

Е. Л. Щукня, Р. Ю. Замараев

(Кемерово)

ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗ СЕРИЙ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Описан метод оценки частоты появления ударных импульсов и качественного анализа состава вибросигнала, основанный на применении вейвлет-преобразования на базе нестандартной функции. Этот метод сравнивается с преобразованием Фурье, оцениваются его возможности, преимущества и недостатки. При помощи данного метода анализируется реальный сигнал от установки с дефектом подшипника качения. Анализ реального сигнала приводит к выводу об ограниченности рассмотрения реальных сигналов путем анализа только фурье-спектра.

Введение. Параметры ударных процессов, происходящих в механических системах, как правило, имеют стохастический характер. Варьироваться может как амплитуда импульсов, так и момент возникновения. Собственная частота, также как и скорость затухания, является следствием физической природы системы и поэтому варьируется незначительно.

Как показано в работе [1], применение вейвлет-преобразования (ВП) позволяет оценивать параметры происходящих ударных процессов (собственную частоту, скорость затухания, начальную амплитуду и момент возникновения импульса), но оценить частоту появления импульсов достаточно сложно из-за их случайного характера. Фурье-преобразование серии импульсов дает совокупность пиков на частотах, кратных частоте появления импульсов, и с максимальной амплитудой на частоте, наиболее близкой к собственной частоте импульсов [2]. В сложном сигнале, состоящем из гармонических и импульсных компонент, импульсные компоненты маскируются и однозначно разделить составляющие спектра не представляется возможным. Фильтрация гармонических компонент не приносит желаемого результата, так как при вычитании из исходного сигнала гармонических компонент с соответствующими спектру частотами и амплитудами нарушается структура импульсных компонент, поскольку одновременно вычитаются и составляющие импульсов. Поэтому для решения задачи разделения гармонических и импульсных компонент необходима разработка нового подхода.

Анализ серий импульсов. Отклик системы с одной степенью свободы на единичное импульсное воздействие описан в [1]. Для анализа серии таких импульсов предлагается использовать вейвлет-преобразование на основе функции, подобной серии ударных импульсов. Такая вейвлет-функция стро-

ится на основе серии «импульсных» вейвлет-функций, представленных в [1], вида

$$\varphi(t) = \exp(2\pi i w_0(t) - 2\pi\beta|t|), \quad (1)$$

где w_0 – собственная частота, β – скорость затухания, а время t выражено в секундах.

В качестве масштаба в таком «серийном» вейвлет-преобразовании (СВП) используется частота следования ударных импульсов, а собственная частота и скорость затухания импульсных вейвлет-функций становятся регулируемыми параметрами. Таким образом, серийная вейвлет-функция (2) будет состоять из суммы вейвлет-функций, разделенных некоторым фиксированным интервалом (рис. 1):

$$\varphi(t, f) = \sum_{k=-fT}^{fT} \exp\left(2\pi i w_0\left(t - \frac{k}{f}\right) - 2\pi\beta\left|t - \frac{k}{f}\right|\right), \quad (2)$$

где T – исследуемый интервал в секундах, а f – частота появления импульсов (масштаб).

Как известно, ударный импульс проявляется в широком диапазоне частот [3], поэтому даже при несовпадающих значениях параметров импульсов, составляющих серию в вейвлет-функции, и параметров импульсов исходного сигнала будет появляться отклик при совпадении моментов возникновения импульсов. Максимальный рост амплитуды ожидается при совпадении частоты появления ударных импульсов в исходном сигнале и частоты следования импульсов в вейвлет-функции (масштаба).

