

УДК 621.438.003

Т.П. ГРЫЗЛОВА, Д.С. ШАЛАЕВ

*Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьева, Россия*

## ДЕКОМПОЗИЦИЯ СИГНАЛОВ СЛОЖНЫХ ИСТОЧНИКОВ НА ОСНОВЕ ФУНКЦИЙ СЛОЖНОСТИ WAVELET-КОЭФФИЦИЕНТОВ

*Рассмотрено одно из возможных решений проблемы обработки сигналов сложных источников и выбора признаков для диагностики их состояния или оценки последовательности состояний. Формализована система структурного анализа сигналов сложных источников. На примере задачи диагностики подшипников трансмиссии ГТД исследована полезность функции сложности типа I, наиболее часто применяемой при структурном анализе сигналов. Приведены результаты исследования характеристик функций сложности типа I для вибрационных диагностических сигналов и их Wavelet-преобразований. Показано, что результаты структурного анализа сигналов можно использовать для принятия решения о состоянии подшипников трансмиссии ГТД в случаях, когда используемый в настоящее время метод приводит к необоснованному съему двигателей. Отмечено, что функции сложности Wavelet-коэффициентов, хотя и помогают уточнить результаты анализа, но имеют скорее обобщающий, чем различающий характер.*

**Ключевые слова:** сложный источник, подшипники трансмиссии ГТД, диагностика, цифровые сигналы, методы анализа, сегментация, функция сложности, Wavelet-коэффициенты

### Введение

В настоящее время методы цифровой обработки сигналов всесторонне исследованы и используются для анализа источников различной природы. Все шире применяется Wavelet-анализ. Но собственно, ни спектральный, ни Wavelet-анализ не дают ответа на вопрос, какие признаки для диагностики состояния источника или обнаружения кратковременных событий выбрать. Так, в [1] предложен целый ряд энергетических характеристик, на основе которых вычисляются специальные характеристики локальной перемежаемости и контрастности Wavelet-коэффициентов.

Далеко не для каждой конкретной задачи диагностики состояния сложного источника решена проблема выбора оптимального метода обработки диагностических сигналов и выбора признаков для оценки его состояния или последовательности состояний. Сигналы, для анализа которых необходим процесс их расчленения на отдельные события (сегментация, декомпозиция), называют структурными. Реально метод сегментации (декомпозиции) оказывается пригодным для решения очень широкого класса задач и в настоящее время активно исследуется как метод машинного обучения.

На основе выделения участков, на которых поведение кривой резко отличается от ее характера в соседних областях, может быть построено сокра-

щенное описание кривых. Речь идет о человеко-машинных методах, помогающих упорядочить и структурировать большие наборы данных в виде небольшого числа сходных элементов. Подход к проблеме обработки данных как к проблеме выработки системы терминов, позволяющих коротко описывать эмпирические данные, был предложен в [2] и оказался достаточно универсальным.

Выделяют две группы источников экспериментальных кривых, для анализа которых необходим лингвистический подход. К первой группе относятся источники, соответствующие представлению об исследуемом явлении как о процессе, проходящем в своем развитии ряд стадий, информацию о которых содержат отдельные информативные участки. Точки стыка информативных участков интерпретируются как моменты смены состояний процесса. Задачей сегментации является выделение точек, соответствующих этим моментам. Сигналы таких источников структурно подобны речевым. Источники экспериментальных кривых второй группы объединяются гипотезой, что исследуемый объект находится преимущественно в неизменном состоянии, время от времени покидая его под действием кратковременных возмущений. Информативные участки кривой рассматриваются как следы этих кратковременных возмущений на фоне сравнительно однородного процесса. Такая модель может быть справедлива для некондиционных подшипников трансмиссии ГТД в

задаче вибродиагностики системы подшипников трансмиссии ГТД [3]. Можно предположить, что вследствие вращения системы подшипников трансмиссии нетипичные участки сигналов, сложным образом связанные с неисправностями, повторяются, поскольку почти периодически повторяется пространственная конфигурация элементарных источников вибраций относительно датчиков

## 1. Метод структурного анализа сложных кривых

Методы исследования сложных экспериментальных кривых, предложенные в [2], включают сегментацию на основе функций сложности (ФС) трех типов. Значения функций вычисляются как: результаты сравнения соседних блоков данных длины  $b$  на основе векторов признаков (I-тип); ошибки аппроксимации элементарных участков кривой в заданной системе ортонормированных векторов (II-тип); ошибки экстраполяции элементарных участков (III-тип).

