

УДК 620.179.14

**АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СИГНАЛОВ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ
КОНТРОЛЕ СТАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ
СКАНЕРОМ-ДЕФЕКТОСКОПОМ АСД «ВИХРЬ»**

**ANALYSIS AND INTERPRETATION OF SIGNALS DURING
NONDESTRUCTIVE TESTING OF STEEL GAS PIPELINES BY
ELECTROMAGNETIC SCANNING FALW DETECTOR ASD «VIKHR»**

Коннов А.В.

ЗАО Научно-производственный центр «МОЛНИЯ»,
г. Москва, Российская Федерация

A.V. Konnov

CJSC Scientific and Production Center “MOLNIYA”, Moscow, the Russian Federation
e-mail: molkon@bk.ru

Аннотация. Описана методика предварительной обработки, анализа и интерпретации измеренного сигнала дифференциального вихретокового преобразователя при контроле стального газопровода электромагнитным сканером-дефектоскопом «Вихрь».

Показано, что спектр случайных помех в сигнале вихретокового преобразователя над стальным трубопроводом является широкополосным, вследствие чего применение спектрального метода подавления помех в измеренном сигнале является неэффективным. Для удаления случайных помех и нелинейного тренда из сигнала вихретокового преобразователя предлагается математический метод, основанный на вейвлетном преобразовании сигнала на основе вейвлетных функций алгебраического типа.

Показано, что при вейвлетном преобразовании сигнала вихретокового преобразователя с оптимальными параметрами, величина соотношения сигнал/шум возрастает в несколько раз, что приводит к повышению надежности выявления дефектов сплошности в стальной трубе и точности определения их геометрических параметров.

Геометрические параметры дефектов сплошности определяются методом минимизации сглаживающего функционала, составленного из измеренных признаков распознаваемого дефекта и теоретической модели дефекта сплошности в стальной трубе. Для обеспечения оптимальной точности определения геометрических параметров дефектов сплошности, величина параметра регуляризации в сглаживающем функционале выбирается согласованно с величиной погрешности измерения сигнала вихретокового преобразователя.

Приведена совокупность признаков классификации дефектов сплошности в стальной трубе, которые получаются на основе измеренных сигналов

дифференциальных вихретоковых преобразователей сканера-дефектоскопа АСД «Вихрь» и которые используются при распознавании типа и геометрических размеров дефектов, выявленных на стальном трубопроводе.

Полученные результаты оценки геометрических параметров дефектов сплошности типа трещин в стальной трубе показывают, что они имеют точность, достаточную для практики электромагнитной дефектоскопии стальных изделий и металлоконструкций.

Abstract. Techniques of preliminary processing, analysis and interpretation of differential eddy-current transducer measured signal during steel pipeline inspection by the electromagnetic scanning flaw detector “Vikhr” are described.

It is shown that the random noise in eddy-current transducer signal over steel pipeline has a broadband spectrum, thus rejection of noise in measured signal using convenient spectral techniques is ineffective. In order to eliminate random noise and nonlinear trend from eddy-current transducer signal the technique based on wavelet transform of signal on the basis of algebraic wavelets is proposed.

It is shown that after wavelet transform of eddy-current signal with optimal values of parameters the signal-to-noise ratio (SNR) increases multiple times, lead to improvement of detectability and precision of defect sizes evaluation.

Defect sizes are determined by the techniques of minimizing the smoothing functional composed from measured features of defect and theoretical model of defect in steel pipe. In order to provide best precision of defect sizes evaluation the regularization factor in the smoothing functional chosen according to error of measured eddy-current signal.

The set of steel pipe defects classification features obtained on measured signals of scanning flaw-detector “Vikhr” differential eddy current transducers and applied during detected defect type recognizing and sizes evaluating is presented.

Result of cracks detected sizes evaluation obtained show that they have enough precision to be used in the practice of steel parts and constructions electromagnetic flaw-detection.

Ключевые слова: дифференциальный вихретоковый преобразователь, стальной трубопровод, дефект сплошности металла, трещина, коррозионное повреждение металла, геометрические параметры дефекта сплошности, точность оценки глубины трещины.

Key words: differential eddy-current transducer, steel pipeline, metal continuity defect, crack, metal corrosion damage, continuity defect, geometrical parameters crack depth evaluation accuracy.

Контроль металла стального газопровода (трубопровода) сканерами-дефектоскопами предъявляет особые требования к измерению и интерпретации сигналов преобразователей, которые осуществляются в условиях жесткого ограничения времени (режим реального времени).

От современных сканеров-дефектоскопов требуется не только обнаружение дефектов сплошности металла, но и определение типа и геометрических параметров дефектов для последующей оценки степени их опасности для эксплуатации стального трубопровода [1, 2]. Очевидно, что эти задачи не могут быть удовлетворительно решены однопараметровыми техническими средствами контроля, которые в большинстве являются переносными приборами для осуществления ручного контроля стальных изделий и металлоконструкций.

Как правило, сканеры-дефектоскопы имеют многоэлементные измерительные блоки преобразователей, охватывающие при сканировании полосу определенной ширины на поверхности стальной трубы, сигнал с выхода которых имеет многопараметровый характер [3-8].

При выборе измерительного блока сканера-дефектоскопа проявляются противоборствующие факторы, которые необходимо учесть для обеспечения оптимальной эффективности неразрушающего контроля стального трубопровода.

