

УДК 004.032.2:629.735.036.34.5*7(045)

В.В. ПАНИН¹, С.В. ЕНЧЕВ², С.С. ТОВКАЧ²

¹*Киевская государственная академия водного транспорта им. П. Сагайдачного, Киев*

²*Национальный авиационный университет «НАУ», Киев, Украина*

ВЕЙВЛЕТ-ДИАГНОСТИКА ВИБРОСОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Статья посвящена разработке современных диагностических систем с использованием вейвлет-преобразования вибрационных сигналов элементов авиационных газотурбинных двигателей. Рассматривается динамический анализ роторных систем на примере подшипников качения. Алгоритм непрерывного вейвлет-преобразования позволяет построить диагностические карты дефектов узлов газотурбинных двигателей. Приведено сравнение расчета коэффициентов вейвлет-разложения и Фурье-преобразования для эффективного выбора метода анализа вибрационных сигналов в режиме реального времени.

Ключевые слова: идентификация, электронная система управления, газотурбинный двигатель, вейвлет-анализ, аппроксимация, вибросигнал, диагностические карты.

Введение

Современные тенденции в эксплуатации газотурбинных двигателей по техническому состоянию подразумевают использование различного рода диагностических систем, которые могут своевременно дать необходимую и правильную информацию о техническом состоянии двигателей для принятия соответствующих решений — снятия двигателя для ремонта, продолжения эксплуатации или продления ресурса [1].

Для авиационных двигателей на сегодняшний день практическое применение получили диагностические системы, использующие:

— методы диагностики за изменением параметров динамических процессов в ГТД (параметрические методы, методы вибрационной и виброакустической диагностики);

— методы диагностики за изменением физико-механических параметров ГТД (спектральный анализ масла, визуально-оптическая диагностика, радиография, термометрия).

Одним из важнейших и перспективных направлений в разработке диагностических систем контроля состояния узлов и деталей двигателей является создание систем вибрационной диагностики [2].

1. Постановка проблемы

Как известно вибрационные сигналы с двигателя, измеряемые высокочувствительными датчиками, обладают высокой информативностью и могут нести в себе признаки состояния многих «критических» элементов в конструкции двигателя.

Под критическим элементом можно понимать любой конструктивный узел или агрегат

газотурбинного двигателя, от состояния, которых и зависит в первую очередь работоспособность и ресурс двигателя. Такими элементами являются роторы, опорные подшипниковые узлы, шестеренчатые пары, агрегаты, рессоры приводов и т.д.

Очевидно, что для одинаковых условий работы исправного узла или агрегата параметры (амплитуды и фазы) соответствующих частотных компонент общего вибрационного спектра, регистрируемого тем или иным датчиком, должны находиться в определенных допустимых пределах [1,2]. Выход параметров частотных компонент, связанных с виброактивностью рассматриваемого узла или агрегата, за допустимые пределы, или появление новой гармоник в спектре вибрационного сигнала может служить диагностическим признаком его неисправного состояния или повреждения.

Простым примером данной ситуации является появление в спектре вибрационного сигнала частотной составляющей с частотой мелькания шариков при появлении трещины или раковины на беговой дорожке внутреннего или наружного кольца подшипника [3].

В настоящее время существует большое количество различных стратегий в разработке и применении систем вибрационной диагностики [2]. Выбор той или иной стратегии зависит от типа и назначения диагностируемого двигателя или узла, условий и режимов их работы, степени оснащения средствами измерений, современного технического уровня применяемых систем для регистрации и анализа вибрационных сигналов, накопленной статистикой для объекта исследования, а также от ряда других факторов.

2. Основная часть

Одним из определяющих критериев работоспособности роторной системы газотурбинного двигателя (ГТД) является виброустойчивость, т.е. способность роторной системы работать в заданном диапазоне частот без недопустимых вибраций, можно говорить о том, что проведение комплексной процедуры динамического анализа роторной системы на всех этапах жизненного цикла является важной и актуальной проблемой.

Рассматривая динамический анализ роторных систем как инструмент обеспечения виброустойчивости, можно сделать вывод, что в данном случае динамический анализ тесным образом связан с диагностикой роторных систем и проблемой идентификации дефектов на различных режимах работы ГТД.

Объектом вибрационной диагностики могут быть любые силовые агрегаты, функционирование которых вызывает возбуждение колебательных процессов в их узлах. Основная отличительная особенность виброакустической диагностики состоит в том, что в качестве диагностических признаков используются динамические параметры системы, регистрируемые как перемещение, скорость или ускорение. Широкие (частотный и динамический) диапазоны колебательных процессов, малая инерционность, большая скорость распространения колебательных волн по элементам и узлам конструкции обуславливают быструю реакцию виброакустического сигнала на изменение технического состояния.

