

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРУЮЩИХ СВОЙСТВ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

В работе исследованы фильтрующие свойства непрерывного вейвлет-преобразования. Приведен метод уменьшения влияния краевых эффектов на результаты вейвлет-анализа. Выполнено обоснование выбора типа вейвлета для анализа нестационарных сигналов. Предложен метод построения банка вейвлетных фильтров с необходимыми анализирующими свойствами. Разработанный метод применен к задаче диагностирования подшипников качения по вибрационному сигналу.

Ключевые слова: нестационарный сигнал, вейвлет-фильтрация, банк фильтров, вейвлет Морле.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее широко используемым методом обработки цифровых сигналов является преобразование Фурье. Однако оно имеет ряд недостатков, которые привели к появлению и разработке новых усовершенствованных методов цифрового анализа нестационарных сигналов. Среди недостатков преобразования Фурье можно выделить усреднение характерных особенностей по всей длительности сигнала, что делает нецелесообразным применение данного метода при необходимости анализа изменений сигнала во времени.

На сегодняшний день все большее распространение получает вейвлет-преобразование [1–4]. Этот инструмент позволяет получить частотно-временное представление анализируемого сигнала.

Однако зачастую на практике вейвлет-анализ сигналов выполняется без учета особенностей настройки вейвлетов, которые существенно влияют на результаты преобразования и возможность их правильной интерпретации. Применение вейвлет-преобразования без учета частотных характеристик вейвлета может давать искаженную информацию об особенностях анализируемого сигнала. Такой подход может привести к неуниверсальности разрабатываемых методов в силу того, что при изменении характеристик исследуемого сигнала применение одних и тех же настроек метода может давать совершенно непредсказуемые результаты.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для успешного использования вейвлет-преобразования необходим тщательный анализ параметров мате-

ринского вейвлета. Это позволит гибко управлять настройкой вейвлета для получения необходимых анализирующих свойств вейвлет-преобразования и правильно интерпретировать получаемые результаты.

Целью данной работы является исследование фильтрующих возможностей непрерывного вейвлет-преобразования, обоснование выбора материнского вейвлета и разработка метода построения анализирующего банка вейвлетных фильтров.

ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ВИДЕ ОПЕРАЦИИ 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 :

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

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.

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

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

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 вейлет-преобразования позволяет значительно ускорить вычисление вейлет-коэффициентов за счет использования быстрого преобразования Фурье (БПФ). К тому же, преобразование Фурье материнского вейвлета обычно известно в аналитическом виде и, следовательно, количество вычислений сокращается.

Выражение (3) также показывает, что вейлет-преобразование может быть рассмотрено как специальная операция фильтрации с вейлетом в качестве ядра фильтра.

ЧАСТОТНО-ВРЕМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Рассмотрим частотно-временные характеристики непрерывного вейлет-преобразования [5, 6].

Выражение (2) представляет вейлет-преобразование как средство анализа во временно-масштабной области. В таком виде интерпретация масштабов и их соответствие частотным диапазонам могут быть затруднены. Если же рассматривать вейлет-преобразование в частотной области, частотный образ материнского вейвлета соответствует полосовому фильтру, характеристики которого определяются типом и настройками вейвлета.

Пусть вейлет $\psi(t)$ и его образ Фурье $\Psi(f)$ являются функциями-окнами с центрами t_0 и f_0 , радиусами δ_f и δ_t соответственно.

На рис. 1 изображено частотно-временное разрешение непрерывного вейлет-преобразования. Оно иллюстрирует анализирующие возможности вейвлетов на различных масштабах.

Благодаря свойствам смещения и масштабирования материнского вейвлета каждый дочерний вейлет на масштабе a будет иметь ширину окна, равную $2\delta_f/a$, и центральную частоту, равную f_0/a . Их отношение не зависит от масштаба преобразования и является постоянной величиной $2\delta_f/f_0$, значение которой задается параметрами материнского вейвлета.

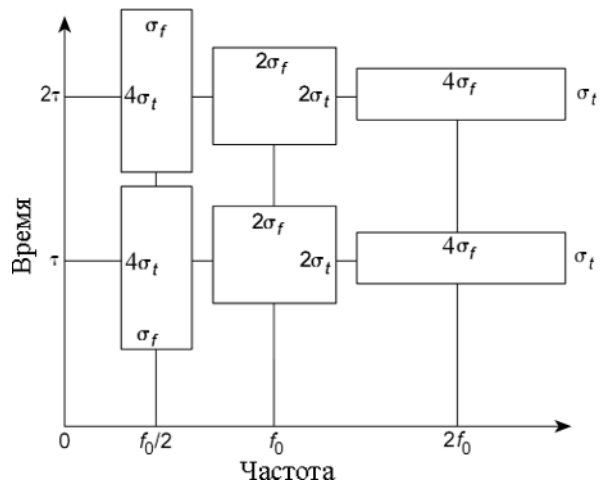


Рис. 1. Частотно-временное разрешение вейлет-преобразования

Таким образом, вейлет-преобразование также может быть рассмотрено как операция фильтрации с постоянной добротностью (с постоянной Q), при которой отношение среднеквадратической ширины полосы пропускания к центральной частоте фильтра является постоянной величиной.

