



УДК 629.735.083.03.004.58:004.67(045)

*Митрахович М.М.*

Национальный авиационный университет. Украина, г. Киев

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ЗАДАЧАХ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Рассмотрены методы обработки вибрационных сигналов узлов авиационных газотурбинных двигателей (ГТД). Определена проблема идентификации дефектов элементов ГТД по частотному составу диагностического сигнала. Предложен частотно-временный анализ диагностического сигнала с использованием вейвлет-преобразования для прогнозирования состояния контролируемых узлов ГТД. С помощью пакета расширения Wavelet Toolbox системы MATLAB смоделированы вибрационные сигналы; получены вейвлет-спектры для определения диагностических признаков дефектообразования элементов ГТД.*

Ключевые слова: газотурбинный двигатель; вибрационные сигналы; вейвлет-спектр; дефекты узлов; диагностика

### Введение

Анализ современных средств контроля и диагностики узлов газотурбинных двигателей (ГТД) показал, что в большинстве своем они базируются на принципах измерения и анализа вибрационных сигналов, поскольку, контроль вибрации дает наибольший объем диагностической информации по

сравнению с такими методами, как контроль температуры, анализ смазки и другими. Из этого следует, что по сигналу вибрации могут быть обнаружены практически все виды дефектов в узлах ГТД без привлечения для диагностики других видов физических процессов [1].

Большинство используемых методов диагностики не позволяет осуществлять одновременную локализацию дефекта во времени и его идентификацию по частотному составу диагностического сигнала.

Анализ средств мониторинга и диагностики ведущих отечественных и зарубежных фирм показал, что подобная задача не решается в силу естественных ограничений спектрального подхода к анализу сигналов.

В настоящее время недостаточно проработаны вопросы прогнозирования технического состояния с использованием как априорной информации о классах моделей дефектообразования, так и результатов мониторинга.

В этих условиях особую актуальность приобретает задача разработки частотно-временных методов анализа диагностических сигналов, нестационарных по своей природе, с дальнейшим использованием полученной информации при прогнозировании состояния контролируемых узлов.

В разные годы проблемой вейвлет-преобразования сигналов занимались исследователи: А. Гроссман, Ж. Морле, И. Добеши, К. Чуи, И. Мейер, Л. В. Новиков, С. Б. Стечкин, Н. М. Астафьева, А. В. Переберин, А. А. Короновский, А. Е. Храмов, В. П. Дьяконов и другие [2–7].

Анализ литературы показывает, что вейвлет-преобразования могут быть использованы для анализа нестационарных сигналов, временных рядов, неоднородных полей и для решения многих задач в различных областях науки и техники.

### Вейвлет-преобразование

Базис вейвлет-разложения, в отличие от Фурье-преобразования, составляет локализованная во времени, быстро убывающая солитоноподобная функция  $\psi_{ab}(t)$ , которая образуется из некоторого прототипа – материнского (анализирующего) вейвлета  $\psi(t)$ , путем дилатаций (сжатий и растяжений) и сдвигов [2].

$$\psi_{ab}(t) = a^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (1)$$

где  $b$  задает положение вейвлетов (смещение по оси  $t$ ), характеризует ширину вейвлетов (масштабирование по времени). В частотной области малые значения соответствуют высоким частотам, а большие – низким частотам. Множитель  $a^{-1/2}$  вводится, чтобы все вейвлетные функции  $\psi_{ab}(t)$  имели постоянную (единичную) норму:

$$\|\psi_{ab}\| = \|\psi_0\| = 1, \quad (2)$$

обеспечивая независимость нормы этих функции от масштабирующего числа  $a$ .

Таким образом, операция задания "окна", используемая при традиционном спектральном

анализе с помощью преобразований Фурье, заложена в самой базисной функции вейвлета. Это создает предпосылки к их адаптации к особенностям анализируемых нестационарных сигналов. При этом точную информацию о высокочастотных гармониках исследуемого сигнала с высокой разрешающей способностью во времени необходимо извлекать ее из коротких временных интервалов, а не из всего сигнала, в то время как информацию о низкочастотной части спектра необходимо получать, анализируя достаточно длинные интервалы времени. При масштабировании функции произведение временного и частотного диапазонов остается постоянным и представляет площадь ячейки в частотно-временной (фазовой) плоскости. На рис. 1 для сравнения показана схема разбиения фазового пространства  $(t, \omega)$  при оконном преобразовании Фурье и при вейвлет-преобразовании [3].