Большинство методов динамического анализа роторных систем, используемых в настоящее время, основаны на использовании преобразования Фурье. Преобразование Фурье как инструмент спектрального анализа служит в основном для анализа непериодических сигналов.

Перспективной альтернативой преобразованию Фурье при анализе нестационарных сигналов является, открытое относительно недавно, вейвлет-преобразование [3,4]. К вейвлетам относят базисные функции, которые должны обладать следующими свойствами: иметь вид коротких, локализованных во времени функций с нулевым значением интеграла на всей временной оси; обладать возможностью сдвига по времени и способностью к масштабированию (сжатию/растяжению); иметь ограниченный (локальный) спектр. Вейвлет-преобразование целесообразно применять в тех случаях, когда результат анализа какого-либо временного сигнала должен содержать не только простое перечисление его характерных частот (масштабов), но и сведения об определенных локальных координатах, при которых эти частоты проявляют себя.

Именно за счет изменения масштаба вейвлеты способны выявлять различие в характеристиках на разных шкалах, а путем сдвига — анализировать свойства сигнала в разных точках на всем изучаемом интервале. При анализе нестационарных сигналов за счет свойства локальности (в отличие от синусоид, определенных на всей временной оси) вейвлеты получают существенное преимущество перед преобразованием Фурье, которое дает нам только глобальные сведения о частотах (масштабах) исследуемого сигнала, поскольку используемые при этом функции определены на бесконечном интервале.

Локальность вейвлетов позволяет анализировать локальные свойства сигнала (разрывы, изменение знаков первой и второй производных и др.), в то время как преобразование Фурье не дает информации, например, о том в какой момент времени частота сигнала изменилась [4].

Непрерывное вейвлет-преобразование (НВП) задается по аналогии с преобразованием Фурье, путем вычисления вейвлет-коэффициентов $C(a, b)$ по соотношениям вида [3,4]:

$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) a^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

Алгоритм проведения НВП исходного сигнала $x(t)$ представлен на рис. 1 и включает в себя выполнение нескольких последовательных действий.

Прежде всего, выбирается, на основе эмпирических соображений, тип вейвлета, наиболее подходящий для данного сигнала. Затем этот вейвлет сравнивают с начальным участком сигнала и рассчитывают вейвлет-коэффициент, по сути являющийся коэффициентом корреляции. После этого вейвлет смещают на величину сдвига b вдоль временной оси и вновь вычисляют коэффициент корреляции. Сдвиг продолжается до тех пор, пока не будет покрыт весь сигнал. После этого вейвлет масштабируют, используя параметр масштаба a и вновь покрывают весь сигнал. Эту последовательность операций повторяют до тех пор, пока не будут рассчитаны коэффициенты для всех заданных масштабов. Полученные коэффициенты вейвлет-преобразования позволяют построить графическое изображение исходного сигнала, позволяющее получить информацию о частотно-временных особенностях сигнала.

Проведем анализ сигнала, в состав которого входят две частотные компоненты, используя НВП. Результат представлен на рис. 2.

В данном примере в качестве анализируемого вейвлета был выбран вейвлет Добеши 5-го порядка [4,5]. Количество рассчитываемых коэффициентов равно 64.



Рис. 1. Алгоритм непрерывного вейвлет-преобразования

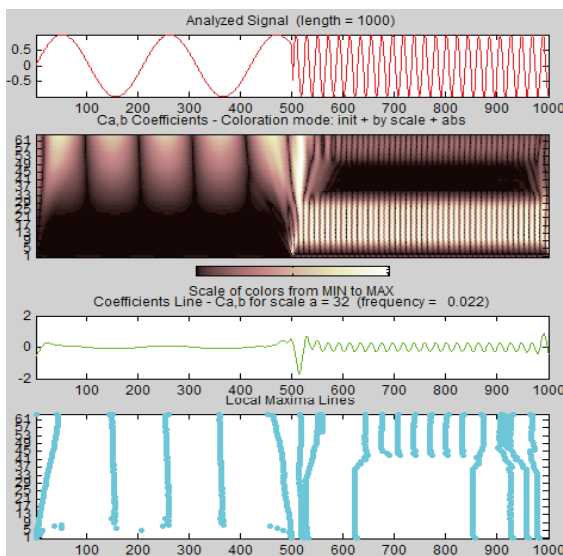


Рис. 2. НВП анализируемого сигнала

Полученный график (рисунок 2) носит название скейлограммы (от англ. scale – масштаб) [5]. Скейлограмма является трехмерным графиком, где по оси абсцисс отложены отсчеты сигнала, т.е., фактически, время, по оси ординат – номера вейвлет-коэффициентов (масштабы), т.е. частота, а цвет характеризует величину определенного вейвлет-коэффициента.

