

УДК 621.385

ПРИМЕНЕНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПОД ДИСТАНЦИОНИРУЮЩИМИ РЕШЕТКАМИ

Е. Г. ЩУКИС, В. П. ЛУНИН, Е. А. КУЛИКОВА

ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

UDC 621.385

APPLICATION OF CONTINUOUS WAVELET TRANSFORM TO HIGHLIGHT DEFECTS UNDER STRUCTURAL ELEMENTS

E. G. SHCHUKIS, V. P. LUNIN, E. A. KULIKOVA

Аннотация

В статье отмечены трудности при анализе данных многочастотного вихре-токового контроля теплообменных труб парогенераторов, обусловленные наличием множества мешающих факторов и шума. Предложен метод выделения сигналов от дефектов под конструктивными элементами на основе непрерывного вейвлет-преобразования.

Ключевые слова:

вейвлет-анализ, вихре-токовый метод контроля, теплообменные трубки парогенератора.

Abstract

The paper describes the difficulties of steam generator heat exchanger tubes eddy-current testing data analysis due to noise levels and the presence of numerous interfering parameters. One of the main interfering parameters is structural elements. The paper considers continuous wavelet transform for reliable flaw isolation under structural elements.

Key words:

wavelet transform, eddy-current testing, eddy-current signals.

Одной из важнейших составляющих безопасной эксплуатации энергоблока атомных электрических станций (АЭС) с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР) является работоспособность парогенераторов (ПГ). Парогенератор предназначен для отвода тепла от теплоносителя первого контура и генерации насыщенного пара.

Основным элементом, определяющим фактический срок службы парогенератора, являются теплообменные трубки (рис.1).

Анализ повреждений ТОТ парогенераторов на АЭС, изготовленных из аустенитной стали, выявил, что причинами выхода из строя ТОТ являются эксплуатационные коррозионные повреждения.

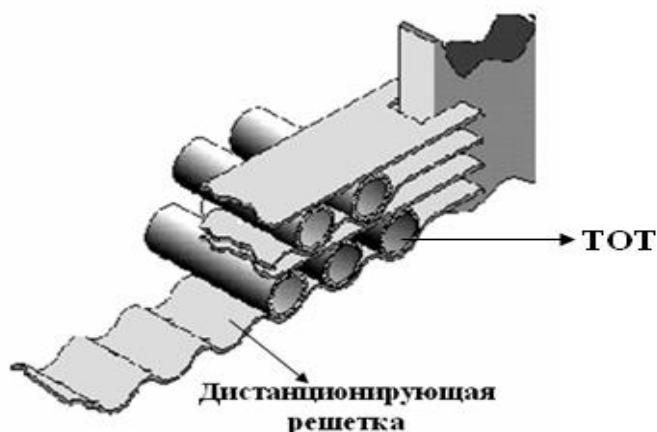


Рис. 1. Теплообменные трубки и дистанционирующая решетка

Наиболее эффективным методом оценки состояния теплообменных труб ПГ на данный момент является вихретоковый метод контроля (ВТК).

ВТК позволяет выявить не только сквозные дефекты, но и дефекты различной глубины и размеров, что позволяет превентивно заглушить трубы с дефектами, которые еще не пропускают теплоноситель из первого контура во второй, но могут развиваться до сквозных [1]. Многочастотный ВТК ТОТ ПГ с использованием внутреннего проходного дифференциального преобразователя дает возможность проконтролировать трубы по всей длине, позволяет зафиксировать наличие дефекта, локализовать его и оценить глубину [2].

На российских АЭС многочастотный метод вихретокового контроля металла ТОТ ПГ применяется уже более 20 лет, но, несмотря на такой длительный срок, остаются проблемы с достоверностью получаемых результатов ВТК, связанных с субъективностью соответствующих экспертных решений. Одной из причин является сложность анализа эксплуатационных вихретоковых сигналов, обусловленная как наличием множества мешающих факторов, таких, например, как сигналы от ряда конструктивных элементов, так и влияние различного рода шумов.

Одним из основных мешающих факторов являются конструктивные элементы, а именно дистанционирующие решетки, под которыми часто возникают коррозионные дефекты. В данной работе представлен метод выделения сигналов от дефектов под дистанционирующими решетками (рис. 1).

