
ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ПРОГРЕССИВНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

PROGRESSIVE INFORMATION TECHNOLOGIES

УДК 004.67

Ю. С. Афонин, В. И. Дубровин, Т. В. Манило

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИКИ ОБЪЕКТОВ ПО ВИБРОАКУСТИЧЕСКОМУ СИГНАЛУ

Представлены методы вейвлет-преобразования (быстрое и пакетное) и преобразование Фурье для обработки виброакустического сигнала в контексте их применения в задачах диагностики объектов. Для каждого метода выявлены характеристики (результаты обработки виброакустических сигналов), связанные с состоянием исследуемого объекта. Выполнено сравнение методов по времени обработки сигналов.

ВВЕДЕНИЕ

Диагностика объектов является неотъемлемой частью поддержки необходимого уровня надежности, обеспечения требований безопасности и эффективности использования объектов.

Разработка и применение методов и средств диагностики позволяет повысить эффективность эксплуатации объекта. Важной частью диагностики является изучение и анализ диагностического сигнала.

При выборе диагностического сигнала для определения места возникновения дефекта, вида дефекта, степени его развития и для прогнозирования изменения

технического состояния объекта требуется большой объем диагностической информации.

Такие диагностические сигналы, как температура, давление и т. п., можно характеризовать практически только одним параметром – их величиной. Значительно больший объем диагностической информации содержится в виброакустическом сигнале – это его общий уровень, уровни в определенных полосах частот, соотношения между этими уровнями, амплитуды, частоты и начальные фазы каждой составляющей спектра частот, соотношения между амплитудами и частотами и т. д. Таким образом, именно виброакустические сигналы лучше всего подходят для решения задач диагностики и прогноза состояния объектов.

Еще одним важным обстоятельством в пользу выбора виброакустического сигнала в качестве диагностического является то, что это позволяет диагностировать объект на рабочем месте без остановки и разборки.

Виброакустический сигнал является одномерным и нестационарным. Виброакустический сигнал в диапазоне слышимых частот в дальнейшем будем называть

© Афонин Ю. С., Дубровин В. И., Манило Т. В., 2007

звуковым сигналом. Преимуществом выбора для анализа звукового сигнала является простота его регистрации.

Существует множество методов цифровой обработки одномерных сигналов [1, 2], в каждом из которых можно выделить ряд преимуществ и недостатков. Выбор метода для анализа сигнала зависит от поставленных целей и задач, требований к скорости обработки, точности, устойчивости, возможности использования данного метода в режиме реального времени и т. п.

В работе рассмотрены известные методы обработки сигналов, а именно преобразования Фурье и вейвлет-преобразование, в контексте задачи диагностики износа режущего инструмента по звуковому сигналу.

МЕТОД ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

Наиболее широко используемым методом цифровой обработки сигнала является преобразование Фурье (ФП). Звуковой сигнал является функцией времени. В большинстве случаев наиболее значимая информация скрыта в частотной области сигнала, поскольку информация, незаметная во временной области, проявляется в его частотном представлении. В таких случаях необходимо получить оценку составляющих сигнала в частотных диапазонах. В результате ФП сигнала, заданного во временной области, можно получить его частотное представление [2, 3]. Сигнал $s(t)$ может быть декомпозирован с помощью ФП $F(\omega)$, исходя из выражения (1)

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt, \quad (1)$$

где $f(t)$ – исходный сигнал, $F(\omega)$ – спектр функции $f(t)$, ω – частота функции.

Дискретное ФП (ДФП) выполняется по формуле (2)

$$F_d(\omega) = \Delta t \sum_{-\infty}^{+\infty} x_n e^{-i\omega n \Delta t}, \quad (2)$$

где $x_n = f(n\Delta t)$ – выборочные данные функции $f(t)$.

Фурье-преобразование успешно применяется при обработке звукового сигнала процессов различной природы. Для примера рассмотрим звуковые сигналы процесса резания при диагностике износа режущего инструмента. Экспериментальные результаты показывают, что амплитуда звукового сигнала в частотной области чувствительна к изменению степени износа инструмента.

На рис. 1 изображены звуковые сигналы процесса резания, полученные при различной степени износа режущего инструмента (<0,15 мм, 0,15–0,3 мм, >0,3 мм). На рис. 2 приведены результаты быстрого ФП (БФП) звуковых сигналов, представленных на рис. 1.