Экспериментальные данные разбиваются на блоки равной длины  $b$  (в отсчетах). Такие блоки назовем инструментальными. Их количество равно целой части  $l = N / b$ . Таким образом, сигнал длины  $N$  раскладывается на элементарные участки, инструментальные блоки равной длины

$$s_0^{N-1} \rightarrow e_0^{b-1} \cdot e_b^{2b-1} \cdot \dots \cdot e_{(i-1)b}^{ib-1} \cdot \dots \cdot e_{(l-1)b}^{lb-1}. \quad (1)$$

Эти блоки преобразуются в векторы признаков

$$e_{(i-1)b}^{ib-1} \rightarrow g_i, \quad (2)$$

по которым вычисляются значения ФС:

$$\Phi(g_i) = \left( g_i, \frac{1}{2}(g_{i-1} + g_{i+1}) \right). \quad (3)$$

Можно использовать непосредственно измеренные данные:

$$\Phi(e_i) = \left( e_i, \frac{1}{2}(e_{i-1} + e_{i+1}) \right). \quad (4)$$

Исследования эффективности функции сложности типа I показали ее непригодность для сегментации речевых сигналов [4], в то время как Wavelet-преобразование сигналов в базисе Хаара  $s(\tilde{t}) \rightarrow |w_1(\tilde{t}) \dots w_L(\tilde{t})|^T$  делает сегментацию на основе функций сложности возможной или повышает ее точность. Поэтому решение, необходимо ли Wavelet-преобразование сигнала для его разложения с использованием ФС или оно будет излишним, целесообразно принять после специальных исследований. Если выполняется Wavelet-преобразование, то ищутся сегменты в последовательностях коэффициентов разных уровней:

$$s_0^{N-1} \rightarrow w_0^{b-1} \cdot w_b^{2b-1} \cdot \dots \cdot w_{(i-1)b}^{ib-1} \cdot \dots \cdot w_{(l-1)b}^{lb-1}. \quad (5)$$

Здесь размер блока выбирается с тем, чтобы было можно выполнить Wavelet-преобразование на  $L$  уровней:  $b = 2^L$ .

## 2. Система анализа сигналов сложных источников

Сигнал  $s(\tilde{t})$  наблюдается на интервале  $\tilde{t} = [0, T]$  с шагом дискретизации  $\Delta t$ . Предполагается, что число отсчетов  $N = 2^n$ . Индексы отсчетов в последовательности  $s_0^{N-1}$  обозначены переменной  $t = 0..(N-1)$ , ей соответствуют отсчеты сигнала  $s(\tilde{t} = t \cdot \Delta t)$  в точках  $t \cdot \Delta t$ .

Методика обнаружения границ сегментов заключалась в следующем. Выполнялся  $L$ -уровневый Wavelet-анализ

$$s_0^{N-1} \rightarrow \begin{pmatrix} (w_1)_0^{N/2-1} \\ (w_2)_0^{N/4-1} \\ \dots \\ (w_L)_0^{N/2^L-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_1(s_t^{t+1}), t = 2 \cdot i_1, i_1 \in 0..(N/2-1) \\ w_2(s_t^{t+3}), t = 2^2 \cdot i_2, i_2 \in 0..(N/4-1) \\ \dots \\ w_L(s_t^{t+2^L-1}), t = 2^L \cdot i_L, i_L \in 0..(N/2^L-1) \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Далее вычислялись функции сложности Wavelet-коэффициентов на разных уровнях:

$$s_0^{N-1} \rightarrow \begin{pmatrix} (w_1)_0^{N/2-1} \\ (w_2)_0^{N/4-1} \\ \dots \\ (w_L)_0^{N/2^L-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Phi_1(j_1) \\ \Phi_2(j_2) \\ \dots \\ \Phi_L(j_L) \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Вычисляется последовательность скалярных произведений блоков Wavelet-коэффициентов для каждого уровня:

$$\rho_0^{N/2^i} \rightarrow \rho_{i,j} \left( w_j^{j+b-1}, w_{j+b}^{j+2b-1} \right), j = 0.. \frac{N}{2^i}. \quad (8)$$

Функция сложности на уровне  $i$  привязана к номеру блока  $j$  в пределах уровня и вычисляется как среднее двух соседних скалярных произведений:

$$\Phi_{i,j} = \left( \rho_{i,j}, \frac{1}{2}(\rho_{i,j-1} + \rho_{i,j+1}) \right). \quad (9)$$

Таким образом, строится функция сложности и для декомпозиции сигнала ищутся ее экстремумы. К сожалению, обычно наблюдается много ложных локальных экстремумов. Значения функции сложности сравниваются с порогом. Если функция сложности превышает пороговое значение, то принимается решение о наличии границы. Если по индексу  $j_i$  элементарной последовательности на уровне  $i \in \{1, 2, \dots, L\}$  обнаруживается граница сегмента, то пересчет в индекс сигнальной последовательности выполняется по правилу:

$$t_{ki} = j_i \cdot 2^i \cdot b, \quad k_i = 1, 2, \dots, K_i, \quad (10)$$

где  $k_i$  – индекс границ сегментов. Моменты перехода между сегментами вычисляются как  $\tilde{t}_{ki} = t_{ki} \cdot \Delta t$ . Методическая погрешность определения границы зависит от уровня и равна  $\varepsilon \in 0..-(2^L + b)$ .

### 3. Результаты исследования функций сложности в задаче вибродиагностики подшипников трансмиссии ГТД

Исследовались функции сложности вибраций, зарегистрированных во время испытаний подшипников трансмиссии ГТД. Вибрации зарегистрированы с частотой дискретизации 10 кГц. Длина реализаций – 30000 отсчетов. Выборка включала в себя 6 сигналов, зарегистрированных при исправной системе подшипников (класс С), 6 сигналов, анализ которых по используемой в настоящее время методике диагностики на основе показаний ИВУ-1 привел к необоснованному съему двигателей (класс N) и 7 сигналов, полученных при неисправных подшипниках (класс В).

#### 3.1. Функции сложности сигналов

Наиболее типичные и характерные функции сложности представлены на рис. 1. ФС сигналов вычислялись в соответствии с (1) – (3), в качестве признаков брались коэффициенты корреляции соседних блоков. Для выявления структуры пришлось подбирать размер блока, был выбран  $b = 64$ .

Введем обозначения для формального описания функций сложности, представленного табл. 1: СП – случайный процесс (рис. 1, C3, C4, B3, N5), ПВ – регулярные выбросы (рис. 1, B1, B2, B6), СВ – случайные выбросы, ПВ- пачки выбросов, ОВ – одиночные выбросы, ТО – тренд огибающей максимумов (N5, B6). На основе формализованного описания функций сложности можно сделать ряд выводов:

– ФС кондиционных подшипников является случайным процессом небольшой мощности, если в нем встречаются выбросы, то они имеют небольшую амплитуду и случайный или одиночный характер;