Если рассмотреть частотно-временное окно, характеризующее разрешение вейлет-анализа, можно отметить, что его площадь постоянна и равна $4\delta_f\delta_t$. При масштабировании материнского вейвлета радиус окна дочернего вейвлета во временной области увеличивается прямо пропорционально масштабу ($\delta_t a$), а в частотной радиус окна уменьшается обратно пропорционально масштабу (δ_f/a). Таким образом, вейлет-преобразование предоставляет переменное разрешение в частотно-временной плоскости, которое дает ему большое преимущество при анализе сигналов, так как быстрые вариации сигналов (высокочастотные характеристики) хорошо локализованы, а для выявления медленно меняющихся характеристик необходимо большое временное окно.

Согласно принципу неопределенности Гейзенберга между временной и частотной локализациями площадь частотно-временного окна вейлет-преобразования ограничена $\delta_f\delta_t \geq (4\pi)^{-1}$, что определяет ограничение разрешающей способности вейлет-анализа [1].

ВЫБОР МАТЕРИНСКОГО ВЕЙВЛЕТА

Среди существующих вейлет-функций, используемых в непрерывном вейлет-анализе, вейлет Морле и вейлет Мексиканская шляпа более всего по форме подобны импульсным составляющим нестационарных сигналов.

ционарных сигналов, что делает их наиболее подходящим средством анализа такого вида сигналов.

Оба эти вейвлета являются экспоненциально убывающими как во временной, так и в частотной области. Принципиальное различие между ними заключается в следующем: вейвлет Морле имеет узкий спектральный диапазон и продолжителен во временной области, тогда как вейвлет Мексиканская шляпа более локализован во временной области за счет более широкого частотного представления [3]. В силу принципа неопределенности Гейзенберга невозможно получить идеальную локализацию одновременно в частотной и временной областях.

При выборе анализирующего вейвлета для фильтрации сигналов предпочтение было отдано вейвлету Морле, который имеет узкий образ Фурье. Присутствие доминирующей частоты позволяет варьировать избирательность вейвлета Морле в частотной области.

Кроме того, в качестве анализирующего был выбран комплексный тип вейвлета Морле. Его преобразование Фурье равно нулю для отрицательных частот, что позволяет разделить фазовые и амплитудные компоненты сигнала при выполнении вейвлет-преобразования.

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

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

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

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

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

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

Так как $\Psi(f)$ является действительным числом, то $\Psi(f) = \Psi^*(f)$.

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

На рис. 2 приведен пример представления вейвлета Морле во временной и частотной областях.

Строго говоря, вейвлет Морле не удовлетворяет условию допустимости для вейвлетов:

$$C_\psi = \int_0^\infty \frac{|\Psi(f)|^2}{f} df < \infty. \quad (6)$$

Это условие также подразумевает, что вейвлет не должен иметь нулевой частотной компоненты $\Psi(0) = 0$ или же, другими словами, вейвлет должен иметь нулевое среднее.

Это означает, что вейвлет Морле не обладает компактным носителем. Однако наибольшая часть его энергии сосредоточена на интервале, ширина которого определяется его полосой пропускания, и на практике при $f_0 \gg 0$ вейвлет Морле может быть использован с минимальной погрешностью [3].