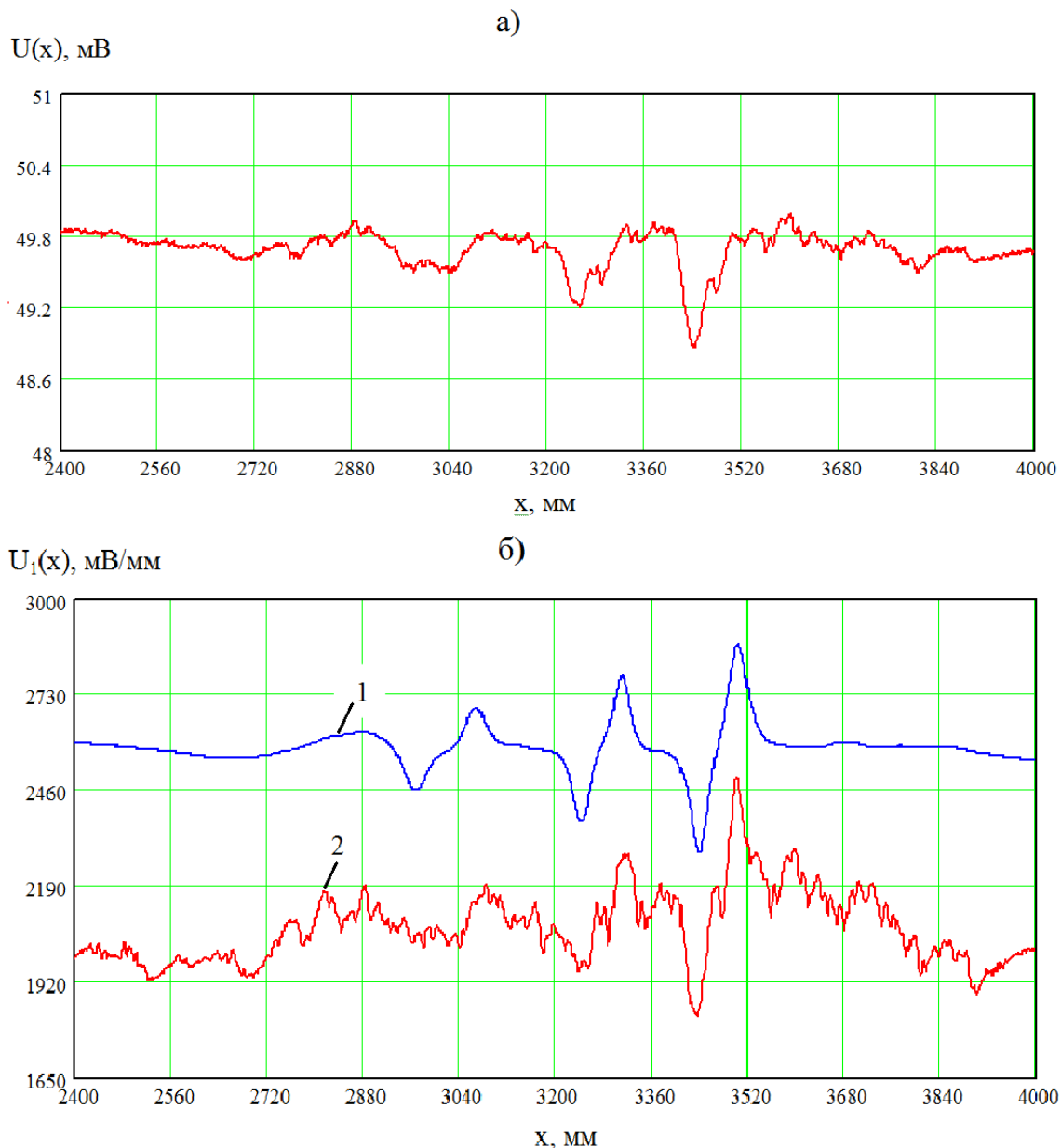


Рисунок 1. Распределение сигналов абсолютного (а) и дифференциального каналов (б) накладного дифференциального ВТП над трещинами в стальной трубе
1 - мнимый, 2 - вещественный измерительный канал ВТП

Например, увеличение количества преобразователей и измеряемых информативных параметров в сканере-дефектоскопе приводит:

- с одной стороны, к повышению надежности выявления дефектов сплошности в металле и достоверности оценки их типа и геометрических параметров;

- с другой стороны, к снижению производительности контроля, связанного с уменьшением скорости сканирования поверхности стальной трубы, из-за необходимости анализа и интерпретации большого объема измеренной информации в режиме реального времени.

В электромагнитном сканере-дефектоскопе «Вихрь» контроль поверхности стального трубопровода осуществляется накладными дифференциальными вихретоковыми преобразователями (ВТП), которые имеют три измерительных канала: абсолютный, вещественный и мнимый [7].

На рисунке 1 показаны сигналы абсолютного и дифференциального каналов ВТП, полученные над группой трех поверхностных дефектов типа трещины в стальной трубе.

Видно, что сигнал абсолютного канала ВТП $U(x)$ над трещиной является однополярным, его минимум находится над серединой дефекта сплошности. Сигналы дифференциальных каналов ВТП (вещественного $\text{Re}U_1(x)$ и мнимого $\text{Im}U_1(x)$, где $U_1(x) = \frac{\Delta U(x)}{\Delta x}$ – градиент измеренного сигнала ВТП) над трещиной являются двуполярными.

Результаты предварительных исследований показали, что совокупность информативных параметров, которые получены на основе данных измеренных сигналов дифференциального ВТП электромагнитного сканера-дефектоскопа АСД «Вихрь», позволяют уверенно выявлять и классифицировать характерные дефекты сплошности металла стального трубопровода [9, 10].

