

УДК 621.438.003

В.Т. ШЕПЕЛЬ¹, Б.И. КОМАРОВ¹, Т.П. ГРЫЗЛОВА²¹ОАО «НПО «САТУРН», Рыбинск, Россия²Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьева

WAVELET-АНАЛИЗ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ТРАНСМИССИОННЫХ ПОДШИПНИКОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рассмотрена проблема ложных съёмов двигателей по оценке технического состояния межвальных подшипников на основе анализа сигнала ИВУ-1М, оцифрованного в системе MIS-200 (ВДК-44). Предложено решение проблемы анализа нестационарных сигналов вибродиагностики технического состояния подшипников трансмиссии ГТД. Разработаны методика и алгоритмы Wavelet-анализа вибродиагностических сигналов. Исследована возможность использования Wavelet-коэффициентов и их характеристик как диагностических признаков для оценки состояния межвальных подшипников ГТД.

авиационный двигатель, подшипник трансмиссионный, межвальный подшипник, Wavelet-анализ, нестационарный сигнал, сигнал вибродиагностики, многоуровневый анализ, Wavelet-коэффициенты, полный Wavelet-анализ, неполный Wavelet-анализ

Введение

Исследования досрочного съёма двигателей Д30КУ/КП/КУ-154 выявили ряд необоснованных съёмов по техническому состоянию трансмиссионных подшипников (ТП) при оценке их пригодности методами виброакустической диагностики и контроля. Очевидно, существует проблема совершенствования методик оценки технического состояния трансмиссионных подшипников.

Зачастую в качестве обобщенных акустических портретов вращающихся деталей двигателя используются спектры мощности виброакустических сигналов, полученные для стационарных режимов работы двигателя [1]. Информативность такого признака существенным образом зависит от режима работы механизма и может быть повышена за счет использования нестационарных режимов (при разгоне или выбеге двигателя).

В работе [2] приведены результаты теоретических исследований низкочастотного виброакустического метода диагностики усталостных трещин в лопатках ГТД при нестационарном вибрационном воздействии, которые позволили объяснить особенности поведения объектов диагностирования при

указанном воздействии и проанализировать спектральные и корреляционные диагностические признаки в зависимости от изменения параметра дефекта и скорости изменения частоты вращения двигателя при его разгоне. Однако выделение таких признаков связано со значительными трудностями в использовании существующих методов спектрального и корреляционного анализа применительно к нестационарным виброакустическим сигналам [3]. В случае медленных изменений параметров сигнала во времени его обработку можно проводить на участках «квазистационарности». Однако при разгоне ГТД девиация частоты вращения ротора достигает значений $\Delta f_p = 250 \text{ Гц}$ за время 20 – 25 с и представление сигнала в указанной форме не является корректным, а уменьшение временных интервалов обработки сигнала значительно ухудшает разрешающую способность анализа. Основным методом обработки нестационарных сигналов до недавнего времени считался частотно-временной анализ на основе преобразования Фурье на небольших участках сигнала во времени, выделенных при помощи спектрального окна. Фиксированный размер спектрального окна является постоянным для анализа

всех частотных компонент исследуемого сигнала и определяет точность данного преобразования.

Для повышения точности и разрешающей способности частотно-временного анализа нестационарных сигналов вибродиагностики межвалльных подшипников ГТД целесообразно применение Wavelet-преобразований сигнала, компактных как во временной, так и в частотной области.

Wavelet-анализ

Wavelet-преобразование сигналов выполняется в последовательности пространств волновых функций, построенных на основе выбранной волновой функции $\Psi(x)$, эффективно ограниченной продолжительности с нулевым средним значением. Результатом преобразования является разложение сигнала в сконструированном базисе.

Теоретически число уровней разложения является бесконечным, а в практике выбирается, исходя из вида анализируемого сигнала и информативности временных разложений. При этом каждый последующий уровень разложения содержит уточненную информацию о высокочастотных компонентах сигнала, тем самым дополняя информацию предыдущего уровня. Получаемый набор аппроксимаций и деталей определяет каждую деталь разложения как разницу между двумя последовательными аппроксимациями, при этом исходный сигнал может быть представлен как сумма аппроксимации на последнем уровне разложения и всех деталей. Если удобно, то разложение может выполняться и в обратном порядке.