Из рис. 1. видно, что при оконном преобразовании Фурье временное разрешение на больших и малых масштабах постоянно и определяется размером окна. При вейвлетном преобразовании базисные функции имеют уменьшающееся с увеличением масштаба временное разрешение  $\psi(t/a)$  и увеличивающееся с масштабом разрешение по частоте (ширина Фурье-образа вейвлет-функции). Это дает хорошую временную локализацию на малых

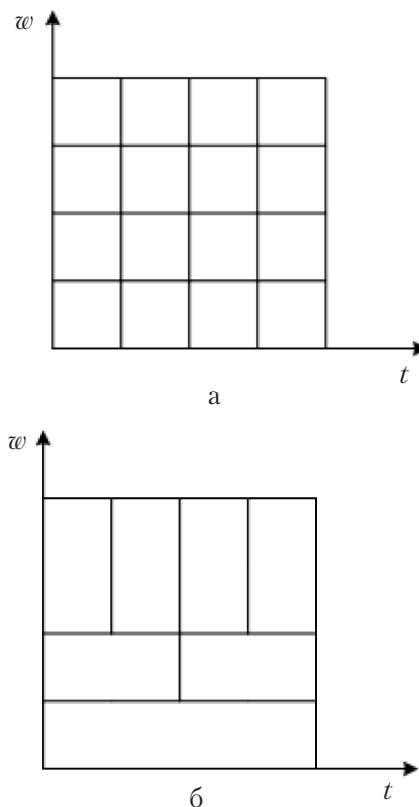


Рис. 1. Частотно-временная локализация в фазовом пространстве:

$a$  – оконное преобразование Фурье;  $b$  – вейвлет-преобразование

масштабах и хорошее частотное разрешение при больших масштабах.

Выполнение непрерывного вейвлет-преобразования в MathCAD требует значительного времени (до 5 минут при частоте процессора 756 МГц), что обусловлено спецификой итерационных процедур. Значительно большей эффективностью обладает система компьютерной математики MATLAB, включающий пакет расширения Wavelet Toolbox, представляющий пользователю обширные возможности для работы с вейвлетами.

По наличию типов вейвлетных функций для обработки сигналов этот пакет является лучшим среди пакетов для систем компьютерной математики в этой области (пакеты расширения Mathcad, Mathematica). Wavelet Toolbox имеет специальные средства для построения вейвлет-спектрограмм сигналов с улучшенной визуализацией. На спектрограмме в нижней части расположены коэффициенты с малыми номерами – детальная картина сигнал, у верхней – коэффициенты с большими номерами – огрубленная картина сигнала. Их значения определяют цвет области спектрограммы.

Это позволяет использовать данный пакет в автоматизированных испытательных и диагностических комплексах.

#### Вейвлет-анализ вибрационных сигналов

Далее приведен вейвлет-анализ сигналов, смоделированных в пакете Signal Processing системы MATLAB [4], на основе расчета частот, характерных для определенных видов дефектов узлов с учетом действий шумовых помех.

Вейвлет-спектр чистого гармонического сигнала без учета влияния случайных помех (рис. 2, а) представляет собой не изменяющуюся с увеличением временного параметра картину – набор ярких горизонтальных полос (переходам сигнала через ноль соответствуют темные участки; экстремальным областям – светлые участки).

Приведенный вейвлет-спектр смоделированного вибросигнала (рис. 2, б) исправного узла ГТД при наличии помех в виде белого шума с амплитудой (10% от уровня основного сигнала) имеет вид чередующихся участков темного и светлого фона (верхняя часть спектрограммы) – свидетельствует о выраженной периодичности сигнала. Нижняя часть спектрограммы характерна для неперiodической высокочастотной составляющей.

Вейвлет-анализ сигнала (рис. 3) определяет момент возникновения высокочастотных колебаний: при значении параметра временного сдвига заметны регулярные колебания тона при малых значениях параметра, что соответствует высоким частотам исходного сигнала. При этом характер изменения тона на больших значениях масштаба,

соответствующих низкочастотной составляющей, остается неизменным.

