

УДК 621.391.14:519

**М. А. Алексеев**, кандидат технических наук,  
заведующий кафедрой программного  
обеспечения компьютерных систем  
Национального горного университета

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ СПЕКТРОВ ПРИ КОНТРОЛЕ ПАРАМЕТРОВ РОТОРНЫХ ОБЪЕКТОВ

*Запропоновано метод контролю параметрів роторних об'єктів управління з використанням частотно-хвильових спектрів на прикладі контролю заповнення кульового млина і стану його футеровальних плит за звукометричним сигналом. Метод дозволяє визначити координати джерела сигналу.*

*Предложен метод контроля параметров роторных объектов управления с использованием частотно-волновых спектров на примере контроля заполнения шаровой мельницы и состояния ее футеровочных плит по звукометрическому сигналу. Метод позволяет определить координаты источника сигнала.*

*The method of control of parameters of rotor objects of management is offered with the use of frequency-wave spectrums on the example of control of filling of ball mill and state of its refractory-lined flags on a sound-ranging signal. A method allows to define the co-ordinates of source of signal.*

**Ключевые слова.** Контроль параметров, объект управления, сигнал, частотно-волновой спектр.

© М. А. Алексеев, 2010

**Введение.** При функционировании роторных объектов управления, которые являются сложными динамическими системами, состоящими из множества взаимодействующих подсистем, возникают возмущающие силы и моменты, приложенные в различных местах объекта. Реакцией динамической системы на возмущающие силы являются механические и звуковые колебательные процессы, то есть вибрация и звуковой сигнал, которые зависят от величины, характера и места действия возмущающих сил. Эти силы можно рассматривать как источники вибрационных и звуковых сигналов, а место их приложения определяет координаты этих источников. Поэтому задача управления роторными объектами управления может быть решена более эффективно, когда наряду с оценкой параметров сигналов как реакции возмущающей силы можно соотнести изменения в спектре сигналов и местоположение источников сигналов в объекте.

Величина, характер и место действия возмущающих сил адекватно связаны с состоянием объекта управления [1]. Взаимодействие порожденных сигналов с широким частотным спектром большого количества источников приводит к сложной волновой картине в исследуемых точках объекта. При этом вследствие перекрытия спектров сигналов различных источников трудно, а порой невозможно соотнести изменения в спектре Фурье временной реализации звукометрического сигнала с местоположением источника сигнала в объекте. Это является одной из трудностей при контроле параметров шаровой мельницы по звукометрическому сигналу. Для преодоления этой трудности была исследована возможность применения частотно-волнового спектрального анализа звукометрического сигнала при управлении шаровыми мельницами.

Как известно, процесс управления состоит из получения информации о цели управления, обработке информации о результатах управления, выработке и исполнении принятого решения. Решение задач управления объектами АСУ ТП в значительной степени основывается на обработке временных сигналов. Однако для многих объектов характерно изменение процессов, сопутствующих функционированию объекта не только во времени, но и в пространстве. Совместное определение частотно-волновых характеристик процессов позволяет получить информативные классификационные признаки [2]. Естественной моделью таких процессов будут случайные поля, образованные суперпозицией бегущих волн от различных источников (например, акустическое поле, возникающее из-за соударений шаров и материала друг с другом и о футеровку при работе барабанной мельницы). Рассмотрим возможности применения частотно-волновых спектров Фурье для формирования информативных признаков при контроле параметров объектов управления.

**Постановка задачи.** Целью работы является разработка метода контроля параметров роторных объектов управления на основе использования частотно-волнового спектрального анализа звукометрического сигнала при управлении шаровыми мельницами.

**Результаты исследования.** Для объектов, находящихся в состоянии статического равновесия, применимы методы анализа стационарных однородных полей. Для получения признаков, инвариантных к временному и пространственному сдвигу, используем в качестве признаков частотно-волновой спектр Фурье [3].

Пространственно-временную функцию  $S(t, v)$  можно представить в виде разложения Фурье следующим образом (для случая плоских волн):

$$S(t, v) = \int \int G(f, k) \exp[2\pi j(f t - k v)] df dk, \quad (1)$$

где  $\exp[2\pi j(f t - k v)]$  – монохроматическая волна;  $v$  – вектор, определяющий координаты точки, в которой оценивается  $S(t, v)$ ;  $k$  – векторное волновое число (вектор “пространственной частоты”);  $G(t, k)$  – взаимная по пространству спектральная плотность.