Реализация БФП приводит к существенному уменьшению вычислительной сложности ДФП. При использовании алгоритмов БФП объем вычислений сокращается примерно на два порядка [1]. Как видно из рис. 2, с увеличением износа режущего инструмента увеличивается амплитуда звукового сигнала в некоторых частотных областях.

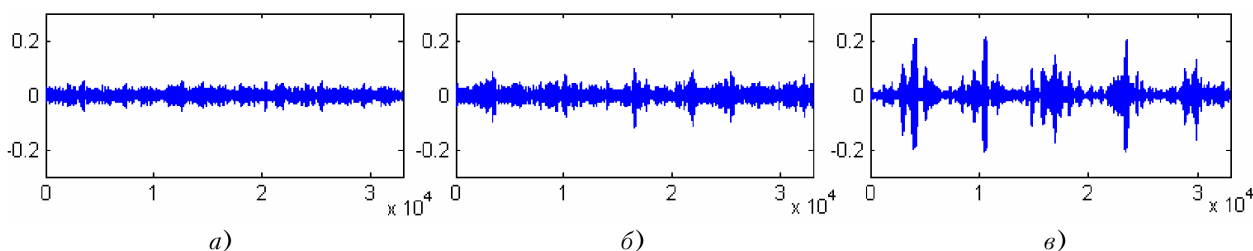


Рисунок 1 – Звуковые сигналы процесса резания при различной степени износа инструмента:
а – <0,15 мм, б – 0,15–0,3 мм, в – >0,3 мм

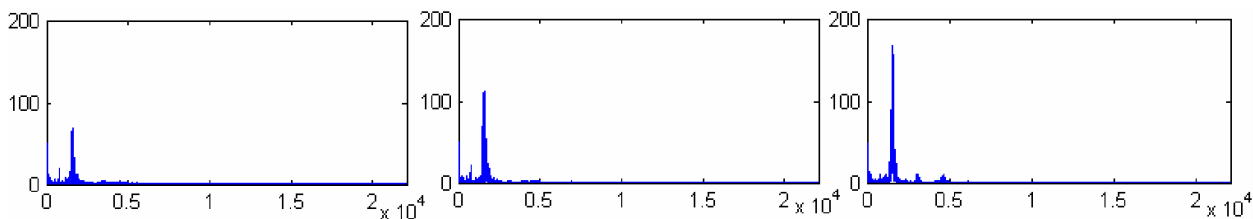


Рисунок 2 – Результаты БПФ

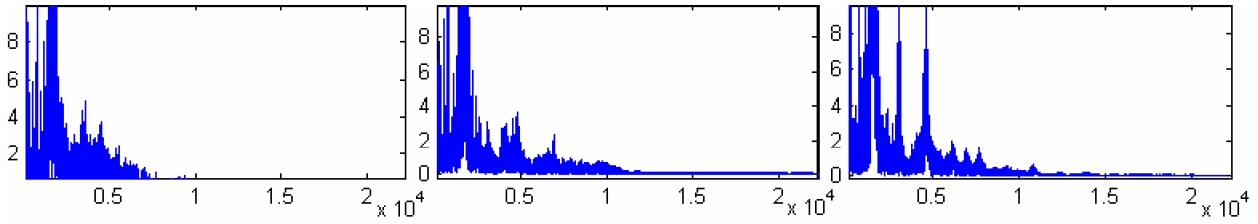


Рисунок 3 – Результати БПФ, масштаб 1:10 по осі ординат

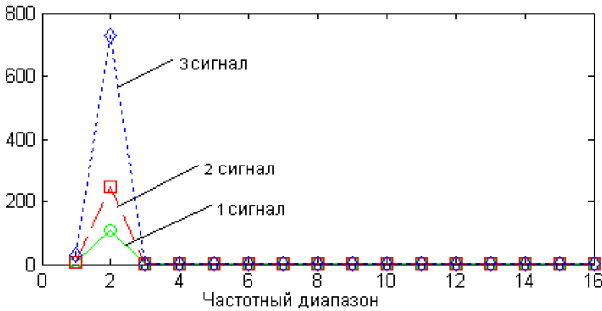


Рисунок 4 – Чувствителість результатів БПФ в 16 діапазонах к изменению износа

На рис. 3 для наглядности показаны результаты БПФ, увеличенные в 10 раз по оси ординат. Ось абсцисс захватывает диапазон частот от 0 до 20 кГц. Разбив область частот на 16 диапазонов, можно более детально определить чувствительность диапазона к изменению износа.