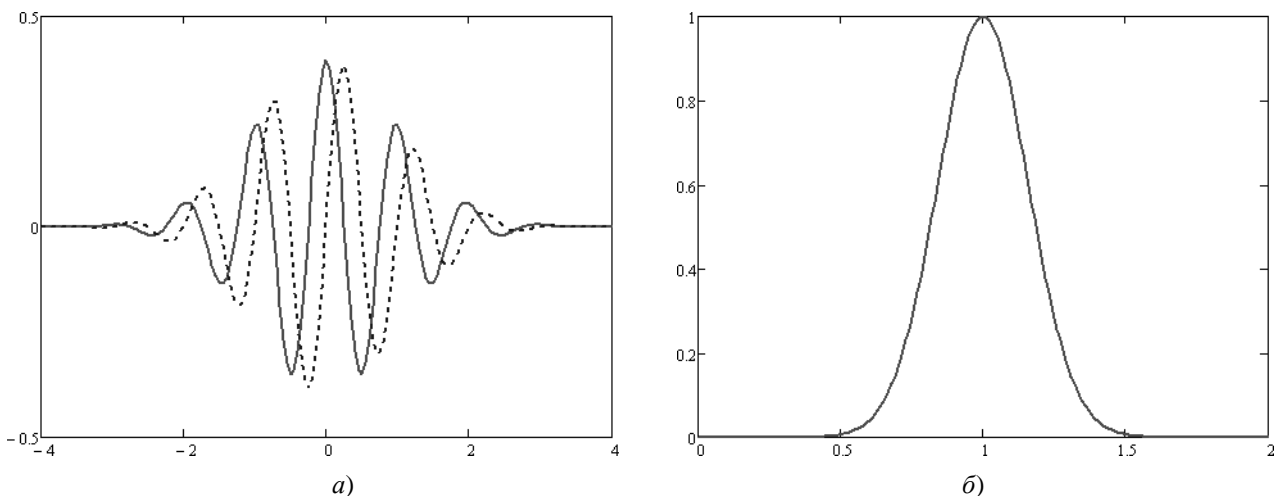


Рис. 2. Представление вейвлета Морле при $\sigma = 0,7$ и $f_0 = 1$:

a – во временной области: реальная часть (–) и мнимая (–); b – в частотной области

КРАЕВЫЕ ЭФФЕКТЫ И ОБЛАСТЬ ДОСТОВЕРНОСТИ ДЛЯ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Рассмотрим механизм возникновения граничного эффекта при выполнении вейвлет-преобразования сигнала [7, 8].

Значение анализируемой функции в точке t_0 влияет на значения коэффициентов преобразования в растущих с масштабом временных диапазонах, в так называемом угле влияния (рис. 3).

Если анализирующий вейвлет $\psi(t)$ хорошо локализован в интервале $2\delta_t$ для $a = 1$, то коэффициенты вейвлетного спектра, соответствующие моменту времени t_0 будут содержаться в конусе влияния, ограниченном прямыми $a = t_0 - t\delta_t$ и $a = t_0 + t\delta_t$ (рис. 3, а). Коэффициент $W(a_0, b_0)$ в свою очередь зависит от значений ряда из определяемого тем же углом влияния временного диапазона около значения b_0 (рис. 3, б).

Диапазон этот тем больше, чем больше анализируемый масштаб a . Таким образом, высокочастотная

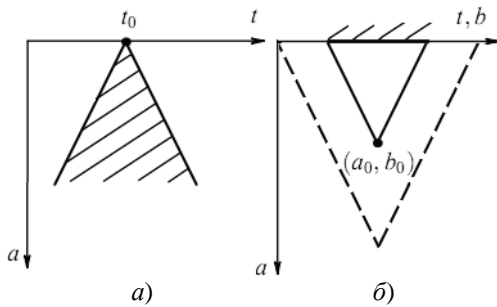


Рис. 3. Угол влияния вейвлет-преобразования: а – влияние точки анализируемой функции на значения вейвлет-коэффициентов; б – зависимость коэффициента $W(a_0, b_0)$ от значений анализируемой функции (пунктиром обозначена область достоверности)

(мелкомасштабная) информация вычисляется на основе малых по длительности отрезков сигнала, а низкочастотная – на основе больших отрезков сигнала.

Максимальный угол влияния отмечает область достоверности – область, вне которой коэффициенты $W(a, b)$ вычисляются уже по отрезкам, выходящим за границы ряда, и поэтому амплитуды вейвлет-коэффициентов носят искаженный характер. Заметим, что при нелинейном изменении масштабов на графиках вейвлет-преобразования угол влияния примет нелинейный вид.

Таким образом возникает граничный эффект – область, в которой коэффициенты вейвлет-преобразования искажаются разрывной природой границы сигнала. Пример граничного эффекта, возникающего при вейвлет-преобразовании, приведен на рис. 4.

Как видно из рис. 4, амплитуды вейвлет-преобразования в области краевых эффектов сравнимы с амплитудами коэффициентов, определяющих особую точку сигнала.

При выполнении вейвлет-преобразования конечной временной реализации длины N в частотной области ошибки в расчете коэффициентов $W(a, b)$ обусловлены природой преобразования Фурье, которое предполагает, что сигнал $s(t)$ периодичен и имеет период длиной N .

Для уменьшения ошибки граничных эффектов ряд дополняется с учетом его поведения (средним значением, известным временным ходом и т. д.) [3].

