

## Выявление дефектов подшипника качения с использованием системы признаков на основе теории активного восприятия

Гай В. Е., Кондратьев В. В., Утробин В. А., Макаров Н. Н.

Предлагается метод выявления дефектов подшипника качения на основе анализа изменений виброхарактеристик подшипника во времени. Признаковое описание вибросигнала формируется на основе теории активного восприятия. Классификация состояния подшипника выполняется на основе метода сравнения с эталоном, мера близости – метрика  $L_1$ . Точность классификации состояния подшипника на основе предложенного метода составляет 95–100 %.

*Ключевые слова:* вибрационный сигнал, подшипник качения, цифровая обработка сигналов, диагностика, теория активного восприятия.

### Введение

Одним из самых важных элементов двигателя является подшипник [1]. Обычно, они устанавливаются в агрегаты и сборочные единицы маслосистемы. Повреждение подшипника может стать причиной выхода из строя всего механизма. Поэтому актуальной задачей является диагностика состояния подшипника, своевременное обнаружение и предупреждение его отказов. Известны различные способы диагностики подшипника качения. Например, в [1] описывается способ диагностики подшипника на основе контроля лёгкости его вращения и определения акустического шума. Данный метод является субъективным методом контроля. Современные подходы к диагностике состояния подшипника основаны на цифровом анализе изменений виброхарактеристик подшипников во времени.

Систему диагностики состояния подшипника по его вибросигналу можно представить как систему распознавания образов. С точки зрения системного анализа задача распознавания (в широком смысле) является совокупностью трёх этапов: предварительная обработка, вычисление признаков и принятия решения (см. рис. 1).



Рис. 1. Этапы распознавания вибрационного сигнала

## **Этапы решения задачи распознавания**

Рассмотрим методы, применяемые на разных этапах решения задачи распознавания [2-4]:

1) этап предварительной обработки, обычно, заключается в фильтрации вибросигнала. Учитывая, что задача распознавания решается в условиях априорной неопределённости, т. е. не известно никакой информации о помехе, выбрать подходящий фильтр сложно [4];

2) для создания описания вибросигнала используются следующие признаки: коэффициенты спектра Фурье, коэффициенты вейвлет-спектра, мел-частотные кепстральные коэффициенты и т. д.;

3) на этапе классификации по имеющимся признакам выполняется отнесение входного сигнала к одному из известных классов (например, нормальное состояние / наличие дефекта). Для этого, обычно используются: скрытая марковская модель, модель гауссовой смеси, нейронная сеть, метод опорных векторов. Применение описанных моделей предполагает их предварительное обучение и выбор параметров, что, в условиях априорной неопределённости является не тривиальной задачей [5].

Известны проблемы, связанные с применением существующих методов распознавания образов для решения задач вибродиагностики [6]:

1) проблема формирования исходного описания: данная проблема связана с тем, что существующие модели и методы распознавания адаптированы к конкретному классу прикладных задач и требуют априорного знания свойств анализируемых сигналов;

2) проблема формирования системы признаков, связанная с выбором конечного множества признаков, обеспечивающих однозначность решения задачи классификации на этапе распознавания и отвечающая требованиям необходимости и достаточности. Этап выбора системы признаков необходим для сокращения размерности входного описания. Учитывая, что задача сокращения размерности – оптимизационная задача, то для её решения необходимо использование критерия информативности. Отсутствие модели априорной неопределённости и модели её раскрытия породило большое количество методов в выборе критерия информативности, что, в свою очередь, порождает большое число возможных вариантов признаков;

3) проблема принятия решений в условиях априорной неопределённости. Этап принятия решения заключается в сравнении с имеющимся эталоном признакового описания анализируемого вибросигнала. Предполагается, что эталону соответствует компактное множество точек в системе признаков. Однако помехи, структурные изменения одного и того же представителя класса приводят к перекрытию классов. Поэтому проблема принятия решения замыкается на проблемы формирования системы признаков, позволяющей сформировать эталон, имеющий компактное представление.