Тогда частотно-волновой спектр, связанный преобразованием Фурье с взаимной по пространству спектральной плотностью, можно представить в виде [3]:

$$E(k, f) = \int G(f, k) \exp(-j k v) dv \quad (2)$$

или с функцией частотно-волновой корреляции в виде:

$$E(k, f) = \int \int \overline{R(\tau, \nu)} \exp[-j2\pi(ff - k\nu)] d\tau d\nu, \quad (3)$$

где многомерная автокорреляционная функция равна математическому ожиданию  $R(\tau, \nu) = M[S(t, \nu_0)S(t + \tau, \nu_0 + \nu)]$ .

Рассмотрим монохроматическую волну вида [3]:

$$S(t, \nu) = A \cos[2\pi f_0(t - \alpha\nu) + \Theta] = a \cos[2\pi(f_0 t + k\nu) + \Theta], \quad (4)$$

где  $\alpha$  – вектор, указывающий направление распространения волны;

$\Theta$  – случайная переменная, равномерно распределенная в  $[0, 2\pi]$ .

Частотно-волновой спектр для этого случая можно представить [3]:

$$\begin{aligned} E(f, k) &= \int \int \overline{\left\{ A^2/2 \right\}} \cos[2\pi(f_0 \tau - k\nu)] \exp[-j2\pi(ff - k\nu)] d\tau d\nu = \\ &= \left\{ A^2/4 \right\} [\delta(f - f_0, k - k_0) + \delta(f + f_0, k + k_0)]. \end{aligned} \quad (5)$$

Частотно-волновой спектр, определяемый (5), является дельта-функцией, сосредоточенной на частоте  $f_0$  и волновом числе  $k_0$ . Это предопределяет возможность использования частотно-волнового спектра для определения направления распространения бегущей волны.

В системы цифровой обработки случайных полей обычно поступают массивы чисел, полученные путем дискретизации поля по пространственным переменным. Для случайных полей интервал дискретизации должен быть выбран так, чтобы прямоугольная область, ограниченная верхними границами частотами волнового спектра ( $k_{хгр}$ ,  $k_{угр}$ ), лежит внутри прямоугольной области, определяемой половинами частот дискретизации ( $k_{хд}/2$ ,  $k_{уд}/2$ ). Следовательно, должны выполняться известные неравенства  $k_{хгр} \leq k_{хд}/2$ ,  $k_{угр} \leq k_{уд}/2$ . Это условие эквивалентно теореме Котельникова о дискретизации одномерных сигналов, в которой сформулировано требование, что частота дискретизации должна хотя бы вдвое превышать наивысшую частоту спектра сигнала.

Если предположить, что измерение значений поля осуществляется в отдельных точках, то для оценки частотно-волнового спектра, базирующейся на оценке взаимной спектральной плотности мощности, можно использовать следующее выражение:

$$\hat{E}(f, k) = \frac{1}{M^2} \sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^M W_i W_l \hat{G}_{il} \exp[jk(\nu - \nu_0^i)], \quad (6)$$

где  $W_i$  – веса, контролирующие форму окна по волновому числу;  $\nu_i$  – вектор, определяющий положение  $i$ -й точки поля.

На рис. 1 представлена схема определения решетками датчиков частотно-волнового спектра звукометрического сигнала, излучаемого шаровой мельницей, с возможностью определения координат источника максимального излучения звукометрического сигнала.