Для анализа сигналов вибродиагностики выбран ортогональный Wavelet, а именно, функция Хаара:

$$\psi(x) = \begin{cases} 1, & \text{для } 0 \leq x < 1/2; \\ -1, & \text{для } 1/2 \leq x < 1; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

На основе функции $\psi(x)$ строится базис из целочисленных сдвигов $\psi(x - \tau)$, $\tau \in \mathbf{Z}$ и $\tau = \dots, -1, 0, 1, \dots$ и волн с частотами, разделенными

на последовательные октавы $\psi(2^k x - \tau)$.

Все функции получены из одной функции $\psi(x)$ в результате двоичного растяжения, т.е. растяжения в 2^k раз и двухпараметрического сдвига на $(\tau/2^k)$. В результате, как и при Фурье-анализе, получается ортонормированный базис $\{\psi_{k,\tau}\}$, в котором исходный сигнал представляется взвешенной суммой базисных функций

$$s(x) = \sum_{k,\tau=-\infty}^{\infty} w_{k,\tau} \psi_{k,\tau}(x).$$

Этот ряд называется Wavelet-рядом и его двухпараметрические коэффициенты определяются, как и в Фурье-анализе, скалярным произведением:

$$w_{k,\tau} = \langle s, \psi_{k,\tau} \rangle.$$

Рассмотрим детали алгоритма Wavelet-анализа на основе функций Хаара.

Сигнал длиной n отсчетов делится на блоки (подвекторы) по 2 элемента. Для каждого подвектора

$$[s_{2i} \quad s_{2i+1}], \quad i = 0..(n/2 - 1)$$

вычисляются Wavelet-коэффициенты по формулам:

$$w_L^1 = \frac{1}{2} \sum_{t=2i}^{t=2i+1} s_t = \frac{s_{2i} + s_{2i+1}}{2};$$

$$w_H^1 = \frac{1}{2} \sum_{t=2i}^{t=2i+1} s_t \cdot (-1)^{t \bmod 2} = \frac{s_{2i} - s_{2i+1}}{2}.$$

На каждом k -м уровне разложения коэффициенты заносятся в новый вектор длиной $\frac{n}{k}$ по шаблону

$[w_L^k \quad w_H^k]$, т.е. сначала размещаются все низкочастотные Wavelet-коэффициенты, затем – высокочастотные коэффициенты.

Вектор высокочастотных коэффициентов остается без изменений, а над первым блоком длиной $\frac{n}{2k}$ процедура повторяется сначала до тех пор, пока в первом блоке не окажется один коэффициент.

Новые коэффициенты вычисляются по следующим формулам:

$$w_L^{k+1} = \frac{w_L^k + w_H^k}{2}, \quad w_H^{k+1} = \frac{w_L^k - w_H^k}{2}.$$

Можно выполнять как полный, так и неполный Wavelet-анализ. Число уровней полного разложения равно $k = \log_2 N$, где N – размер данных.

Для пояснения были сформированы тестовые сигналы – последовательности из (-1) и 1 длиной 30000: $S1 = (-1 \ 1)^{15000}$;

$$S500 = ((-1)^{500} \ (1)^{500})^{30};$$

$$S512 = \left[((-1)^{512} \ (1)^{512})^{29} (-1)^{304} \right].$$

Ниже приводятся наиболее показательные участки визуализированного представления Wavelet-коэффициентов этих тестовых сигналов.

