

Р. А. Бадамшин, Т. Р. Загидулин, А. В. Коннов

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ВЕЙВЛЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Предложена методика оптимизации параметров вейвлетного преобразования измеренных сигналов накладного вихретокового преобразователя, применяемого для выявления поверхностных дефектов сплошности типа трещин и коррозионных повреждений металла. *Вейвлетное преобразование; вихретоковый преобразователь; дефект сплошности; измеренный сигнал*

При математической обработке измеренных сигналов преобразователей электромагнитного поля, используемых для выявления дефектов сплошности в стальных изделиях и металлоконструкциях, обычно используются классические методы спектрального анализа. Однако при наличии значительного уровня случайных шумов, эффективность спектрального анализа сигнала существенно снижается, так как шум имеет аналогичный спектр, что и полезный сигнал, особенно для малых дефектов сплошности.

В настоящее время все более широкое применение находит вейвлет-преобразование, которое является эффективным при исследовании непериодических, неоднородных сигналов разной физической природы [1–5].

При вейвлет-преобразовании сигнала в качестве базовых функций используются непериодические, узко локализованные функции, удовлетворяющие определенным условиям, при этом наиболее распространены вейвлетные функции Хаара, оптимальные для анализа сигналов в виде двуполярных прямоугольных импульсов и МНАТ-вейвлет, используемый преимущественно при анализе однополярных импульсных сигналов [1, 2].

Указанные вейвлетные функции относятся к классу трансцендентных математических функций, что приводит к определенным трудностям при реализации на их основе цифровой обработки измеренных сигналов в микропроцессорных устройствах (особенно, функционирующих в масштабе реального времени).

В работе [5] предложены более простые вейвлетные функции алгебраического типа, которые позволяют эффективно анализировать широкий класс измеренных электрических сигналов (рис. 1).

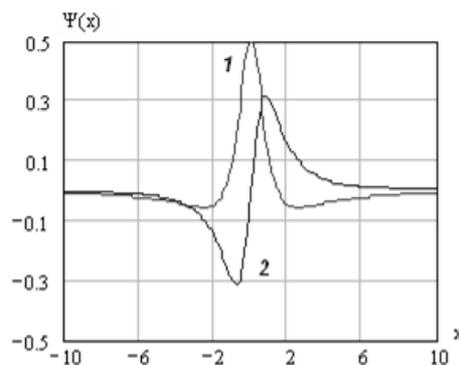


Рис. 1. Материнская вейвлетная функция алгебраического типа: 1 – $\Psi_1(x)$, 2 – $\Psi_2(x)$

В отличие от стандартных материнских вейвлетных функций [1, 2], вейвлетные функции алгебраического типа являются параметрическими, что позволяет, меняя значения параметров, оптимально описывать исследуемые сигналы [5]:

$$\Psi_1(x) = \frac{z_1}{x^2 + z_1^2} - \frac{z_2}{x^2 + z_1^2}, \quad (1a)$$

$$\Psi_2(x) = \frac{x}{x^2 + z_1^2} - \frac{x}{x^2 + z_1^2}, \quad (1б)$$

где $z_1, z_2 \neq 0$ – параметры вейвлетной функции, $|x| < \infty$.

Параметры z_1, z_2 вейвлетных функций (1) не ограничены и могут иметь произвольные значения, поэтому аналитические выражения (1) описывают бесконечное множество материнских вейвлетных функций алгебраического типа.

Несмотря на то, что в общем случае вейвлет-анализ сигналов не ограничивает применение различных вейвлетных функций, с точки зрения их практического применения возникает задача поиска оптимальных вейвлетных функций. Определение оптимальных вейвлетных функций и параметров вейвлетного преобразования сигнала методом перебора из имеющейся

совокупности является возможным, но неэффективным.

В данной работе рассматривается математический метод поиска и определения оптимальных параметров z_1, z_2 вейвлетных функций алгебраического типа (1).

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕЙВЛЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛА АБСОЛЮТНОГО НАКЛАДНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Определим оптимальные параметры вейвлетного преобразования выходных сигналов преобразователей электромагнитного поля (вихретоковых преобразователей – ВТП), измеренных в области дефектов сплошности металла типа трещин и коррозионных повреждений. Сигнал ВТП представляет собой ЭДС индукции, создаваемой в измерительной катушке преобразователя электромагнитного дефектоскопа переменным магнитным полем вихревых токов, индуцируемых в металле [3, 4].

