

Н.И. КОРСУНОВ, д-р техн. наук, проф. БелГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород, Россия),

М.В. МИХЛЕВА, БелГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород, Россия)

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЙ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ МЕЛЬНИЦ ПОМОЛА

В статье рассматривается возможность применения вейвлет-преобразований и нейросетевых технологии для частотной обработки спектров звуковой энергии шаровой мельницы. Предложено эффективное применение нейросетевых технологии для частотной обработки на основе базовых функций вейвлета Хаара.

Ключевые слова: вейвлет-преобразование, нейросетевые технологии, частотная обработка.

Постановка проблемы. Процесс измельчения сырья, широко используемый в различных областях промышленности, характеризуется высокой ресурсоемкостью, и заставляет производителей и исследователей искать новые энергосберегающие технологии измельчения, заниматься разработкой более эффективного управления оборудованием.

Шаровые мельницы обеспечивают получение больших объемов тонкодисперсных материалов при достаточно высоких показателях технической надежности оборудования. В настоящее время никакое другое помольное оборудование не может конкурировать с шаровыми мельницами в деле переработки больших объемов материалов, и производственная практика это лишний раз подтверждает.

Процесс измельчения материала в шаровой мельнице сопровождается излучением звуковой энергии, возникающей из-за соударений шаров и материала друг с другом и о футеровку. Считается, что сила звука, излучаемого мельницей, зависит от величины загрузки мельницы рудой, а по изменению амплитуды и частоты издаваемых мельницей звуков можно судить об эффективности измельчения материала.

Для качественного динамического контроля измельчения исходного сырья необходимо выделение динамических параметров шаровой мельницы. Такими параметрами являются акустические и энергетические сигналы мельницы, по которым можно судить об эффективности и скорости измельчения материала.

Анализ литературы. Для установления взаимосвязи между динамическими явлениями, происходящими в шаровой мельнице, и эффективностью измельчения применяют различные методы контроля мельницы. В этом направлении большие возможности открывают методы виброакустического контроля, базирующиеся на использовании информации о звуковой энергии.

Спектры звуковых давлений шаровой мельницы дают полное представление об уровне и частоте шума, издаваемого мельницей. Измерение амплитуды и частоты звука возможно при помощи конденсаторного микрофона. Сигнал микрофона через анализатор поступает на самописец и регистрируется с помощью логарифмической шкалы [1].

Требованиями, предъявляемыми к оперативному контролю барабанных мельниц, являются: получение минимального числа наиболее информативных признаков, на основе которых строится решающее правило, обеспечивающее требуемую глубину контроля; высокая вычислительная эффективность метода контроля; простота аппаратурной или программной реализации.

В настоящее время при решении задач звукометрического контроля с помощью существующих методов возникают определенные трудности. Это касается определения режимов работы мельницы и локальных особенностей звуковой энергии при измельчении сырья.

В основе многих разработанных методов контроля лежит вычисление коэффициентов ряда Фурье. Характер изменения коэффициентов позволяет получить информацию о свойствах сигнала, например, выявить скрытые периоды. Для вычисления коэффициентов существует алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ), называемый алгоритмом прореживания по частоте/времени или алгоритмом по основанию 2, имеющий сложность $O(N \log(N))$.

Важнейшим свойством коэффициентов Фурье является то, что они отражают поведение сигнала в целом. Спектр Фурье наглядно демонстрирует лишь глобальные свойства сигналов, но из него трудно извлечь информацию о локальных особенностях – резких скачках, узких пиках, и т.п. Шум мельницы является сложным сигналом, представляющим собой совокупность сигналов, возбуждаемых различными источниками колебаний.

Существующий на практике метод спектрального Фурье-преобразования не всегда успешно справляется с обработкой этих сигналов. Основным недостатком этого метода является его применимость лишь для анализа стационарных сигналов. Проблема заключается в том, что спектральный анализ не всегда позволяет определять динамику изменения реального сигнала диагностируемого оборудования. Переход к оконному преобразованию Фурье приводит к сильной зависимости частотных характеристик сигнала от параметров окна.

Преодолеть эти трудности можно с помощью вейвлет-преобразования [2, 3], которое позволяет определить характер изменения частоты сигнала во времени.