Среднеквадратические значения (СКЗ) результатов БПФ в каждом из 16 диапазонов, определяющие энергетический уровень сигналов в соответствующем диапазоне, показаны на рис. 4.

Как видно из рис. 4, лишь значения в первых диапазонах заметно отличаются для трех сигналов, которым соответствует различная степень износа инструмента. Как наиболее чувствительные диапазоны можно выделить первый и второй, которым соответствуют область частот 0–1250 Гц, 1250–2500 Гц.

СКЗ результатов БПФ сигнала в полученных диапазонах могут служить как информативные характеристики для оценки состояния исследуемого объекта, в данном случае износа режущего инструмента.

МЕТОДЫ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ: БЫСТРОЕ И ПАКЕТНОЕ

При вейвлет-преобразовании (ВП) сигнал декомпозируется при помощи семейства базовых функций, называемых вейвлетами, которые имеют две независимые переменные: время и частоту. В результате получаем частотно-временное представление сигнала [4, 5]. Результатом ВП являются аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты, которые в общем случае можно вычислить по формулам (3) и (4), соответственно.

$$c_{j,k} = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \sum_{t=0}^L s(t) \phi\left(\frac{t-2^j k}{2^j}\right), \quad (3)$$

$$d_{j,k} = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \sum_{t=0}^L s(t) \psi\left(\frac{t-2^j k}{2^j}\right), \quad (4)$$

где $c_{j,k}$, $d_{j,k}$ – коэффициенты аппроксимации и детализации, j – параметр масштаба или уровень разложения, k – параметр сдвига, $s(t)$ – исходный сигнал, L – длина сигнала, Φ – масштабирующая функция, ψ – вейвлет функция.

Рекурсивные выражения для расчета коэффициентов вейвлет-разложения, позволяющие рассчитывать коэффициенты разложения на основании коэффициентов предыдущего уровня (рис. 5, а), имеют название каскадного алгоритма (алгоритма Маллата), а ВП, выполняемое по данному алгоритму, называют быстрым (БВП) [6, 7].

Аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты при БВП могут быть получены из выражений (5) и (6), соответственно.

$$c_{j+1,k} = \sum_n h_n c_{j,2k+n}, \quad (5)$$

$$d_{j+1,k} = \sum_n g_n c_{j,2k+n}, \quad (6)$$

где h_n , g_n – вейвлет-последовательность и масштабирующая последовательность для заданного уровня, n – количество коэффициентов последовательности h и g .

Для цифровых данных в качестве значений аппроксимирующих коэффициентов на нулевом уровне $c_{0,k}$ обычно принимаются исходные значения данных, исходя из выражения (7).

$$c_{0,k} = s(k), \quad (7)$$

где $s(k)$ – значение в k -й точке исходного сигнала.

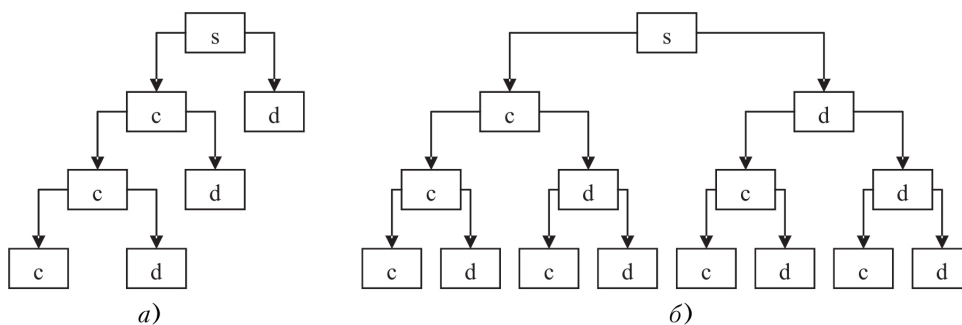


Рисунок 5 – Структура вейвлет-представления сигнала:

а – при БВП, б – при ПВП

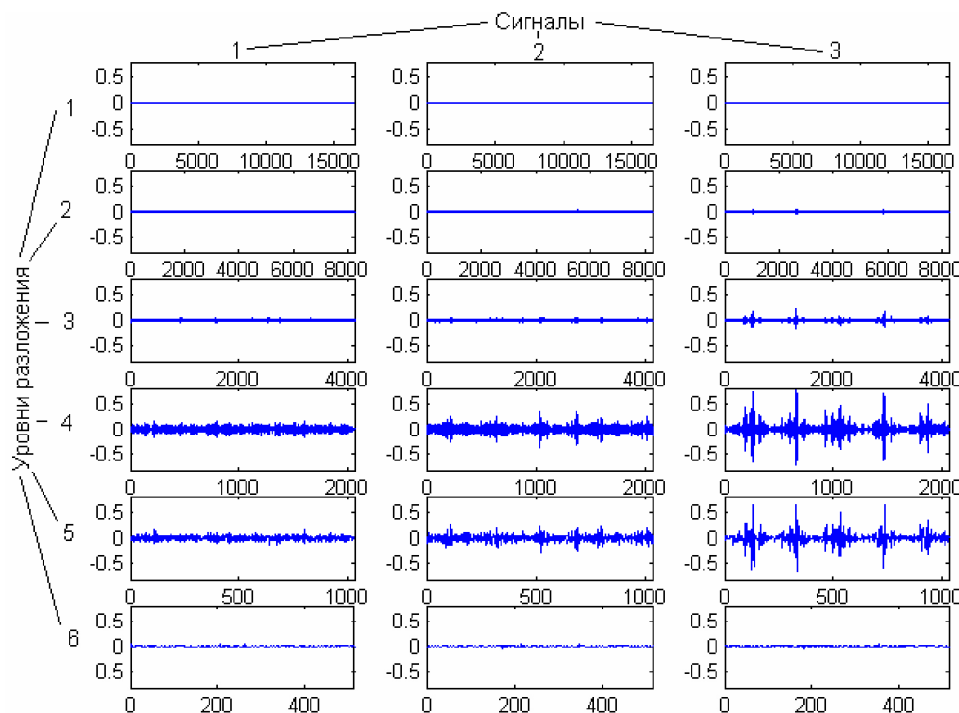


Рисунок 6 – Детализирующие коэффициенты на 6 уровнях при БВП

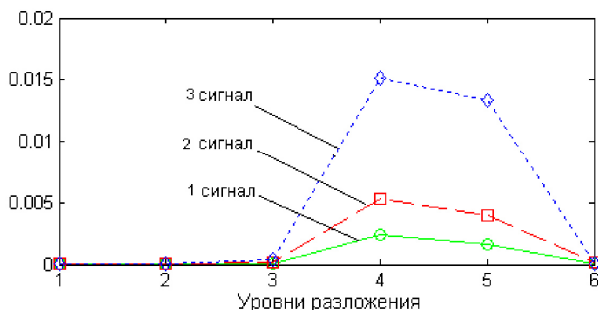


Рисунок 7 – Чувствительность СКЗ детализирующих коэффициентов на 6 уровнях при БВП к изменению износа

Установлено, что информативным параметром, характеризующим состояние режущего инструмента, является энергия детализирующих коэффициентов вейвлет-разложения сигналов. На рис. 6 показаны детализирующие коэффициенты, как результаты декомпозиции трех сигналов, представленных на рис. 1, на шести уровнях.

На рис. 7 изображена чувствительность СКЗ детализирующих коэффициентов на каждом из шести уровней к изменению износа. Из рисунка видно, что наиболее информативными являются 4-й и 5-й уровни разложения. В подобных задачах СКЗ детализирующих коэффициентов в выделенных уровнях могут быть использованы для определения состояния исследуемого объекта.

