

Е. Л. Щукин, Р. Ю. Замираев
(Кемерово)

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА В ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

Рассмотрены возможности применения вейвлет-анализа в вибродиагностике для определения характеристик импульсных составляющих вибросигнала. Показано, что вейвлет-анализ в отличие от других методов позволяет разделить импульсный сигнал по частотам и оценить его параметры (амплитуду, скорость затухания и момент возникновения).

Введение. Виброакустическая диагностика является самым популярным и эффективным методом оперативного безразборного контроля технического состояния машин и механизмов. Для решения задач вибродиагностики применяются различные методы анализа виброакустического сигнала [1], в частности спектральный и кепстральный. В данной работе рассматривается возможность применения вейвлет-анализа для обработки виброакустического сигнала с целью выделения импульсных составляющих.

Особенностью проявления таких неисправностей, как дефекты подшипников качения и зубчатых передач, является присутствие в вибросигнале импульсных составляющих, соответствующих ударным процессам. Возникающие ударные импульсы невелики по амплитуде и поэтому трудно различимы на фоне шума и периодических составляющих. Существующие методы их анализа сводятся к вычислению энергии и периодичности импульсов, а также анализу спектра вибросигнала и сравнению полученных частот с расчетными. Но эти методы недостаточно эффективны и, в частности, не позволяют определять основные параметры ударных процессов – их частотные и временные характеристики. Применение вейвлет-анализа существенно расширяет возможности исследования импульсных сигналов.

Вейвлет-анализ. Вейвлет-преобразование

$$wF(x, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\varphi\left(\frac{t-x}{a}\right)} dt \quad (1)$$

имеет много общего с преобразованием Фурье, но если в фурье-преобразовании используются только стандартные функции, не обращающиеся в нуль при бесконечно большом значении аргумента, то в вейвлет-преобразовании

базисными функциями могут являться любые функции [2], удовлетворяющие следующим условиям:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \varphi(t) = 0; \\ \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) dt = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Примером подобной функции является вейвлет Морле:

$$\varphi(t) = \exp\left(i5t - \frac{t^2}{2}\right). \quad (3)$$

Если учесть применение спектральных окон в фурье-методе, то использование вейвлет-функции, подобной (3), – это не что иное, как преобразование Фурье с динамическим спектральным окном, перемещающимся по оси времени.

Еще одна особенность вейвлета: в нем используется масштаб, обратно пропорциональный аналогичному параметру – частоте в фурье-преобразовании.

Из ограничений, накладываемых на базисные функции, вытекает локальность вейвлет-преобразования и, следовательно, возможность дополнения традиционного спектра третьей координатой – временем. Кроме того, существуют определенные особенности: стандартный вейвлет строится в координатах амплитуда, масштаб, время, а так как используемый масштаб обратно пропорционален частоте, то при построении вейвлет-поверхности в координатах амплитуда, частота, время высокочастотные составляющие размываются по частоте сильнее, чем низкочастотные.

Вейвлет-анализ в вибродиагностике. Применение вейвлет-анализа в вибродиагностике отражено в литературе. Использование вейвлет-преобразования при анализе шума для акустического контроля качества работы механизмов рассмотрено в [3]. В работе [4] методы вейвлет-анализа применены для создания алгоритма обработки виброакустического сигнала с низким соотношением сигнал/шум. Работы [5–7] посвящены выделению особенностей вибросигнала, которые свидетельствуют о наличии сильных дефектов типа дисбаланса, расцентровки и др.

Вейвлет-анализ для выделения импульсных составляющих. Отклик системы с одной степенью свободы на ударное воздействие может быть описан следующей моделью [8]:

$$x(t) = a_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi_0), \quad (4)$$

где x – смещение; a_0 – начальная амплитуда; ω – собственная частота затухающих колебаний (резонансная частота), связанная с частотой собственных колебаний системы без трения соотношением $\omega^2 = \omega_0^2 - \beta^2$; $\beta = \frac{r}{2m}$ – скорость затухания колебаний; r – коэффициент сопротивления; m – масса колеблющейся системы. Частота собственных колебаний системы без трения здесь понимается как частота, с которой колебалась бы система при отсутствии сил

сопротивления. Далее собственной частотой системы будем называть резонансную частоту.