Формула СВП имеет вид

$$wF(x, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{\varphi}(t-x, f) y(t) dt, \quad x, f \in R.$$

Строго говоря, это преобразование не является вейвлет-преобразованием, поскольку базовая функция не локальна, но каждый из составляющих эту вейвлет-функцию импульсов локален. Такое преобразование сигнала, состоящего из серии импульсов с параметрами: собственная частота $\alpha = 55$, ско-

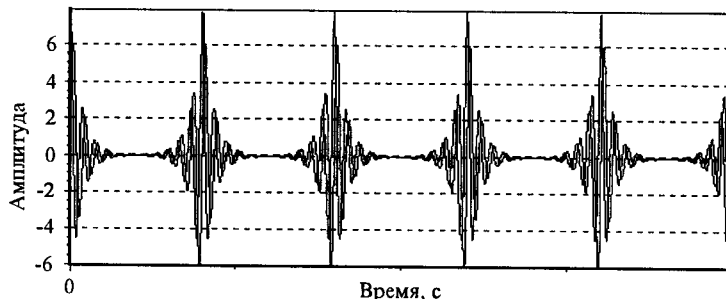


Рис. 1. Серийная вейвлет-функция на частоте 5 Гц ($w_0 = 55$, $\beta = 10$)

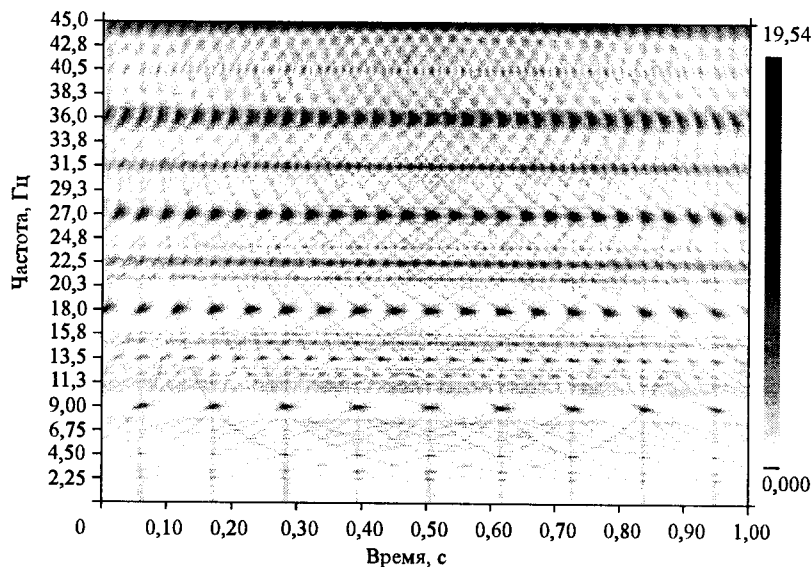


Рис. 2. Вейвлет-преобразование с серийной вейвлет-функцией ($w_0 = 55$, $\beta = 30$)

рость затухания $\beta = 20$, количество импульсов $N = 9$, начальная амплитуда $a_0 = 10$, представлено на рис. 2.

Если рассмотреть вейвлет-поверхность на фиксированной частоте, можно заметить, что для нее характерна периодичность, обратно пропорциональная исследуемой частоте. Это обусловлено периодичностью базовой функции. Основную информацию на таком периоде несет максимальное значение амплитуды, указывающее на момент возникновения среднестатистического импульса, и кратность, т. е. число импульсов вейвлет-функции, совпадающих с импульсами исходного сигнала. Поэтому есть смысл рассматривать такое вейвлет-преобразование как кривую максимумов вейвлет-поверхности. Таким образом, получается кривая, подобная спектру Фурье, но обладающая некоторыми особенностями. На вейвлет-поверхности серии импульсов (см. рис. 2) наблюдается набор линий, соответствующих моментам совпадения импульсов исходного сигнала и импульсов вейвлет-функции. Точки пересечения этих линий (см. рис. 2, темные точки) означают совпадение двух и более импульсов. В таких точках наблюдается рост амплитуды, пропорциональный количеству пересекающихся линий, т. е. количеству совпавших импульсов. Точки пересечения располагаются в моменты времени, совпадающих с моментами возникновения импульсов в исходном сигнале. Таким образом, рост амплитуды достигает $N \cdot 100\%$ (N – количество импульсов в исходном сигнале). Максимальная амплитуда достигается на кратных частотах, больших либо равных частоте появления импульсов в исходном сигнале. Распределение амплитуд по кратным частотам на СВП серии импульсов показано на рис. 3, а.