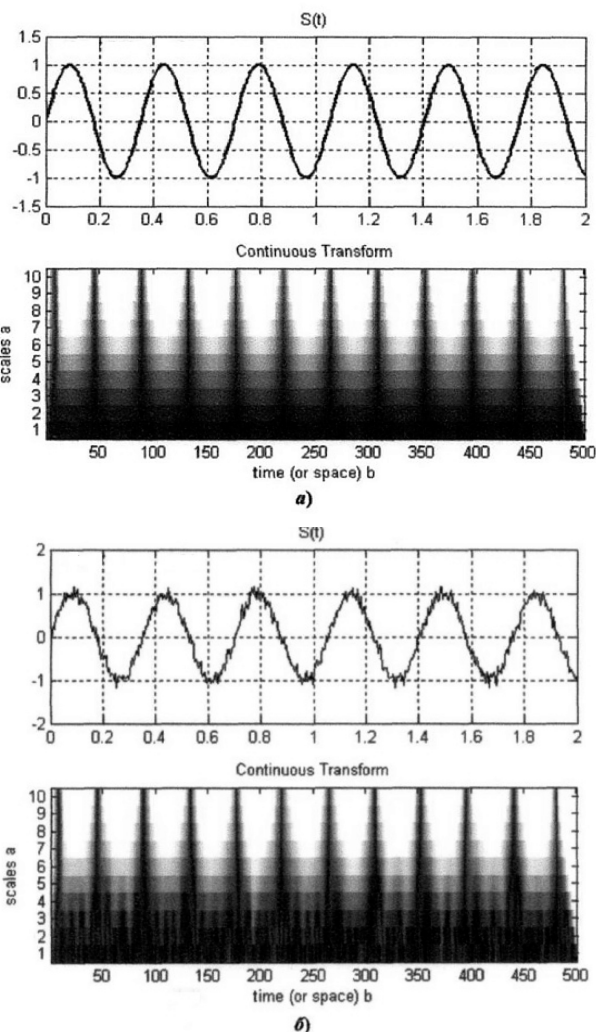


Рис. 2. Вейвлет-преобразование гармонического сигнала (а) и этого же сигнала с адитивной помехой у виде белого шума (б)

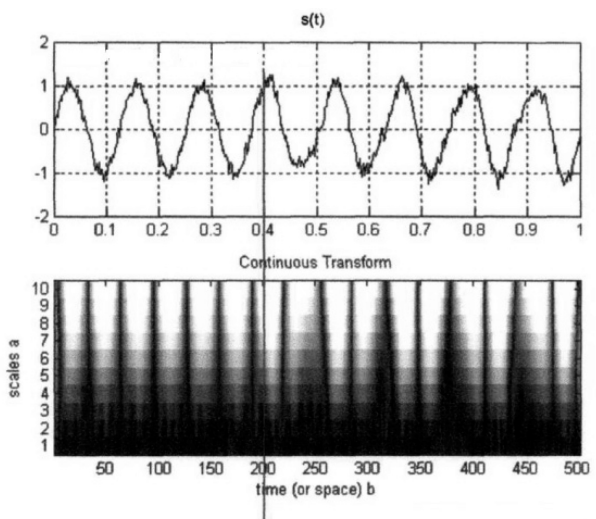


Рис. 3. Вейвлет-преобразование сигнала, в котором возникает высокочастотная компонента

С увеличением амплитуды колебаний высокочастотной компоненты, что связано с развитием, что связано с развитием дефекта, яркость окраски соответствующих вейвлет-коэффициентов увеличивается (рис. 4, а и б).

