

УДК 004.9:621.822.6

Т.В. ЮР¹, В.Н. ХАРИТОНОВ², В.И. ДУБРОВИН¹¹Запорожский национальный технический университет, Украина²ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

МЕТОД АНАЛИЗА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ, ОСНОВАННЫЙ НА ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВЕЙВЛЕТ-МАТЕМАТИКИ

Рассмотрен подход к обработке вибрационных сигналов подшипников качения, использующий вейвлет-фильтрацию и являющийся усовершенствованием метода анализа огибающей высокочастотной случайной вибрации. Для более качественного выделения характерных диагностических частот, соответствующих тому или иному типу дефекта, предлагается использовать взаимные спектры огибающих вейвлет-коэффициентов значимых фильтров. В качестве параметра для экспресс-анализа, позволяющего судить о возникновении и развитии дефекта подшипника, предлагается использовать максимальные амплитуды получаемых взаимных спектров.

Ключевые слова: диагностирование, вибросигнал, вейвлет-фильтрация, огибающая, взаимный спектр.

Введение

Виброакустическая диагностика – один из методов технической диагностики ГТД, использующий в качестве диагностических сигналов механические колебания деталей и узлов. Механические колебания (вибрации) обладают высокой информативностью и быстрой реакцией на изменения состояния деталей и узлов, а также высокой чувствительностью к дефектам на ранней стадии развития.

Одной из задач вибродиагностики ГТД является определение технического состояния двигателя и его элементов, а также раннее обнаружение неисправностей для обеспечения требуемой надежности двигателя и уменьшения затрат, связанных с устранением последствий неисправностей.

Подшипники качения являются наиболее распространенными и в то же время уязвимыми элементами роторных механизмов. Техническое состояние подшипников является важнейшей составляющей, определяющей работоспособность механизма в целом.

1. Постановка задачи

Сигнал вибрации дефектного подшипника качения и его спектр содержат характерные признаки, по которым можно достаточно корректно выявить вид и место нахождения дефекта.

Подшипник с дефектами может генерировать вибрацию на четырех типах частот [1]:

- на роторных частотах, кратных частоте вращения (частоты кинематического возбуждения);
- на собственных частотах;

- на суммарных и разностных частотах;
- на случайных частотах.

Существует множество методик анализа вибросигнала подшипников качения. Все они разрабатываются с двумя целями: отделить сигнал подшипника от других компонент и минимизировать шум, который может маскировать сигнал подшипника особенно на ранних стадиях дефекта, и идентифицировать состояние подшипника, различить нормальные и дефектные подшипники, указать дефектные компоненты.

Анализ сигнала в частотной области или же другими словами спектральный анализ является наиболее распространенным методом выявления дефектов подшипников. Большинство методов данной категории анализируют энергетический спектр вибросигнала подшипника при помощи быстрого преобразования Фурье, недостатки которого широко известны практикующим специалистам [2].

Немонотонность поведения спектров при подходе к аварийному состоянию механизмов вынуждает использовать более эффективные методы диагностирования, в частности методы, основанные на обработке амплитудно-импульсной модуляции огибающей высокочастотной случайной вибрации.

В работе предлагается усовершенствование метода огибающей, которое на наш взгляд увеличивает быстродействие и надежность диагноза.

2. Анализ вибросигналов подшипников качения на основе вейвлет-фильтрации

Непрерывное вейвлет-преобразование представляет собой разложение анализируемого сигнала

в базисе анализирующей вейвлетной функции.

Базис вейвлет-преобразования строится путем масштабных преобразований и переносов материнского вейвлета $\psi(t)$ с непрерывными значениями базисных параметров – масштабного коэффициента a и параметра сдвига b :

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a, b \in \mathbb{R}, \quad (1)$$

где $\psi_{a,b}(t)$ – дочерний вейвлет базиса.

В интегральной форме вейвлет-преобразование непрерывного сигнала $s(t)$ может быть выражено:

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi_{a,b}^*(t) dt, \quad (2)$$

где $*$ – оператор комплексного сопряжения.

Как можно заметить, непрерывное вейвлет-преобразование сигнала $s(t)$ с анализирующим вейвлетом $\psi(t)$ представляет собой свертку сигнала с комплексно-сопряженным дочерним вейвлетом.

