

## ПРИМЕНЕНИЕ ДЕКОМПОЗИЦИИ СИГНАЛА НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТОВ ДЛЯ ЗАДАЧ ЛОКАЛИЗАЦИИ ВОЛН ДАВЛЕНИЯ

Ю.Ю. Бетев

Томский политехнический университет

E-mail: betev\_yy@mail.ru

Предложен метод анализа волн давления при малых утечках на фоне большой зашумленности сигнала с датчиков давления. Показано, что декомпозиция сигнала на основе вейвлетов с последовательным изменением масштаба по времени позволяет с высокой точностью локализовать незначительные изменения в сигнале.

### Ключевые слова:

Волна давления, вейвлет-анализ, декомпозиция сигнала, детализирующая составляющая.

### Key words:

Pressure wave, wavelet analysis, signal decomposition, detailing component.

В процессе эксплуатации объектов трубопроводного транспорта нефти возникает необходимость оперативного и точного обнаружения утечек, возникающих при его повреждении. Одним из способов локализации утечек является метод, основанный на улавливании волн давления. Согласно теории неустановившихся процессов в момент утечки жидкости в трубопроводе возникают волны разрежения, которые распространяются от места утечки в обе стороны [1]. Регистрация волн производится на основе показаний высокочувствительных датчиков давления, установленных в начале и в конце контролируемого участка (рис. 1).

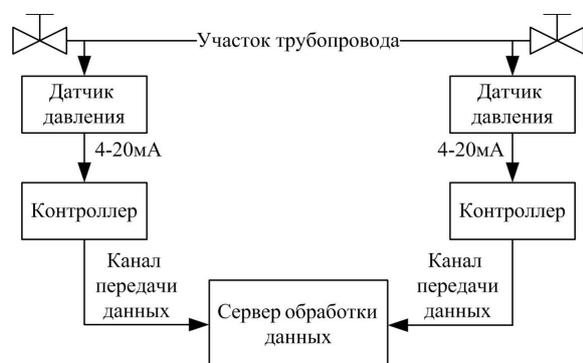


Рис. 1. Схема контролируемого участка трубопровода

Местоположение утечки определяется через разность моментов прихода волн к началу и к концу участка контролируемого трубопровода по формуле:

$$x = \frac{L}{2} + \frac{c}{2}(t_1 - t_2),$$

где  $x$  – местоположение утечки;  $L$  – длина контролируемого участка трубопровода;  $c$  – скорость звука в перекачиваемой жидкости;  $t_1$  – момент прихода волны к началу контролируемого участка;  $t_2$  – момент прихода волны к концу контролируемого участка.

Основным фактором, влияющим на погрешность этого метода, является точность определения времени прихода волны давления, которая в свою

очередь зависит от дискретности поступающего с датчика давления сигнала и от математического аппарата, применяемого для его анализа.

Волна давления при порыве трубопровода характеризуется резким перепадом давления, фронт волны распространяется со скоростью звука в перекачиваемой жидкости. Величина перепада давления зависит от диаметра отверстия, через которое происходит утечка жидкости и может носить как ярко выраженный характер (рис. 2), так и быть едва различимой на фоне шума сигнала (рис. 3).

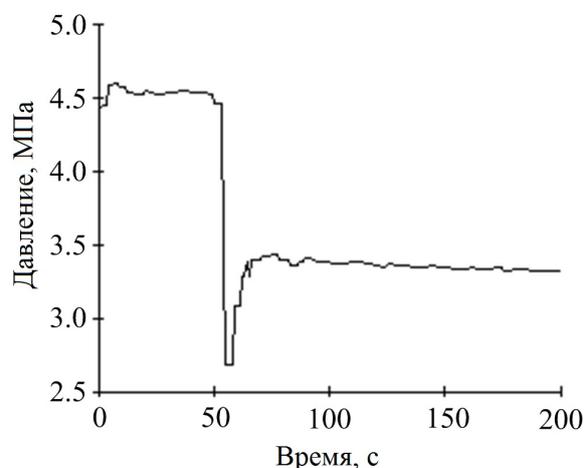


Рис. 2. Волна давления при большом диаметре отверстия

Основную сложность в данном случае вызывает анализ волн давления, возникающих при малых диаметрах отверстия. Существующие программные методы фиксации и временной локализации волн давления [1] обладают существенным недостатком, так как анализ сигналов производится на уровне сервера (рис. 1), что требует обеспечить сбор данных с датчиков давления в реальном масштабе времени с высокой частотой дискретизации. Это предъявляет высокие требования к пропускной способности каналов передачи данных, которые могут быть обеспечены проектируемыми линиями производственно-технологической связи, но зачастую не приемлемы для линий связи, нахо-

дящихся в эксплуатации. Описанный в статье метод позволяет производить временную локализацию волн давления на уровне контроллеров и передавать на уровень сервера обработки данных только пакеты, содержащие метки времени зафиксированных волн давления. Такое разделение вычислительных функций существенно снижает нагрузку на каналы передачи данных. Это позволяет применять данный метод на трубопроводах, где линии производственно-технологической связи имеют низкую пропускную способность.