Как правило, на практике мы имеем дело с виброскоростью или виброускорением, модель для этих случаев получается одинарным или двойным дифференцированием выражения (4).

Любая машина состоит из отдельных частей (статор, ротор, станина, корпус и др.), которые обладают некоторой подвижностью относительно друг друга. Энергия, поступившая от удара, распределяется между этими узлами, заставляя их колебаться с различными, характерными для них собственными частотами. Таким образом, модель отклика реальной системы на ударный импульс выглядит как сумма моделей (4), соответствующих элементам системы с определенными собственными частотами и амплитудами. Разделить эти частотные составляющие обычными методами не всегда представляется возможным. Их разделение можно осуществить с помощью вейвлет-преобразования не только в частотной, но и во временной области.

Чтобы определить возможности применения вейвлет-анализа в области виброакустической диагностики, проведен следующий модельный эксперимент. Для исследования был взят модельный сигнал виброускорения, характерный для дефекта средней тяжести подшипника качения, который состоит из трех гармонических (синусоидальных) компонент: несущей (основной) с амплитудой 15 мм/с^2 и частотой 33 Гц и кратными ей гармониками с амплитудами 1 и 5 мм/с^2 и частотами 66 и 99 Гц соответственно; девяти ударных импульсов с начальными амплитудами 5 мм/с^2 , собственными частотами 55 Гц и скоростью затухания 10; шума с уровнем 3 мм/с^2 (рис. 1). Для выде-

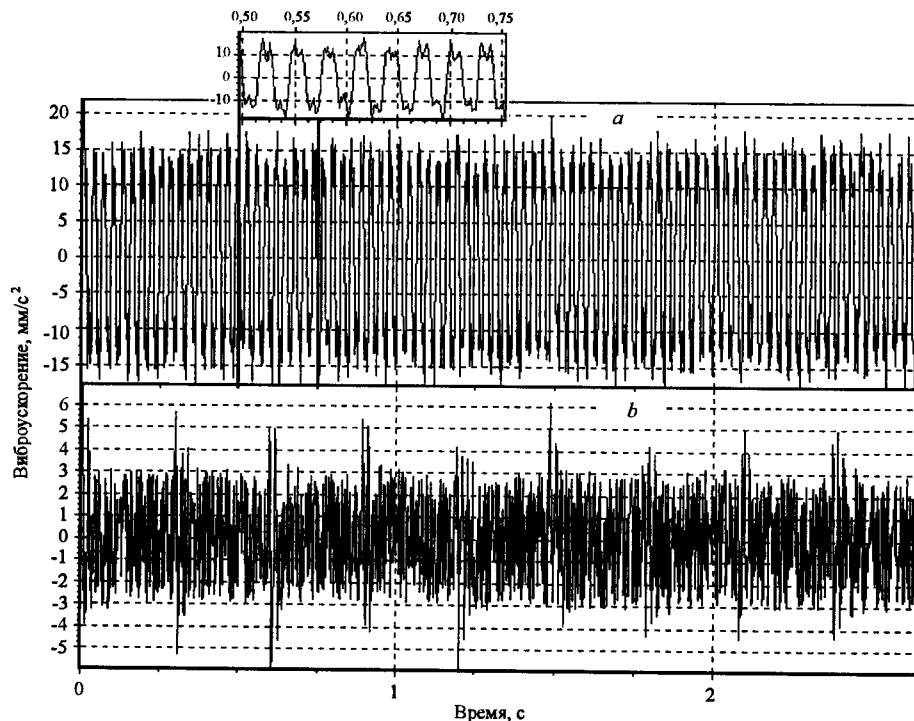


Рис. 1. Исходный модельный сигнал до фильтрации (а) и после нее (b)

ления импульсных составляющих сигнала разработан и применен следующий алгоритм:

Первый этап – устранение высокоэнергетических периодических составляющих производилось путем фильтрации фурье-спектра. Необходимость такой фильтрации связана с тем, что на вейвлет-поверхности неотфильтрованного сигнала высокоэнергетические периодические составляющие скрывают импульсные. Периодические составляющие в спектре имеют дискретные выбросы амплитуды, в то время как у импульсных непрерывный малоамплитудный спектр, что помогает легко отличать гармонические компоненты от негармонических. На основании спектра в модельном сигнале подавлялись гармонические компоненты, имеющие амплитуду более 1 мм/с^2 , что обуславливалось стандартным представлением вибрационного сигнала в виде суммы высокоэнергетических гармонических ($\geq 1 \text{ мм/с}^2$) и негармонических компонент. В полученном сигнале оставались малоамплитудные периодические составляющие и непериодические (удары).