Сигналы на выходе вихретокового преобразователя относятся к классу нестационарных сигналов, в котором основную информацию несут локальные особенности сигнала, соответствующие конструктивным элементам и/или дефектам ТОТ [3]. Сигналы такого рода требуют применения математического аппарата, который позволял бы анализировать и представлять локализованные одновременно в частотной и временной областях особенности сигнала. Поэтому для выявления и анализа локальных особенностей сигналов целесообразно применять вейвлет-анализ [4].

Непрерывное вейвлет-преобразование служит для определения вейвлет-спектра, т. е. набора коэффициентов $\{W_s(a,b)\}$, представляющих исследуемый сигнал в частотно-временной области.

Оно определяется следующим выражением:

$$W_s(a,b) = \langle S(x), \psi_{a,b}(x) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} S(x) \cdot \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx, \quad (1)$$

где a – это масштабный коэффициент; b – параметр сдвига по оси x .

Вейвлет-преобразование используют в тех случаях, когда результат анализа исследуемого сигнала должен содержать не только простое перечисление его характерных частот (масштабов), но и сведения об определенных локальных координатах, при которых эти частоты проявляют себя.

Выбор вейвлет-функции ψ осуществляется на основе подобия формы сигнала от дефекта и материнского вейвлета. Для анализа был применен вейвлет Гаусса.

$$\psi(x) = (-1)^n \frac{d^n}{dx^n} e^{-\frac{x^2}{2}}. \quad (2)$$

Был проведен анализ частотных свойств вейвлет-функций различных порядков и их разрешающей способности в зависимости от значения масштаба. В качестве примера, на рис. 2 показаны вейвлет-функции Гаусса 8-ого порядка при двух различных значениях масштаба, $a=6$ и $a=20$. Как видно из рис. 2, чем меньше значение масштаба, тем в более высокочастотной области находится спектр вейвлет-функции и больше значение параметра W -эффективной ширины спектра. Под эффективной шириной спектра понимают диапазон пространственных частот, в котором значения спектральной плотности мощности превышают половину ее максимального значения.

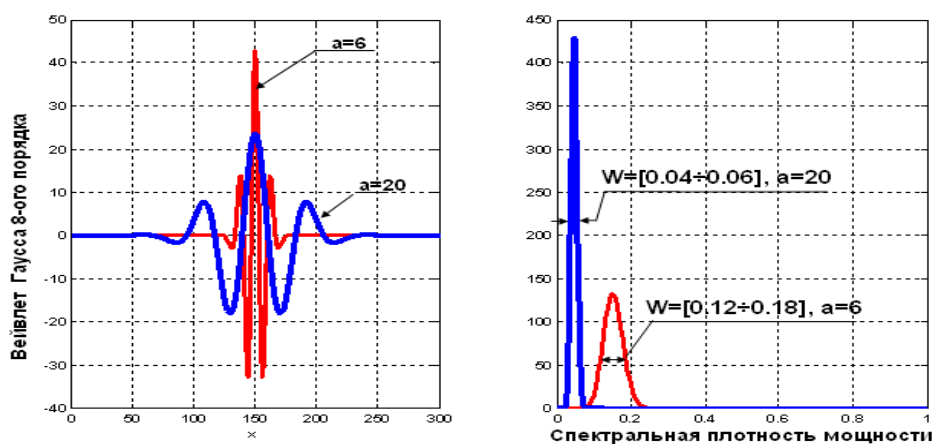


Рис. 2. Вейвлет Гаусса 8-ого порядка

На рис. 3 и 4 показан характер изменения эффективной ширины спектра вейвлет-функций Гаусса 1-ого и 8-ого порядка при изменении значений масштаба.

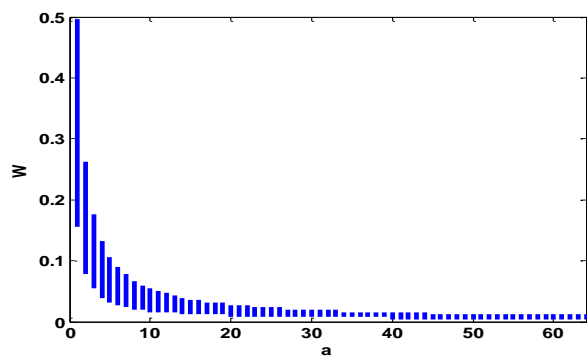


Рис. 3. Зависимость разрешающей способности вейвлет-функции по частоте от масштаба для вейвлета Гаусса 1-ого порядка