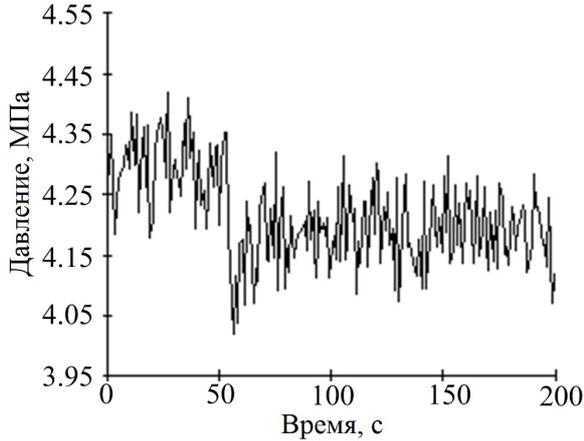


Рис. 3. Волна давления при малом диаметре отверстия

Предлагается применение кратномасштабного вейвлет-анализа для исследования локальных особенностей нестационарных сигналов, что позволяет с минимальной погрешностью по времени локализовать волну давления. Его идея состоит в представлении сигнала последовательностью образов с разной степенью детализации. Каждый образ содержит независимую неперекрывающуюся информацию о сигнале в виде вейвлет-коэффициентов, которые вычисляются с помощью итерационной процедуры – быстрого вейвлет-преобразования. В совокупности они позволяют решить проблему полного анализа сигнала (выявления сингулярностей в сигналах от датчиков давления, вызванных распространением волн при порыве трубопровода).

Любую функцию  $f(\tau)$  из пространства  $L^2(R)$  можно достаточно хорошо приблизить функцией с компактным носителем, кусочно-постоянной на отрезке  $(j2^{-i}, (j+1)2^{-i})$ . Последовательное уменьшение  $i$  позволяет получить все более грубые приближения  $f^i$  к  $f(\tau)$ , таким образом, получается цепочка подпространств, представляющих уровни с последовательным изменением масштаба по времени (уровни разрешения):  $V^{(i)} = \{f^i \in L^2(R)\}$ .

Согласно концепции кратномасштабного вейвлет-анализа справедливо следующее представление [2]:

$$f(\tau) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} v_j^{(i_0)} \phi_j^{(i_0)}(\tau) + \sum_{i=i_0}^{+\infty} \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \omega_j^{(i)} \psi_j^{(i)}(\tau), \quad i_0 \in Z, \quad (*)$$

где  $v_j^{(i_0)}(\tau) = \langle f(\tau) | \phi_j^{(i_0)}(\tau) \rangle$ ,

$$\phi_j^{(i_0)}(\tau) = \sqrt{2^{i_0}} \psi(2^{i_0} \tau - j), \quad i_0, j \in Z.$$

Представление (\*) можно рассматривать как разложение сигнала  $f(\tau)$  на две проекции – проекцию на пространство  $V^{(i_0)}$  (первое слагаемое) и проекцию на ортогональное дополнение  $V^{(i_0)}$  до  $L^2(R)$  (второе слагаемое). Структура пространств такова, что проекция сигнала на первое пространство является низкочастотным (пользуясь терминологией анализа Фурье) представлением этого сигнала, а на второе – высокочастотным, т. е. содержащим уточняющую информацию о сигнале.

Основной проблемой в применении такого преобразования является сложность вычисления вейвлет-коэффициентов. Упростить эту процедуру возможно, воспользовавшись свойствами кратномасштабного анализа. Из соотношения (\*) следует, что любую масштабирующую (скейлинг-) функцию  $\phi_j(\tau)$  уровня разрешения  $i$  можно представить в виде линейной комбинации скейлинг-функции уровня  $i+1$ :

$$\phi_j^{(i)}(\tau) = \sqrt{2} \sum_{k \in Z} h_k \phi_j^{(i)}(2\tau - k) = \sum_{k \in Z} h_k \phi_{2j+k}^{(i+1)}(\tau),$$

$$i, j \in Z.$$

Следовательно,

$$v_j^{(i)} = \langle f(\tau) | \phi_j^{(i)}(\tau) \rangle = \left\langle f(\tau) \left| \sum_{k \in Z} h_k \phi_{2j+k}^{(i+1)}(\tau) \right. \right\rangle =$$