Второй этап – выделение ударных импульсов. Отфильтрованный вибросигнал обрабатывался методом вейвлет-преобразования с базисной функцией модифицированного вейвлета Морле:

$$\varphi(t) = \exp(ik_0 t - \beta_0 |t|). \quad (5)$$

Эта функция выбрана на основании эмпирического вывода, сделанного в ходе поиска оптимальной вейвлет-функции, о том, что наилучшее разрешение обеспечивается функцией, похожей на искомый сигнал. Параметры k_0 и β_0 здесь введены для обеспечения возможности подбора оптимального разрешения в частотной и временной областях. Увеличение k_0 (уменьшение β_0) улучшает частотное разрешение, постепенно приближая вейвлет-поверхность к спектру Фурье, но, с другой стороны, уменьшается разрешение по оси времени. Уменьшение k_0 (увеличение β_0) приводит к уменьшению разрешения по частоте, но зато улучшает временное разрешение, постепенно приближая вейвлет-поверхность к виду временной реализации сигнала.

Вид обработанного модельного сигнала показан на рис. 2, где интенсивность черного цвета пропорциональна величине амплитуды.

Срез вейвлет-поверхности при фиксированной частоте дает кривую изменения энергии, приходящейся на данную частоту, во времени. Усреднение таких кривых на всех частотах дает усредненную кривую изменения энергии. Полученная кривая сглаживалась методом скользящего среднего. Моменты времени, в которые наблюдались всплески амплитуды (точки локальных максимумов), принимались за моменты возникновения ударных импульсов T . Частотные срезы вейвлет-поверхности в фиксированные моменты времени на интервале затухания каждого импульса также усреднялись методом скользящего среднего. Частота, при которой получалось максимальное значение амплитуды, принималась за резонансную частоту импульса.

Третий этап заключался в выделении серий ударов (групп импульсов с общими параметрами) и их классификации. Из вейвлет-поверхности при частоте и моменте времени, полученных на предыдущем этапе, брался срез по времени (рис. 3). Аналитическое выражение формы кривой находилось из (1) путем подстановки используемого вейвлета (5) и вычисления интеграла на заданной частоте. По критерию минимизации среднеквадратичного отклонения аналитической кривой от кривой среза путем простого перебора

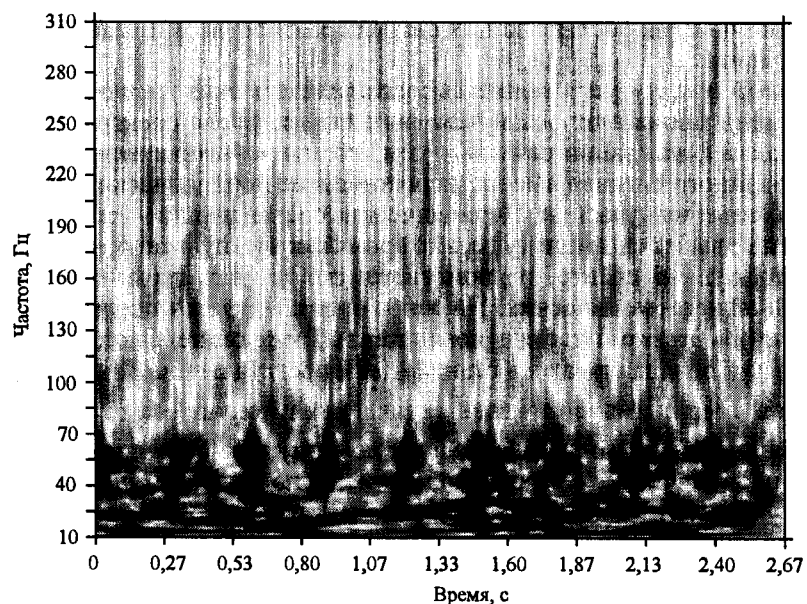


Рис. 2. Вейвлет-поверхность отфильтрованного сигнала

подбирались параметры (амплитуда a_0 и скорость затухания β), соответствующие модели (4), а также уточнялся момент возникновения импульса T (момент времени, в который возникает импульсное колебание). На рис. 3 точками изображена кривая, полученная при вейвлет-преобразовании исходного импульса без шума и периодических компонент, треугольниками представлен срез полученной вейвлет-поверхности, а крестиками показана приближенная кривая с подобранными по методу наименьших квадратов параметрами импульса. Таким образом обрабатывались все локализованные ударные импульсы. Результаты обработки приведены в таблице.