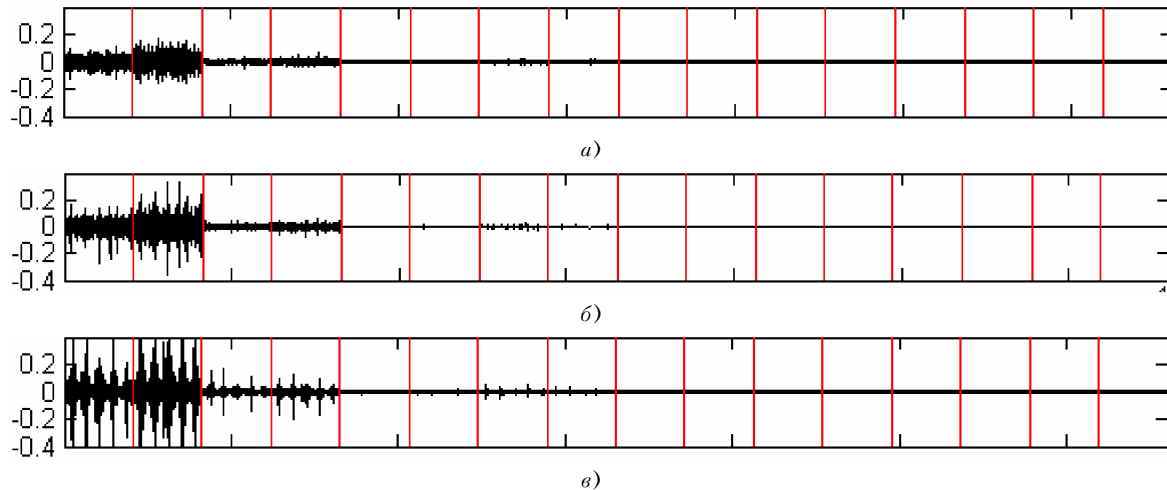


Рисунок 8 – Результати ПВП на четвертому рівні розкладу для сигналів, представлених на рис. 1, а (а), рис. 1, б (б), рис. 1, в (в)

При БВП на кожному шагу декомпозирується лише низькочастотна компонента сигналу. Ефективне використання даного алгоритма виходить з факта про більшу інформативність низькочастотної частини спектра сигналу, що для багатьох випадків не завжди справедливо.

Не виключено, що більш детальну інформацію про характеристики звукового сигналу в деяких випадках можна отримати, розклавши сигнал за допомогою пакетів вейвлетів, тим самим, проаналізувавши як низькочастотні, так і високочастотні складові сигналу. Дану процедуру називають пакетним вейвлет-перетворенням (ПВП) [6–9]. В цьому випадку відбувається заміна вейвлета $\psi(t)$ на два нових вейвлета: (8) і (9).

$$\psi_{2j}(t) = \sqrt{2} \sum h_n \psi_j(2t - n), \quad (8)$$

$$\psi_{2j+1}(t) = \sqrt{2} \sum g_n \psi_j(2t - n). \quad (9)$$

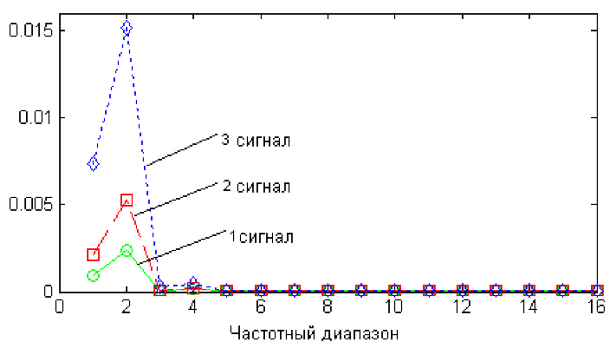


Рисунок 9 – Чувствительность окон при ПВП к изменению износа

Схема ПВП представлена на рис. 5, б.

На рис. 8 показаны результаты ПВП на четвертом уровне. В результате имеем 16 окон. СКЗ коэффициентов в этих окнах определяют энергетический уровень сигнала в соответствующих частотных диапазонах. На рис. 9 показана чувствительность окон к изменению износа. Выбранные окна могут быть приняты за значимые параметры в задаче диагностики состояния объекта.

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ

По результатам ПВП (рис. 9) ярко выражены различия значений энергетических уровней сигналов в первом, втором диапазонах и, менее заметно, в четвертом диапазоне, в то время как по результатам преобразования Фурье (рис. 4) данные различия были заметны только во втором и, в меньшей степени, первом диапазонах. Следовательно, ПВП может в большей мере описать состояние исследуемого объекта. При этом применение метода ПВП требует больше времени на обработку звукового сигнала, чем преобразование Фурье (БФП), что можно увидеть из табл. 1. В данной таблице приведено сравнение методов БФП, БВП, ПВП по скорости обработки сигнала.