Использование методов теории активного восприятия (ТАВ) [6] позволяет решить описанные проблемы. Базовым в теории активного восприятия является  $U$ -преобразование, которое заключается в последовательном применении к анализируемому сигналу преобразований интегрирования и дифференцирования. Настоящая работа посвящена применению данной теории к анализу вибросигналов.

Рассмотрим реализацию этапов системы распознавания с использованием ТАВ.

### **Формирование признакового описания вибросигнала**

Предлагаемый метод вычисления признакового описания вибросигнала состоит из следующих шагов.

1) Входной вибросигнал  $S$  представляется как множество сегментов  $s = \{s_k\}$ ,  $k = \overline{1, N}$ , где  $N$  – число сегментов, длина сегмента составляет  $M$  отсчётов.

2) К каждому сегменту  $s_k$  применяется  $U$ -преобразование, в результате формируется спектральное представление каждого сегмента:  $u_k = U[s_k]$ ,  $\mathbf{u} = \{u_k\}$ , где  $U$  – оператор вычисления  $U$ -преобразования; пример вычисления  $U$ -преобразования, а также замкнутых групп приведён в [7, 8].

3) По вычисленному спектральному представлению  $u_k$  сегмента  $s_k$  определяются замкнутые группы:  $p_k = P[u_k]$ ,  $\mathbf{p} = \{p_k\}$ , где  $P$  – оператор вычисления замкнутых групп.

4) Вычисляется гистограмма замкнутых групп:  $h = H[\mathbf{p}]$ , где  $H$  – оператор формирования одномерной гистограммы замкнутых групп, которая и является признаковым описанием вибросигнала, размерность гистограммы составляет 840 элементов. Размерность гистограммы определяется количеством возможных замкнутых групп, что описано в алгебре групп теории активного восприятия [6].

### **Принятие решения (классификация)**

Процедура классификации основана на методе сравнения с эталоном с использованием метрики  $L_1$ :

$$a(x) = \arg \min_{c \in C, v \in \overline{1, V_c}} H(h_{c,v}, h_x),$$

где  $H(h_{c,v}, h_x) = \sum_{k=1}^K |h_{c,v}(k) - h_x(k)|$ ,  $K = 840$  – количество замкнутых групп,  $k$  – порядковый номер признака,  $V_c$  – количество эталонов для класса  $c$ ,  $C$  – множество классов, описывающих состояние подшипника (нормальное состояние / дефект подшипника),  $h_c$  – признаковое описание эталона, относящегося к классу  $c$ ,  $h_x$  – признаковое описание, вычисленное по классифицируемому сигналу  $x$ ,  $H$  – оператор вычисления метрики  $L_1$ . Анализируемый сигнал относится к классу

соответствующему тому эталону, расстояние до которого от входного сигнала окажется минимальным.

### Вычислительный эксперимент

Вычислительный эксперимент выполнялся на основе базы данных вибросигналов, описанной в [4]. Указанная база содержит записи вибросигналов подшипников качения с дефектами (на внешней, внутренней дорожке и на теле качения, см. рис. 2) и без дефектов. Размеры дефектов составляют 0.007, 0.014, 0.021 и 0.028 дюйма в диаметре. Дефекты внешней дорожки являются стационарными, поэтому положение дефекта относительно зоны нагрузки подшипника влияет на вибрационный сигнал, генерируемый подшипником. Для исследования влияния этого эффекта дефекты на внешнюю дорожку наносились в трёх позициях.

Таким образом, в рамках имеющейся базы данных можно классифицировать двадцать одно состояние подшипника: 1) нормальное; 2-5) дефект тела качения (размер дефекта: 0.007, 0.014, 0.021, 0.028); 6-9) дефект внутренней дорожки (размер дефекта: 0.007, 0.014, 0.021, 0.028); 10-21) дефект внешней дорожки (положение дефекта: *centr*, *orth*, *opp*; размер дефекта: 0.007, 0.014, 0.021, 0.028).