На скейлограмме отчетливо видно, в какой момент времени присутствует каждая частота. Такую локализацию частоты во времени получить, используя преобразование Фурье, не удастся. Так, например, видно, что вторая гармоника присутствует в сигнале примерно с 480 отсчета. Зная частоту дискретизации исходного сигнала можно определить момент времени, в который данная частота появилась: $480/f_d$.

Однако, несмотря на то, что вейвлеты в данной ситуации значительно превосходят Фурье-преобразование по информативности, отчетливо проявляется самый существенный недостаток вейвлет преобразования – время, требуемое для расчета коэффициентов вейвлет-преобразования. Ниже приведен сравнительный анализ затраченного времени для расчета коэффициентов для преобразования Фурье и для НВП (рис. 3, 4).

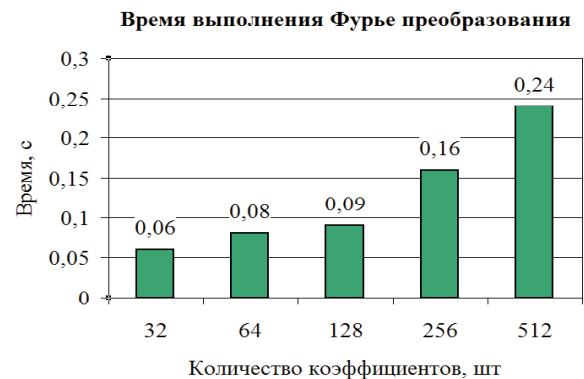


Рис. 3. Время выполнения Фурье-преобразования

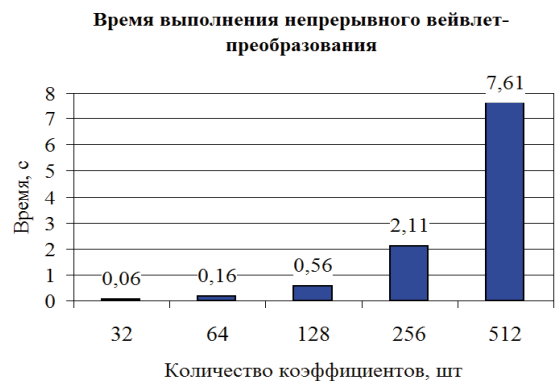


Рис. 4. Время выполнения вейвлет-преобразования

При проведении сравнительного анализа по времени расчета в качестве материнского

использовался вейвлет Добеши 5-го порядка. Из графика отчетливо видно, что при малом количестве коэффициентов (32 и 64) время выполнения НВП также достаточно мало. Но, при увеличении числа рассчитываемых коэффициентов время выполнения резко возрастает. Так, для расчета 512 коэффициентов требуется почти 7,6 секунд.

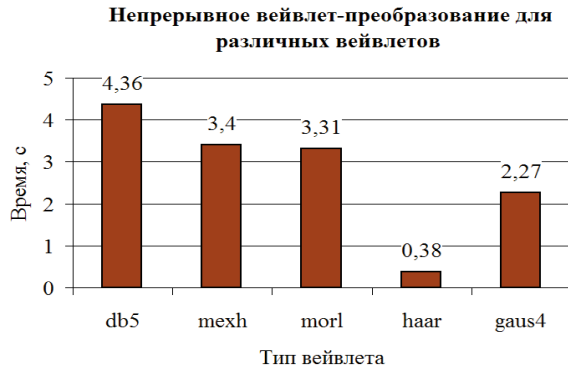


Рис. 5. Время выполнения НВП для различных вейвлетов

Также необходимо отметить, что время выполнения НВП зависит не только от количества коэффициентов, но и от типа выбранного вейвлета. На рисунке 5 приведено время выполнения преобразования для пяти наиболее распространенных вейвлетов. Для всех вейвлетов количество рассчитываемых коэффициентов равно 256. Из рисунка 5 видно, что быстрее всех выполняется вейвлет-преобразование для вейвлета Хаара, что связано с простотой функции Хаара.