По такому распределению амплитуд возможна идентификация импульсной компоненты и определение частоты появления импульсов в исходном сигнале. Это минимальная частота, на которой достигается максимальная амплитуда. Для идентификации такого сигнала достаточно знания максимальных амплитуд, через которые проходят прямые. Такая схема однозначно идентифицирует импульсную компоненту, так как СВП гармонического сиг-

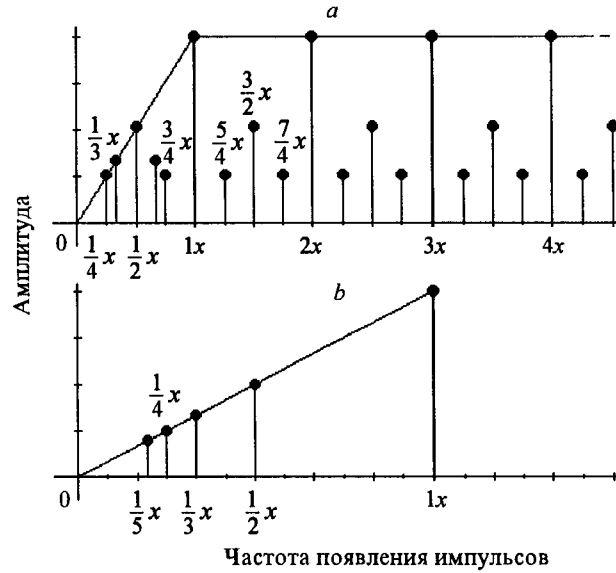


Рис. 3. Схемы распределения результирующих амплитуд на СВП: серии импульсов (а), гармонического сигнала (б)

нала имеет другой вид (рис. 3, б). Для СВП гармонического сигнала характерно отсутствие старших кратных компонент. Это обусловлено, по-видимому, тем, что на кратных частотах, больших основной в четное число раз, одинаковое число импульсов вейвлет-функции попадает в точки с положительной амплитудой гармонического сигнала и столько же импульсов попадает в точки с отрицательной амплитудой – в итоге сумма получается равной нулю. На нечетных гармониках результирующая амплитуда получается незначительной, по-видимому, по тем же самым причинам (один импульс попадает на пик в положительной области, а два других на края пика в отрицательной, поэтому сумма близка к нулю).

Ограничения СВП. Используя полученные схемы (см. рис. 3, а, б), можно разделить импульсные и гармонические компоненты. Показанные в схемах распределения амплитуд сохраняются при выполнении определенных условий. Как выяснилось, необходимо, чтобы импульсы одной серии в исходном сигнале не накладывались друг на друга, аналогичное условие должно выполняться и для вейвлет-функции. При наложении соседних импульсов в вейвлет-функции или в исходном сигнале амплитуды гармоник на СВП начинают варьироваться, что осложняет идентификацию. Наложения соседних импульсов не происходит при выполнении условия $\beta \geq \frac{f_{\max} \ln(100)}{\pi}$ для

вейвлет-функции и условия $\beta_0 \geq \frac{N \ln(100)}{2\pi}$ для исходного сигнала. При выпол-

нении обоих условий амплитуды кратных компонент на СВП становятся одинаковыми, а тип сигнала легко идентифицируется.

Возможность настройки СВП. Варьируемые параметры: собственная частота и скорость затухания позволяют подстроиться под особенности исследуемого сигнала при условии наличия априорной информации. Влияние выбранных параметров на СВП гармонического и импульсного сигналов