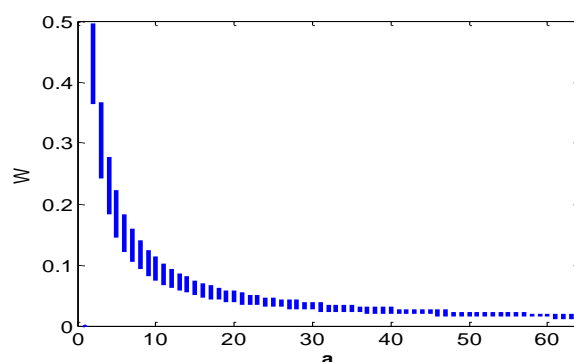


Рис. 4. Зависимость разрешающей способности вейвлет-функции по частоте от масштаба для вейвлета Гаусса 8-ого порядка

Вейвлет-функции при каждом значении масштаба соответствует некоторый диапазон частот, при увеличении значения масштаба этот диапазон сужается. Чем больше порядок вейвлета, тем большую разрешающую способность по частоте он обеспечивает.

Частотный анализ сигналов от дефектов и от дистанционирующих элементов показал, что спектры сигналов от дефектов и дистанционирующих элементов пересекаются, но спектр сигнала от дефекта имеет более высокочастотный характер. В результате было получено среднее значение эффективной ширины спектра сигнала от дефекта – $[0,033 \div 0,4]$ (нормализованная пространственная частота), при шаге сканирования равном 1 мм. Средняя эффективная ширина спектра сигнала от дистанционирующей решетки составляет $[0 \div 0,12]$, при шаге сканирования равном 1 мм. Спектры сигналов от решеток и дефектов пересекаются, но сигнал от дефекта имеет более высокочастотный характер. Поэтому для выделения сигналов от дефектов используется только диапазон частот $[0,12 \div 0,4]$.

Совместный анализ зависимости разрешающей способности по частоте вейвлет-функций от масштаба и спектров анализируемых сигналов позволяет определить необходимый для выделения дефекта частотный диапазон и соответствующий диапазон масштабов. В табл. 1 для вейвлетов различных порядков приведены значения масштабов, соответствующие тому диапазону частот, который нужно анализировать для выделения сигнала от дефекта при определенном шаге сканирования.



Табл. 1. Выбор масштаба

Вейвлет	шаг 1 мм	шаг 0,5 мм	шаг 0,2 мм
gaus 2	2	3	3
gaus 3	2	3–6	5–9
gaus 4	3–4	4–9	7–20
gaus 5	3–5	6–11	9–25
gaus 6	3–5	6–13	9–26
gaus 7	3–6	6–15	9–27
gaus 8	3–8	7–17	10–27

Из табл. 1 видно, что чем больше порядок вейвлет-функции Гаусса и больше шаг сканирования, тем больший диапазон масштабов подходит для выделения сигналов от дефектов.

В результате применения к сигналу от дефекта под решеткой непрерывного вейвлет-преобразование получен вейвлет-спектр (рис. 5), построенный с помощью вейвлет-функции Гаусса 8-ого порядка.

В связи с тем, что анализировать вейвлет-спектр в трехмерном представлении сложно, в работе для анализа использовались двумерные вейвлет-спектрограммы, представляющие собой проекцию поверхности на плоскость масштаб-координат. Пример двумерной вейвлет-спектрограммы, соответствующей трехмерному вейвлет-спектру, показан на рис. 6.