Сигналы дифференциального ВТП, полученные при сканировании поверхности стального трубопровода, содержат случайные шумы и помехи, источники которых точно установить не всегда возможно. Часто это комплексное влияние нескольких факторов: неровность поверхности стальной трубы и случайная вибрация ВТП, электромагнитные помехи от электропривода дефектоскопического комплекса, внешние источники и собственные помехи из-за взаимного влияния измерительных каналов ВТП и т.д. На рисунке 2 показан спектр сигнала вещественного канала дифференциального ВТП над дефектным и бездефектными участками стальной трубы. Значения коэффициентов преобразования Фурье для измеренных сигналов дифференциального ВТП определяются по формулам [11]:

$$\begin{Bmatrix} c_{1j} \\ c_{2j} \\ c_{3j} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sum_{k=0}^n \begin{Bmatrix} U(x_k) \\ \text{Re}U_1(x_k) \\ \text{Im}U_1(x_k) \end{Bmatrix} \exp \left[i \frac{2\pi j k}{n} \right], \quad (1)$$

где x_k – x -координата k -той точки сигнала, c_{1j} , c_{2j} , c_{3j} – коэффициенты дискретного Фурье-преобразования измеренных сигналов абсолютного, вещественного и мнимого каналов ВТП соответственно, n – количество отсчетов в измеренном сигнале ВТП (при БПФ $n = 2^m$, где m – целое число), $0 \leq j \leq n/2$, i – мнимая единица ($i^2 = -1$).

Исследование спектров измеренных сигналов абсолютного, вещественного и мнимого каналов дифференциального ВТП на основе формул (1) показало, что спектры всех сигналов являются широкополосными. Это приводит к тому, что путем осуществления фильтрации (аналоговой, цифровой) невозможно эффективно подавить уровень случайных помех в измеренном сигнале ВТП, так как удаление спектра случайных помех неизбежно приводит к искажению полезной информации.

При вейвлетном преобразовании измеренных сигналов ВТП с оптимальными параметрами удастся существенно снизить уровень случайных шумов и помех без потери полезной информации в сигнале о дефектах сплошности металла [12, 13].

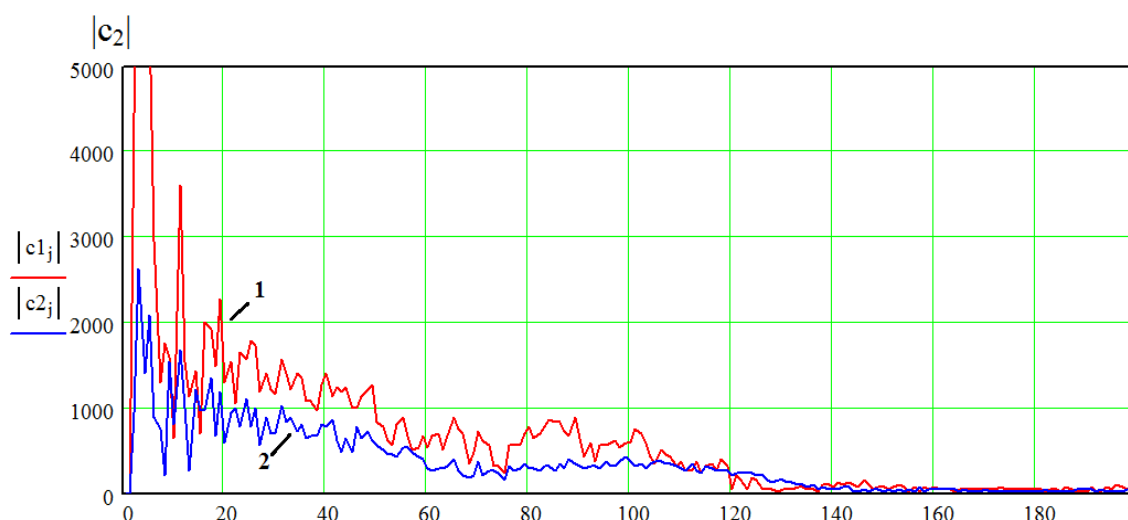


Рисунок 2. Распределение модуля коэффициентов преобразования Фурье сигнала вещественного канала дифференциального ВТП над участком стальной трубы: 1 - с дефектом сплошности типа трещины, 2- без дефекта сплошности

Исходя из формы распределения измеренного сигнала абсолютного канала ВТП $U(x)$, коэффициенты непрерывного вейвлетного преобразования определяются по следующей формуле:

$$WU(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} U(x) \overline{\psi_1\left(\frac{x-b}{a}\right)} dx, \quad (2a)$$

где a – масштабирующий параметр, b – параметр сдвига.

Исходя из формы распределения измеренного сигнала дифференциального (вещественного и мнимого) канала ВТП $U_1(x)$, коэффициенты непрерывного вейвлетного преобразования определяются по формуле:

$$WU_1(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} U_1(x) \overline{\psi_2\left(\frac{x-b}{a}\right)} dx, \quad (2б)$$

где $\psi_1(x)$, $\psi_2(x)$ – параметрические вейвлетные функции алгебраического типа, которые имеют следующий вид:

$$\psi_1(x) = \frac{z_1}{x^2 + z_1^2} - \frac{z_2}{x^2 + z_2^2}, \quad (3a)$$

$$\psi_2(x) = \frac{x}{x^2 + z_1^2} - \frac{x}{x^2 + z_2^2}, \quad (3б)$$

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

Оптимальные вейвлетные функции (3) для вейвлетного преобразования измеренных сигналов дифференциального ВТП (2) определяется выбором соответствующих значений масштабирующего параметра a и параметров вейвлетной функции z_1, z_2 по методикам, описанным в работах [12, 13].