Следует заметить, что в зависимости от типа ВТП электромагнитного дефектоскопа, измеренный сигнал над дефектом сплошности металла имеет разную форму. Например, выходной сигнал измерительной катушки абсолютного ВТП трансформаторного типа является однополярным и имеет колоколообразную форму, в то время как выходной сигнал дифференциального ВТП является двуполярным и имеет форму, близкую к синусоиде [3, 4].

В связи с этим при вейвлетном преобразовании выходного сигнала абсолютного ВТП трансформаторного типа $U(x)$ следует использовать вейвлетную функцию (1а), то есть коэффициенты вейвлетного преобразования сигнала данного типа ВТП определяются по формуле [1, 2]:

$$WU(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} U(x) \bar{\Psi}_1\left(\frac{x-b}{a}\right) dx, \quad (2a)$$

где a – масштабирующий параметр, b – параметр сдвига.

При вейвлетном преобразовании выходного сигнала дифференциального ВТП коэффициенты преобразования определяются по следующей формуле:

$$WU_1(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} U_1(x) \bar{\Psi}_2\left(\frac{x-b}{a}\right) dx, \quad (2б)$$

где $U_1(x) = \frac{\Delta U(x)}{\Delta x}$ – градиент выходного сигнала накладного ВТП, Δx – база (расстояние между элементами) дифференциального ВТП.

Оптимальная вейвлетная функция (1) для вейвлетного преобразования выходного сигнала ВТП (2) определяется выбором соответствующих значений масштабирующего параметра a и параметров вейвлетной функции z_1, z_2 .

В общем случае форма выходного сигнала ВТП над дефектом сплошности металла зависит от его геометрических размеров, линейных размеров ВТП и его месторасположения в пространстве над металлом, поэтому подобрать единственную вейвлетную функцию, оптимальную для всех типоразмеров дефектов сплошности металла, не представляется возможным.

Однако можно установить область значений масштабирующего параметра a и параметров z_1, z_2 вейвлетной функции (1), описывающих оптимальные вейвлетные функции для рассмотренных дефектов сплошности, что позволяет в дальнейшем обоснованно выбирать из этой области те значения, которые наилучшим образом подходят для вейвлет-анализа выходных сигналов ВТП, полученных в области расположения реальных дефектов сплошности металла.

Рассмотрим следующий математический способ определения оптимального масштабирующего параметра a и параметров вейвлетной функции z_1, z_2 (1), который основан на методе наименьших квадратов.

Критерием оптимальности вейвлетной функции здесь является наименьшее значение среднеквадратичного отклонения ее значений от соответствующих значений выходного сигнала ВТП, то есть осуществляется равномерное приближение формы вейвлетной функции алгебраического типа (1) к форме измеренного сигнала ВТП.

Составим следующий функционал, состоящий из значений выходного сигнала абсолютного ВТП и вейвлетной функции (1):

$$F(a, z_1, z_2) = \sum_{j=1}^N \left[\frac{U(x_j)}{U_m} - \Psi_1(x_j, a, z_1, z_2) \right]^2, \quad (3)$$

где $U(x_j)$ – значения выходного сигнала ВТП ($j = 1, 2, \dots, N$), U_m – амплитуда сигнала ВТП над дефектом сплошности металла.

В функционале (3) амплитуды выходного сигнала абсолютного ВТП и вейвлетной функции $\Psi_1(x)$ (1а) приведены к единице, при этом вейвлетная функция имеет вид:

$$\Psi_1(x_j, a, z_1, z_2) = \quad (4)$$

$$= \frac{z_1 z_2}{z_2 - z_1} \left[\frac{z_1}{\left(\frac{x_j}{a}\right)^2 + z_1^2} - \frac{z_2}{\left(\frac{x_j}{a}\right)^2 + z_2^2} \right].$$

Длительность вейвлетной функции $\Psi_1(x)$ (или период) связана с ее параметрами следующей формулой:

$$x_n = 2\sqrt{z_1 z_2},$$

из которой следует, что с увеличением параметров вейвлетной функции (1а) происходит монотонное увеличение ее длительности (рис. 2). Поэтому для вейвлет-анализа широко распределенных сигналов ВТП в вейвлетной функции (1а) следует использовать сравнительно большие значения параметров z_1, z_2 , и наоборот.

Оптимальные параметры вейвлетной функции (1) соответствуют минимуму функционала (3) и они могут быть определены разными численными способами.