В данной работе для анализа вибрационных сигналов предлагается использовать дополнение временного ряда нулями до длины $2N$. Такой подход приводит к появлению сильной неоднородности на границах исходного временного ряда. Однако возмущения, вносимые этой неоднородностью, лежат в области очень больших временных масштабов, в то время как спектр исходной неоднородности (которая фор-

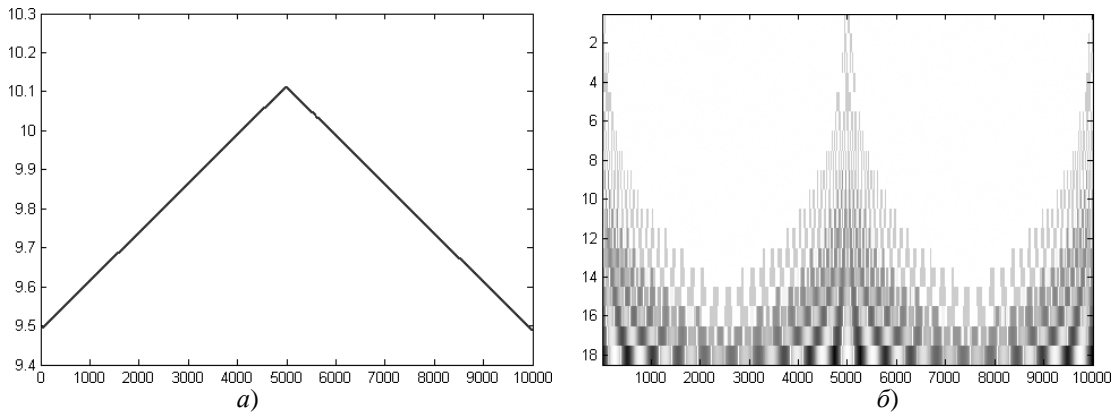


Рис. 4. Иллюстрация граничного эффекта, возникающего при вейлет-анализе: а – пример анализируемого сигнала; б – вейвлет-преобразование сигнала

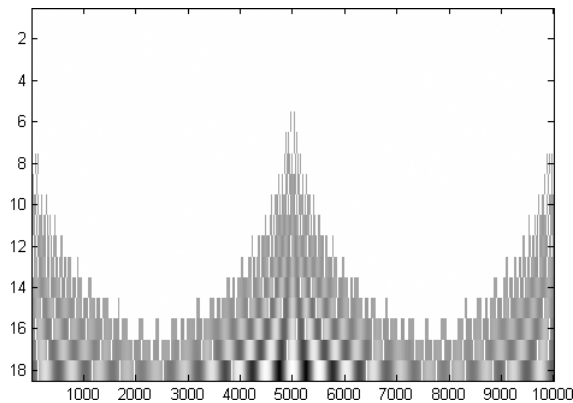


Рис. 5. Вейвлет-преобразование сигнала 4, a после дополнения нулями

мально существенно меньше внесенной) лежал бы в области масштабов анализируемого сигнала. Так что внесение такой неоднородности приводит к уменьшению амплитуды $W(a, b)$ около границ исходного ряда. Очевидно, чем больше будет длина дополнения, заполненного нулями, тем меньше влияние краевых эффектов. Использование для анализа ряда, в котором длина последовательности нулей равна длине исходного сигнала, является оптимальной в смысле баланса скорости вычислений, затрат машинной памяти и точности осуществления вейвлет-преобразования вблизи границ исходного временного ряда [8] (рис. 5).

На рис. 5 показано вейвлет-преобразование сигнала, приведенного на рис. 4, a , с использованием дополнения ряда нулями. Как видно, если сравнить рис. 4, b и рис. 5, влияние краевых эффектов значительно уменьшилось. Амплитуды в области краевых эффектов значительно ниже амплитуд коэффициентов, определяющих особую точку.

РАСЧЕТ ОБЛАСТИ ДОСТОВЕРНОСТИ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ, ВЫПОЛНЯЕМОГО ПРИ ПОМОЩИ ВЕЙВЛЕТА МОРЛЕ

Пусть вейвлет Морле $\psi(t)$ представляет собой функцию-окно с радиусом δ_t . Тогда каждый дочерний вейвлет на масштабе a будет иметь радиус окна, равный $\delta_t a$. Как видно из рис. 3, b , если точка $W(a, b)$ расположена от границы ряда на расстоянии меньшем, чем $\delta_t a$, то для ее расчета необходимы значения, выходящие за пределы ряда. Таким образом, количество точек от краев сигнала, которые носят искаженный характер, может быть задано следующим образом:

$$n = \delta_t a * f_d, \quad (7)$$

где f_d – частота дискретизации сигнала.

Так как вейвлет Морле является комплексной экспонентой, модулируемой функцией Гаусса (см. выр. 4), его ширина во временной области может быть определена при помощи правила трех сигм как:

$$\delta_t = \frac{3}{\sigma\sqrt{2}}. \quad (8)$$

Используя выражения (7)–(8), получим 2 области: область достоверности вейвлет-преобразования и область, в которой нельзя пренебречь наличием краевых эффектов. Предлагается отбрасывать данную область краевых эффектов при дальнейшей манипуляции с рассчитанными коэффициентами вейвлет-преобразования.