Используя равенство Парсеваля, которое описывает связь между функциями и их образами Фурье, выражение (2) может быть записано в альтернативной форме:

$$W(a,b) = \sqrt{a} F^{-1} \left\{ S(f) \Psi^*(af) \right\}, \quad (3)$$

где F^{-1} – оператор обратного преобразования Фурье; $\Psi(af)$ – преобразование Фурье дочернего вейвлета; $S(f)$ – преобразование Фурье анализируемого сигнала; f – частота; a – масштабный коэффициент.

Такое представление позволяет ускорить вычисление вейвлет-коэффициентов за счет использования быстрого преобразования Фурье. К тому же, преобразование Фурье материнского вейвлета известно в аналитическом виде и, следовательно, количество вычислений сокращается.

Выражение (3) показывает, что вейвлет-преобразование может быть рассмотрено как специальная операция фильтрации с вейвлетом в качестве ядра фильтра. Также можно заметить, что вейвлет-преобразование является фильтрацией с постоянной добротностью (с постоянной Q), при которой отношение среднеквадратической ширины полосы пропускания к центральной частоте фильтра является постоянной величиной.

Среди существующих вейвлет-функций, используемых в непрерывном вейвлет-анализе, был выбран комплексный вейвлет Морле. Комплексный вейвлет Морле более всего по форме подобен импульсным составляющим вибрационных сигналов, генерируемых дефектными элементами оборудования. Кроме того, преимущество комплексного вейвлета для анализа вибрационных сигналов перед его действительным аналогом заключается в том, что его преобразование Фурье равно нулю для отрица-

тельных частот, что позволяет разделить фазовые и амплитудные компоненты анализируемого сигнала.

Во временной области комплексный вейвлет Морле представляет собой комплексную экспоненту, модулируемую функцией Гауса:

$$\psi(t) = \frac{\sigma}{\sqrt{\pi}} e^{-\sigma^2 t^2} e^{i2\pi f_0 t}, \quad (4)$$

где t – время; σ и f_0 – параметры вейвлета, задающие его форму.

В частотной области вейвлет Морле имеет форму Гаусового окна с центральной частотой f_0 и шириной σ :

$$\Psi(f) = e^{-(\pi^2/\sigma^2)(f-f_0)^2}, \quad (5)$$

где $\Psi(f)$ – преобразование Фурье вейвлета Морле; f_0 – центральная частота анализирующего вейвлета; σ – ширина анализируемого диапазона частот.

Таким образом, соответствующий частотный диапазон, покрываемый окном, практически ограничен интервалом $[f_0 - \sigma/2, f_0 + \sigma/2]$.

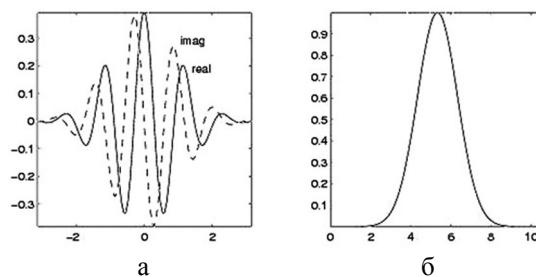


Рис. 1. Представление вейвлета Морле: а – во временной области: реальная часть (—) и мнимая (---); б – в частотной области

Для разделения различных частотных компонент сигналов используются банки фильтров. Как было отмечено, вейвлет-преобразование сигналов можно рассматривать как фильтрацию с постоянной относительной полосой частот. Поэтому по аналогии с обычными банками (гребенками) из $1/n$ -октавных полосовых фильтров может быть построен вейвлетный банк фильтров.

Для построения анализирующего банка фильтров на основе комплексного вейвлета Морле предлагается использовать следующую стратегию.

Добротность вейвлета Морле в качестве фильтра определяется как:

$$Q_w = \frac{\sigma}{f_0}. \quad (6)$$

При использовании набора масштабов a_i , набор соответствующих центральных частот f_i и параметров ширины диапазона частот σ_i комплексного вейвлета Морле могут быть получены с помощью

константы Q_W :

$$f_i = \frac{f_0}{a_i} \text{ и } \sigma_i = f_i Q_W. \quad (7)$$

Таким образом, полученный набор значений f_i и σ_i покроем заданный интервал частот.

Задавая исходные параметры вейвлета f_0 и σ , а также набор масштабов для расчета непрерывного вейвлет-преобразования можно построить банк фильтров с необходимыми анализирующими параметрами.

Построим банк фильтров с заданным количеством фильтров на октаву ($k = 1, 2, 3, 4, 6, 12, 24$), модифицируя процедуру изложенную в [3].