Один из способов заключается в минимизации функционала (3) по переменным a, z_1, z_2 численными методами поиска экстремумов функций множества переменных, для которых существует множество разработанных алгоритмов и программных приложений (методы золотого сечения, дихотомии, координатного спуска и т. д.) [6–7].

В целях ограничения области решений для искомых параметров вейвлетной функции алгебраического типа (1) следует ввести ряд условий, превращающих функционал (3) в нелинейный вид:

- условие положительности решений, то есть значения оптимизирующих параметров:

$$a \geq 0, z_1 \geq 0, z_2 \geq 0;$$

- соотношения для значений оптимизирующих параметров вейвлетной функции:

$$a > 0, z_1 \geq 0, z_1 > z_2.$$

Второй способ определения оптимальных параметров вейвлетной функции (1а) заключается в решении системы алгебраических уравнений, которые получаются на основе того, что в точке минимума функционала (3) для оптимизируемых параметров выполняются условия экстремума:

$$\left. \frac{\partial F(a, z_1, z_2)}{\partial z_1} \right|_{z_1=z_1^*} =$$

$$= \sum_{j=1}^N [U(x_j) - \Psi_1(x_j, a, z_1, z_2)] \frac{\left(\frac{x_j}{a}\right)^2 - z_1^2}{\left(\left(\frac{x_j}{a}\right)^2 + z_1^2\right)^2} = 0, \quad (5a)$$

$$\left. \frac{\partial F(a, z_1, z_2)}{\partial z_2} \right|_{z_2=z_2^*} =$$

$$= \sum_{j=1}^N [U(x_j) - \Psi_1(x_j, a, z_1, z_2)] \frac{\left(\frac{x_j}{a}\right)^2 - z_2^2}{\left(\left(\frac{x_j}{a}\right)^2 + z_2^2\right)^2} = 0, \quad (5б)$$

$$\left. \frac{\partial F(a, z_1, z_2)}{\partial a} \right|_{a=a^*} = \sum_{j=1}^N [U(x_j) - \Psi_1(x_j, a, z_1, z_2)] \frac{x_j^2}{a^3} \times$$

$$\times \left[\frac{z_1}{\left(\left(\frac{x_j}{a}\right)^2 + z_1^2\right)^2} - \frac{z_2}{\left(\left(\frac{x_j}{a}\right)^2 + z_2^2\right)^2} \right] = 0, \quad (5в)$$

где a^*, z_1^*, z_2^* – оптимальные значения масштабирующего параметра и параметров вейвлетной функции $\Psi_1(x)$ соответственно.

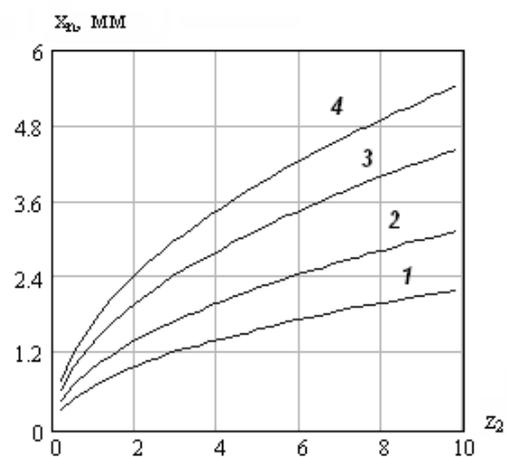


Рис. 2. Зависимость длительности вейвлетной функции $\Psi_1(x)$ от ее параметров:
1 – $z_1=0,5$; 2 – $z_1=1$; 3 – $z_1=2$; 4 – $z_1=3$

В данном случае оптимальные значения параметров вейвлетной функции (1а) определяются на основе численного решения системы алгебраических уравнений (5).