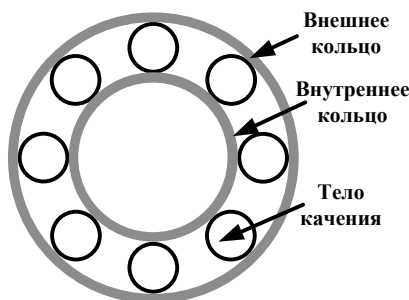


Рис. 2. Схема подшипника

Схема стенда для записи вибросигналов показана на рис. 3. Исследуемый подшипник устанавливается на вал двигателя. Для регистрации вибросигнала используются акселерометры, которые размещаются на корпусе двигателя в месте подключения нагрузки (DE), рядом с вентилятором (FE) и на поддерживающем устройстве (BA). Запись вибросигналов выполняется с частотой дискретизации 12 кГц и 48 кГц.

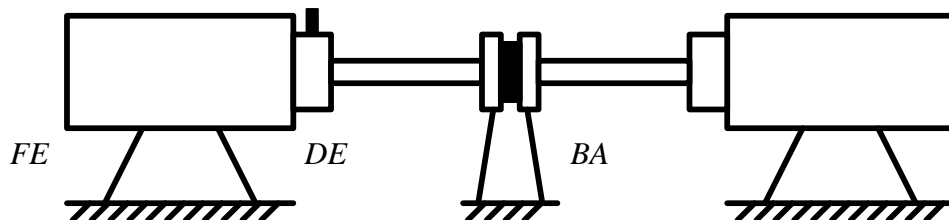


Рис. 3. Стенд для регистрации вибросигналов

Вычислительный эксперимент выполнялся на ноутбуке Asus K70AD, процессор – AMD Turion(tm) II Dual-Core Mobile M500, 2200 МГц (два ядра), объем оперативной памяти – 4 Гб.

Вычислительный эксперимент выполнялся на основе метода перекрёстной проверки, для разбиения выборки использовался контроль по отдельным объектам (leave-one-out).

Результаты тестирования существующих методов классификации состояния подшипника качения приведены в табл. 1.

Табл. 1. Результаты тестирования методов вибродиагностики

Источ- ник	Признаки	Количество признаков	Метод классификации	Количество классифи- цируемых состояний	Точность распознавания ( $R$ , в %)
[2]	Мел-частотные кепстральные коэффициенты	16	Скрытая марковская модель	4	99
[2]	Мел-частотные кепстральные коэффициенты	16	Модель гауссовой смеси	4	94
[3]	Коэффициенты пакетного вейвлет разложения	32	Метод опорных векторов	21	99.3
[3]	Статистические признаки	26	Метод опорных векторов	21	92.88
[3]	Спектр комплексной оггибающей	72	Метод опорных векторов	21	85.47
[3]	Коэффициенты пакетного вейвлет разложения	32	$K$ ближайших соседей	21	97.76-97.35
[3]	Статистические признаки	26	$K$ ближайших соседей	21	96.64-95.69
[3]	Спектр комплексной оггибающей	72	$K$ ближайших соседей	21	99.83-99.92
[4]	Свойства коэффициентов вейвлет разложения	5	Сеть радиально- базисных функций	4	72.1
[4]	Свойства коэффициентов вейвлет разложения	5	Многослойный персептрон	4	100
[4]	Свойства коэффициентов вейвлет разложения	5	Вероятностная нейронная сеть	4	97.5

В табл. 2 приведены результаты исследования предлагаемого метода на вибросигналах, записанных на различных участках стенда. В заголовке таблицы в скобках указано количество классифицируемых состояний, т. к. вследствие отсутствия данных количество состояний подшипника не всегда равно 21.

Табл. 2. Зависимость точности распознавания от длины вибросигнала

Длина сигнала (в отсчётах), $L$	Точность распознавания ( $R$ , в %)				
	Част. диск.: 48 кГц		Част. диск.: 12 кГц		
	DE (14)	FE (14)	DE (16)	FE (14)	BA (13)
	длина сегмента – 32 отсчёта				
60000	100	100	100	100	100
30000	78	100	100	92	84
15000	64	100	100	92	84
10000	51	71	81	85	76
	длина сегмента – 64 отсчёта				
60000	100	100	93	92	100
30000	92	100	93	85	84
15000	92	92	81	71	84
10000	78	78	56	71	84
	длина сегмента – 128 отсчётов				
60000	92	92	100	75	92
30000	71	78	87	43	61
15000	50	57	68	43	46
10000	50	57	25	43	23