На рис. 6 приведен пример вейвлет-преобразования 4, b и 5 с рассчитанным максимальным углом влияния.

Заметим, что с уменьшением количества точек после отсекания области, содержащей краевые

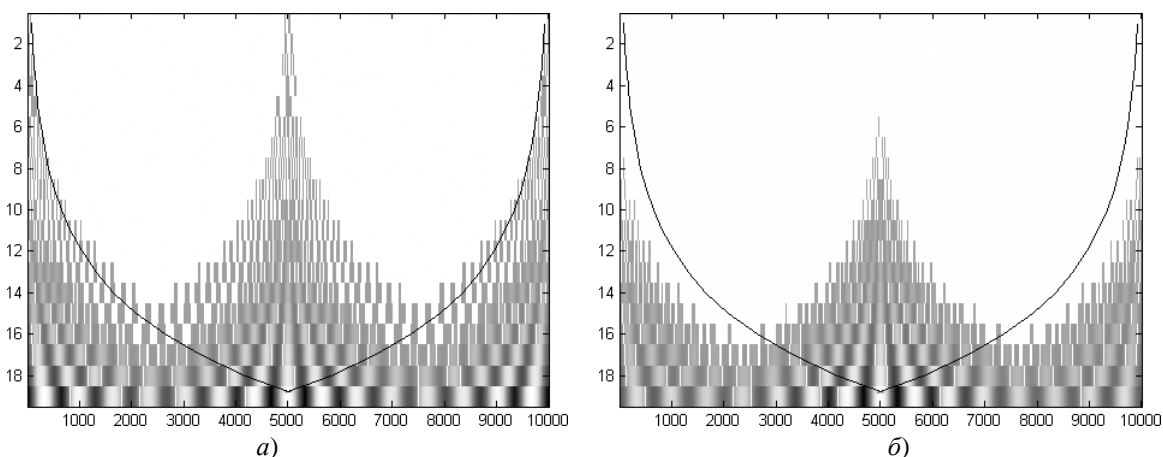


Рис. 6. Вейвлет-преобразование анализируемого сигнала (рис. 4, a) с обозначенной областью достоверности:

a – без дополнения сигнала нулями; b – с дополнением сигнала нулями

эффекты, падает разрешение по частоте для спектра вейвлет-преобразования:

$$\Delta f = \frac{1}{(N - 2^n)f_d}, \quad (9)$$

где N – количество отсчетов сигнала; f_d – частота дискретизации сигнала; n – длина области краевых эффектов.

МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ АНАЛИЗИРУЮЩЕГО БАНКА ФИЛЬТРОВ

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

$$Q_w = \frac{\omega}{f_0}. \quad (10)$$

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 :

$$f_i = \frac{f_0}{a_i} \text{ и } \sigma_i = f_i Q_w. \quad (11)$$

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.

Для f_0 максимальным приемлемым значением $f_0 = 0,8 \cdot 8 \cdot f_{Nyq}$, где f_{Nyq} – частота Найквиста сигнала.

Такое значение не позволит первому фильтру в банке выйти за границу f_{Nyq} .

В качестве основания для расчета масштабов вейвлет-преобразования выберем $a_i = (2^{1/k})^i$, что позволит строить банк фильтров с k фильтрами на октаву.

Параметр добротности выберем таким образом, чтобы ширина диапазона каждого фильтра равнялась расстоянию между фильтрами

$$Q_w = 2^{1/k} - 1. \quad (12)$$

При помощи данного параметра можно варьировать ширину полосы пропускания фильтров и степень перекрытия фильтров в банке.

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

На рис. 7, а показан банк фильтров, полученный при помощи данной процедуры, а на рис. 7, б – банк фильтров с добротностью, увеличенной в два раза.

Используя выражение (7), производится вейвлет-фильтрация анализируемого сигнала.

Так как используемый вейвлет Морле является комплексным, то 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 сигнала также предлагается использовать спектр огибающей вейвлет-преобразования, который позволяет демодулировать сигнал в необходимом частотном диапазоне:

$$EW(a, b) = [W_{re}(a, b)^2 + W_{im}(a, b)^2]^{1/2}. \quad (13)$$

Правильная настройка банка фильтров и учет области достоверности вейвлет-преобразования позволяет проанализировать особенности сигнала наилучшим образом.