В итоге получено: усредненное значение амплитуды 4,26, относительная погрешность 14,73 %; усредненное значение скорости затухания 4,84, относительная погрешность 3,13 %. Относительная погрешность вычисления

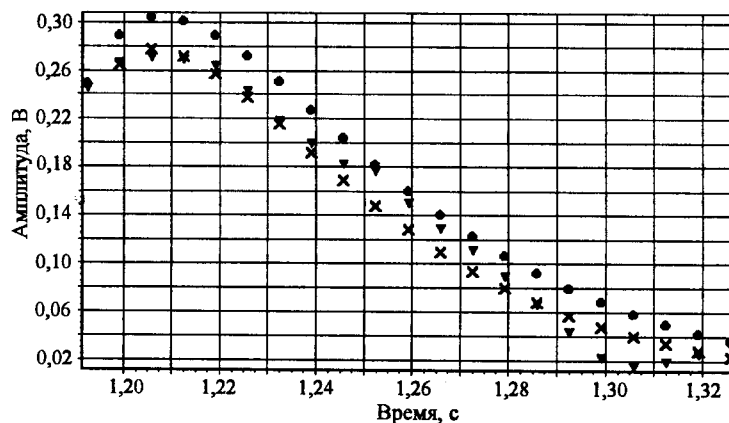


Рис. 3. Срез вейвлет-поверхности на вычисленной частоте 53 Гц и моменте времени 1,2 с

Результаты вычислений характеристик импульсов модельного сигнала

№ п/п	Момент возникновения, с*	Начальная амплитуда a_0 , мм/с ²	Скорость затухания β	Относительная погрешность, %	
				a_0	β
1	0,02	4,80	5,06	4,0	1,2
2	0,30	4,00	5,42	20,0	8,4
3	0,60	7,60	6,66	52,0	33,2
7	1,78	3,76	4,92	24,8	1,6
8	2,08	1,55	2,36	69,0	52,8
9	2,39	2,01	2,83	59,8	43,4

* Время от начала выборки.

моментов возникновения импульсов не превысила 10 % продолжительности одного импульса, погрешность определения частоты – 1%.

Дополнительно в трех экспериментах было исследовано влияние уровня шума на точность определения параметров ударных процессов (рис. 4, 5). При одном и том же уровне шума сигнал исследовался несколько раз и погрешность определения параметров импульса имела различную величину. Наибольшую вариацию имела погрешность оценки частоты, так как она определялась по максимальному значению на срезе вейвлет-поверхности.

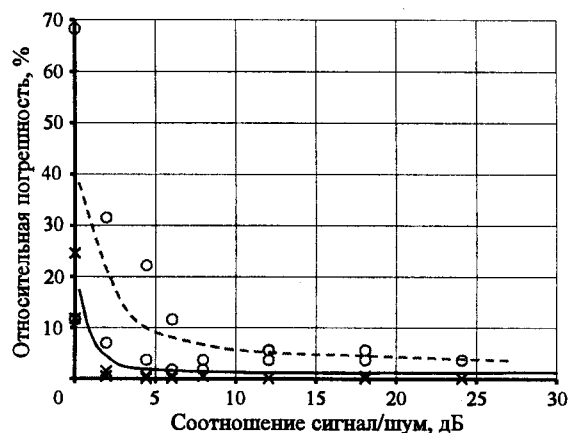


Рис. 4. Зависимость погрешностей определения частоты w и момента возникновения импульса T от соотношения сигнал/шум (погрешность T – сплошная кривая и крестики, погрешность w – штриховая кривая и кружки)