различно. На СВП гармонического сигнала при совпадении частот вейвлет-функции и исходного сигнала наблюдается значительный рост амплитуды. Получается, что на собственных частотах серийной вейвлет-функции, в 3 раза меньших частоты гармонической компоненты, соотношение амплитуд импульсной и гармонической компонент на СВП в 2 раза больше, чем аналогичное соотношение на фурье-спектре. Это различие можно использовать для усиления импульсной компоненты на СВП и подавления гармонической, но для этого необходимо знание собственных частот механизма. В фурье-преобразовании нет регулируемых параметров, поэтому соотношение амплитуд импульсной и гармонической компонент на фурье-спектре остается неизменным относительно исходных частот. При таких параметрах вейвлет-функции импульсная компонента выражена в 3 раза больше на СВП, чем на фурье-спектре. Оказалось также, что в случае анализа состава (выделения импульсной компоненты) выгоднее использовать мнимую часть вейвлет-преобразования, поскольку в ней гораздо менее заметен возрастающий фон, связанный с тем, что действительная часть такого преобразования не автомодельна (ее интеграл на бесконечном интервале не равен нулю).

Таким образом, использование схем (см. рис. 3) в отличие от фурье-спектра делает возможным выделение отдельных составляющих сигнала и определение их характера (рис. 4).

Обращая внимание на амплитуду гармоник на вейвлет-поверхности, можно отметить, что получаемое соотношение амплитуд не соответствует исходному, оно зависит не только от амплитуд, но и от частот исходных гармоник. Для СВП сигнала, состоящего из кратных гармонических компонент, характерно то, что, складываясь с кратными гармониками старших гармонических компонент, амплитуды младших возрастают, но линейность роста амплитуды сохраняется.

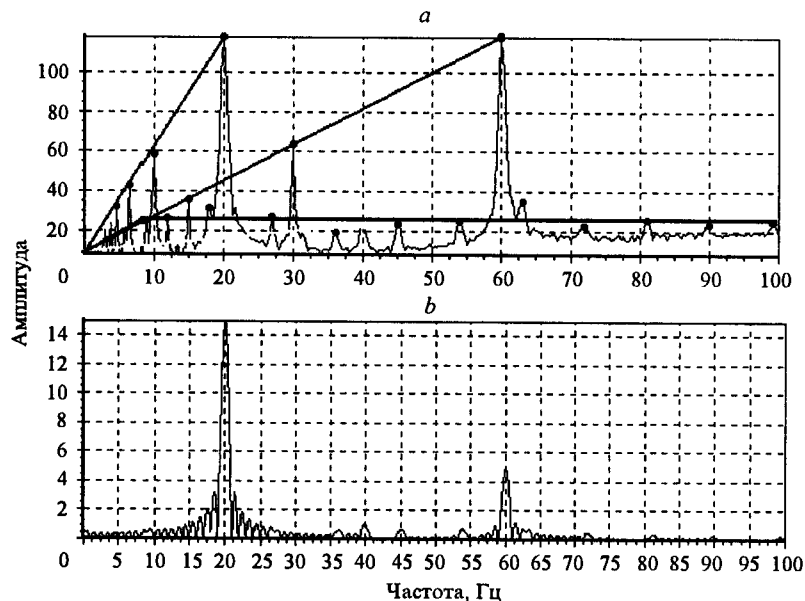


Рис. 4. Срез максимумов СВП суммы трех синусоид с частотами 20, 40, 60 Гц и амплитудами 15, 1, 5 мм/с и одной серии импульсов с параметрами $N = 9$, $w_0 = 55$, $\beta = 20$, $a_0 = 10$ (a) и фурье-спектр того же сигнала (b)

Сравнение СВП с фурье-преобразованием. Сравнивая СВП с фурье-спектром (см. рис. 4), нетрудно заметить определенное сходство. Выбросы амплитуд, имеющиеся в фурье-спектре, наблюдаются и на СВП, но здесь присутствуют также кратные частоты, которых нет на спектре Фурье. Присутствие излишнего числа частотных компонент затрудняет анализ, но, с другой стороны, несет дополнительную информацию и позволяет определять качественную структуру сигнала.