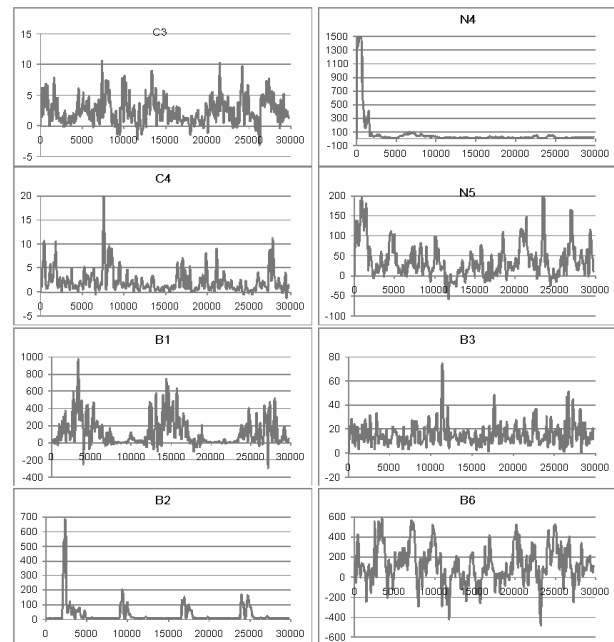


Рис. 1. Функции сложности некоторых сигналов вибродиагностики подшипников трансмиссии ГТД

Таблица 1

Описание функций сложности сигналов вибродиагностики,  $b = 64$

S(t)	Сигнал		Выбросы			
	Тип	Уровень	Тип	Уровень	Тип	Уровень
C1	СП	-2..1	СВ	~-2		
C2	СП	~3..5	СВ	~25..10		
C3	СП	~3, до 5				
C4	СП	-1..2	СВ	~10	ОВ	~20
C5	СП	-1..2	СВ	~3..4	ОВ	~7
C6	СП	~1	СВ	~3..4		
N1	СП	~100	ПВ	~500	ТО	~400
N2	СП	~5..10	ПВ	~60		
N3	СП	~50..10			ТО	~100
N4	СП	~5	ПВ	~50	ОВ	~1500
N5	СП	~50..80			ТО	-100, ~200
N6	СП	~3	СВ	~6		
B1	ПВ		ПВ	~25..70		
B2	ПВ	>150				
B3	СП	~15	ПВ	~30..50	провалы	
B4	СП	-500..500				
B5	СП	~50				
B6	ПВ	~400	ПВ	~-200	ТО	~1000
B7	ПВ	>500				

– ФС необоснованно снятых подшипников всегда можно характеризовать как случайные процессы нормальной или средней мощности, выбросы их по мощности соизмеримы с выбросами некондицион-

ных подшипников, но имеют характер пачек с выраженным трендом огибающей;

– необоснованно снятый подшипник N6 не был бы снят, если бы использовались характеристики ФС, поскольку они совпадают с характеристиками кондиционных подшипников;

– некондиционные подшипники имеют ФС типа регулярных выбросов, в том числе отрицательного знака; если они характеризуются как случайные процессы, то имеют очень большую мощность без характерных выбросов.

Естественно, требуется работать над более четкой терминологией, требуется проверка на контрольной выборке. Поскольку оценка визуальна, надо проводить ее при одинаковых масштабах по оси времени. Вероятно, словарь будет зависеть от масштаба наблюдения.

### 3.2. Функции сложности Wavelet-коэффициентов

ФС вычислялись в соответствии с (5) – (10). Для исследования были отобраны наиболее близкие по характеристикам ФС сигналов данные C3, N5, B3 и B6. Wavelet-коэффициенты первого уровня у сигналов разных классов становятся более похожими (обобщение), чем ФС сигналов, что естественно, поскольку спектры разностей обычно расширяются.

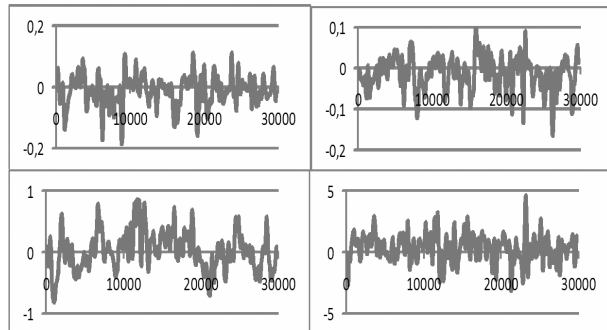


Рис. 2. Функции сложности Wavelet-коэффициентов 1-го уровня (слева – C3, N5; справа – B3, B6)