$$= \sum_{k \in Z} \langle f(\tau) | h_k \phi_{2j+k}^{(i+1)}(\tau) \rangle = \sum_{k \in Z} h_k \langle f(\tau) | \phi_{2j+k}^{(i+1)}(\tau) \rangle =$$

$$= \sum_{k \in Z} h_k v_{2j+k}^{(i+1)}(\tau) \quad i, j \in Z.$$

Аналогично получается выражение для  $\psi_j^{(i)}(\tau)$ :

$$\psi_j^{(i)}(\tau) = \sqrt{2} \sum_{l \in Z} g_l \phi_j^{(i)}(2\tau - l) = \sum_{l \in Z} g_l \phi_{2j+l}^{(i+1)}(\tau),$$

$$i, j \in Z,$$

откуда следует, что:

$$\omega_j^{(i)} = \langle f(\tau) | \psi_j^{(i)}(\tau) \rangle = \sum_{l \in Z} g_l \langle f(\tau) | \phi_{2j+l}^{(i+1)}(\tau) \rangle =$$

$$= \sum_{l \in Z} g_l v_{2j+l}^{(i+1)}(\tau), \quad i, j \in Z.$$

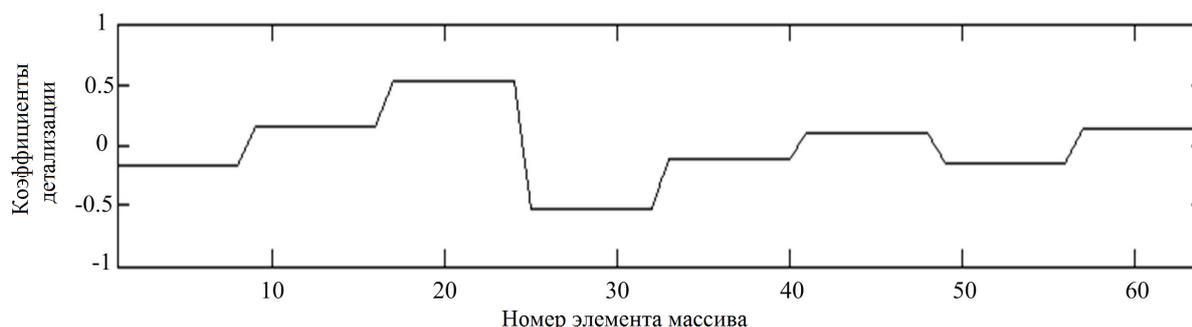
Таким образом, процедура последовательного разложения строится на итерационных методах, что позволяет применять данный алгоритм на уровне контроллеров.

Для анализа сигнала используется пакет Matlab, имеющий в своем составе модуль для работы с вейвлетами [3]. Анализ производится для постоянно сдвигающегося массива из 64 значений (рис. 4). Данные попадают в массив с модуля АЦП, подключенного к датчику давления по принципу первый вошел – последний вышел. Для увеличения точности данные берутся с максимально возможной дискретизацией, которую может обеспечить скан-цикл контроллера. Исследование локальных особенностей сигнала производится в несколько этапов с последовательным уточнением их во временной области.

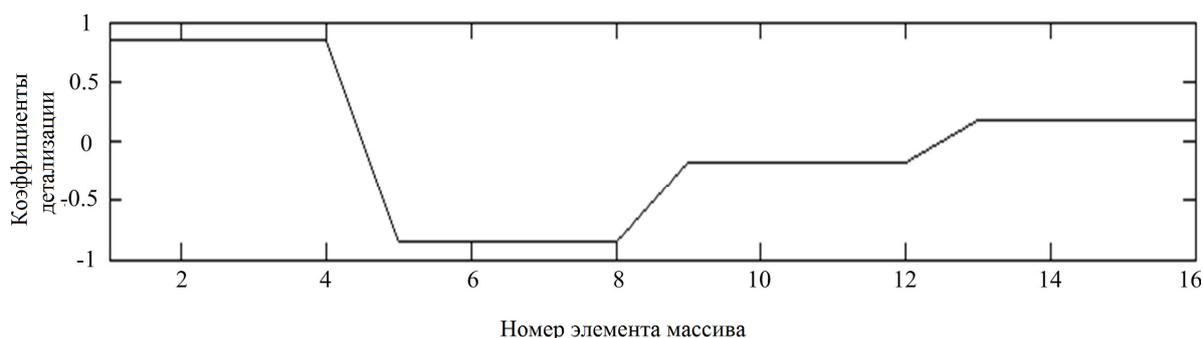
На каждом этапе определяются интервалы, на которых исходный сигнал превышает поро-



**Рис. 4.** Исходный сигнал (выборка из 64 значений с дискретность 100 мс)



**Рис. 5.** Детализирующая составляющая сигнала. Уровень декомпозиции 4



**Рис. 6.** Детализирующая составляющая сигнала. Уровень декомпозиции 3

вый уровень величины перепада давления. Пороговый уровень определяется по существующим характеристикам трубопровода. Он зависит от нескольких факторов: реальной погрешности применяемых на трубопроводе датчиков давления, профиля трубопровода, а также от режима перекачки нефти.