В программном обеспечении электромагнитного сканера-дефектоскопа осуществляется дискретное вейвлетное преобразование измеренных сигналов абсолютного и дифференциального каналов ВТП, которое осуществляется по следующим формулам (для сигнала абсолютного канала ВТП $U(x_j)$, где $0 \leq j \leq n$):

$$WU(a, b) = \frac{dx}{a\sqrt{a}} \sum_{j=0}^n U(x_j) \left[\frac{z_1}{\left(\frac{x_j - b}{a}\right)^2 + z_1^2} - \frac{z_2}{\left(\frac{x_j - b}{a}\right)^2 + z_2^2} \right] \frac{1}{AM_1}, \quad (4a)$$

где амплитудный параметр $AM_1 = \frac{z_2 - z_1}{z_1 z_2}$, $dx = x_{j+1} - x_j$ - шаг изменения координаты x в измеренном сигнале ВТП;

- для сигнала вещественного канала ВТП $ReU_1(x_j)$, где $0 \leq j \leq n$:

$$WReU_1(a, b) = \frac{dx}{a\sqrt{a}} \sum_{j=0}^n ReU_1(x_j) \left[\frac{x_j - b}{\left(\frac{x_j - b}{a}\right)^2 + z_1^2} - \frac{x_j - b}{\left(\frac{x_j - b}{a}\right)^2 + z_2^2} \right] \frac{1}{AM_2}, \quad (4б)$$

где амплитудный параметр $AM_2 = \frac{x_2}{x_2^2 + z_1^2} - \frac{x_2}{x_2^2 + z_2^2}$, при этом значение параметра x_2 определяется по формуле:

$$x_2 = \sqrt{\frac{z_1^2 + z_2^2}{6} - \frac{\sqrt{(z_2^4 - z_1^4)^2 - 12(z_1^2 - z_2^2)^2(z_1^2 z_2^4 - z_1^4 z_2^2)}}{6(z_1^2 - z_2^2)}};$$

- для сигнала мнимого канала ВТП $ImU_1(x_j)$, где $0 \leq j \leq n$:

$$W\text{Im}U_1(a, b) = \frac{dx}{a\sqrt{a}} \sum_{j=0}^n \text{Im}U_1(x_j) \left[\frac{\frac{x_j - b}{a}}{\left(\frac{x_j - b}{a}\right)^2 + z_1^2} - \frac{\frac{x_j - b}{a}}{\left(\frac{x_j - b}{a}\right)^2 + z_2^2} \right] \frac{1}{AM_2}. \quad (4\text{в})$$

Для восстановления значений сигналов измерительных каналов дифференциального ВТП, в которых подавлен уровень случайных помех, осуществляется дискретное обратное вейвлетное преобразование на основе ограниченного массива коэффициентов, которые предварительно определены на основе формул (4).

Дискретное обратное вейвлетное преобразование коэффициентов осуществляется следующими формулами обращения:

- для абсолютного канала ВТП:

$$U(x_k) = \frac{da db}{C_\Psi} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{i=1}^{n_1} WU(a_i, b_j) \left[\frac{z_1}{\left(\frac{x_k - b_j}{a_i}\right)^2 + z_1^2} - \frac{z_2}{\left(\frac{x_k - b_j}{a_i}\right)^2 + z_2^2} \right] \frac{1}{a_i^2}, \quad (5\text{а})$$

где постоянная $C_\Psi = 2\pi^2 \ln \frac{(z_2 + z_1)^2}{4z_2 z_1}$;

- для вещественного канала ВТП:

$$\text{Re}U_1(x_k) = \frac{da db}{C_\Psi} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{i=1}^{n_1} W\text{Re}U_1(a_i, b_j) \left[\frac{\frac{x_k - b_j}{a_i}}{\left(\frac{x_k - b_j}{a_i}\right)^2 + z_1^2} - \frac{\frac{x_k - b_j}{a_i}}{\left(\frac{x_k - b_j}{a_i}\right)^2 + z_2^2} \right] \frac{1}{a_i^3}, \quad (5\text{б})$$

- для мнимого канала ВТП:

$$\text{Im}U_1(x_k) = \frac{da db}{C_\Psi} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{i=1}^{n_1} W\text{Im}U_1(a_i, b_j) \left[\frac{\frac{x_k - b_j}{a_i}}{\left(\frac{x_k - b_j}{a_i}\right)^2 + z_1^2} - \frac{\frac{x_k - b_j}{a_i}}{\left(\frac{x_k - b_j}{a_i}\right)^2 + z_2^2} \right] \frac{1}{a_i^3}, \quad (5\text{в})$$

где da, db – шаг изменения масштабирующего параметра и параметра сдвига соответственно.

На рисунке 3а показано распределение сигнала вещественного канала дифференциального ВТП, измеренного над поверхностью участка стальной

трубы. Наряду с локальными участками коррозионного повреждения металла на поверхности стальной трубы в точке с координатой $x = 1788$ мм находится точечная коррозия глубиной 1,3 мм и диаметром 12 мм, через точку на поверхности трубы с координатой $x = 1442$ мм проходит продольный электросварной шов. Видно, что измеренный сигнал вещественного канала дифференциального ВТП содержит случайные помехи и нелинейный тренд, экстремальные значения которых соизмеримы или превышают амплитуды сигналов над дефектами сплошности и коррозионными повреждениями металла стальной трубы.

Над данным участком стальной трубы для сигнала дифференциального ВТП над точечной коррозией металла соотношение сигнал/шум не превышает значения 1,25 ед., что существенно ниже требуемого значения этого параметра для вихретоковых дефектоскопов.

На рисунке 3б приведено распределение коэффициентов вейвлетного преобразования сигнала вещественного канала дифференциального ВТП, рассчитанного по формуле (4б) с параметрами $a = 1,2$, $z_1 = 1$ мм, $z_2 = 5$ мм. Из этого распределения видно, что в коэффициентах вейвлетного преобразования сигналов ВТП существенно уменьшился уровень случайных помех и полностью исчез нелинейный тренд. Вследствие этого соотношение сигнал/шум в распределении коэффициентов увеличилось и стало равным 4,3 ед., что более чем в два раза превышает уровень порога, предусмотренного для магнитных и вихретоковых дефектоскопов.