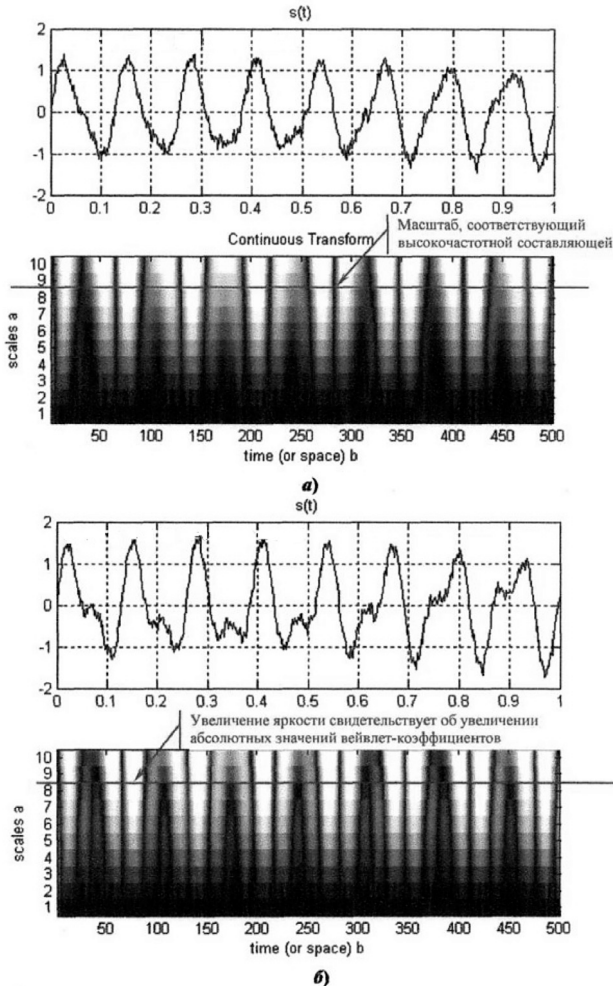


Рис. 4. Вейвлет-преобразование сигнала, с увеличивающейся амплитудой высокочастотной составляющей

Интересная особенность вейвлетов выявлять скачки и разрывы в сигналах. На рис. 5 сигнал представляет синусоиду с наложенными на нее колебаниями прямоугольной формы –

$$0.1 \cdot \text{sign} \left\{ \cos \left[ \frac{(t-10)^2}{5} \right] \right\}.$$

Синусоида будет содержать небольшие скачки прямоугольных импульсов положительной и отрицательной полярности, положение которых не фиксировано, а определяется квадратическим законом нарастания частоты прямоугольных импульсов. Можно считать, что смоделирован нестационарный сигнал.

Вейвлет-спектр отчетливо фиксирует все скачки, темные пики между которыми явно идут по квадратическому закону. На уровне больших коэффициентов видна и периодичность синусоиды.

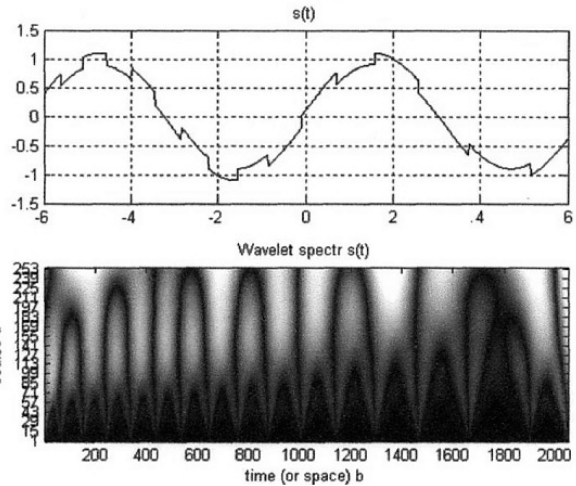


Рис. 5. Вейвлет-спектр сигнала с наложенными прямоугольными нестационарными колебаниями

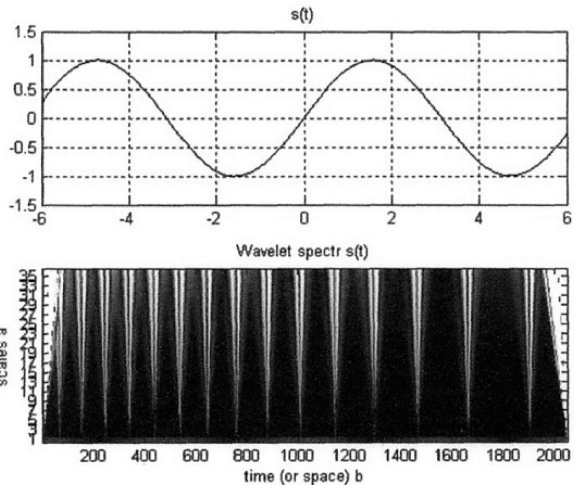


Рис. 6. Вейвлет-спектр сигнала с наложенными прямоугольными нестационарными колебаниями ничтожно малой амплитуды

Уменьшение амплитуды прямоугольной нестационарной компоненты до одной тысячной от амплитуды синусоиды приводит до отсутствия нестационарных прямоугольных колебаний на временном графике сигнала. Но вейвлет-спектр их выделяет (рис. 6). Эта особенность позволяет использовать вейвлет-анализ для выделения слабых нестационарных импульсов в диагностическом сигнале.