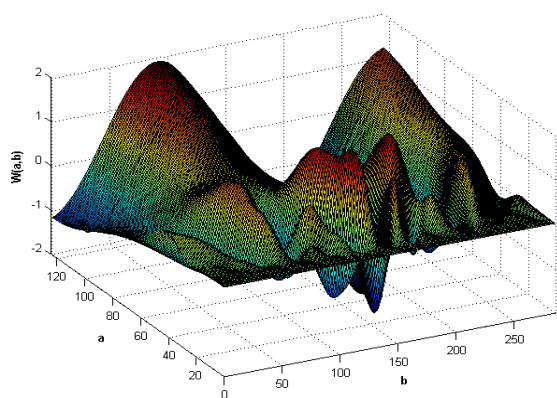


Рис. 5. Вейвлет-спектр сигнала $S(x)$ от дефекта под дистанционирующей решеткой

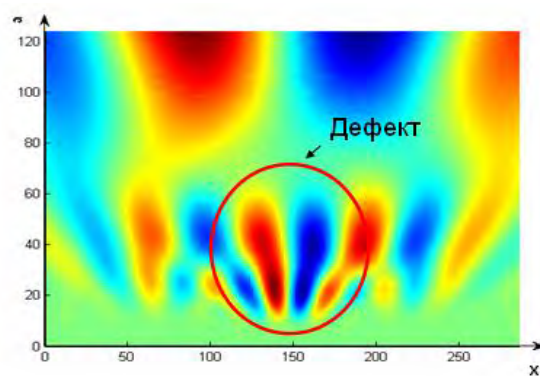


Рис. 6. Вейвлет-спектрограмма сигнала $S(x)$ от дефекта под дистанционирующей решеткой

Для повышения качества локализации сигнала от дефекта предусматривается пороговая обработка вейвлет-спектрограммы, значение порога рассчитывается с использованием «минимаксного» критерия. Пример применения к вейвлет-спектрограмме пороговой обработки показан на рис. 7.

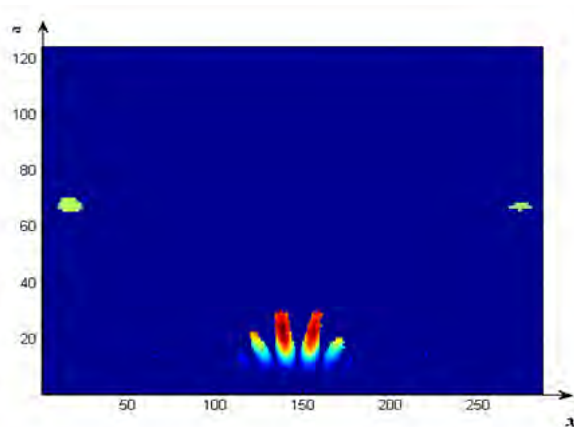


Рис. 7. Вейвлет-спектрограмма сигнала $S(x)$ после пороговой обработки

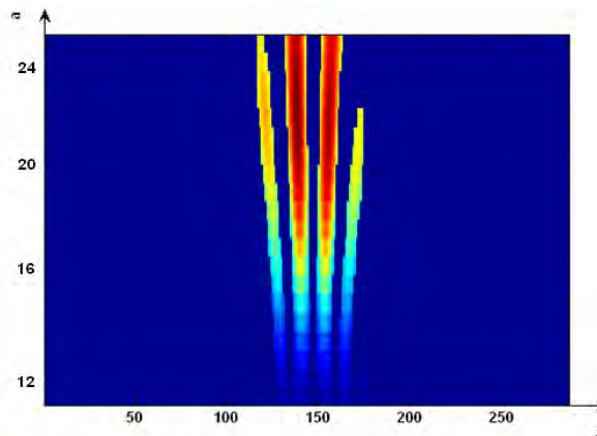


Рис. 8. Участок вейвлет-спектрограммы сигнала $S(x)$ для масштабов 10–27

В соответствии с табл. 1, для выделения дефекта нужно воспользоваться определенным диапазоном масштабов. Например, при шаге сканирования 0,2 мм был рассмотрен диапазон масштабов с 10 по 27 (рис. 8). Определение координат сигнала от дефекта базируется на процедуре обработки участка вейвлет-спектрограмм. Для каждого временного отсчета вейвлет-спектрограммы суммируются значения коэффициентов вейвлет-спектра по всем масштабам.

$$Sum_{W(a,i)}(i) = \sum_a W(a,i), \quad i = 1 \dots L, \quad (4)$$

где L – длительность сигнала (количество отсчетов в сигнале).

По выражению (4) строится зависимость $Sum_{W(a,i)}(i) = f(W(a,i))$, которая позволяет определять координаты сигнала от дефекта. Пример обнаружения сигнала от дефекта под дистанционирующей решеткой показан на рис. 9.

Просуммировав значения коэффициентов вейвлет-спектрограммы по масштабам для каждого отсчета, получим зависимость, координаты глобальных максимумов которой по координатной оси совпадают с координатами глобальных экстремумов сигнала от дефекта, а ненулевая часть соответствует местоположению дефекта. Таким образом, в соответствии с предложенным способом можно автоматически выделять сигнал от дефекта под решеткой, т.е. ставить «рамку», координату начала и конца сигнала от дефекта.

