УДК 629.12.05:594.647

ДИАГНОСТИКА КАЧЕСТВА ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА

И.Г. ДАВЫДОВ, Л.М. ЛЫНЬКОВ, В.Н. ЛЕВКОВИЧ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 17 июля 2005

Обосновано применение вейвлет-анализа для диагностики качества подшипников. Рассмотрены и проанализированы базисные функции, применяемые для вейвлет-анализа, обозначены требования к ним. На основе имеющихся базисных функций разработана и обоснована вейвлет-функция, максимально приспособленная для диагностики качества подшипников. Проведен анализ предложенной функции на соответствие требованиям, предъявляемым к базисным функциям. Предложена методика выделения ударных импульсов на фоне шума и общий алгоритм диагностики качества подшипников с применением вейвлет-преобразования.

Ключевые слова: базовая функция, вейвлетный анализ, вибродиагностика.

Введение

Вейвлеты (wavelets — короткая волна) – функции определенной формы, локализованные по оси аргументов (независимых переменных), инвариантные к сдвигу и линейные к операции масштабирования (сжатия/растяжения). Они создаются с помощью специальных базисных функций, которые определяют их вид и свойства. По локализации во временном и частотном представлении вейвлеты занимают промежуточное положение между гармоническими (синусоидальными) функциями, локализованными по частоте, и функцией Дирака, локализованной во времени. Впервые этот термин использовали Гроссман и Морле (A. Grossmann, J. Morlet) при анализе свойств сейсмических и акустических сигналов.

Отличительной особенностью вейвлет анализа является его высокая чувствительность к кратковременным высокочастотным флуктуациям сигнала, так как вейвлет-окно обеспечивает адекватную оценку таких флутуаций за счет одновременного увеличения амплитуды окна при уменьшении его ширины. Разрешающая способность анализа во временной области возрастает с ростом частоты. В этом заключается принципиальное отличие вейвлет-анализа от преобразования Фурье на коротких реализациях, при котором разрешающая способность по времени не зависит от частоты и связана только с разрешающей способностью в частотной области, абсолютное значение которой не зависит от частоты.

В литературе не существует единого определения вейвлет-функций, а имеется набор минимальных требований, которым должна удовлетворять функция $\psi(t) \in L^2(R)$, чтобы считаться базисной для частотно-временного анализа [1].

Во всем многообразии базисных функций, применяемых для вейвлет-анализа, выделяют подкласс "crude" — "грубых". Среди характерных особенностей базисных функций, входящих в этот класс, следует отметить не выполнение условий ортогональности и биортогональности (а значит, и гарантий строгого восстановления с помощью обратного преобразования), а отсутствие компактного носителя, отсутствие возможности реализации дискретного вейвлет-преобразования (а значит, и применения быстрых алгоритмов). Данные функции удовлетворяют минимальному набору требований, предъявляемых к базисным функциям. Общим правилом при анализе сигналов является то, что вид базисной функции должен быть максимально подобен виду анализируемых данных [2], поэтому "грубым" вейвлетам отдается предпочтение. За счет соответствия минимальному набору требований расширяются возможности по выбору формы функции, а с учетом свойств различных функций можно выявлять в анализируемых сигналах особенности, которые трудновыделимы другими методами анализа, особенно в присутствии сильных шумов.

На рис. 1 изображена форма вибросигнала, соответствующая подшипнику качения с выраженным дефектом. Заметные на рисунке всплески генерируются короткими ударными импульсами при взаимодействии металл-металл. Сигнал, возникающий от соударений элементов конструкции подшипника, имеет во временной области характерную форму — резко возникающего импульса с быстрым экспоненциальным затуханием. Частота затухающих колебаний определяется резонансными свойствами элементов конструкции подшипника и практически всегда лежит в диапазоне 28–32 кГц [3–5].