Рассмотрим два сигнала, один из которых будет суммой импульсов с параметрами $N = 20$, $w_0 = 55$, $\beta = 30$, $\alpha_0 = 50$, а другой, построенный по его спектру, – суммой косинусоид с частотами 0, 20, 40, 60, 80, 100, 120 Гц с амплитудами 2,3; 4,7; 5,2; 4,8; 3,2; 2,0; 1,35 мм/с соответственно. У этих сигналов есть некоторое внешнее сходство, а спектры оказываются практически идентичными несмотря на то, что они имеют различную природу. По графикам СВП обоих сигналов на рис. 5 заметны характерные отличия: на первом графике отсутствуют старшие кратные компоненты, т. е. нет пиков на частотах 70, 90, 110. Это означает, что составляющие сигнала – гармонические компоненты. На втором ясно прослеживается структура, характерная для импульсного сигнала: присутствуют пики на старших кратных частотах и сохраняется амплитуда. Таким образом, СВП позволяет в отличие от фурье-преобразования различать гармонический и импульсный сигналы.

Анализ реального сигнала. Исследовался сигнал, снятый с установки с дефектом подшипника качения. Тестовая система представляла собой установленный на опорах ротор с подшипниками качения, на котором располагался груз, создающий дисбаланс. Ротор приводился в движение через

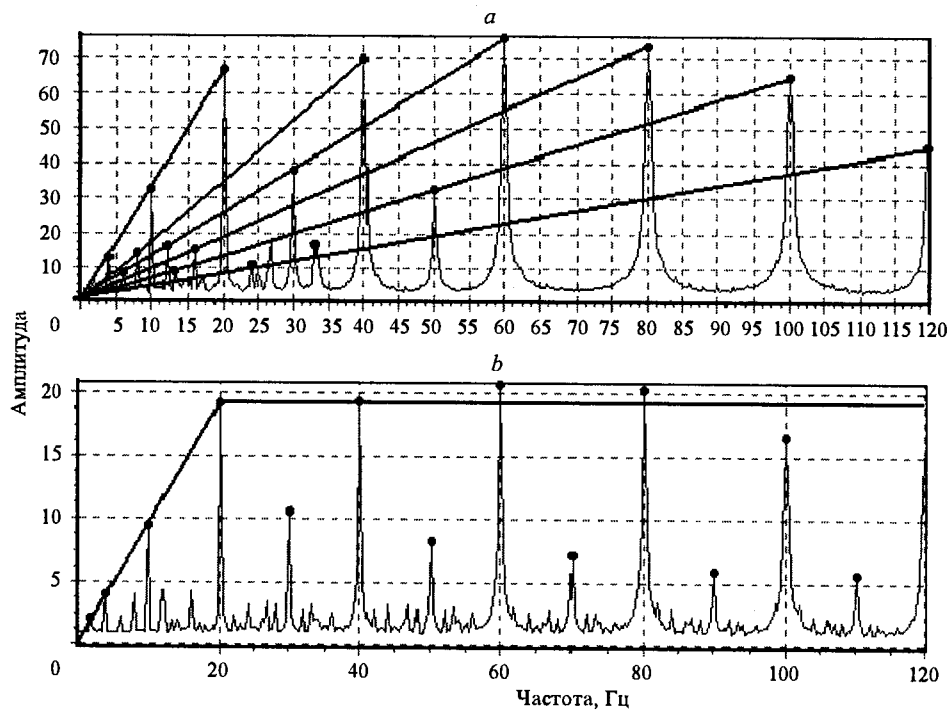


Рис. 5. Серийное вейвлет-преобразование гармонического (а) и импульсного (b) сигналов