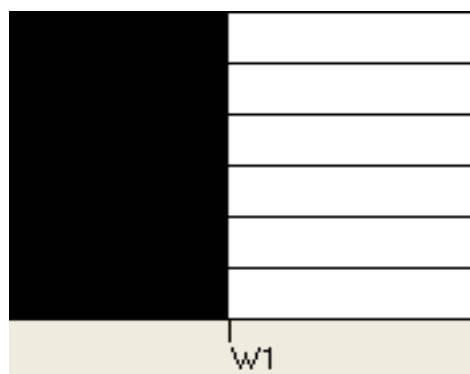


Рис. 1. Wavelet-коэффициенты $S1$, уровни 1 и 2

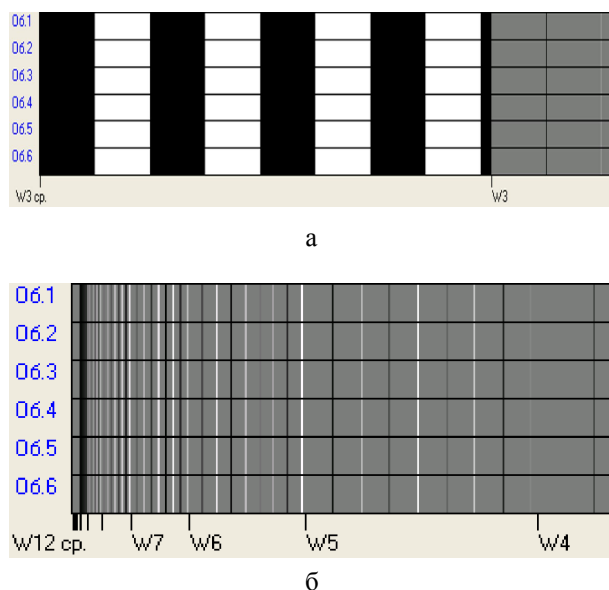


Рис. 2. Wavelet-коэффициенты $S500$ при:
а – неполном (трехуровневом) анализе;
б – полном анализе

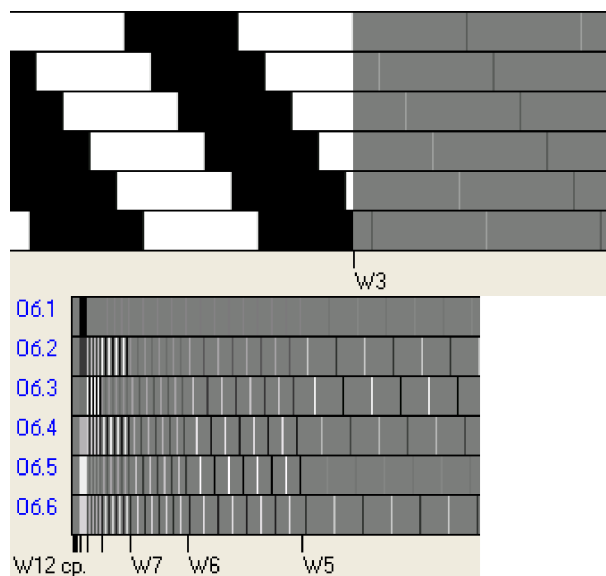


Рис. 3. Wavelet-коэффициенты $S512$ при полном (внизу) и неполном (вверху) анализе

Результаты Wavelet-анализа сигналов вибродиагностики межвальных подшипников

Программа для ЭВМ «Система диагностики подшипников», разработанная совместно НПО «Сатурн» и кафедрой МПО ЭВС РГАТА, позволяет выполнять статистический и информационный анализ сигналов, Wavelet-анализ сигналов, статистический и информационный анализ Wavelet-коэффициентов на различных уровнях и классификацию технического состояния подшипников на два класса: кондиционный и плохой.

Для удобства интерпретации Wavelet-коэффициентов ниже приводится таблица соответствий между Wavelet-уровнями в нумерации приложения и частотными диапазонами.

Чередование светлых и темных полос при графическом представлении сигналов можно идентифицировать с касанием и силовым воздействием тел качения ТП с внутренней обоймой ТП и через нее с валом ТВД. Чем темнее или светлее полоса при графической иллюстрации, тем сильнее или слабее взаимодействие тел качения (роликов) с наружной и внутренней обоймой ТП.