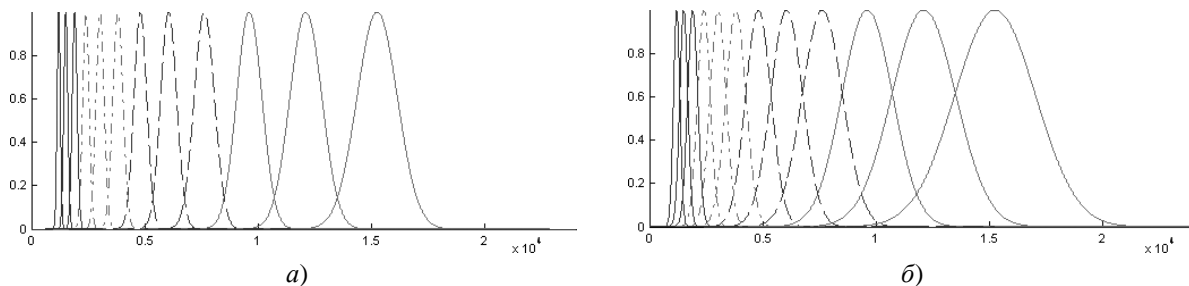


Рис. 7. Банк вейвлет-фильтров с тремя фильтрами на октаву, покрывающий 4 октавы: а – при добротности $Q_w = 2^{1/k} - 1$; б – при добротности, увеличенной в два раза: $Q_w = 2 \cdot (2^{1/k} - 1)$

В качестве признаков для выбора оптимального фильтра из построенного банка предлагается использовать различные статистические параметры. Например, эксцесс коэффициентов вейвлет-преобразования может быть использован для получения отфильтрованного сигнала с наибольшей импульсностью [9].

При настройке вейвлетного банка фильтров следует также учитывать требования к необходимой точности обработки сигнала. Достижение высокой точности и детальности описания характеристик сигнала приводит к увеличению длительности обработки сигнала. Поэтому одной из главных задач является рациональная настройка метода обработки сигнала, чтобы с приемлемой скоростью получить требуемое описание сигнала.

Для примера в табл. 1 приведено время обработки сигналов при помощи банков вейвлетных фильтров в зависимости от длины сигнала и характеристик банка фильтров. Приведенные значения получены для конкретного программно-аппаратного комплекса.

Таблица 1. Время обработки сигнала при помощи банка вейвлетных фильтров в зависимости от длины сигнала и характеристик банка фильтров

Длина сигнала, отсчеты	Время обработки, с		
	6 фильтров в банке	12 фильтров в банке	24 фильтра в банке
1024	0,0156	0,0313	0,0469
2048	0,0313	0,0469	0,0781
4096	0,0313	0,0625	0,1406
8192	0,0496	0,0938	0,2188
16384	0,0781	0,1719	0,4219
32768	0,1875	0,4219	1,0469

ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕДЛОЖЕННОГО МЕТОДА К ЗАДАЧЕ ДИАГНОСТИКИ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

В качестве примера для демонстрации фильтрующих возможностей вейвлет-преобразования были использованы вибрационные сигналы тестовой установки с дефектными подшипниками качения [10]. На установку помещали подшипник с точечным дефектом на внешней дорожке качения и подшипник с точечным дефектом на внутренней дорожке. Дефекты размером 0,007 дюйма нанесены при помощи эрозионного станка.

Скорость вращения вала установки примерно равна $f = 29$ Гц. Частота дискретизации сигнала 48 кГц. Подшипник имеет следующие параметры: количество шариков $z = 9$, угол контакта шарика с дорожка-

ми $\varphi = 0^\circ$, диаметр шарика $d = 7,95$ мм, диаметр сепаратора $D = 38,5$ мм.

Таким образом, может быть рассчитана характеристическая частота перекачивания тел качения по внешней дорожке:

$$F_{\text{ВРФО}} = 0,5zf\left(1 - \frac{d}{D}\cos\varphi\right) = 104 \text{ Гц}$$

и частота перекачивания тел качения по внешней дорожке:

$$F_{\text{ВРФИ}} = 0,5zf\left(1 + \frac{d}{D}\cos\varphi\right) = 158 \text{ Гц.}$$

На рис. 8 приведены результаты обработки сигнала с подшипником с дефектом на внешней дорожке качения, на рис. 9 – с дефектом на внутренней дорожке качения.

Масштабу 7 соответствует центральная частота фильтра 3809,8 Гц с шириной полосы пропускания 990,23 Гц, а масштабу 8 – 3023,8 Гц и 785,95 Гц соответственно.

Рис. 8 и 9 иллюстрируют эффективность фильтрации нестационарных сигналов при помощи комплексного вейвлета Морле.

ВЫВОДЫ

В работе решена актуальная задача исследования фильтрующих свойств непрерывного вейвлет-преобразования. Приведен метод уменьшения влияния краевых эффектов на результаты вейвлет анализа. Выполнено обоснование выбора типа вейвлета для анализа нестационарных сигналов. Предложен метод настройки материнского вейвлета Морле и построения банка фильтров с необходимыми анализирующими свойствами. Предложенный метод эффективно применен к задаче диагностирования подшипников качения по вибрационному сигналу.

