразователей  $f_a = 44100$  Гц и равнялось  $2\pi f_a$ . Во втором варианте (см. рис. 2, *b*) использовался произвольный набор частот из указанного диапазона. Результаты измерений в виде экспериментальных годографов приведены на рис. 3 в виде точек (символы  $\circ$  описывали первый вариант,  $\bullet$  — второй вариант).

Из рис. 3 следует, что экспериментальные точки укладываются на теоретическую кривую *b*, соответствующую эмпирическому значению коэффициента заполнения  $\eta = 0,63$ . Рисунок демонстрирует также, что точки для обоих вариантов измерений ложатся на одну линию годографа. Это показывает, что выбор частот возбуждающего сигнала практически не сказывается на результатах построения годографа.

**4. Экспериментальные годографы для накладного датчика.** В практических задачах диагностики используются, как правило, накладные датчики, позволяющие контролировать различные параметры металлических изделий произвольной формы. Экспериментальный метод, апробированный в разд. 3 на примере проходного датчика, был применён при получении годографов для разных объектов и условий измерений в случае накладного датчика. Испытания проводились по схеме, приведённой на рис. 1, с произвольным набором частот  $\omega_m$  от 100 Гц до 8 кГц из рабочего диапазона датчика. При измерениях использовался датчик, представлявший собой катушку индуктивности, помещённую в полуброневый ферритовый сердечник диаметром 20 мм марки 2000МН. Выбор этой конструкции был обусловлен зависимостью получаемого с датчика сигнала одновременно от физических свойств материала, геометрических параметров объекта диагностики и условий измерения, что позволяло выявить возможности предложенного метода по разделению влияния различных факторов.

Исследовано влияние на получаемые годографы удельной электропроводности материала, геометрических размеров (толщины) образца и величины зазора между датчиком и проводящей поверхностью. В качестве исследуемых объектов использовались образцы из меди и алюминиевого сплава Д16Т. Удельные электропроводности материалов составляли  $\sigma = 57 \pm 5$  МСм/м для меди и  $\sigma = 17 \pm 1$  МСм/м для алюминиевого сплава. Образцы изготавливались из пластин толщиной  $d = 2$  и  $d = 20$  мм и имели рабочую часть размером  $60 \times 60$  мм. Измерения проводились при непосредственном контакте датчика с поверхностью образца (зазор  $h = 0$ ) и зазоре  $h = 0,5$  мм, заданном диэлектрической прокладкой. Полученные экспериментальные годографы приведены на рис. 4.

Вид экспериментальных годографов качественно соответствует теоретическим оценкам для модельных накладных датчиков [7]. Как видно из рис. 4, группы точек, описывающих материалы с разной удельной электропроводностью при одинаковых значениях зазора и толщины образца, ложатся на одну и ту же кривую. Это обусловлено тем, что влияние удельной электропроводности определяется величиной обобщённого вихретокового параметра  $y$ , пропорционального произведению удельной электропроводности и частоты ( $y \sim \sqrt{\omega\sigma}$ ), и проявляется в сдвиге экспериментальных точек при росте частоты  $\omega$  из верхней части годографа в нижнюю часть. Годографы образцов разной толщины различаются

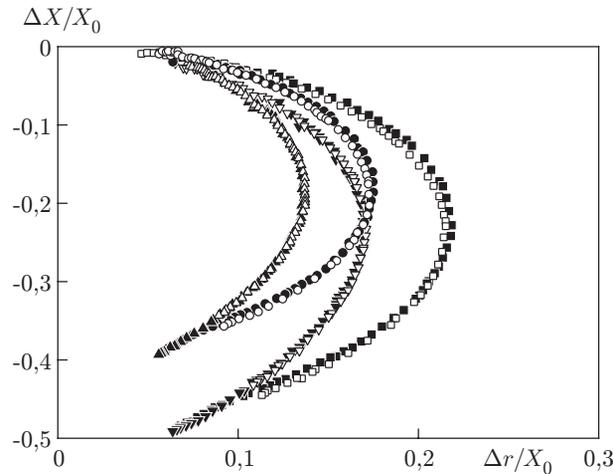


Рис. 4. Влияние различных факторов на экспериментальные годографы для накладного параметрического датчика (при  $h = 0$ : ▼ — медная пластина ( $d = 20$  мм), ▽ — дюралюминиевая пластина ( $d = 20$  мм), ■ — медная пластина ( $d = 2$  мм), □ — дюралюминиевая пластина ( $d = 2$  мм); при  $h = 0,5$  мм: ▲ — медная пластина ( $d = 20$  мм); △ — дюралюминиевая пластина ( $d = 20$  мм), ● — медная пластина ( $d = 2$  мм), ○ — дюралюминиевая пластина ( $d = 2$  мм))