Коэффициенты более низкой частоты зависят от класса, хотя не так явно как ФС сигналов (рис. 3 и табл. 2). У сигналов кондиционных подшипников диапазон изменения ФС практически не зависит от уровня, а если и меняется, то симметрично. У неисправных подшипников при переходе от 1-го к 3-му уровню растет диапазон изменения ФС, но симметрично относительно нулевого уровня. Что касается необоснованно снятых подшипников, то ФС растет при увеличении уровня, но асимметрично. Характер ФС – случайный процесс (СП) на уровнях  $l=1-2$ , затем низкочастотный случайный процесс (НЧ) или плавные колебания (ПК), наконец на уровнях  $l=5-6$  наблюдаются колебательные тренды (КТ).

Таблица 2

Описание функций сложности Wavelet-коэффициентов сигналов вибродиагностики.

S(t)	W1		W2		W3	
	Тип	Диап.	Тип	Диап.	Тип	Диап.
C3	СП	$\pm 0,1$	СП	$\pm 0,3$	НЧ	$-0,5..0,2$
N5	СП	$\pm 0,8$	СП	$\pm 1$	НЧ	$-4..-10$
B3	СП	$\pm 0,1$	СП	$\pm 0,3$	НЧ	$\pm 1$
B6	СП	$-1..4$	СП	$-6..6$	НЧ	$-20..20$
S(t)	W4		W5		W6	
	Тип	Диап.	Тип	Диап.	Тип	Диап.
C3	НЧ	$-0,2..+0,8$	ПК	$\pm 2$	ПК	$\pm 0,2$
N5	НЧ	$-2..20$	КТ	$-15..10$	ПК	$-1..10$
B3	НЧ	$1..-1$	КТ	$-0,5..1,5$	КТ	$0,4..-0,2$
B6	НЧ	$\pm 30$	КТ	$-80..40$	КТ	$0..40$

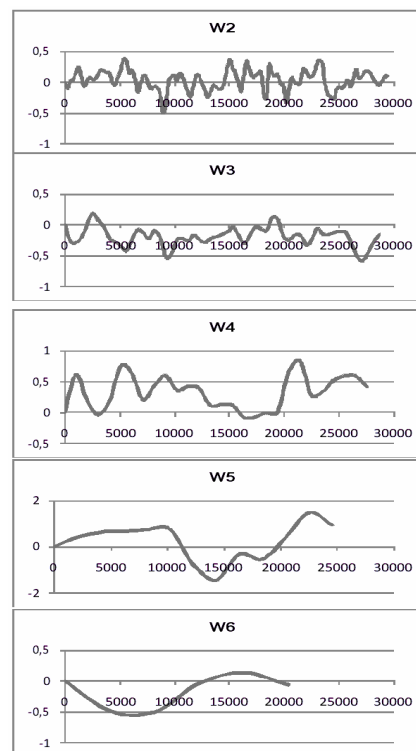


Рис. 3. Функции сложности Wavelet-коэффициентов 2 – 6-го уровней для типичного сигнала исправных подшипников трансмиссии ГТД

### Заключение

Исследование поведения функций сложности сигналов и Wavelet-коэффициентов показывают, что их можно использовать для поддержки принятия решения о состоянии подшипников трансмиссии ГТД. Предложенный метод хорошо приспособлен для изучения структуры неоднородных процессов. Выполненные исследования являются необходимым этапом для перехода к системам автоматического принятия решения, элементами ко-

торых должны стать оптимальные приемники процессов соответствующего типа. Самая существенная проблема – настройка порогов и размеров блоков данных, решение этой задачи – направление дальнейших исследований по совершенствованию методов структурного анализа.

### Литература

1. Астафьева Н.М. Вейвлет анализ: основы теории и примеры применения / Н.М. Астафьева // Успехи физических наук. – Ноябрь, 1996. – Т. 166, № 11. – С. 1145-1170.
2. Браверман Э.М. Структурные методы

обработки данных / Э.М. Браверман, И.Б. Мучник. – М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. – 464 с.