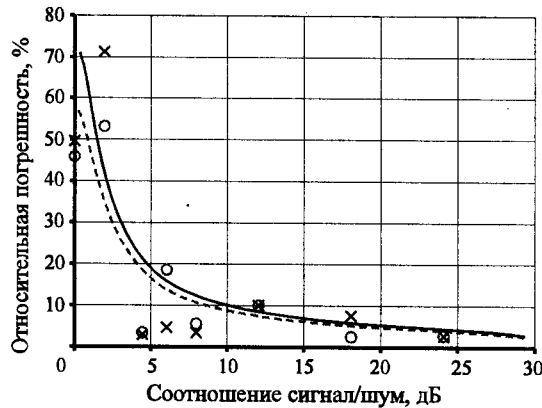


Рис. 5. Зависимость величин погрешностей определения амплитуды a_0 и скорости затухания β от соотношения сигнал/шум (обозначения погрешностей такие, как на рис. 4)

Из рис. 4 видно, что величина T (момент возникновения импульса) определяется с высокой точностью до достаточно малых отношений сигнал/шум, равных 2; погрешность не превышает 4% продолжительности импульса. Погрешность определения скорости затухания β и амплитуды a_0 целиком зависит от точности определения частоты и момента возникновения импульса T , поэтому зависимости погрешности определения этих параметров от соотношения сигнал/шум вычислялись при фиксированных значениях частоты и момента возникновения импульса.

Дополнительную информацию несет момент возникновения колебаний. При надлежащей точности вычислений временной фактор может являться дополнительным критерием определения источника импульсов.

В описанных примерах исследовалась только низкочастотная область. Это связано с тем, что в высокочастотной области пространственное затухание имеет экспоненциальную зависимость от расстояния до источника [1] и тогда возможна диагностика только того узла, на котором установлен датчик вибрации.

Закключение. Метод вейвлет-анализа позволяет получать характеристики ударных процессов, происходящих в механической системе, определять с высокой точностью периодичность появления импульсов, разделять их по частотам и, следовательно, применять для локализации источников ударных импульсов. Полученные характеристики импульсов позволяют вычислять энергию, приходящуюся в вибросигнале на долю импульсных составляющих.

На практике амплитуда ударных импульсов относительно невелика, поэтому необходима предварительная обработка вибросигнала. Фильтрацией высокочастотных периодических составляющих можно получить сигнал, состоящий из импульсных малоамплитудных периодических составляющих и шума, пригодный для обработки описанным методом.

Область применения представленного алгоритма выделения импульсных составляющих и определения их параметров не ограничена дефектоскопией. Алгоритм пригоден для распознавания и классификации импульсных составляющих колебаний в различных приложениях. Он также может быть использован и в обратной задаче – обработке отклика системы на задан-

ный импульс (определение резонансных частот; энергии, приходящейся на каждую частоту; скорости затухания – рассеивания энергии).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Генкин М. Д., Соколова А. Г.** Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М.: Машиностроение, 1987.
2. **Левкович-Маслюк Л.** Дайджест вейвлет-анализа в двух формулах и 22 рисунках // Компьютерра. 1998. № 8. С. 31.
3. **Güttler S., Kantz H.** The auto-synchronized wavelet transform analysis for automatic acoustic quality control // Journ. Sound and Vibr. 2001. **243**, N 1. P. 3.
4. **Lin J., Qu L.** Feature extraction based on Morlet wavelet and its application for mechanical fault diagnosis // Journ. Sound and Vibr. 2000. **234**. N 1. P. 135.
5. **Payá B. A., Esat I. I., Badi M. N. M.** Artificial neural network based fault diagnostics of rotating machinery using wavelet transforms as a preprocessor // Mechanical Systems and Signal Processing. 1997. **11**, N 5. P. 751.
6. **Brie D.** Modelling of the spalled rolling element bearing vibration signal: an overview and some new results // Mechanical Systems and Signal Processing. 2000. **14**, N 3. P. 353.
7. **Shibata K., Takahashi A., Shirai T.** Fault diagnosis of rotating machinery through visualization of sound signals // Ibid. N 2. P. 229.
8. **Шебалин О. Д.** Физические основы механики и акустики. М.: Высш. шк., 1981.

*Институт угля и углехимии СО РАН,
E-mail: impact@kemnet.ru*

*Поступила в редакцию
6 августа 2001 г.*