Таблица 1
Соответствие между уровнями Wavelet-анализа
и частотными диапазонами в «Системе
диагностики подшипников»

Уро- вень раз- ло- же- ния	Масштаб (уменьше- ние разре- шения)	Базовый временной интервал, сек.	Максималь- ная частота низкочастот- ных коэффи- циентов, Гц
1	2	0,0002	2500
2	4	0,0004	1250
3	8	0,0008	625
4	16	0,0016	~315
5	32	0,0032	~150
6	64	0,0064	~78
7	128	0,0128	~39
8	256	0,0256	~20
9	512	0,0512	~10
10	1024	0,1024	~5
11	2048	0,2048	~2,5
12	4096	0,4096	~1

На рис. 4 показан визуальный образ Wavelet-коэффициентов среднестатистического некондиционного подшипника (вверху) и кондиционного (внизу) при неполном трехуровневом анализе сигнала, на рис. 5 – при полном Wavelet-анализе. Ввиду ограниченности места показаны наиболее значимые уровни разложения. Очевидна ритмичность изменения Wavelet-коэффициентов кондиционных подшипников и относительная хаотичность коэффициентов некондиционных. Если у кондиционных подшипников при полном разложении значимы коэффициенты только пятого уровня (~150 Гц), то у некондиционных – 4-го – 7-го (315 – 40 Гц). Визуальные образы позволяют ограничить количество вариантов при выборе наиболее эффективных характеристик Wavelet-коэффициентов для диагностики. Визуальные образы целесообразно использовать для контроля автоматического диагностирования.

Wavelet-коэффициенты имеют нулевое среднее (кроме коэффициента разложения самого низкого разрешения по частоте), знаки коэффициентов могут быть отрицательными, а их величина для сигналов вибродиагностики не очень велика (–5в...5в), поэтому для визуализации выполнено смещение и

масштабирование значений Wavelet-коэффициентов для размещения в диапазоне яркостей (0...255).

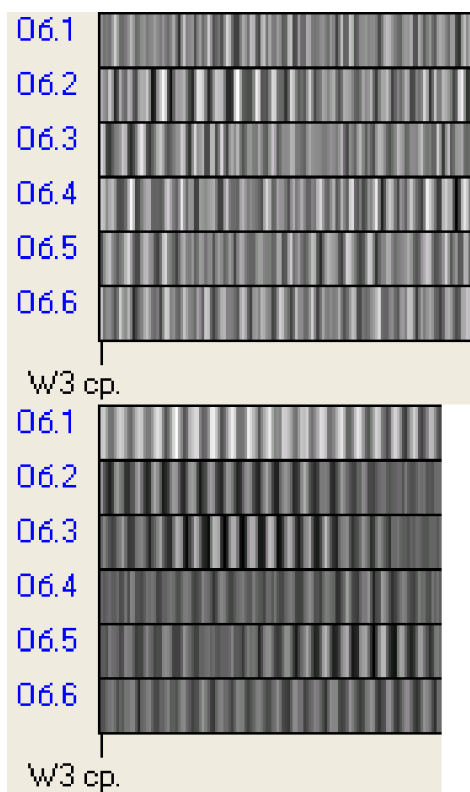


Рис. 4. Визуализация Wavelet-коэффициентов среднестатистических некондиционного подшипника (вверху) и кондиционного (внизу) при неполном анализе сигнала

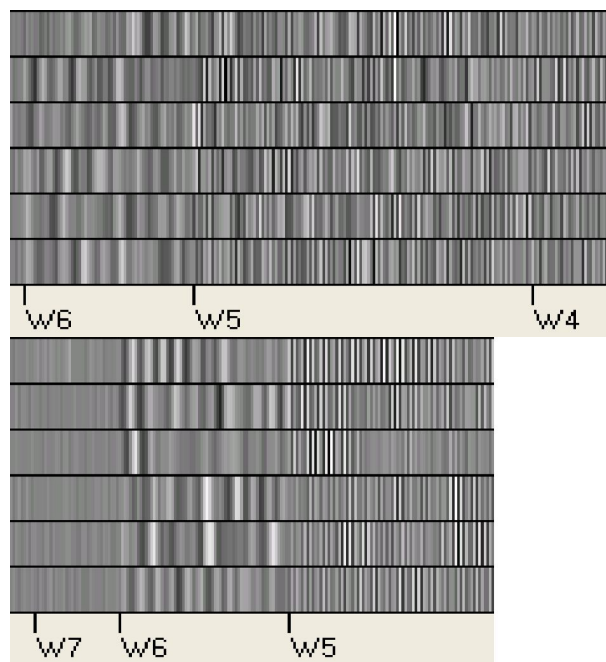


Рис. 5. Визуализация Wavelet-коэффициентов среднестатистических некондиционного подшипника (вверху) и кондиционного (внизу) при полном анализе сигнала

На рис. 6 показаны графики высокочастотных Wavelet-коэффициентов среднестатистических подшипников.