Вейвлет-анализ есть логическое продолжение оконного преобразования Фурье. В случае Фурье-анализа в качестве базиса используются гармонические функции, с бесконечной областью определения по времени, а для вейвлет-анализа используются функции, ограниченные на ограниченных интервалах времени.

Вейвлеты обладают существенными преимуществами по сравнению с преобразованием Фурье, потому что вейвлет-преобразование позволяет судить не только о частотном спектре сигнала, но также о том, в какой момент времени появилась та или иная гармоника. С их помощью можно легко анализировать локальные свойства сигнала и прерывистые сигналы, либо сигналы с острыми всплесками [4].

Практическое использование вейвлет-преобразований связано, в основном, с дискретными вейвлетами как в силу повсеместного использования цифровых методов обработки данных, так и в силу ряда различий дискретного и непрерывного вейвлет-преобразований [5].

Цель статьи – предложить способ выделения параметров для контроля мельницы помола, который бы позволял оперативно контролировать работу мельницы.

Для достижения цели нами предлагается использовать вейвлет-преобразования для виброакустического контроля работы шаровой мельницы.

Вейвлет анализ можно представить как последовательное представление исследуемой функции через иерархически вложенные непересекающиеся подпространства V_m , где $m \in Z$, Z – множество целых чисел [6].

Для анализа дискретной временной последовательности хорошо подходит вейвлет Хаара [6]. На основе базовой функций вейвлета Хаара записываем масштабированную функцию звукового сигнала шаровой мельницы:

$$\varphi_{m,k}(x) = 2^{m/2} \varphi(2^m x - k), \quad (1)$$

где $\varphi_{m,k}(x)$ – базисная функция; $m \in Z$; k – шаг сдвига.

Эта функция образует нормированные взаимно ортогональные базисы пространства вейвлетных коэффициентов, на которые может быть разложен анализируемый сигнал. При сдвиговой ортогональности прямоугольных базисных функций прямое преобразование (проекции сигнала на базис (1)) для непрерывных сигналов выполняется по формуле:

$$C_{m,k} = \int_{k\Delta x}^{(k+1)\Delta x} s(x) \varphi(2^m x - k) dx,$$

где $s(x)$ – сигнал; $\varphi(2^m x - k)$ – базисная функция, $m \in Z$, k – шаг сдвига.

Восстановление сигнала выполняется по формуле реконструкции:

$$s_r(m, x) = \sum_{k=0}^{N-1} C_{m,k} \varphi_{m,k}(x),$$

где N – количество отсчетов сигнала; m – количество масштабных строк.

Общая формула реконструкции сигнала [5]:

$$s_r(x) = C_0 \varphi_0(x) + D_0 \varphi_0(x) + \sum_{k=0}^1 D_{1,k} \varphi_{1,k}(x) + \dots + \sum_{k=0}^{N-1} D_{m,k} \varphi_{m,k}(x), \quad (2)$$

где m – уровень декомпозиции сигнала; $D_0, D_{i,k}$ – детализирующие коэффициенты; $i = \overline{1, m}$; C_0 – масштабный коэффициент.

Представление звукового сигнала в виде (2) позволяет определять характер изменения частоты сигнала во времени. Поскольку шумы мельницы относятся к тональным сигналам, то для контроля работы мельницы помола целесообразно воспользоваться вейвлет-преобразованиями, которые достаточно точно локализируют точки максимумов энергии, которые характеризуют изменение режима работы мельницы. Если шумы различаются по тональности, то их достаточно разделить на частотном диапазоне, что позволит определять степень загрузки мельницы. Следствием является возможность контролировать работу мельницы помола не по абсолютным значениям параметров сигнала, а по попаданию точек максимумов энергии в тот или иной частотный диапазон.

В матричном виде один уровень вейвлет-преобразования представляется в виде:

$$y = xW, \quad (3)$$

где x – вектор сигнала; W – матрица-фильтр; y – результирующий вектор.

Получение результирующего вектора y предполагает $n \times m$ однотипных операций по умножению элементов матрицы W и вектора x , где m – число строк матрицы W ; n – длина вектора x .