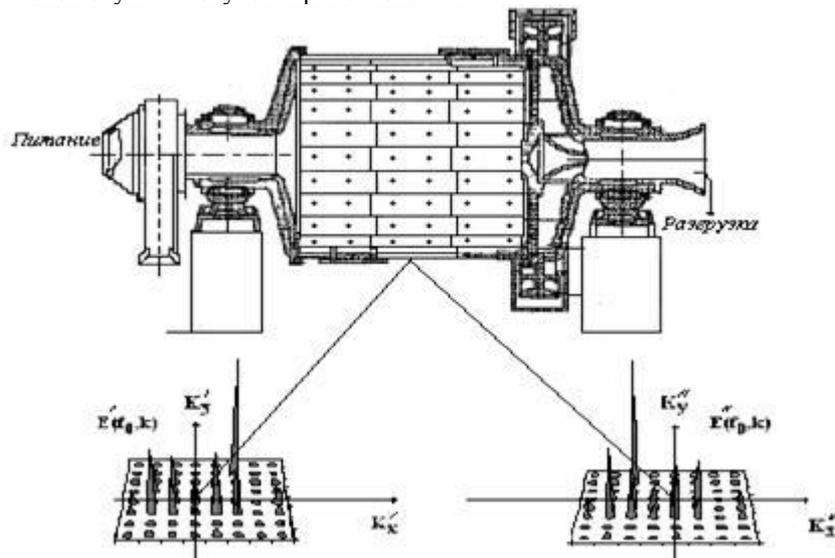


Рис. 1. Схема определения координат источника максимального излучения звукометрического сигнала по частотно-волновому спектру

В качестве общей модели звукометрического сигнала была использована модель, предложенная в [4]. Соответственно, звукометрический сигнал представляется как аддитивная смесь суммы конечного числа узкополосных компонент  $x_i(t)$  и широкополосного звукового шума

$$x_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^n x_i(t) + \zeta(t) \quad (7)$$

Общее аналитическое выражение узкополосной компоненты имеет вид

$$x(t) = A(t) \sin [\omega_0 t - \varphi(t)], \quad (8)$$

где  $A(t)$  и  $\varphi(t)$  – медленно меняющиеся функции по сравнению с  $\sin(\omega_0 t)$ .

Тогда модель вибрации принимает вид [4]:

$$x_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^n A_i(t) \sin[\omega_i t - \varphi_i(t)] + \zeta(t). \quad (9)$$

Представление компонент звукометрического сигнала выражением (7) неоднозначно: при заданных статистических характеристиках  $x(t)$  имеется некоторая возможность выбора статистических характеристик  $A(t)$  и  $\varphi(t)$ . Это обстоятельство обуславливает возможность использования различных моделей [4].

При анализе информационных процессов главный интерес вызывают модели компонент. Обычно используемая модель представляет собой квазидетерминированную вибрацию, различные реализации которой могут отличаться амплитудами, частотами или начальными фазами. В последнем случае ансамбль реализаций каждой компоненты имеет вид  $x(t) = A_0 \sin(\omega_0 t - \varphi_0)$ , где  $A_0$  и  $\varphi_0$  – фиксированные величины.

При равномерном распределении фаз на периоде  $2\pi$  одномерная плотность вероятности  $p(x)$  распределена по закону арксинуса [4]:

$$p(x) = \begin{cases} \frac{1}{\pi \sqrt{A_0^2 - x^2}} \\ 0 \end{cases} \quad \text{при } |x| \leq A_0, \quad (10)$$

при  $|x| > A_0$ , и спектральную плотность можно представить одной дискретной составляющей на частоте  $f_0$

$$G(f) = \frac{A_0^2}{2} \delta(f - f_0). \quad (11)$$

Вероятность распределения амплитуд можно представить с помощью  $\delta$ -функции

$$p(A) = A_0 \delta(A - A_0). \quad (12)$$

Модель “синусоида + шум” в определенной мере универсальна и при моделировании звукометрического сигнала шаровой мельницы этой моделью можно ограничиться. В специальных задачах может потребоваться учет частотной модуляции из-за флуктуации частоты вращения подвижных частей объекта управления.

Оценка частотно-волнового спектра проводилась с помощью решетки из 16 чувствительных элементов с расстоянием между ними 2 см. При этом максимальная “частота” волнового спектра составляет 0,25 см. Модель сигнала представляет сумму двух плоских волн, проходящих через решетку чувствительных элементов с различных направлений ( $|k_1| = 0,125$ ,  $|k_2| = 0,0803$ ). Интервал выборки составил  $1 \times 10$  сек, частота волн источников  $f_1 = f_2 =$

$= 5$  кГц, скорость распространения волн  $V_1=400$  м/сек,  $V_2=400$  м/сек). Длина выборки определялась 32 отсчетами. Векторы волновых чисел плоских волн, проходящих через решетку чувствительных элементов, определялись путем нахождения областей с наибольшим значением частотно-волнового спектра.

На рис. 2 представлена оценка частотно-волнового спектра при отсутствии звукового шума, поступающего на микрофоны от соседних барабанных мельниц и других источников звуковых сигналов.