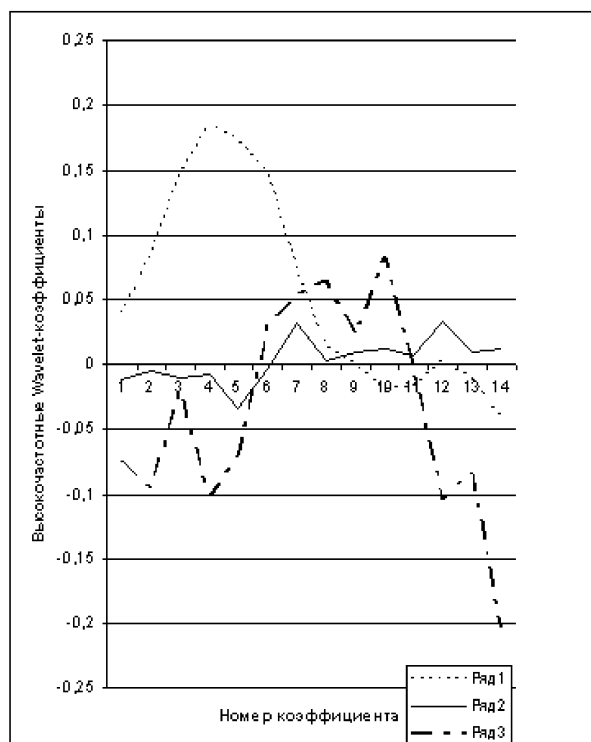


Рис. 6. Высокочастотные Wavelet-коэффициенты среднестатистических подшипников: 1-й ряд – соответствует необоснованно снятому подшипнику, 2-й – кондиционному, третий – некондиционному

Заключение

Апробирование Wavelet-преобразований проведено при контроле и диагностировании ТП 25 ГТД. 10 ТП имели увеличенный радиальный зазор, 5 ТП имели выкрашивания металла на беговых дорожках и телах качения и 10 ТП были кондиционными. Диагностическими признаками при классификации технического состояния ТП ГТД были выбраны информационные и статистические меры Wavelet-коэффициентов наиболее значимых уровней. Классификация дефектов ТП с помощью Wavelet-преобразований и применения потенциальных функций осуществлялась без ошибок.

Исследования показали, что Wavelet-преобразования позволяют кодировать виброакустические сигналы для графического представления временного и силового взаимодействия в анализируемом (исследуемом) трансмиссионном подшипнике ГТД и формировать эффективные признаки для классификации технического состояния трансмиссионных подшипников ГТД.

Литература

1. Балицкий Ф.Я. и др. Вибрационная диагностика зарождающихся дефектов. – М.: Наука, 1984. – 120 с.
2. Бурау Н.И., Гельман Л.М., Марчук П.И. Пассивно-активный метод виброакустической диагностики вращающихся деталей авиационных двигателей // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Гос. аэрокосмический ун-т «ХАИ». – 1998. – Вып. 5. – С. 374 – 378.
3. Цветков Э.И. Нестационарные случайные процессы и их анализ. – М.: Энергия, 1978. – 128 с.
4. Daubechies I. The Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis // IEEE Trans. Information Theory. – 1990. – Vol. IT-36, № 5. – P. 961 – 1005.
5. О применении wavelet-преобразования для обработки нестационарных сигналов в задачах виброакустической диагностики трещин в лопатках газотурбинных двигателей // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Гос. аэрокосмический ун-т. «ХАИ». – 2000. – Вып. 19. – С. 443 – 448.

Поступила в редакцию 30.05.2005

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.А. Букатый, Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьева, Рыбинск.