Сравним результаты вычислительного эксперимента, полученные в данной работе, с результатами, полученными в [3] с использованием метода классификации  $K$  ближайших соседей. Полученный выигрыш в точности классификации объясняется выбранным признаковым описанием вибросигнала. В данной работе, после выполнения этапа вычисления спектрального представления сигнала, с помощью алгебры групп осуществляется корреляционный анализ связей между элементами полученного спектра, являющимися структурными элементами вибросигнала. В работе [3] в качестве системы признаков используется спектральное представление сигнала (вейвлет разложение) или признаки, вычисляемые непосредственно по временному представлению сигнала.

Повышение точности классификации возможно за счет применения двухэтапной процедуры [10]. При этом на первом этапе принимается решение о наличии или отсутствии дефекта в тестируемом подшипнике. Если в результате бинарной классификации на первом этапе обнаружен дефект, то на втором этапе выполняется распознавание типа дефекта.

### Заключение

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет сделать следующие выводы.

1) уменьшение длины сигнала (для построения обучающей и контрольной последовательности) приводит к снижению точности распознавания. Это связано с уменьшением объёма данных, по которым формируется гистограмма замкнутых групп/

2) Уменьшение размера сегмента, на которые разбивается анализируемый сигнал, приводит к повышению точности создаваемого признакового описания (в результате, повышается точность распознавания) и к увеличению времени создания признакового описания.

3) Из приведённых таблиц, описывающих точность распознавания вибросигналов, видно, что для двадцати одного класса возможных состояний подшипника сто процентная точность достигается только при использовании предложенного метода.

### **Библиографический список**

1. Панов В.А. Виброакустическая диагностика неразборных подшипников при ремонте авиационных двигателей // Двигатель. – 2011. – Т. 76. – № 4. – С. 28-31.
2. Nelwamondo F.V., Marwala T., Mahola U. Early classifications of bearing faults using hidden Markov models, Gaussian mixture models, mel-frequency cepstral coefficients and fractals // International Journal of Innovative Computing, Information and Control. – 2006. – Vol. 2. – N. 6. – P. 1281–1299.
3. Boldt F. de A., Rauber T.W., Varejão F.M. Feature Extraction and Selection for Automatic Fault Diagnosis of Rotating Machinery // X Encontro Nacional de Inteligência Artificial e Computacional (ENIAC). – Fortaleza, Ceará, 2013. – P. 213-220.
4. Al-Raheem K.F., Abdul-Karem W. Rolling bearing fault diagnostics using artificial neural networks based on Laplace wavelet analysis // International Journal of Engineering, Science and Technology. – 2010. – Vol. 2. – N. 6. – P. 278-290.
5. Баранов В.Г., Кондратьев В.В., Милов В.Р., Зарипова Ю.Х. Нейросетевые алгоритмы распознавания образов // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2007. № 11. С. 20-27.
6. Утробин В.А. Элементы теории активного восприятия изображений // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2010. – Т. 81. – № 2. – С. 61-69.
7. Гай В.Е. Метод оценки частоты основного тона в условиях помех // Цифровая обработка сигналов. – 2013. – № 4. – С. 65-71.
8. Гай В. Е., Айнуллин Д. Т. Алгоритм сегментации звукового сигнала по признаку тон/шум в условиях априорной неопределенности // Нейрокомпьютеры, № 11, 2014, С. 32-37.
9. Баранов В.Г., Милов В.Р., Зарипова Ю.Х., Эпштейн А.Ю. Интеллектуализация системы распознавания образов на основе сравнения эффективности методов классификации // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. Т.8. № 2, С. 35-39.
10. Баранов В.Г., Кольцов В.А., Милов В.Р., Милов Д.В., Гай В. Е. Экспертная система оценки состояния элементов транспортно-технологического оборудования в процессе перегрузочных операций // Информационно-измерительные и управляющие системы, №7, 2013, С. 67-71.