### Вывод

Полученные результаты вейвлет-преобразования диагностических сигналов, смоделированных с учетом влияния процесса дефектообразования в узлах на вибрационный сигнал, показывают, что вейвлет-спектр содержит информацию о наличии локальных особенностей в сигнале, а сам метод частотно-временного анализа с привлечением вейвлетных базисов может быть использован для обнаружения и идентификации вида дефекта узлов газотурбинных двигателей.



**Литература**

- [1] Бурау Н. І. Методи цифрової обробки сигналів для вібраційної діагностики авіаційних двигунів [Текст]: монографія / Н. І. Бурау, Л. Л. Яцко, О. М. Павловський, Ю. В. Сопілка. – К.:НАУ, 2012. – 152 с.
- [2] Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения [Текст] / Н. М. Астафьева // Успехи физических наук. – 1996. – №11. – С. 1145–1170.
- [3] Дремин И. М. Вейвлеты и их использование [Текст] / И. М. Дремин, О.В. Иванов, В.А. Нечитайло // Успехи физических наук. – 2001. – № 5.
- [4] Дьяконов В. П. Вейвлеты: От теории к практике [Текст] / В. П. Дьяконов. – М.:СОЛОН.Р.:2002 – 446 с.
- [5] Новиков Л. В. Адаптивный вейвлет-анализ сигналов [Текст] / Л. В. Новиков // Научное приборостроение. – 1999. – №2. – С. 30–37.
- [6] Перебрин А. В. О систематизации вейвлет-преобразований. Вычислительные методы и программирование [Текст] / А. В. Перебрин. – 2001. – С. 15–40.
- [7] Чуи К. Введение в вейвлеты: пер. с англ.; под ред. Я. М. Жилейкина [Текст] / К. Чуи. – М. Мир. – 2001 – 412 с.

**Mitrakhovych M. M.**

National Aviation University, Ukraine, Kiev

**THE USE WAVELET TRANSFORM IN PROBLEMS OF DIAGNOSTICS  
THE TECHNICAL STATE OF GAS TURBINE ENGINE**

*Considered the methods of processing the vibration signals of elements aircraft gas turbine engines (GTE). Defined the problem of identifying the defect items GTE on the frequency composition of the diagnostic signal. Proposed a time-frequency analysis of the diagnostic signal using wavelet transform to predict the state-controlled elements GTE. With this package, the extension of MATLAB Wavelet Toolbox Simulated vibration signals in MATLAB with package extension Wavelet Toolbox; wavelet spectra were obtained to determine the diagnostic features defect GTE elements.*

Keywords: gas turbine engine; vibration signals; wavelet spectrum; defects of elements; diagnostics

**References**

- [1] Burau N. I. Metodu cufrovoi obrobku signaliv dla vibraciynoi diagnostuku aviaciynuh dvugyniv [Tekst]: monografija / N. I. Burau, L. L. Yacko, O. M. Pavlovsrkiy, U. V. Sopilka. – K.:NAU, 2012. – 152 s.
- [2] Astafeva N. M. Weyvlet-analis: osnovu teorii i primeru primenienia [Tekst] / N. M. Astafeva // Uspehu fisicheskikh nauk. – 1996. – №11. – S. 1145–1170.
- [3] Dremin I. M. Weyvletu i jih ispolzovanie [Tekst] / I. M. Dremin, O.V. Ivanov, V. A. Nechutaylo// Uspehu fisicheskikh nauk. – 2001. – № 5.
- [4] Dyakonov V. P. Weyvletu: Ot teorii k praktike [Tekst] / V. P. Dyakonov. – M.:SOLON.R.:2002 – 446 s.
- [5] Novikov L. V. Adaptivnuy weyvlet-analis signalov [Tekst] / L. V. Novikov // Nauchnoe priborostroenie. – 1999. – №2. – S. 30–37.
- [6] Perebrin A. V. O systematyzacii weyvlet-preobrazovaniy. Vuchislitelne metode i programirovanie [Tekst] / A. V. Perebrin. – 2001. – S. 15–40.
- [7] Chyi K. Vvedenie v weyvletu: per. s angl.; pod red. Y. M. Zhyleikina [Tekst] / K. Chyi. – M.Mir. – 2001 – 412 s.