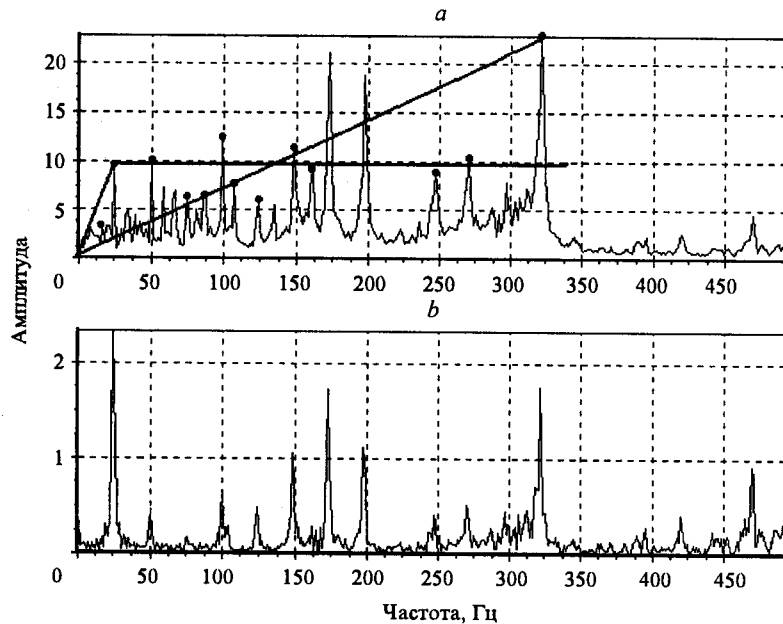


Рис. 6. Серийное вейвлет-преобразование (а) и фурье-спектр (б) виброакустического сигнала, снятого с установки

гибкое соединение однофазным двигателем с частотой 1450 об./мин. Один из подшипников имел дефект в виде раковины на внешнем кольце.

По фурье-спектру (рис. 6) можно судить о наличии дисбаланса, но о состоянии подшипника ничего определенного сказать нельзя.

После применения ВП становятся заметны ударные импульсы в области собственных частот 150–200 Гц. Используя алгоритм оценки параметров [1], получаем усредненные значения параметров: собственная частота 173 Гц, скорость затухания 16,14, амплитуда 7,5 мм/с. Всего на интервале 0,5 с определяется 12 импульсов.

Расчетная частота появления импульсов составляет 62,3 Гц, но из-за присутствующего дисбаланса и того, что дефект представляет собой раковину, ударные импульсы появляются лишь в моменты нагрузки, соответствующие определенному положению ротора. Так как в данном случае сила, связанная с дисбалансом, превышает силу тяжести ротора, нагрузка на место дефекта будет иметь место примерно в течение половины оборота ротора. Таким образом, получается серия ударных импульсов, модулированных оборотной частотой, что согласуется с результатом, полученным применением СВП.

Сравнение СВП и фурье-преобразования (см. рис. 6) позволяет по-новому взглянуть на интерпретацию фурье-спектра. Производя разделение сигнала на компоненты, видим, что ударные импульсы повторяются с частотой, соответствующей оборотной, а старшие гармоники в спектре по большей части являются лишь следствием ударных импульсов на основной частоте. Практически всегда при анализе фурье-спектров частоты, кратные основной, принимаются за гармонические компоненты – гармоники основной частоты; существуют даже целые наборы диагностических признаков, основанных на величинах амплитуд определенных гармоник. Применение СВП показывает, что в некоторых случаях присутствие кратных компонент об-

условлено наличием ударных импульсов, модулированных обратной частотой.

Заключение. Серийное вейвлет-преобразование как метод анализа виброакустического сигнала позволяет в дополнение к фурье-анализу определять тип процесса (гармонический или импульсный) и получать значение частоты появления ударных импульсов. Зачастую диагностические признаки определенных видов дефектов привязаны к уровням определенных гармоник, полученным на основе статистических наблюдений, без учета структуры происходящих процессов. Разработанный метод позволяет определять структуру процесса формирующего колебания, что дает дополнительные возможности в моделировании функционирования механизма и уточнении диагностических признаков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щукин Е. Л., Замараев Р. Ю. Возможности применения вейвлет-анализа в виброакустической диагностике // Автометрия. 2002. № 3. С. 90.
2. Генкин М. Д., Соколова А. Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М.: Машиностроение, 1987.
3. Шебалин О. Д. Физические основы механики и акустики. М.: Высш. шк., 1981.

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

*Поступила в редакцию
6 февраля 2003 г.*