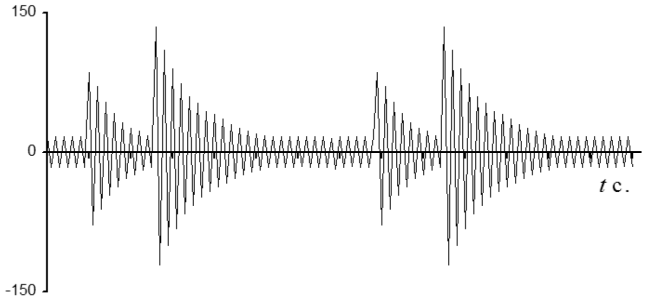

Рис. 1. Форма временного вибросигнала при наличии дефекта подшипника

Наличие импульсов характерной формы является надежным диагностическим признаком. Период следования ударных импульсов в вибросигнале соответствует частоте, характеризующей дефект определенного элемента подшипника. Интенсивность характерных импульсов, степень их выраженности и превышения над фоном вибрации зависят от степени развития дефекта.

Базисная функция, применяемая для диагностики качества подшипников, должна быть асимметрична, приспособлена для выделения характерного резкого скачка амплитуды колебаний в начале ударного импульса. Базисная функция должна иметь узкий фурье-образ, т.е. должна содержать выраженную доминирующую частоту для обеспечения избирательности в частотной области. Закон убывания функции по возможности должен быть экспоненциальным.

Указанным условиям удовлетворяет составная функция из двух частей. На интервале $(-\infty > t \geq 0)$ вейвлет изменяется по закону базисной функции MHAT $(1-t^2)e^{\left(\frac{-t^2}{2}\right)}$ [1] для выделения характерного пика в начале исследуемого сигнала. На интервале $(0 > t > \infty)$ функция изменяется по закону $\cos(\omega t)e^{\left(\frac{-t}{k}\right)}$ для соответствия экспоненциальному затуханию. Здесь параметр k задает скорость убывания экспоненты, а параметр ω — частоту доминирующей гармоники. График на рис. 2 изображен при значениях $\omega = 0{,}25\pi;\ k = 2$.

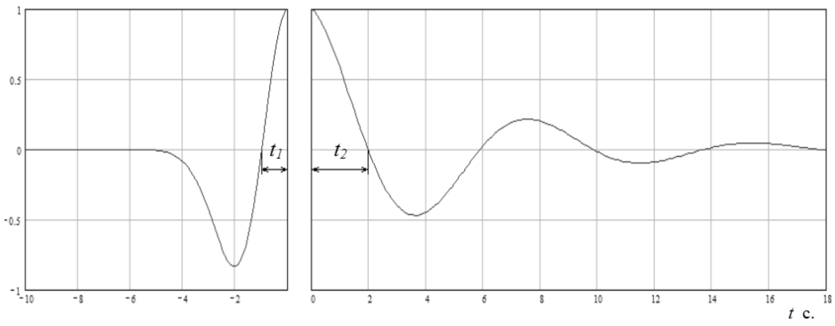

Рис. 2. Составная функция

Необходимо связать функции, чтобы в точке 0 не было разрыва, а также обеспечить наследование доминирующей частоты при переходе от одного закона изменения к другому. При масштабировании базисной функции интервал t_1 должен быть равен интервалу t_2 и их сумма — половине периода доминирующей частоты.

Эти условия выполняются при записи составной функции в следующем виде:

$$\psi_m(t) = \begin{cases} \left(\dfrac{4}{\pi^2}\right)\left(\dfrac{\pi^2}{4} - (\omega t)^2\right)\exp\left(\dfrac{-2(\omega t)^2}{\pi^2}\right) & \text{ïðè } -\infty < t \le 0, \\ \cos(\omega t)\exp\left(\dfrac{-t}{k}\right) & \text{ïðè } 0 < t < \infty, \end{cases} \tag{1}$$

где параметр k задает скорость убывания экспоненты, а параметр ω — частоту доминирующей гармоники.

Составная функция $\psi_m(t)$ непрерывна, интегрируема по всей длине, обладает свойством самоподобия. Локализация во времени осуществляется по экспоненциальному закону $e^{-a|t|}$, и условие $\int\limits_{-\infty}^{\infty} |\psi_m(t)|^2 dt < \infty$ выполняется. Функция $\psi_m(t)$ обладает хорошей частотной локализацией, так как обеспечено сохранение доминирующей частоты.