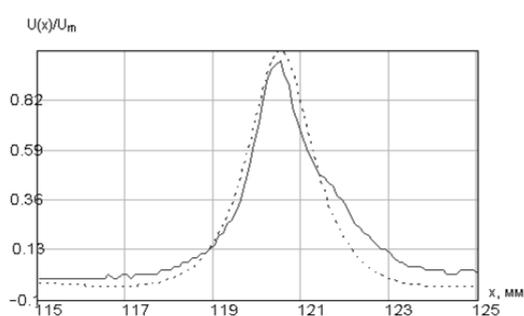
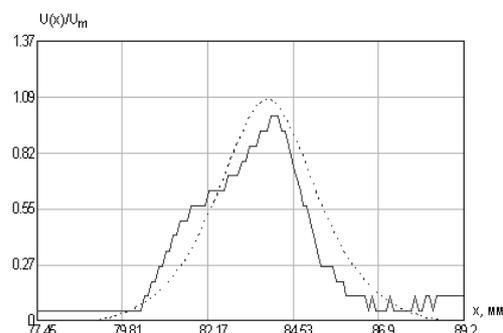


Рис. 3. Сигнал абсолютного накладного ВТП над трещиной в металле глубиной 0,5 мм (а) и 3 мм (б) и оптимальная вейвлетная функция. Сплошная кривая – выходной сигнал ВТП, пунктирная – вейвлетная функция, зазор ВТП $z = 1$ мм

На рис. 3 показаны графики оптимальных вейвлетных функций, применяемых для вейвлетного преобразования выходного сигнала абсолютного накладного ВТП трансформаторного типа электромагнитного дефектоскопа, параметры которых получены на основе минимизации функционала (3).

Сигналы абсолютного накладного ВТП электромагнитного дефектоскопа были получены при непрерывном сканировании поверхности металла, который содержал дефекты сплошности типа трещин и коррозионные повреждения естественного происхождения.

Из рис. 3 видно, что, несмотря на наличие в измеренных сигналах накладного ВТП случайных шумов и трендов, форма оптимальных вейвлетных функций (1) весьма близка к форме исходных сигналов ВТП.

В табл. 1 приведены значения параметров оптимальной вейвлетной функции $\Psi_1(x)$, используемой для вейвлет-преобразования выход-

ного сигнала абсолютного накладного ВТП электромагнитного дефектоскопа над дефектами сплошности типа трещин и коррозионными повреждениями металла, и соответствующие минимальные значения функционала F_m (3).

Из приведенных данных табл. 1 следует, что для выходных сигналов абсолютного накладного ВТП над рассмотренными поверхностными дефектами сплошности металла:

- значение параметра z_1 вейвлетной функции $\Psi_1(x)$ меняется в интервале от 1 до 1,5 ед.;
- значение параметра z_2 вейвлетной функции $\Psi_1(x)$ меняется в интервале от 2,5 до 17 ед.;
- значение масштабирующего параметра вейвлетного преобразования измеренных сигналов накладного ВТП меняется в интервале от 0,8 до 3 ед.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЕЙВЛЕТНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СИГНАЛА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО НАКЛАДНОГО ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

При поиске оптимальных параметров вейвлетного преобразования выходного сигнала дифференциального ВТП электромагнитного дефектоскопа в функционале (3) вместо сигнала $U(x)$ используется градиент выходного сигнала

ВТП $U_1(x) = \frac{\Delta U(x)}{\Delta x}$, и вместо вейвлетной

функции $\Psi_1(x)$ подставляется вейвлетная функция $\Psi_2(x)$ (1б), которая берется в виде, при котором амплитуда функции приведена к единице, то есть описывается следующей формулой:

$$\Psi_2(x_j, a, z_1, z_2) = \frac{1}{\Psi_2(x_m)} \frac{x_j}{a} \left[\frac{1}{\left(\frac{x_j}{a}\right)^2 + z_1^2} - \frac{1}{\left(\frac{x_j}{a}\right)^2 + z_2^2} \right] = 0, \quad (6)$$

где $\Psi_2(x_m)$ – амплитудное значение вейвлетной функции (1б), соответствующее точке с координатой:

$$x_m = \sqrt{\frac{z_1^2 + z_2^2}{6} - \frac{\sqrt{(z_2^4 - z_1^4)^2 - 12(z_1^2 - z_2^2)^2(z_1^2 z_2^4 - z_1^4 z_2^2)}}{6(z_1^2 - z_2^2)}}. \quad (7)$$

Таблица 1

Параметры вейвлетного преобразования сигнала абсолютного ВТП на основе функции $\Psi_1(x)$

№	Вид дефекта	Геометрические размеры, мм	a	z_1	z_2	F_m
1	Трещина	Глубина $h = 0,1$ мм	1,2	1,5	3,5	7,41
2	Трещина	$h = 0,3$ мм	1,0	1,26	2,48	3,51
3	Трещина	$h = 0,5$ мм	1,2	1,0	15,47	2,01
4	Трещина	$h = 0,7$ мм	1,1	1,0	10	5,92
5	Трещина	$h = 2,8$ мм	2,33	1,42	10,1	6,57
6	Трещина	$h = 3,0$ мм	1,0	1,0	6,35	0,46
7	Трещина	$h = 3,2$ мм	2,9	1,0	8,13	2,04
8	Коррозия металла	Поверхность 3×5 мм	1,0	1,0	3,23	0,47
9	Стресс-коррозионные трещины	–	1,8	1,0	5	3,28

Из формулы (7) следует, что с увеличением параметров вейвлетной функции (16) происходит монотонное увеличение расстояния между экстремумами функции (рис. 4).