На рисунке 3в показано восстановленное распределение измеренного сигнала дифференциального ВТП, которое получено на основе дискретного обратного вейвлетного преобразования коэффициентов (рисунок 3б) по формуле (5б).

Видно, что в восстановленном измеренном сигнале дифференциального ВТП существенно уменьшился уровень случайных помех и полностью удален нелинейный тренд. В результате прямого и обратного вейвлетного преобразования сигнала практически не исказилась форма и не изменилась амплитуда сигналов ВТП над сварным швом и точечной коррозией металла. Более надежно начала выявляться также область коррозионного повреждения металла, x – координата которой на поверхности стальной трубы меняется от 2300 мм до 2450 мм (рисунок 3в).

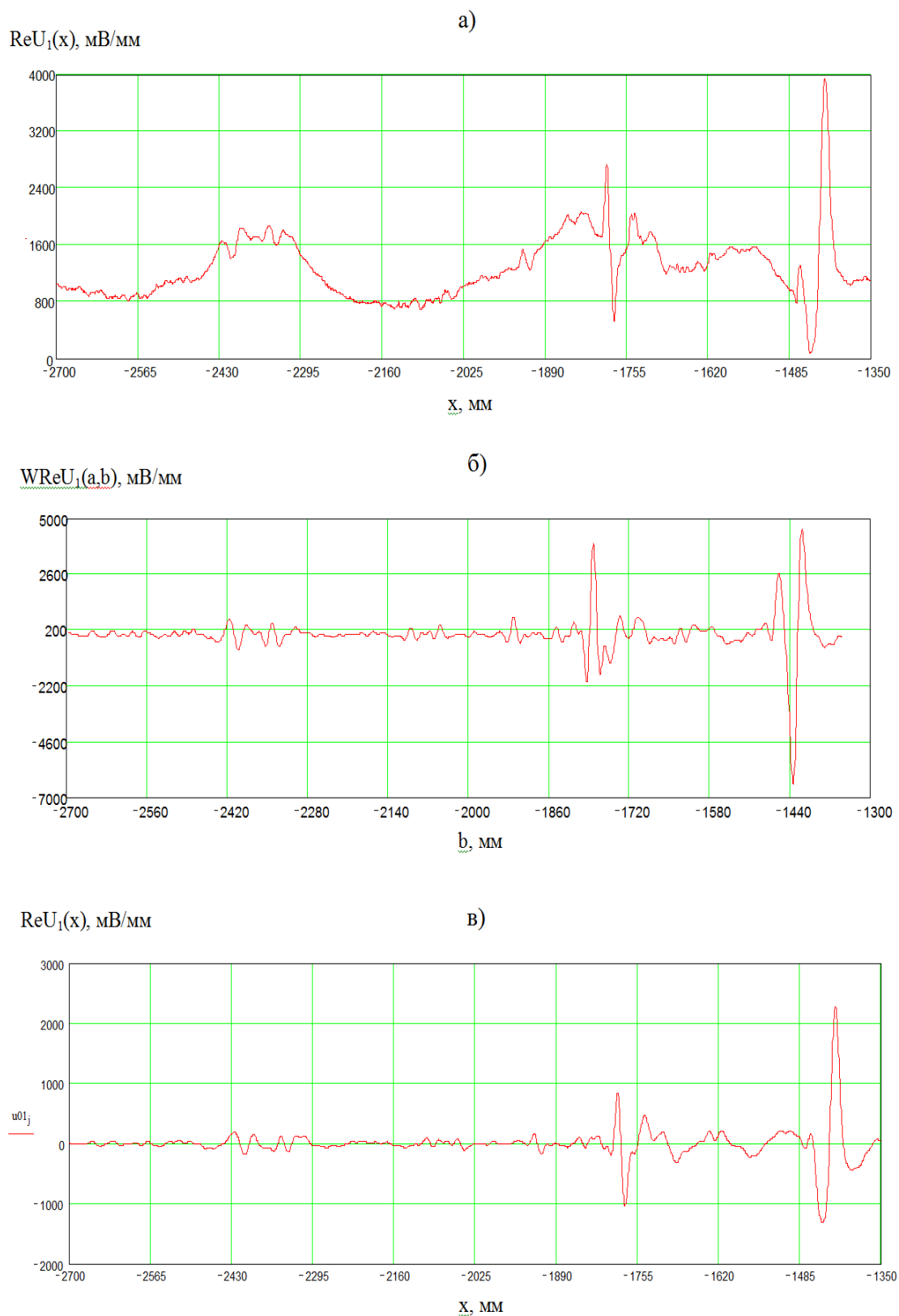


Рисунок 3. Распределение сигнала вещественного канала ВТП над стальной трубой (а), коэффициентов вейвлетного преобразования (б) и восстановленного сигнала ВТП после обратного вейвлетного преобразования (в)

Для восстановленного сигнала ВТП соотношение сигнал/шум равно 3,12 ед., что также существенно выше уровня порога, предусмотренного для вихретоковых дефектоскопов, и в 2,5 раза превышает этот параметр для исходного измеренного сигнала ВТП над стальной трубой. Удаление случайных помех и восстановление измеренных значений сигнала ВТП позволяет решать многопараметровую задачу оценки типа и геометрических параметров выявленных дефектов сплошности металла стальной трубы, которая относится к типу некорректных обратных задач математической физики [14, 15].