по форме. Вследствие того, что величина активных потерь в системе датчик—образец зависит от соотношения толщины образца и величины скин-слоя в материале, при этом на участке высоких частот из-за малой величины скин-слоя толщина образца практически не сказывается на положении линии годографа. Изменение величины зазора приводит к расхождению нижних участков линий годографа, соответствующих высоким частотам измерений, что вызвано уменьшением влияния вихревых токов на параметры датчика при его удалении от проводящей поверхности. В целом рис. 4 свидетельствует о достаточно надёжном разделении факторов, влияющих на вид и положение годографов.

**Заключение.** Полученные результаты показывают, что предложенный метод, основанный на применении в многочастотных вихретоковых измерениях сигнала специальной формы, позволяет одновременно определить все точки, образующие экспериментальные годографы, при этом время измерений уменьшается пропорционально числу точек. Достижимая точность построения годографов обеспечивает разделение различных факторов, влияющих на эксперимент. Это свидетельствует о перспективности применения данного метода в автоматизированных системах диагностики и контроля материалов и изделий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Неразрушающий контроль:** Справочник /Под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 2003. Т. 2. 688 с.
2. **Garcia-Martin J., Gómez-Gil J., Vázquez-Sánchez E.** Non-destructive techniques based on eddy current testing // *Sensors*. 2011. **11**, Is. 3. P. 2525–2565.
3. **Song Z., Yamada T., Shitara H., Takemura Y.** Detection of damage and crack in railhead by using eddy current testing // *Journ. Electromagnetic Anal. and Appl.* 2011. **3**, N 11. P. 546–550.
4. **Sasi B., Rao B. P. C., Jayakumar T., Baldev R.** Development of eddy current test procedure for non-destructive detection of fatigue cracks and corrosion in rivets of air-intake structures // *Defence Sci. Journ.* 2009. **59**, N 2. P. 106–112.

5. **Ren Shang-kun, Sun Da-peng.** Studies of eddy current testing on nuclear power steam generator tube based on finite element simulation // Proc. of the 2nd Intern. Conf. on Materials, Mechatronics and Automation. 2012. Vol. 15. P. 217–222.
6. **Lingqi L., Tsukada K., Hanasaki K., Zheng L.** Fusion of multi-frequency eddy current signals-by using wavelet analysis method // Proc. of the Fifth Intern. Conf. on Information Fusion. IEEE, 2002. Vol. 1. P. 108–113.
7. **Yang H. C., Tai C. C.** Pulsed eddy-current measurement of a conducting coating on a magnetic metal plate // Meas. Sci. Technol. 2002. **13**, N 8. P. 1259–1265.
8. **Дякин В. В., Сандовский В. А.** Теория и расчет накладных вихретоковых преобразователей. М.: Наука, 1981. 136 с.
9. **Райков Б. К., Секисов Ю. Н. Тулупова В. В.** Функции преобразования кластерного одновиткового вихретокового датчика // Автометрия. 2008. **44**, № 1. С. 47–58.
10. **Egorov A. V., Polyakov V. V., Salita D. S. et al.** Inspection of aluminum alloys by a multi-frequency eddy current method // Defence Technol. 2015. **11**, Is. 2. P. 99–103. DOI: 10.1016/j.dt.2014.12.002.
11. **Polyakov V. V., Egorov A. V., Pirogov A. A., Kolubaev E. A.** Application of projection methods of multivariate data analysis in eddy current testing of materials // AIP Conf. Proc. 2015. Vol. 1683, Is. 1. 020185. DOI: 10.1063/1.4932875.
12. **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. **160**. P. 8–12. DOI: 10.1063/1.4932875.
13. **Гетманов В. Г.** Об алгоритме поиска по частоте в задаче оценивания параметров моделей полигармонических сигналов // Автометрия. 2009. **45**, № 3. С. 83–89.
14. **Залманзон Л. А.** Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. М.: Наука, 1989. 496 с.
15. **Ефимов В. М., Резник А. Л., Бондаренко Ю. В.** О минимизации ошибки восстановления непрерывного периодического сигнала при его равномерной дискретизации // Автометрия. 2013. **49**, № 2. С. 3–11.
16. **Баштанников Л. А., Бондаренко В. И., Себко В. П., Тюпа В. И.** Определение электромагнитных характеристик материала сплошных цилиндрических изделий // Дефектоскопия. 1980. № 8. С. 5–9.

*Поступила в редакцию 22 февраля 2017 г.*

---