Таблица 1 – Сравнение методов по времени обработки сигнала

Время обработки одного сигнала, с	БФП	БВП	ПВП
минимальное	0,015	0,015	0,079
максимальное	0,016	0,031	0,141

Данные параметры могут варьироваться в зависимости от длины обрабатываемого сигнала, частоты дискретизации сигнала, программной среды, в которой обрабатывается сигнал, способа реализации алгоритма, быстродействия ЭВМ и т. д. Поэтому приведенные результаты имеют относительный характер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбор метода обработки сигнала не может ограничиваться лишь значением параметра скорости обработки. Он должен вытекать из контекста поставленных задач и целей. Примером может быть необходимость наблюдения сигнала во времени. В таком случае применение преобразования Фурье будет нецелесообразным, поскольку результаты будут усреднены по всей длительности сигнала, в то время как вейвлет-преобразование успешно справится с такой задачей. Немаловажно учитывать требования к предъявляемой точности обработки сигнала. Обычно достижение высокой точности сопровождается увеличением длительности обработки сигнала и наоборот. Следовательно, главной задачей является подбор рационального способа обработки сигнала, чтобы с приемлемой скоростью и в достаточной мере описать необходимые характеристики акустического сигнала.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Гольденберг А. М., Матюшкин Б. Д., Поляк М. Н. Цифровая обработка сигналов: Учеб. пособие для вузов. –

2-изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1990. – 256 с.

2. Оппенгейм А. В., Шафер Р. В. Цифровая обработка сигналов: Пер. с англ./ Под ред. С. Я. Шаца. – М.: Связь, 1979. – 416 с.
3. Поликар Р. Введение в вейвлет-преобразование. – СПб.: АВТЭКС, 2001. – 59 с.
4. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. – 1996. – Т. 166, № 1. – С. 1145–1170.
5. Новиков Л. В. Основы вейвлет-анализа сигналов. Учебное пособие. – СПб., МОДУС+, 1999. – 152 с.
6. Дремин И. М., Иванов О. В., Нечитайло В. А. Вейвлеты и их использование // Успехи физических наук. – 2000. – Т. 171, № 5. – С. 465–501.
7. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Солон-Пресс, 2004. – 400 с.
8. Чуи К. Введение в вейвлеты. М.: Мир, 2001. – 412 с.
9. Jaideva C. Goswami, Andrew K. Chan. Fundamentals of wavelets. Theory, algorithms and applications. – Wiley Interscience, 1999. – 324 p.

Надійшла 11.09.07

Представлені методи вейвлет-перетворення (швидке та пакетне) та перетворення Фур'є для обробки віброакустичного сигналу в контексті їх використання в задачах діагностики об'єктів. Для кожного методу виявлені характеристики (результати обробки віброакустичного сигналу), пов'язані зі станом об'єкта, що досліджується. Виконано порівняння методів за часом обробки сигналів.

The methods of wavelet analysis (fast and packet wavelet transform) and Fourier-transform for vibroacoustic signal processing in the context of their application for the task of object diagnostics are presented. The characteristics (results of vibroacoustic signals processing), related to the object state under consideration are revealed for each method. The methods comparison by signal processing time is performed.

УДК 658.5.011.56:681.3

В. И. Дубровин, Л. Ю. Дейнега

ПОДСИСТЕМА ВИЗУАЛИЗАЦИИ БАЗЫ ЗНАНИЙ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

В статье представлена автоматизированная подсистема визуализации базы знаний, применение которой упрощает работу пользователя с экспертной системой. Приведена структура представления знаний, функциональные возможности подсистемы и пример ее использования.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений систем поддержки принятия решений являются экспертные системы (ЭС). ЭС – особые компьютерные программы, мо-

делирующие действия эксперта-человека при решении задач в какой-либо предметной области на основе накопленных знаний, составляющих базу знаний (БЗ) [1].

Основной особенностью ЭС является ориентация на решение практических задач в неформализованных предметных областях. При этом результаты работы ЭС сравнимы с результатами, получаемыми человеком-экспертом. Накопленные знания определенным образом представлены в памяти ЭВМ в виде БЗ и, в отличие от знаний человека-эксперта, достаточно мобильны [2].

© Дубровин В. И., Дейнега Л. Ю., 2007