Параметры, которые необходимо определить для такого банка:

- общее количество фильтров в банке M ;
- основание для расчета масштабов вейвлет-преобразования $scalebase = 2^{1/k}$;
- параметр добротности выбран таким образом, чтобы ширина диапазона каждого фильтра равнялась расстоянию между фильтрами

$$Q_W = \frac{\sigma_i}{f_i} = 2 * 2^{1/k} - 2; \quad (8)$$

- центральные частоты фильтров:

$$f_i = \frac{f_0}{scalebase^i}, \quad (9)$$

где $f_0 = 0,8 * f_{Nyq}$; f_{Nyq} – частота Найквиста сигнала;

- ширина диапазона частот

$$\sigma_i = f_i * Q_W. \quad (10)$$

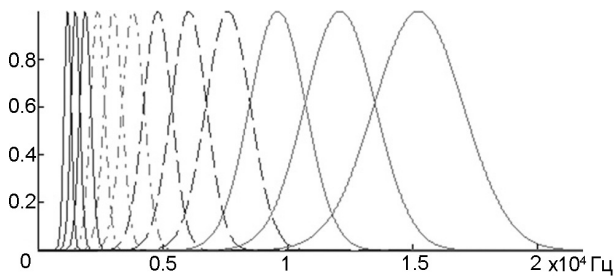


Рис. 2. Банк вейвлет-фильтров с 3 фильтрами на октаву, покрывающий 4 октавы

После определения обозначенных параметров при помощи выражения (5) может быть построен банк фильтров.

Используя выражение (3) производится вейвлет-фильтрация анализируемого сигнала.

Так как используемый вейвлет является комплексным, получаемые вейвлет-коэффициенты для каждого масштаба/фильтра также являются комплексными значениями. Реальная часть вейвлет-

коэффициентов $W_{re}(a, b)$ представляет собой отфильтрованный сигнал, мнимая часть $W_{im}(a, b)$ – является фазой отфильтрованного сигнала.

Для анализа особенностей вибрационного сигнала предлагается использовать спектр огибающей вейвлет-преобразования

$$EW(a, b) = [W_{re}(a, b)^2 + W_{im}(a, b)^2]^{1/2}. \quad (11)$$

Настройку банка фильтров необходимо произвести таким образом, чтобы первыми фильтрами покрыть полосу частот, в которой под действием сил трения или ударных импульсов возникает сильная резонансная вибрация с собственными частотами колебаний тела качения или наружного (неподвижного) кольца подшипника, либо использовать более высокочастотную нерезонансную вибрацию, возбуждаемую этими же силами. Некорректная настройка фильтров может существенно исказить информацию о состоянии подшипника [2].

Для нахождения одинаковых признаков в различных частотных диапазонах предлагается использовать взаимный спектр огибающих вейвлет-преобразования сигнала на паре масштабов.

Кросс-спектральный анализ определяет наличие или отсутствие существенных гармонических составляющих в исследуемых частотных диапазонах и оценку тесноты связи между этими рядами.

3. Экспериментальные данные и анализ полученных результатов

В качестве исходных данных были использованы тестовые вибрационные сигналы [4], также использованные в работе [5] посвященной анализу статистических методов оценки состояния подшипников.

В табл. 1 приведены характерные частоты одного из тестовых подшипников.

Таблица 1

Характерные частоты тестового подшипника

Характерная частота	Значение, Гц
Скорость вращения внутренней дорожке	29,13
Частота перекатывания тел качения по наружной дорожке	157,8
Частота перекатывания тел качения по внутренней дорожке	104,4
Частота вращения сепаратора	11,6
Частота вращения тел качения	137,3

На рис. 3 показаны примеры тестовых вибросигналов бездефектного подшипника и подшипников с дефектами на дорожках качения и на шарике.

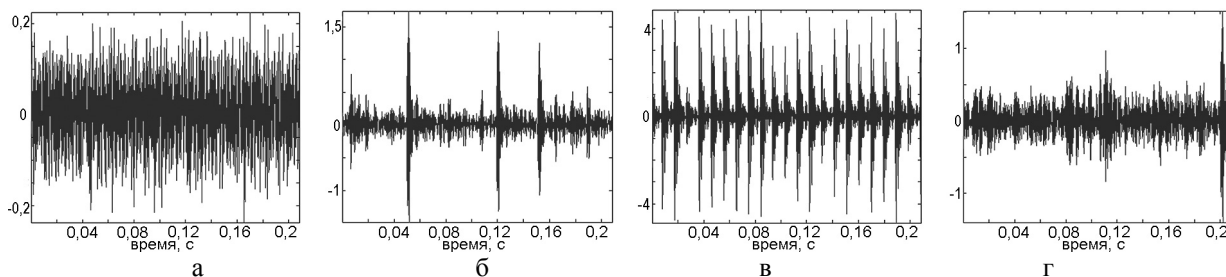


Рис. 3. Форма вибросигналов:

а – подшипник без дефектов; б – подшипник с дефектом внутренней дорожки; в – подшипник с дефектом внешней дорожки; г – подшипник с дефектом шарика

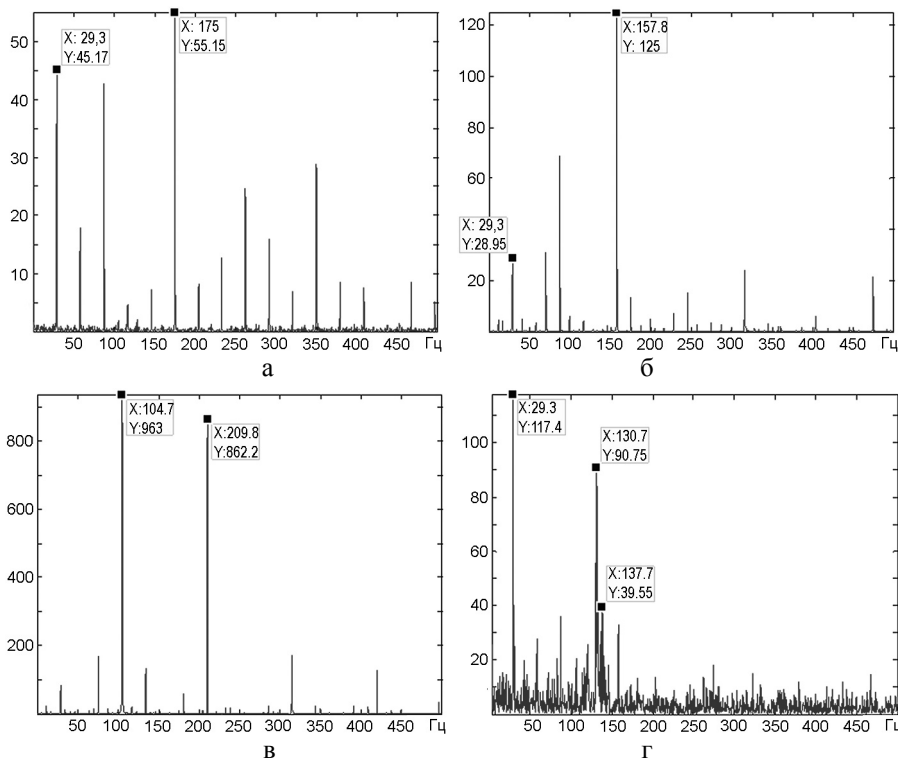


Рис. 4. Взаимные спектры, полученные в результате применения предлагаемого метода:

а – без дефектов; б – дефект внутренней дорожки; в – дефект внешней дорожки; г – дефект шарика

На рис. 4 представлены результаты применения предлагаемого метода для анализа вибросигналов, представленных на рис. 3.

В качестве параметра для экспресс-анализа, позволяющего судить о возникновении и развитии дефекта подшипника, предлагается использовать

максимальные амплитуды взаимных спектров вейлет-коэффициентов 1, 2 и 3 фильтров.

На рис. 5 приведены графики, иллюстрирующие поведение данного параметра для тестовых сигналов.

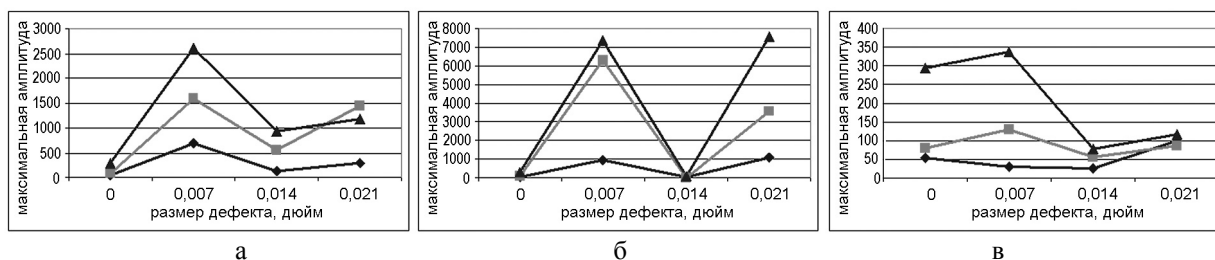


Рис. 5. Поведение максимальной амплитуды взаимных спектров:

а – дефект внутренней дорожки; б – дефект внешней дорожки; в – дефект шарика (ромб - на масштабах 1-2, квадрат - на масштабах 1-3, треугольник – на масштабах 2-3)

Как видно из графиков, при появлении дефекта максимальная амплитуда резко возрастает. Затем с развитием дефекта она значительно уменьшается, а затем снова начинает расти.

Заключение

В работе предложена методика обработки вибросигналов подшипников качения, основанная на применении вейвлет-математики.

Предложенный метод является усовершенствованием метода анализа огибающей высокочастотной случайной вибрации.

Результаты исследования показали, что применение вейвлет-фильтрации для анализа вибрационных сигналов увеличивает быстродействие и надежность постановки диагноза.

Кроме того, полученные результаты позволяют сделать вывод об универсальности предложенного метода и возможности его эффективного применения для анализа других типов нестационарных сигналов с целью идентификации дефектов оборудования.

Литература

1. *Обнаружение дефектов подшипников качения (перевод материалов фирмы IRD) [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: http://www.vibration.ru/obnar_defekt.shtml*
2. Баркова Н.А. *Оптимизация методов диагностики подшипников качения по высокочастотной вибрации [Электронный ресурс] / Н.А. Баркова. – Режим доступа к ресурсу: <http://www.vibrotek.ru/russian/biblioteka/book19>.*
3. Shir L. *Rolling element bearing fault detection using improved envelope analysis / L. Shir, B. Randall, J. Antoni // IMECHE conference transactions. – 2004. – Vol 2. – P. 301-312.*
4. *Case Western Reserve University Bearing Data Center. Seeded Fault Test Data [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: http://www.eecs.case.edu/laboratory/bearing/welcome_overview.htm*
5. Федорончак Т.В. *Диагностирование технического состояния подшипников качения / Т.В. Федорончак, В.Н. Харитонов, В.И. Дубровин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 7 (64). – С. 166-170.*

Поступила в редакцию 29.05.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Технологии авиадвигателей» А.Я. Качан, Запорожский национальный технический университет, Запорожье.

МЕТОД АНАЛІЗУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПІДШИПНИКІВ КОЧЕННЯ, ЗАСНОВАНИЙ НА ВИКОРИСТАННІ ВЕЙВЛЕТ-МАТЕМАТИКИ

Т.В. Юр, В.Н. Харитонов, В.І. Дубровін

Розглянуто підхід до обробки вібраційних сигналів підшипників кочення, що використовує вейвлетну фільтрацію та є удосконаленням методу аналізу огибаючої високочастотної випадкової вібрації. Для більш якісного виділення характерних діагностичних частот, що відповідають тому або іншому типу дефекту, пропонується використовувати взаємні спектри огибаючої вейвлет-коефіцієнтів значимих фільтрів. В якості параметру для експрес-аналізу, що дозволяє судити про виникнення й розвиток дефекту підшипника, пропонується використовувати максимальні амплітуди одержуваних взаємних спектрів.

Ключові слова: діагностування, вібросигнал, вейвлет-фільтрація, огибаюча, взаємний спектр.

METHOD OF ROLLING BEARING DIAGNOSTICS BASED ON WAVELET FILTERING

T.V. Yur, V.N. Haritonov, V.I. Dubrovin

Approach to rolling bearing vibration signals processing based on wavelet filtration is considered. It is an improvement of method of high-frequency random vibration envelope analysis. It is proposed to use cospectrum of wavelet envelope of significant filters to better allocate characteristic frequencies corresponding to the bearing faults. It is also proposed to use peak amplitudes of the cospectrum as a parameter in bearing rapid analysis.

Key words: diagnostics, vibrations, wavelet filtering, envelope, cospectrum.

Юр Татьяна Васильевна – аспирант кафедры программных средств Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: tetyana.yur@gmail.com.

Харитонов Виктор Николаевич – инженер-конструктор ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: 03510@ivchenko-progress.com.

Дубровин Валерий Иванович – канд. техн. наук, доцент, проф. кафедры программных средств Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: vdubrovin@gmail.com.