Количество вейвлет-коэффициентов, которые необходимо рассчитывать при анализе сигнала, зависит от того какие частоты необходимо выделить на скейлограмме. Масштаб, на котором будет проявляться на скейлограмме определенная частота, зависит от частоты дискретизации f_d , с которой был снят сигнал, и от центральной частоты вейвлета f_c , который выбран для анализа. Следует заметить, что для определения центральной частоты вейвлета в MATLAB существует функция *centfrq*. Зная частоту дискретизации сигнала, центральную частоту вейвлета и частоту, которую необходимо выявить f , номер масштаба S можно вычислить по соотношению:

$$S = \frac{f_d f_c}{f} \quad (2)$$

Рассмотрим применение метода вейвлет-анализа к эталонным траекториям дефектов подшипников качения. В таблице 1 приведены диагностические карты дефектов роторных систем с подшипниками качения,

полученные с помощью непрерывного вейвлет-преобразования с использованием в качестве базисной функции вейвлета Морле.

Таблица 1

Диагностическая карта дефекта	
<p>Дисбаланс СКЕЙЛОГРАММА</p> <p>Наличие гармоник частоты вращения ротора.</p>	<p>Полускоростной выхрь СКЕЙЛОГРАММА</p> <p>Наличие оборотной частоты вращения ротора</p>
<p>Задевание ротора СКЕЙЛОГРАММА</p> <p>Наличие высокочастотных вибраций.</p>	<p>Ударное воздействие СКЕЙЛОГРАММА</p> <p>Появление низкочастотной вибрации</p>

Вывод

В процессе исследования представлено решение актуальной научно-практической задачи по совершенствованию методов динамического анализа роторных систем ГТД с подшипниками качения на основе применения вейвлет-преобразования вибрационных сигналов.

Определена эффективность использования методов анализа нестационарных вибрационных сигналов, основанных на непрерывном вейвлет-преобразовании, для решения задач динамики роторных систем с подшипниками качения. Предложен алгоритм обработки сигналов. Выявлены существенные преимущества НВП перед спектральным анализом и Фурье-преобразованием.

На основе предложенных методов сформированы диагностические карты дефектов роторных систем ГТД. Применение непрерывного вейвлет-преобразования в динамическом анализе роторных систем позволяет решить проблему идентификации зарождающихся дефектов.

Литература

1. Барков А.В. Вибрационная диагностика машин и оборудования. [Текст] / А.В. Барков, Н.А. Баркова – СПб.: СПбГМТУ, – 2004. – 156 с.

2. Бурау Н.І. Методи цифрової обробки сигналів для вібраційної діагностики авіаційних двигунів [Текст]: монографія / Н.І. Бурау, Л.Л. Яцко, О.М. Павловський. – К:НАУ. – 2012. – 152 с.

3. Ахметханов Р.С. Применение вейвлет-анализа для исследования нестационарных процессов роторных систем [Текст] / Р.С. Ахметханов, А.П. Никифоров // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2005, №2. – С. 53 - 61.

4. Астафьева Н.М. Вейвлеты и их использование [Текст] / Н.М. Астафьева, И.О. Дремин // Успехи физических наук. – 2001. – №5. – С. 465-561.

5. Широков С.В. Практические вопросы применения непрерывного вейвлет-преобразования в диагностике дефектов роторных машин [Текст] / С.В. Широков // Гидродинамическая теория смазки – М: Машиностроение. – 2006. – С. 606-617.

Поступила в редакцию 15.06.2014

В.В. Панін, С.В. Єнчев, С.С. Товкач. Вейвлет-діагностика вібростану елементів газотурбінного двигуна

Стаття присвячена розробці сучасних діагностичних систем з використанням вейвлет-перетворення вібраційних сигналів елементів авіаційних газотурбінних двигунів. Розглядається динамічний аналіз роторних систем на прикладі підшипників кочення. Алгоритм неперервного вейвлет-перетворення дозволяє побудувати діагностичні карти дефектів вузлів газотурбінних двигунів. Наведено порівняння розрахунку коефіцієнтів вейвлет-розкладу і Фур'є-перетворення для ефективного вибору методу аналізу вібраційних сигналів в режимі реального часу.

Ключові слова: ідентифікація, електронна система керування, газотурбінний двигун, вейвлет-аналіз, апроксимація, вібросигнал, діагностичні карти.

V.V. Panin, S.V. Enchev, S.S. Tovkach. Wavelet-diagnostic vibration state of elements gas turbine engine

The article is devoted to the development of modern diagnostic systems using wavelet transform for vibration signals in aircraft gas turbine engines. Considered a dynamic analysis of rotor systems on the example of rolling bearings. Algorithm of continuous wavelet transform allows us to construct diagnostic cards defects for elements of gas turbine engines. Described the comparison of the calculation of wavelet coefficients and Fourier transform for efficient selection of the method for analysis the vibration signals in real time.

Keywords: identification, electronic control system, the gas turbine engine, the wavelet analysis, approximation, vibration signal, diagnostic card.