В качестве направления дальнейшего исследования может быть выделена задача построения вектора характеристических признаков анализируемого сигнала из получаемых вейвлет-коэффициентов с целью постановки диагноза и принятия решения о состоянии исследуемого объекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чуи К. Введение в вейвлеты / К. Чуи. – М. : Мир, 2001. – 412 с.
2. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов / С. Малла. – М. : Мир, 2005. – 671 с.
3. Addison P. S. Illustrated wavelet transform handbook. Introductory Theory and Applications in Science, Engineering, Medicine and Finance / Paul S. Addison. – Bristol : Institute of Physics Publishing, 2002. – 400 p.
4. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике / В. П. Дьяконов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Солон-Пресс, 2004. – 400 с.

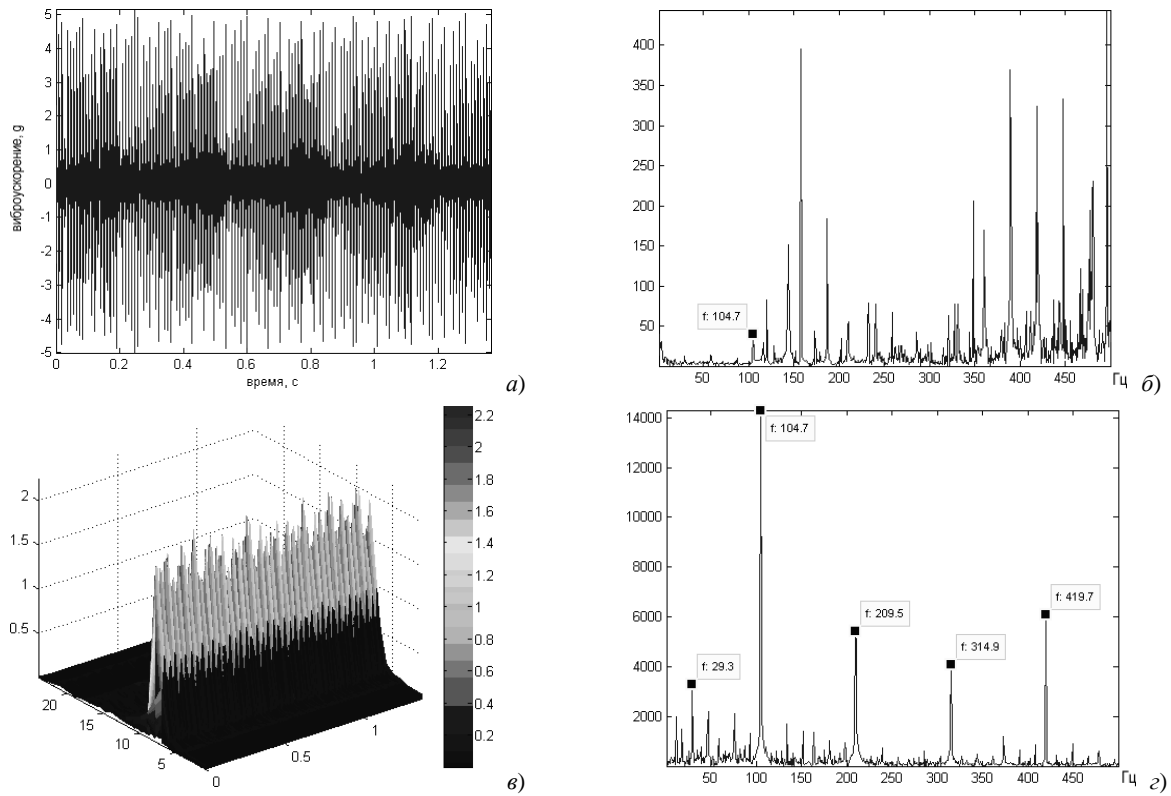


Рис. 8. Обработка сигнала с дефектом на внешней дорожке качения:
 а – исходный сигнал; б – спектр необработанного сигнала; в – вейвлет-преобразование сигнала;
 г – спектр огибающей вейвлет-коэффициентов на масштабе номер 8