3. Шепель В.Т. Выбор признаков для диагностики технического состояния трансмиссионных подшипников ГТД / В.Т. Шепель, Б.И. Комаров, Т.П. Грызлова // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 8 (24). – С. 97-100.

4. Грызлова Т.П. Эффективность Wavelet-преобразования для сегментации сигналов сложных источников / Т.П. Грызлова, Д.С. Шалаев // Материалы Всероссийских научных и научно-технических конференций. XXVII ВНТК «Информационные технологии в науке, проектировании и производстве». – Нижний Новгород: НИМЦ «Диалог», 2009. – С. 9.

Поступила в редакцию 29.05.2009

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Т. Шепель, начальник отдела сертификации двигателей «ОАО «Сатурн», Рыбинская государственная авиационная технологическая академия, Рыбинск, Россия.

### ДЕКОМПОЗИЦІЯ СИГНАЛІВ СКЛАДНИХ ДЖЕРЕЛ НА ОСНОВІ ФУНКЦІЙ СКЛАДНОСТІ WAVELET-КОЕФІЦІЄНТІВ

Т.П. Грызлова, Д.С. Шалаєв

Розглянуто одне з можливих рішень проблеми обробки сигналів складних джерел і вибору ознак для діагностики їх стану або оцінки послідовності станів. Формалізована система структурного аналізу сигналів складних джерел. На прикладі задачі діагностики підшипників трансмісії ГТД досліджено корисність функцій складності типу I, найчастіше вживаною при структурному аналізі сигналів. Приведено результати дослідження характеристик функцій складності типу I для вібраційних діагностичних сигналів і їх Wavelet-перетворень. Показано, що результати структурного аналізу сигналів можна використовувати для ухвалення рішення про стан підшипників трансмісії ГТД у випадках, коли використовуваний в даний час метод приводить до необґрунтованого знімання двигунів. Відмічено, що функції складності Wavelet-коефіцієнтів, хоч і допомагають уточнити результати аналізу, але мають скоріше узагальнювальний, чим розрізняючий характер.

**Ключові слова:** складне джерело, підшипники трансмісії ГТД, діагностика, цифрові сигнали, методи аналізу, сегментація, функція складності, Wavelet-коефіцієнти.

### DECOMPOSITION OF THE SIGNALS OF THE COMPLEX SOURCE BASED ON COMPLEXITY – FUNCTION OF WAVELET-KOEFFICIENTS

T.P. Gryzlova, D.S. Shalaev

The complex sources, as they in the theory of information were defined, are considered. One of the possible solutions of the problem of the signals' processing and the features' extraction on purposes of diagnostics or states sequences estimation was proposed. A system of the structure's analysis of the complex sources' signals is formalized. On the task of a technical state assessment of the GTE transmission bearings, complexity functions of I-type as the more often used were tested for the utility. There were given results of the curves tracing that are I-type complexity functions of diagnostic vibrations and their Wavelet-transformations. The results of structure analysis of the signals were demonstrated to have properties for the technical state assessment of the GTE transmission bearings in the cases when the current method is incorreced in engine takeoffs. It was noted that complexity functions of the Wavelet-coefficients although are useful for improvement of analysis results but they are rather of the unifying nature than discriminating nature.

**Key words:** complex source, GTE transmission bearings, diagnostics, digital signals, analysis techniques, segmentation, complexity function, Wavelet-coefficients.

**Грызлова Татьяна Павловна** – канд. техн. наук, доцент кафедры математического и программного обеспечения электронных вычислительных систем, Рыбинская государственная технологическая академия им. П.А. Соловьева (РГАТА), Рыбинск, Россия, e-mail: kntnpgryzlova@mail.ru.

**Шалаев Дмитрий Сергеевич** – аспирант, Рыбинская государственная технологическая академия им. П.А. Соловьева (РГАТА), Рыбинск, Россия, e-mail: shalaev-dima@mail.ru.