Геометрические параметры дефектов сплошности, выявленных в стальной трубе по измеренным сигналам дифференциального ВТП, определяются на основе минимизации сглаживающего функционала, состоящего из признаков классификации дефектов сплошности металла (теоретической модели X^T и экспериментально измеренных параметров на основе сигнала ВТП X^3):

$$M^\gamma(\vec{p}) = \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^m \left[X_k^3(x_j) - X_k^T(x_j) \right]^2 + \gamma \Omega(\vec{p}), \quad (6)$$

где X_k – k -й признак классификации дефекта сплошности ($k = 0, 1, \dots, m$), m – количество признаков классификации X , n – количество отсчетов в измеренном сигнале ВТП, $\gamma > 0$ – параметр регуляризации, $\Omega(\vec{p})$ – стабилизирующий функционал, \vec{p} – вектор геометрических параметров дефекта сплошности.

Стабилизирующий функционал в (6), состоящий из первых производных признаков классификации дефектов сплошности, описывается следующей формулой:

$$\Omega(\vec{p}) = \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^m \left[\frac{\partial X_k^3(x_j)}{\partial x} - \frac{\partial X_k^T(x_j)}{\partial x} \right]^2. \quad (7)$$

При сближении геометрических параметров теоретической модели дефекта сплошности с аналогичными параметрами для реального дефекта сплошности значение сглаживающего функционала (6) монотонно уменьшается и принимает минимальное значение. Значения компонент вектора геометрических параметров дефекта сплошности, которые соответствуют минимуму сглаживающего функционала (6), берутся в качестве оценок геометрических параметров реального дефекта сплошности в стальной трубе.

В функционалах (6) – (7) была использована следующая совокупность признаков классификации дефектов сплошности, определенная на основе измеренных сигналов дифференциального ВТП:

$X_1 = U(x)$, $X_2 = \text{Re}U_1(x)$, $X_3 = \text{Im}U_1(x)$, $X_4 = WU(a, b)$, $X_5 = W\text{Re}U_1(a, b)$, $X_6 = W\text{Im}U_1(a, b)$.

Значение параметра регуляризации в сглаживающем функционале (6) меняется согласованно с погрешностью измерения сигналов ВТП ε (рисунок 4).

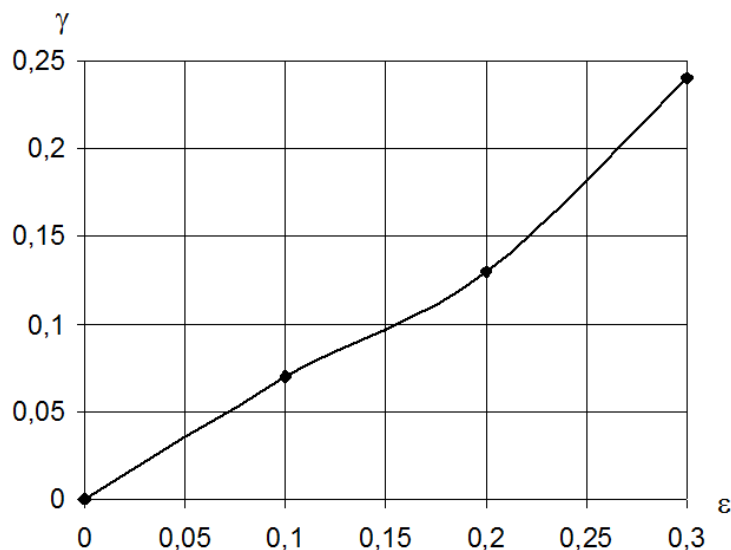


Рисунок 4. Зависимость параметра регуляризации в сглаживающем функционале от погрешности измерения

В зависимости от класса дефекта сплошности стального трубопровода (трещина или коррозия металла) вектор геометрических параметров дефекта сплошности задавался следующим образом:

$$\vec{p} = \{ h, 2b, 2L \} - \text{трещина},$$

$$\vec{p} = \{ h, D \} - \text{точечная коррозия металла}$$

$$\vec{p} = \{ h, 2b, 2a \} - \text{обширная коррозия металла}$$

где h – глубина, $2b$ – ширина дефекта сплошности, $2L$ – протяженность трещины, D – диаметр точечной коррозии металла, $2a$ – протяженность области металла с обширной коррозией металла.

В таблице 1 приведены оценки геометрических параметров трещин в стандартных образцах, изготовленных из стали 09Г2С электроискровым способом. Признаки классификации дефектов сплошности были получены на основе измеренных амплитудных значений сигналов накладного дифференциального ВТП над стандартными образцами.