На первом этапе сигнал исследуется на предмет низкочастотных составляющих. Локализация по времени на этом этапе имеет большую погрешность, так как дискретизация детализирующей составляющей уменьшена в 8 раз по сравнению с исходным исследуемым сигналом.

Производится декомпозиция сигнала с помощью вейвлета Добеши [4] и анализируется детализирующая составляющая сигнала с уровнем декомпозиции равным 4 (рис. 5).

Определение уровней декомпозиции дано в [2]. Таким образом, производится оценка грубо аппроксимированной копии сигнала, что позволяет

выявить интервалы, на которых сигнал имеет перепад, превышающий пороговый уровень, что характерно для волны давления.

Следующий этап анализа проводится для интервала сигнала, на котором детализирующая составляющая с уровнем декомпозиции 4 имела перепад, превышающий расчетное пороговое значение. Производится декомпозиция выборки из 16 значений с помощью вейвлета Добеши и анализируется детализирующая составляющая сигнала с уровнем декомпозиции 3 (рис. 6), то есть масштаб исследования сигнала увеличивается в два раза. Так же как и на предыдущем шаге, локализуется интервал, на котором детализирующая составляющая с уровнем декомпозиции имеет перепад, превышающий расчетное пороговое значение.

Применение высокоточных датчиков давления в совокупности с контроллерами, обладающими высокой вычислительной способностью позволяют уже на этом этапе анализа получить временную

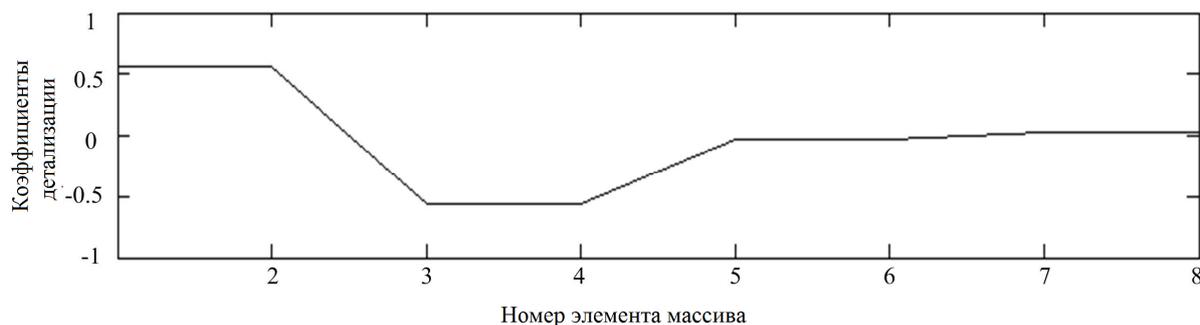


Рис. 7. Детализирующая составляющая сигнала. Уровень декомпозиции 2

локализацию волны давления с погрешностью, удовлетворяющей требованиям, предъявляемым к системам обнаружения утечек.

Последний этап проводится для локализации волны давления по времени с минимальной погрешностью. Рассматривается интервал сигнала, на котором детализирующая составляющая с уровнем декомпозиции 3 имела перепад, превышающий расчетное пороговое значение. Производится декомпозиция сигнала с помощью вейвлета Добеши и анализируется детализирующая составляющая сигнала с уровнем декомпозиции 2 (рис. 7).

Таким образом, применение кратномасштабного анализа сигнала на основе вейвлетов с последовательным увеличением масштаба по времени позволяет с высокой точностью локализовать малые волны давления на фоне большой зашумленности сигнала. Также применение кратномасштабного анализа позволяет выявлять волны давления, вызванные медленно развивающимися утечками. Для локализации медленно развивающихся утечек увеличивается размер входного массива, что позволяет исследовать более долгосрочное поведение сигнала.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вайншток С.М., Новоселов В.В., Прохоров А.Д. и др. Трубопроводный транспорт нефти. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. – 621 с.
2. Воробьев В.И. Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. – СПб.: Военный университет связи, 1999. – 204 с.
3. Weeks M. Digital Signal Processing Using MATLAB and Wavelets. – Jones & Bartlett Publishers, 2006. – 452 p.
4. Mallat S. A Wavelet Tour of Signal Processing, 2<sup>nd</sup> edition. – Academic Press, 1999. – 637 p.

Поступила 08.10.2010 г.