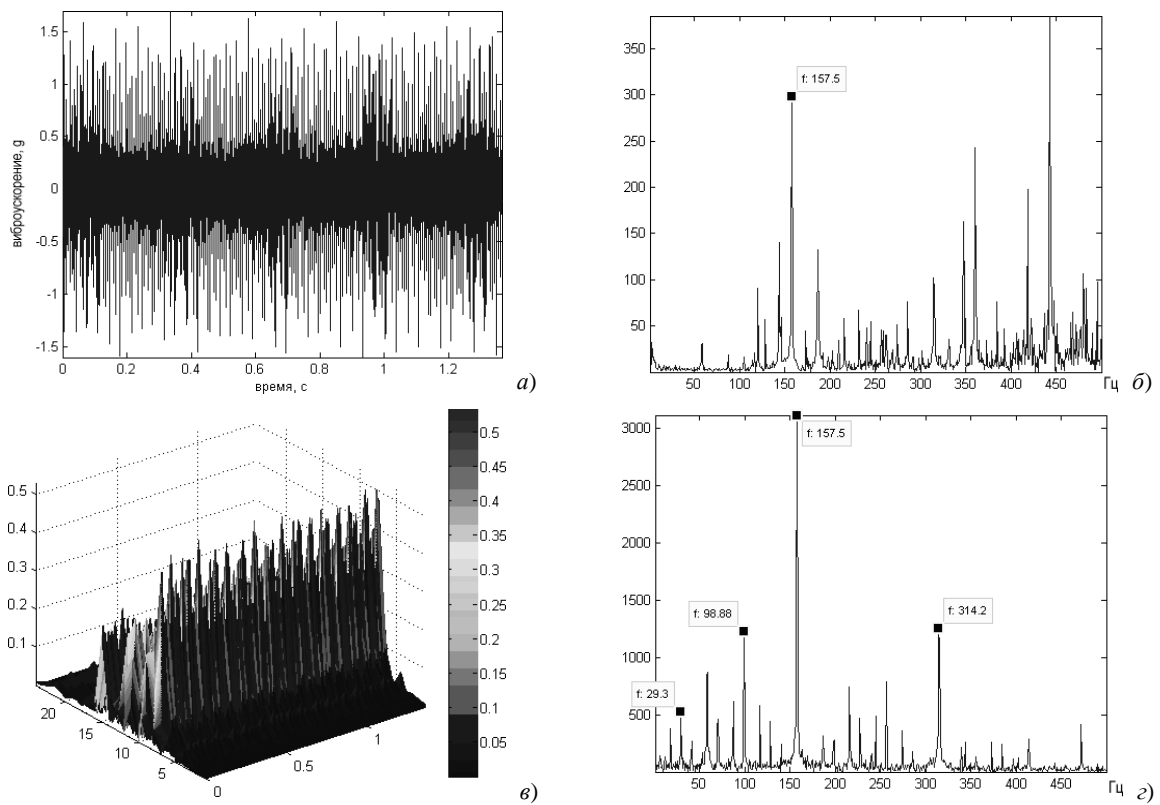


Рис. 9. Обработка сигнала с дефектом на внутренней дорожке качения:
 а – исходный сигнал; б – спектр необработанного сигнала; в – вейвлет-преобразование сигнала;
 г – спектр огибающей вейвлет-коэффициентов на масштабе номер 8

5. *Torrence C.* A Practical Guide to Wavelet Analysis / C. Torrence, G. P. Compo // Bulletin of the American Meteorological Society. – 1998. – Vol. 79. – Pp. 61–78.
6. *Najmi A.* The Continuous Wavelet Transform and Variable Resolution Time–Frequency Analysis / A. Najmi, J. Sadowsky. // JOHNS HOPKINS APL TECHNICAL DIGEST. – 1997. – Vol. 18, No. 1. – Pp.134–140.
7. *Астафьева Н.* Вейвлет анализ: основы теории и примеры применения / Н. Астафьева // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166, № 11. – С. 1145–1170.
8. *Короновский А. А.* Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения / А. А. Короновский, А. Е. Храмов. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 176 с.
9. *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.
10. Case Western Reserve University Bearing Data Center. Seeded Fault Test Data [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.eecs.case.edu/laboratory/bearing/welcome_overview.htm.

Надійшла 19.04.2010

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЛЬТРУЮЧИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ

В роботі досліджено фільтруючі властивості безперервного вейвлет-перетворення. Наведено метод зменшення

впливу крайових ефектів на результати вейвлет-аналізу. Виконано обґрунтування вибору типу вейвлету для аналізу нестационарних сигналів. Запропоновано метод побудови банку вейвлетних фільтрів з необхідними аналізуючими властивостями. Розроблений метод застосовано до задачі діагностування підшипників кочення за вібраційним сигналом.

Ключові слова: нестационарний сигнал, вейвлет-фільтрація, банк фільтрів, вейвлет Морле.

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

ANALYSIS OF WAVELET TRANSFORM FILTERING PROPERTIES

Filtering properties of continuous wavelet transform are investigated in the paper. The method that decreases the influence of edge effects on wavelet analysis results is described. The choice of wavelet for non-stationary signals analysis is grounded. The method of construction of a filter bank with required analyzing properties is proposed. The given method is applied to the problem of rolling bearing diagnostics by vibration signals.

Key words: non-stationary signal, wavelet filtering, filter bank, Morlet wavelet.