Составная функция $\psi_m(t)$ удовлетворяет условию допустимости $\int\limits_{-\infty}^{\infty} \psi(t)dt = 0$ по частям. Для левой части функции условие допустимости следует из утверждения о симметричности базисной функции MHAT [1].

Условие допустимости для правой части можно доказать, взяв определенный интеграл [6] на интервале $(0 > t > \infty)$:

$$\int\limits_0^{\infty} \exp(-kt)\cos(\omega t + 0) = \frac{1}{k^2 + \omega^2}(k\cos 0 - \omega \sin 0) = \frac{k}{k^2 + \omega^2}. \tag{2}$$

При $\omega \to \infty$ интеграл (2) стремится к нулю. Для сравнения можно исследовать интеграл левой части симметричного вейвлета Морле:

$$\int\limits_0^{\infty} \exp\left(-kt^2\right)\cos(\omega t) = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\pi}{k}}\exp\left(\frac{-\omega^2}{4k}\right). \tag{3}$$

На рис. 3 изображен график значений интегралов (2) и (3) в зависимости от частоты ω при постоянном значении $k = 1$. Сплошная линия соответствует изменению интеграла (3), прерывистая — (2).

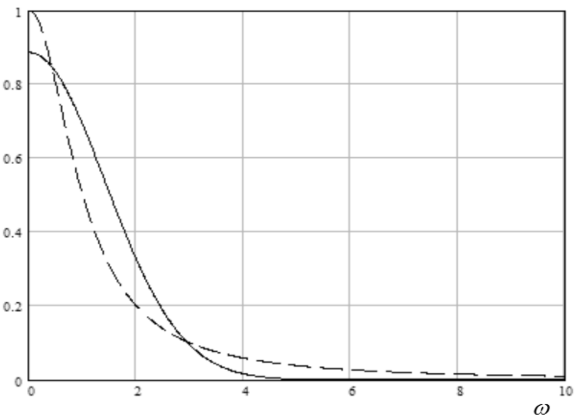

Рис. 3. Значения интегралов

Как видно из графика, представленного на рис. 3, закон изменения значений интегралов подобен, следовательно, базисная функция $\psi_m(t)$ не имеет компактного носителя. Предлагается ввести понятие эффективного носителя, т. е. такого интервала, за пределами которого вейвлет $\psi_m(t)$ приблизительно равен нулю.

Если выбрать $\omega = 2\pi\ 28000;\ k = 4 \cdot 10^{-5}$, можно рассчитать эффективный носитель и постоянную составляющую интегрирования на длине носителя. Эффективный носитель для функции $\psi_m(t)$ определен на интервале (–0,00005; 0,0002), так как на нем содержится 99,8 % энергии $\psi_m(t)$. Значение интеграла на длине носителя составляет 0,31230675041099.

На рис. 4 изображена функция $\psi_m(t)$ на длине эффективного носителя.