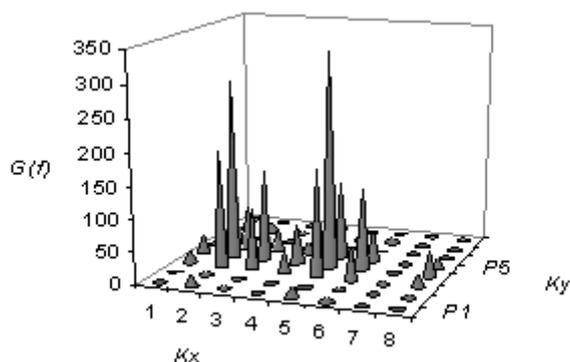


Рис. 2. Частотно-волновой спектр при двух источниках волн

Два максимума соответствуют двум плоским волнам. Рисунок представляет собой сечение, зависящее от волнового числа  $k$  при фиксированной частоте  $f$ . Скорость волн определяется отношением их частот к соответствующим волновым числам, а азимут распространения волн – углом векторов волновых чисел с положительным направлением оси  $k_x$ . Погрешность определения направления на источники распространяющихся волн зависит от степени дискретизации сетки волновых чисел, которая ограничивается временем вычисления оценки частотно-волнового спектра.

Для оценки степени влияния посторонних шумов от соседних шаровых мельниц проведено вычисление частотно-волнового спектра при использовании выбранной модели “синусоида + шум” с равномерным законом распределения шума в диапазоне чисел  $[0, 1]$ . При этом предполагалось, что кроме шумового поля на датчики воздействует посторонний источник звукового сигнала, соизмеримый с полезным звукометрическим сигналом (амплитуды узкополосных компонент в выражении (11) были равны  $A_1 = A_2$ ) (рис. 3). Из рис. 3 следует, что присутствие шумов искажает картину частотно-волнового спектра. Однако поскольку метод измерения объемной загрузки мельницы основан на наличии корреляционной связи между параметрами загрузки мельницы и уровнем ее шумового поля, то на этапе обучения частотно-волновой спектр при наличии постороннего источника звукового сигнала необходимо принять за эталон, отклонения от которого будут указывать на те или иные изменения в параметрах загрузки барабанной мельницы исходным сырьем, мелющими телами, водой, возвратным продуктом.

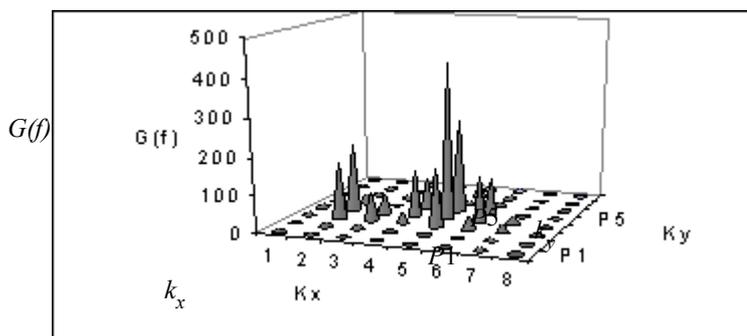


Рис. 3. Частотно-волновой спектр при наличии шумового поля и постороннего источника звукового сигнала

Для иллюстрации на рис. 4 представлен случай, когда происходит изменение координат одного из источников. Соответственно перемещается также максимум спектра в пространстве волновых чисел.

Основным способом разрушения измельчаемых материалов в мельницах является удар, который вызывает появление сколов мелющих тел и футеровки, а также отрыв футеровочных плит от барабана мельницы. Накопление в шаровой мельнице трудно дробимых включений существенно снижает практическую производительность помольного оборудования и требует регулярного освобождения рабочей камеры шаровой мельницы, работающей по замкнутому циклу, от накопившихся включений. Отрыв футеровочных плит повышает уровень шума из-за удара мелющих тел по внутренней поверхности барабана мельницы и вызывает дополнительную ударную нагрузку на соседние футеровочные плиты. Использование для контроля параметров звукометрического сигнала частотно-волновых спектров позволяет зафиксировать отрыв футеровочных плит и локализовать дефектное место с точностью, определяемой расстоянием между датчиками решетки. Это позволит сократить значительную часть простоев, связанных с обнаружением места отрыва футеровочных плит и их заменой. На рис. 5 проиллюстрировано влияние изменения амплитуды сигнала одного из источников (моделирование отрыва футеровочной плиты) на соответствующее изменение частотно-волнового спектра.