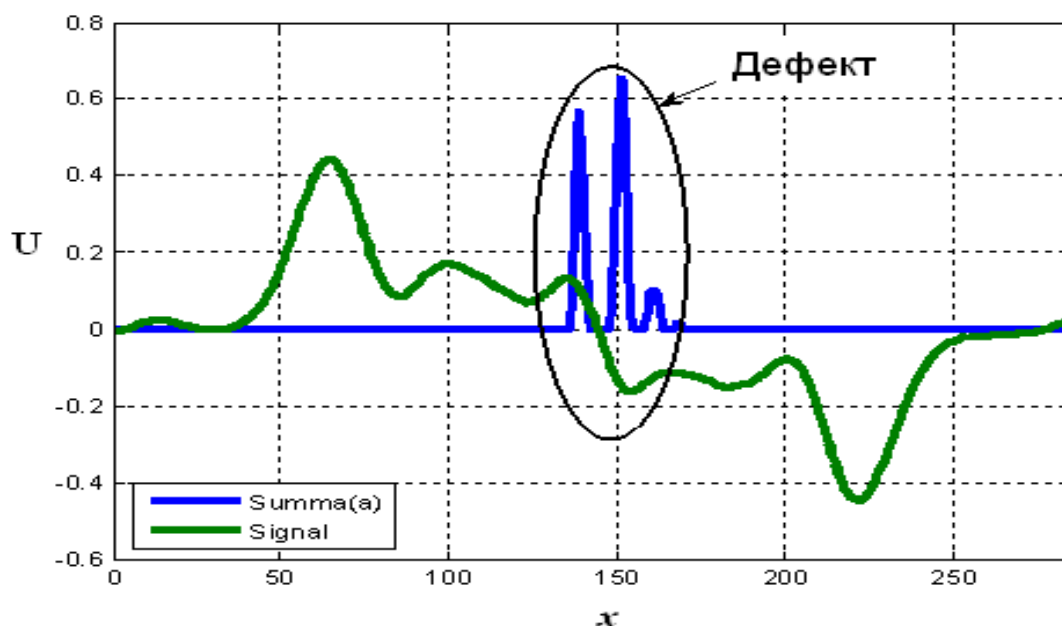


Рис. 9. Результаты выделения координат сигнала от дефекта

В связи с тем, что дефект может располагаться произвольно относительно центра дистанционирующей решетки, была проанализирована равномерность применения предлагаемого способа для произвольного положения дефекта под решеткой. В результате анализа было установлено, что возможно выделить дефекты с произвольным расположением, если для обнаружения сигнала от дефекта применять и вещественную, и мнимую составляющие вихретоковых сигналов при частотах контроля 130 и 280 кГц дифференциального канала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Беляков, В. А.** Анализ и оценка данных ВТК теплообменных труб парогенераторов Кольской АЭС / В. А. Беляков, С. В. Смирнов // 7-ой междунар. семинар по горизонтальным парогенераторам : тез. докл. – Подольск, 2006. – С. 49–51.
2. **Кадников, А. А.** Опыт проведения вихретокового контроля теплообменных трубок ПГ. ФГУДП «Атомэнергоремонт» / А. А. Кадников, А. В. Никоноров // Докл. 7-го междунар. семинара по горизонтальным парогенераторам, 3–5 окт. 2006 г. – ФГУП ОКБ "ГИДРОПРЕСС".
3. **Щукис, Е. Г.** Анализ вихретоковых сигналов, полученных при контроле теплообменных труб парогенераторов / Е. Г. Щукис, В. П. Лунин // Информационные средства и технологии : тр. 15-ой междунар. науч.-техн. конф. – М., 2007. – Т. 1. – С. 122–128.
4. **Shchukis, E.** Wavelet transform for eddy-current signal processing / E. Shchukis, V. Lunin, M. Zelenskiy // 54rd Internationales Wissenschaftliches Kolloquium Technische Universität Ilmenau. 07–10 September 2009; USB-Flash-Ausg.: Faculty of Electrical and Information Technology, Technische Universität Ilmenau. – Ilmenau : 2009. – S. 112–114.