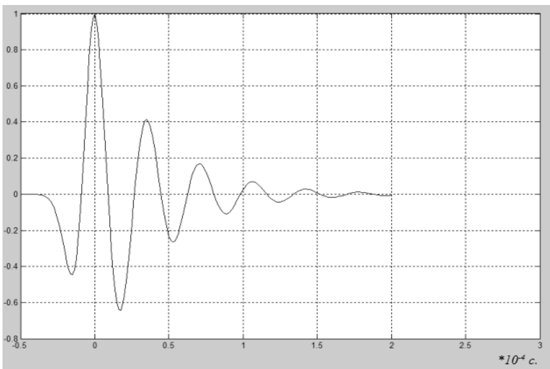

Рис. 4. Функция $\psi_m(t)$ на длине эффективного носителя

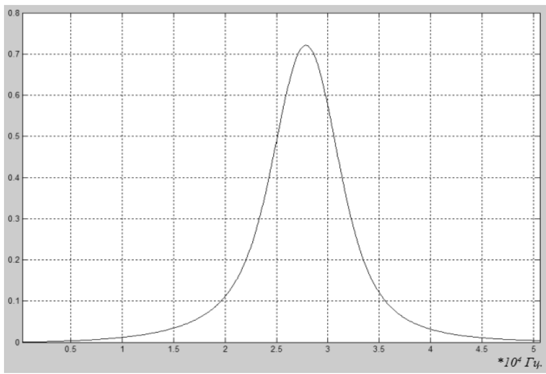

Рис. 5. Спектр фурье-функции $\psi_m(t)$

Спектр Фурье этой функции будет иметь вид, изображенный на рис. 5. Как видно, он смещен относительно доминирующей частоты в область низких частот с коэффициентом $k_{ñì} = 0{,}99139$. Это явление связано с влиянием вейвлета MHAT.

На основе новой базисной функции предложен следующий алгоритм обработки вибросигнала. На первом этапе обработки вибросигнала осуществлялась предварительная фильтрация с помощью смоделированного аналогового фильтра Бесселя. Эти фильтры характеризуются практически постоянной групповой задержкой в полосе пропускания, что позволяет сохранить форму пропускаемых через фильтр сигналов, если их спектр сосредоточен в полосе пропускания фильтра. Дискретные фильтры Бесселя не обладают этим свойством. Применяется фильтр высоких частот с частотой среза 3000 Гц.

Полученный сигнал подвергается вейвлет-преобразованию с применением базисной функции $\psi_m(t)$ для получения скалограммы и определения доминирующей частоты ударных импульсов. Из результатов вейвлет-преобразования выбирается набор вейвлет-коэффициентов, соответствующий масштабу, на котором доминирующие частоты вейвлет-образа и ударного импульса совпадают. Для этого набора формируется огибающая, полученная с помощью преобразования Гильберта, на основе которой определяется местоположение ударного импульса на шкале времени. По аналогии с методом огибающей можно взять преобразование Фурье от огибающей набора вейвлет-коэффициентов.

Предложенный алгоритм продемонстрировал большую устойчивость, чем традиционно используемые методики, и отличается особенной чувствительностью на начальных этапах появления дефектов.

DIAGNOSTICS OF QUALITY FRICTIONLESS BEARINGS WITH APPLICATION WAVELET ANALYSIS

I.G. DAVYDOV, L.M. LUNKOV, V.N. LEVKOVICH

Abstract

Application wavelet analysis for diagnostics of quality of bearings is justified. The basic functions, used for wavelet analysis, are considered and parsed and requirements to them are determined. On the basis of available base functions it is developed and justified basis wavelet function as much as possible adapted to diagnostics of quality of bearings. The analysis of the designed function on correspondence to the requirements showed to basis functions is carried out (spent). The technique of selection of shock impulses on a background of noise and common algorithm of diagnostics of quality of bearings with application wavelet-conversions is offered.

Литература

1. *Новиков Л.В.* Основы вейвлет-анализа сигналов: Учеб. пособие. 1999.
2. *Левалле Дж.* Введение в анализ данных с применением непрерывного вейвлет-преобразования. Syracuse University / Пер. Грибунина В.Г. 29 с. [Электрон. ресурс] 24.01.05. Режим доступа: http://www.autex.spb.ru/cgi-bin/download.cgi?wvlt_lewalle.
3. Обнаружение дефектов подшипников качения. (перевод материалов фирмы IRD). [Электрон. ресурс] 24.01.05. Режим доступа: http://vibration.ru/obnar_defekt.shtml.htm
4. *Русов В.А.* Спектральная вибродиагностика. Вып. 1. Пермь, 1996.
5. Выявление дефектов подшипников качения с помощью анализа вибрации. Daniel Lynn, Manager, Training, Computational Systems, Inc. (CSI) / Пер. с англ. И.Р. Шейняк; Под ред. В.А. Смирнова. [Электрон. ресурс] 24.01.05. Режим доступа: http://vibration.ru/v_defekt.shtml.htm
6. *Градштейн И.С., Рыжик И.М.* Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М., 1962.