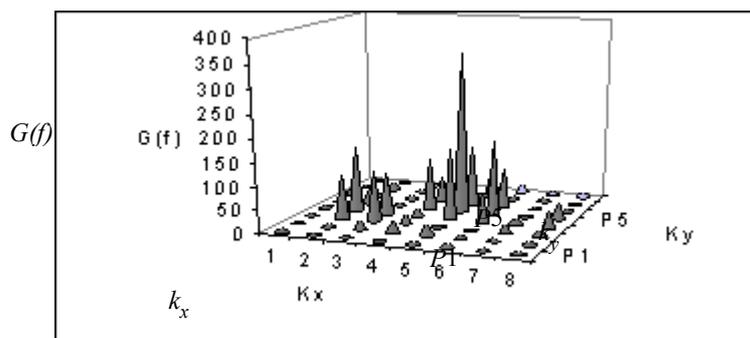


Рис. 4. Частотно-волновой спектр при наличии широкополосного шума и отраженных сигналов и изменении координат одного из источников

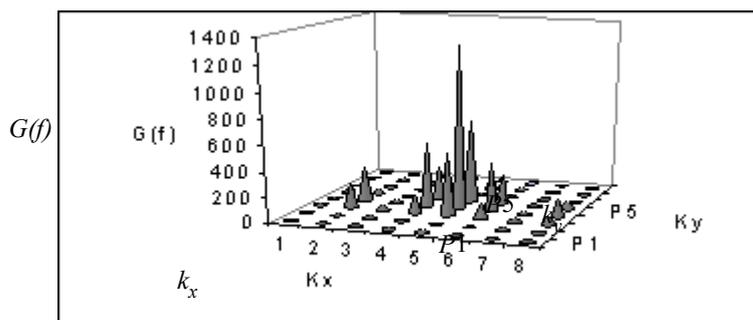


Рис. 5. Частотно-волновой спектр при наличии широкополосного шума и отраженных сигналов и изменении амплитуды одного из источников

При увеличении амплитуды сигнала в два раза пропорционально увеличилась амплитуда соответствующего максимума частотно-волнового спектра.

Полученные результаты подтверждают возможность использования частотно-волновых спектров для формирования информативных признаков при контроле загрузки шаровой мельницы. При этом информативными считаются величина максимума спектра и его положение в пространстве волновых чисел по сравнению со спектром, принятым за эталон. Контроль параметров звукометрического сигнала повышает точность определения такого параметра, как загрузка мельницы, по ее объему и позволяет локализовать отрыв футеровочных плит источников. Расчеты показывают, что с сокращением потерь времени из-за перегрузки мельницы при контроле звукометрического сигнала производительность шаровой мельницы увеличится более чем на 3 %.

**Выводы.** Использование частотно-волновых спектров, определенных путем обработки звукометрических сигналов шаровых мельниц, поступающих не менее чем от двух решеток датчиков сигналов, по сравнению с методами Фурье одномерных сигналов позволяет определить не только спектральные параметры сигналов, но и координаты источников возмущения, что повышает точность контроля заполнения шаровой мельницы и состояния ее футеровки.

Исследования целесообразно продолжить в направлении разработки методов контроля параметров роторных объектов на основе анализа частотно-волновых спектров сигналов различной физической природы.

#### Литература

1. Барков А. В. Долгосрочный прогноз состояния роторных машин по сигналу вибрации [Электронный ресурс] / А. В. Барков, П. П. Якобсон. – Режим доступа : <http://www.vibrotek.com/russian/articles/dps/index.htm>
2. Алексеев М. А. Пространственно-временной спектральный анализ модели вибрационных процессов промышленных объектов / М. А. Алексеев // Науковий вісник НГА України. – 1999. – № 4. – С. 51–53.
3. Кейпон Дж. Пространственно-временной анализ с высоким разрешением / Дж. Кейпон // ТИИЭР. – 1969. – Т. 57. – № 8. – С. 69–79.
4. Карасев В. А. Вибрационная диагностика газотурбинных двигателей / Карасев В. А., Максимов В. П., Сидоренко М. К. – М. : Машиностроение, 1978. – 132 с.