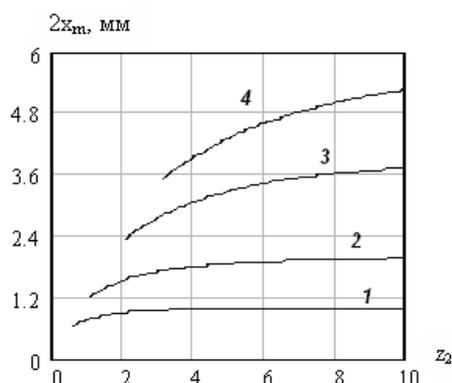


Рис. 4. Зависимость расстояния между экстремумами вейвлетной функции $\Psi_2(x)$ от ее параметров: 1 – $z_1 = 0,5$; 2 – $z_1 = 1$; 3 – $z_1 = 2$; 4 – $z_1 = 3$

Поэтому для вейвлет-анализа широко распределенных сигналов ВТП в вейвлетной функции (16) также следует использовать сравнительно большие значения параметров z_1 , z_2 , и наоборот.

На рис. 5 показаны графики оптимальных вейвлетных функций, применяемых для вейвлетного преобразования выходного сигнала дифференциального накладного ВТП электромагнитного дефектоскопа в области трещин в металле стального изделия, полученные на основе минимизации функционала (3) с использованием вейвлетной функции (6).

Расстояние между сердечниками дифференциального ВТП (база) $\Delta x = 8$ мм, расстояние от измерительной катушки ВТП до поверхности металла (зазор) была равна $z = 1$ мм.

В табл. 2 приведены значения параметров оптимальной вейвлетной функции $\Psi_2(x)$, используемой для вейвлет-преобразования выход-

ного сигнала дифференциального накладного ВТП электромагнитного дефектоскопа в области дефектов сплошности металла типа трещин, и соответствующие минимальные значения функционала F_m (3).

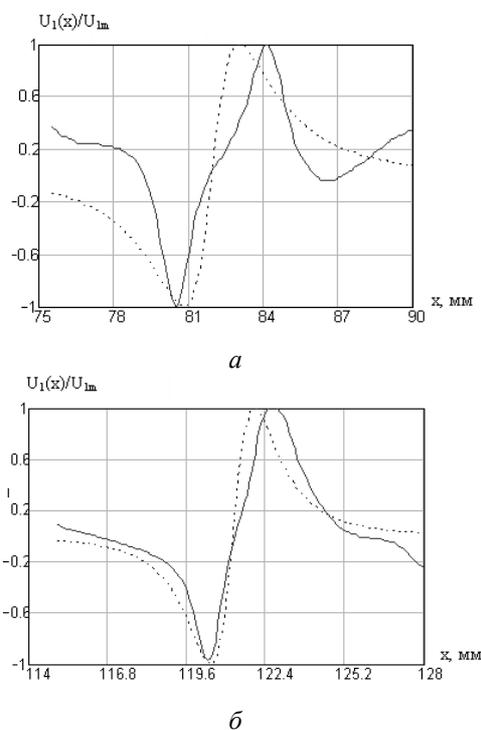


Рис. 5. Сигнал дифференциального накладного ВТП над трещиной глубиной 0,5 мм (а) и 3 мм (б) и оптимальная вейвлетная функция. Сплошная линия – выходной сигнал ВТП, пунктирная – вейвлетная функция

Из приведенных данных табл. 2 следует, что для измеренных сигналов дифференциального накладного ВТП, полученных над дефектами сплошности металла:

- значение параметра z_1 вейвлетной функции $\Psi_2(x)$ меняется в интервале от 1 до 4 ед.;

Таблица 2

Параметры вейвлетного преобразования сигнала дифференциального ВТП на основе функции $\Psi_2(x)$