Таблица 1. Оценка геометрических параметров трещин в металле

| № | Глубина h, мм | Ширина 2b, мм | Оценка глубины h*, мм | Оценка ширины 2b*, мм | Минимум функционала M ^γ |
|----|------------------|------------------|-----------------------------|-----------------------------|--|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 0,56 | 0,072 | 0,59 | 0,072 | 0,003 |
| 2 | 1,12 | 0,072 | 0,89 | 0,14 | 0,024 |
| 3 | 1,65 | 0,072 | 1,68 | 0,072 | 0,019 |
| 4 | 0,58 | 0,14 | 0,61 | 0,072 | 0,033 |
| 5 | 1,01 | 0,152 | 1,02 | 0,23 | 0,011 |
| 6 | 1,52 | 0,148 | 1,67 | 0,14 | 0,025 |
| 7 | 2,08 | 0,152 | 1,88 | 0,53 | 0,041 |
| 8 | 0,55 | 0,228 | 0,54 | 0,23 | 0,063 |
| 9 | 1,01 | 0,22 | 1,01 | 0,23 | 0,011 |
| 10 | 1,52 | 0,236 | 1,47 | 0,23 | 0,018 |
| 11 | 2,01 | 0,232 | 2,02 | 0,4 | 0,012 |
| 12 | 2,6 | 0,236 | 2,62 | 0,23 | 0,013 |
| 13 | 3,04 | 0,228 | 3,07 | 0,23 | 0,012 |
| 14 | 0,52 | 0,4 | 0,43 | 0,4 | 0,042 |
| 15 | 0,95 | 0,39 | 0,96 | 0,53 | 0,092 |
| 16 | 1,39 | 0,38 | 1,4 | 0,23 | 0,027 |
| 17 | 1,9 | 0,37 | 2,02 | 0,14 | 0,026 |
| 18 | 2,38 | 0,38 | 2,45 | 0,53 | 0,036 |
| 19 | 2,82 | 0,39 | 2,82 | 0,4 | 0,014 |
| 20 | 0,55 | 0,53 | 0,59 | 0,4 | 0,027 |
| 21 | 1,05 | 0,52 | 0,93 | 0,23 | 0,013 |
| 22 | 1,58 | 0,52 | 1,68 | 0,53 | 0,047 |
| 23 | 2,14 | 0,53 | 1,83 | 0,4 | 0,026 |
| 24 | 2,6 | 0,52 | 2,55 | 0,53 | 0,026 |
| 25 | 3,1 | 0,53 | 3,1 | 0,4 | 0,025 |

Наибольшая погрешность значений измеренных сигналов дифференциального ВТП не превышала 15 - 20 % ($\varepsilon = 0,15 - 0,2$). Исходя из этого интервала погрешности измерений ВТП, было выбрано среднее значение параметра регуляризации в сглаживающем функционале (6), которое равно $\gamma = 0,12$ ед. (рисунок 4).

В столбцах таблицы 2, 3 приведены истинные геометрические параметры трещин в металле стандартного образца, в столбцах 4, 5 приведены расчетные значения геометрических параметров трещин, которые определены путем минимизации сглаживающего функционала (6).

В столбце 6 приведены минимальные значения сглаживающего функционала (6), которые характеризуют степень отклонения признаков классификации реального дефекта сплошности от признаков классификации

модели дефекта: чем меньше эти значения, тем ближе теоретическая модель дефекта к реальному дефекту сплошности, и наоборот.

Из данных таблицы 1 видно, что наиболее точно оценивается глубина трещины в металле, наименее точно - ширина трещины. Точность оценки глубины трещины меняется от $\Delta h = 0,1$ мм (для дефектов малой глубины) до $\Delta h = 0,3$ мм (для дефектов большой глубины), что является приемлемой для практики неразрушающего контроля стальных трубопроводов.

Аналогичные (сопоставимые) результаты были получены при оценке геометрических параметров моделей коррозионных повреждений металла (точечных и обширных), изготовленных в стальных образцах из трубной стали методом сверления и фрезерования металла.

Выводы

1. Результаты предварительных исследований показали, что совокупность информативных параметров, которые получены на основе данных измеренных сигналов дифференциального ВТП сканера-дефектоскопа АСД «Вихрь», позволяют уверенно выявлять и классифицировать характерные дефекты сплошности металла стального трубопровода

2. При вейвлетном преобразовании измеренных сигналов ВТП с оптимальными параметрами удается существенно снизить уровень случайных шумов и помех без потери полезной информации в сигнале о дефектах сплошности металла.

3. Для дальнейшего повышения точности оценки геометрических параметров дефектов сплошности в металле стального трубопровода необходимо увеличивать точность измерения значений совокупности признаков классификации дефектов, получаемых на основе измеренных сигналов дифференциального накладного ВТП.

Список используемых источников

1. Р Газпром 2-2.3-569-2011. Организация и проведение технического диагностирования линейной части магистральных газопроводов наружными сканерами-дефектоскопами при капитальном ремонте. Общие требования. М.: ОАО «Газпром», 2012. 64 с.

2. СТО Газпром 2-2.3-095-2007. Методические указания по диагностическому обследованию линейной части магистральных газопроводов. М.: ОАО «Газпром», 2008. 43 с.

3. Коваленко А.В. Магнитные сканеры для контроля стенок и сварных швов нефтегазопроводов и резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов // Контроль. Диагностика. 2008. №3. С.64-70.

4. Степанчук Ю.М., Пеннер Э.Л. Опыт применения наружного сканера-дефектоскопа «АВТОКОН-МГТУ» в процессе ремонта газопроводов на объектах ОАО «Газпром» // Территория Нефтегаз. 2009. №11. С. 42-45.
5. Самокрутов А.А., Шевалдыкин В.Г. Возможности и перспективы применения сканеров-дефектоскопов // Территория нефтегаз. 2010. №12. С. 61-63.
6. Пасси Г. Автоматический/автоматизированный контроль сварных швов // Контроль. Диагностика. 2012. №5. С. 23-28.
7. Электромагнитный контроль поверхности стальных газопроводов в процессе переизоляции/ Коннов А.В. и др. // Достижения физики неразрушающего контроля: материалы международ. науч.-техн. конф. (15.10.2013). Респ. Беларусь. Минск, 2013. С. 182-189.
8. Устройство для сплошного сканирующего контроля качества неповоротных цилиндрических деталей / Коннов В.В., Коннов А.В.: пат. РФ на изобретение №2455625. Бюл. изобр. 10.07.2012. № 19.
9. Коннов А.В. Об информативности сигналов преобразователей многоканального электромагнитного дефектоскопа для контроля стальных изделий и металлоконструкций // Фундаментальная математика и её приложения в естествознании: материалы международ. шк.-конф. для студентов, аспирантов и молодых ученых (14-18. 10. 2012). Уфа: РИЦ БашГУ, 2012. С. 41.
10. Загидулин Р.В., Коннов А.В. Исследование информативности сигнала накладного вихретокового преобразователя над дефектами сплошности металла при электромагнитном контроле стальных изделий // Контроль. Диагностика. 2013. № 7(181). С. 19-27.
11. Марпл -мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
12. Загидулин Р.В., Коннов А.В. Поиск оптимальных параметров вейвлетной функции для вейвлет-преобразования сигналов вихретокового преобразователя над дефектами сплошности в стальном изделии // Контроль. Диагностика, 2013. № 5(179). С. 12-17.
13. Бадамшин Р.А., Загидулин Т.Р., Коннов А.В. Некоторые вопросы оптимизации параметров вейвлетного преобразования сигналов преобразователей электромагнитного поля // Вестник УГАТУ. 2013. Т.17. №1 (54). С. 122-127.
14. Арсенин В.Я. Методы математической физики и специальные функции. М.: Наука, 1974. 432 с.
15. Загидулин Р.В. Распознавание дефектов сплошности в ферромагнитных изделиях: дис... д-ра техн. наук. Уфа, 2001. 412 с.