Представление вейвлет-преобразования в виде (3) позволит эффективно применить нейросетевые технологии для частотной обработки на основе базовых функций вейвлета:

$$Y = f(W \cdot X),$$

где $W = \|w_{ij}\|$ – матрица весовых коэффициентов нейронной сети, длина вектора-столбца X равна длине вектора-столбца Y ; f – функция активации, базовая функция вейвлета Хаара. Весовые коэффициенты связей нейронной сети w_{ij} определяются на этапе обучения. Для применения многоуровневого вейвлет-преобразования сигналов можно использовать $(k+1)$ -слойную нейронную сеть, каждый $k+1$ слой которой будет реализовывать k -й уровень вейвлет преобразования. Был проведен вычислительный эксперимент с помощью вейвлет-преобразований и быстрого преобразования Фурье, который показал, что преобразование Фурье несет информацию об изолированной особенности сигнала, а с помощью вейвлетов различаются моменты возникновения изолированных особенностей, что позволяет точно определить, в каком режиме работает мельница. Кроме этого, может быть построен алгоритм обучения нейронной сети, выходами которой будут являться моменты времени появления временных изолированных особенностей.

Полученные результаты проверялись с помощью вычислительного эксперимента в соответствии с алгоритмом:

1. Измерение шума мельницы с помощью первичных преобразователей.

2. Исследование сигнала на предмет выявления его свойств.
3. Предварительная обработка сигнала с целью повышения его информативности.
4. Анализ характеристик сигнала с целью формирования системы контролируемых признаков на основе вейвлет-преобразования.
5. Сравнение контролируемых признаков с эталонными и принятие решения, т.е. определение режима, в котором работает мельница помол.

Выводы. Таким образом, исследована возможность использования вейвлет преобразований для контроля режимов работы мельницы по звуковому сигналу мельницы. Такое преобразование обеспечивает точную реконструкцию сигнала, а значит и более точное определение, режима работы мельницы. Также рассмотрена возможность реализации контроля на основе нейросетевых технологий.

Список литературы: 1. *Марюта А.Н., Мецераков Л.И.* Спектральный анализ сигнала активной мощности приводного двигателя мельниц мокрого самоизмельчения руд для задач контроля технологических переменных // Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. – 1981. – № 1. – С. 91-96. 2. *Richard J. Higgins.* Digital Signal Processing in VLSI, Prentice-Hall, 1990. – С.101-103. 3. *Астафьева Н.М.* Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук, 1996. – С. 1153-1157. 4. *Nason G.P., Silwerman B.W.* The Discrete Wavelet Transform in S // Journal of Computational and Graphical Statistics, 1994. – № 4. – С. 51-52. 5. *Воробьев В.И., Грибунин В.Г.* Теория и практика вейвлет-преобразования. – ВУС, 1999. – С. 74-83. 6. *Червяков Н.И., Ремизов С.Л.* Нейросетевая реализация модулярных преобразований в вейвлет-обработке речевых сигналов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2005. – № 5. – С. 68-72. 7. Дьяконова В.П. Вейвлеты. От теории к практике. – М.: Солон-Р, 2002. – 480 с. 8. *Чуи К.* Введение в вейвлеты. – М.: Мир, 2001. – 482 с.

УДК 621.391

Застосування вейвлет-перетворювань для виділення параметрів контролю млинів помелу / Корсунів М.І., Михелева М.В. // Вісник НТУ "ХПІ". Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2009. – № 13. – С. 89 – 93.

У статті розглядається можливість вживання вейвлет-перетворювань і нейромережових технологій для частотної обробки спектрів звукової енергії кульового млина. Запропоновано ефективне вживання нейромережових технологій для частотної обробки на основі базових функцій вейвлета Хаару. Библиогр.: 8 назв.

Ключевые слова: вейвлет-перетворювання, нейромережові технології, частотна обробка.

UDC 621.391

Application of wavelet-transformations for allocation of control parametres by grinding mills / Korsunov N.I., Miheleva of M.V. // Herald of the National Technical University "KhPI". Subject issue: Information Science and Modelling. – Kharkov: NTU "KhPI". – 2009. – № 13. – P. 89 – 93.

In article possibility of application wavelet-transformations and neuronets technologies for frequency processing of a spherical mill spectra sound pressure is considered. Effective application of neuronets is offered to technology for frequency processing on the basis of base functions wavelet Haara. Refs: 8 titles.

Keywords: wavelet-transformations, neuronet technologies, frequency processing.

Поступила в редакцію 10.04.2009