№	Вид дефекта	Геометрические размеры, мм	a	z_1	z_2	F_m
1	Трещина	Глубина $h = 0,3$ мм	1,85	1,0	1,15	9,1
2	Трещина	$h = 0,5$ мм	1,22	1,0	3,83	114,4
3	Трещина	$h = 0,7$ мм	1,16	1,0	3,19	99,6
4	Трещина	$h = 2,8$ мм	2,01	2,29	3,44	40,2
5	Трещина	$h = 3,0$ мм	1,29	1,0	1,66	4,53
6	Трещина	$h = 3,2$ мм	2,8	0,98	2,14	11,87
7	Пропил	$h \times 2b \times 2L = 3 \times 1,5 \times 35$ мм	1,0	1,0	1,24	8,58
8	Коррозия небольшая	Поверхность 3×5 мм	1,02	1,0	1,58	13,4
9	Стресс-коррозионные трещины	–	1,0	4,11	6,97	17,2

• значение параметра z_2 вейвлетной функции $\Psi_2(x)$ меняется в интервале от 1,2 до 7 ед.;

• значение масштабирующего параметра вейвлетного преобразования сигналов дифференциального накладного ВТП меняется в интервале от 1 до 3 ед.

Сравнивая данные табл. 1, 2 можно заметить, что полученные интервалы значений для оптимальных параметров вейвлетных функций алгебраического типа (1) при вейвлетном преобразовании выходных сигналов абсолютных и дифференциальных накладных ВТП электромагнитного дефектоскопа весьма близки и перекрываются между собой. Это свидетельствует о том, что для вейвлет-анализа выходных сигналов абсолютных и дифференциальных накладных ВТП, измеренных в области поверхностных дефектов сплошности стального изделия, можно использовать вейвлетные функции алгебраического типа, имеющие одинаковые параметры вейвлетных функций, которые соответствуют интервалам оптимальных значений.

ВЫВОДЫ

1. Для вейвлет-анализа выходных сигналов абсолютных и дифференциальных накладных ВТП электромагнитных дефектоскопов можно использовать вейвлетные функции алгебраического типа.

2. Метод сближения формы исходного сигнала и вейвлетной функции позволяет определять параметры оптимальных вейвлетных функций алгебраического типа для вейвлет-анализа выходных сигналов накладных ВТП.

3. Вейвлетные функции для анализа выходных сигналов абсолютных и дифференциальных накладных ВТП электромагнитных дефектоскопов, измеренных в области расположения поверхностных дефектов сплошности металла, имеют одинаковые параметры, которые соответствуют интервалам оптимальных значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Нефедов В. И.** Основы радиоэлектроники и связи. М.: Высшая школа, 2006. 510 с.
2. **Астафьева Н. М.** Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. Т. 166, № 11. С. 1145–1170.
3. **Загидулин Р. В., Ефимов А. Г.** Цифровой анализ сигналов в электромагнитной дефектоскопии // Физические основы и практические приложения. Saarbrücken, Germany: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG., 2011. 119 с.
4. Неразрушающий контроль: справочник: в 8 т. / под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 2: Кн. 2: Вихревой контроль / Ю. К. Федосенко [и др.]. М.: Машиностроение, 2006. 688 с.
5. Вейвлет-анализ магнитного поля дефекта сплошности в ферромагнитном изделии. Ч. 1. Сравнительный анализ вейвлетного и Фурье-преобразования распределения поля дефекта сплошности / В. Ф. Мужичкий [и др.] // Контроль. Диагностика. 2007. № 3 (105). С. 24–29.
6. **Дьяконов В. П.** Справочник по алгоритмам и программам на языке Бейсик для персональных ЭВМ. М.: Наука, 1987. 240 с.
7. **Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М.** Численные методы. М.: Наука, 2003. 632 с.

ОБ АВТОРАХ

Бадамшин Рустам Ахмарович, проректор по научн. и инновац. деятельности, проф. каф. техн. кибернетики. Дипл. инж.-электромех. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук (УГАТУ, 2000). Действ. чл. Междунар. академии наук высшей школы.

Загидулин Тимур Ринатович, асп. той же каф. Дипл. магистр техники и технологий по материаловедению и технологии новых материалов (УГАТУ, 2012), бакалавр физики (БашГУ, 2010).

Коннов Алексей Владимирович, зам. ген. дир. ЗАО НПЦ «Молния», г. Москва. Дипл. инженер-физик (МИФИ, 2007).