References

1. R Gazprom 2-2.3-569-2011. Organizatsiya i provedenie tehnikeskogo diagnostirovaniya lineynoy chasti magistralnykh gazoprovodov naruzhnyimi skanerami-defektoskopami pri kapitalnom remonte. Obschie trebovaniya. Moskva: OAO Gazprom, 2012. pp.64. [in russian].
2. STO Gazprom 2-2.3-095-2007. Metodicheskie ukazaniya po diagnosticheskomu obsledovaniyu lineynoy chasti magistralnykh gazoprovodov. Moskva: OAO Gazprom, 2008. pp.43. [in russian].
3. Kovalenko A.V. Magnitnyie skaneryi dlya kontrolya stenok i svarnykh shvov neftegazoprovodov i rezervuarov dlya hraneniya nefiti i nefteproduktov // Kontrol. Diagnostika. 2008. №3. pp.64-70. [in russian].
4. Stepanchuk Yu.M., Penner E.L. Opyit primeneniya naruzhnogo skanera-defektoskopa «AVTOKON-MGTU» v protsesse remonta gazoprovodov na obyektakh OAO «Gazprom» // Territoriya neftegaz.2009. №11. pp. 42-45.
5. Samokrutov A.A., Shevaldyikin V.G. Vozmozhnosti i perspektivy primeneniya skanerov-defektoskopov // Territoriya neftegaz. 2010. №12. pp. 61-63. [in russian].
6. Passi G. Avtomaticheskii/avtomatizirovannyiy kontrol svarnykh shvov // Kontrol. Diagnostika. 2012. №5. pp.23-28. [in russian].
7. Konnov A.V., Kuznetsov A.M., Zagidulin T.R., Zagidulin R.V. Elektromagnitnyiy kontrol poverhnosti stalnykh gazoprovodov v protsesse pereizolyatsii // Dostizheniya fiziki nerazrushayushego kontrolya: Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya (15.10.2013). Belarus, Minsk, 2013. - pp. 182-189. [in russian].
8. Konnov V.V., Konnov A.V. Ustroystvo dlya sploshnogo skaniruyushego kontrolya kachestva nepovorotnykh tsilindricheskikh detaley. – Patent RF na izobretenie №2455625, Byul. izobr., 10.07.2012. №19. [in russian].
9. Konnov A.V. Ob informativnosti signalov preobrazovateley mnogokanalnogo elektromagnitnogo defektoskopa dlya kontrolya stalnykh izdeliy i metallokonstruktsiy // Fundamentalnaya matematika i eyo prilozheniya v estestvoznanii: materialy Mezhdunarodnoy shkoli-konferentsii dlya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh, (14-18. 10. 2012). Ufa: RITs BashGU, 2012. – p.41. [in russian].
10. Zagidulin R.V., Konnov A.V. Issledovanie informativnosti signala nakladnogo vihretokovogo preobrazovatelya nad defektami sploshnosti metalla pri elektromagnitnom kontrole stalnykh izdeliy // Kontrol. Diagnostika. 2013. №7 (181). pp.19-27. [in russian].
11. Marpl.-ml. S.L. Tsifrovoy spektralnyiy analiz i ego prilozheniya. M.: Mir, 1990. 584 p.

12. Zagidulin R.V., Konnov A.V. Poisk optimalnykh parametrov veyvletnoy funktsii dlya veyvlet-preobrazovaniya signalov vihretokovogo preobrazovatelya nad defektami sploshnosti v stalnom izdelii // Kontrol. Diagnostika. 2013. №5 (179). pp. 12-17. [in russian].

13. Badamshin R.A., Zagidulin T.R., Konnov A.V. Nekotorye voprosy optimizatsii parametrov veyvletnogo preobrazovaniya signalov preobrazovatelya elektromagnitnogo polya // Vestnik UGATU. 2013. T.17. №1 (54). pp. 122-127. [in russian].

14. Arsenin V.Ya. Metody matematicheskoy fiziki i spetsialnyie funktsii. M.: Nauka, 1974. 432 p.

15. Zagidulin R.V. Raspoznavanie defektov sploshnosti v ferromagnitnykh izdeliyah. Dissertatsiya doctora tehn. Nauk. Ufa, 2001. 412 p. [in russian].

Сведения об авторе

Information about the author

Коннов А.В., зам. генерального директора ЗАО «НПЦ «Молния», г. Москва, Российская Федерация

A.V. Konnov, deputy CEO CJSC Scientific and Production Center "MOLNIYA", Moscow, the Russian Federation

e-mail: molkon@bk.ru