

УДК 629.7.03.018

Б.Б. КОРОВИН¹, О.Н. БЫЛИНКИНА¹, Т.П. ГРЫЗЛОВА²¹Федеральное государственное унитарное предприятие РФ
«Летно-исследовательский институт им. М.М. Громова», Россия²Рыбинская государственная авиационная технологическая академия
им. П.А. Соловьева, Рыбинск, Россия

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДИСКРЕТНОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ И КОНТРОЛЕ ВИБРОНАГРУЖЕННОСТИ ГТД

На основе рассмотрения возможностей вейвлет-преобразования сигнала, особенностей формирования вибропроцессов в ГТД, а также проблем обработки вибросигналов обсуждаются возможные области использования вейвлет-анализа применительно к исследованиям динамического нагружения ГТД и в задачах виброконтроля этих двигателей. Даны примеры эффективного применения W-анализа.

вибропроцессы, вейвлет-преобразование, лопатки, вибронагруженность, динамическое нагружение, виброконтроль

Введение

Несмотря на достаточно большой объем публикаций о возможностях вейвлет-анализа применительно к различным областям науки и техники (см., например, подробный обзор литературных источников И.М. Дремина, О.В. Иванова и В.А. Нечитайло с авторским комментарием [1], а также [2]), вопросам реального использования такого анализа при исследовании вибропроцессов в авиационных ГТД до последнего времени не уделялось должного внимания. Известен лишь один пример успешного использования вейвлетов применительно к динамическим процессам в ГТД – ранняя диагностика помпажного срыва в двигателе по изменению пульсаций давления воздуха в компрессоре [3].

Настоящая работа – постановочная. В ней предпринята попытка обосновать области эффективного применения вейвлет-преобразования при исследовании динамического нагружения компрессорных лопаток авиационных ГТД, а также в задачах виброконтроля и вибродиагностики этих двигателей. Приведены примеры эффективного использования вейвлет-анализа для реальных вибропроцессов в ГТД.

1. Подходы, использовавшиеся при решении проблемы

Обоснование целесообразности применения вейвлет-преобразования при исследовании динамического нагружения ГТД выполнялось на основе рассмотрения материалов динамического тензометрирования и вибрографирования этих двигателей в натурных условиях их работы на летательных аппаратах. При этом принимались во внимание особенности формирования вибропроцессов в ГТД, проблемы обработки и анализа указанных вибропроцессов во временной и частотной областях [4 – 6], оценивались возможности применения для решения поставленной задачи программно-аппаратного комплекса разработки РГАТА по обработке нестационарных процессов на основе вейвлет-анализа [7].

2. Решение проблемы

2.1. Ожидаемые области приложения вейвлет-анализа применительно к исследованиям динамического нагружения ГТД. Одним из главных преимуществ вейвлет-анализа перед спектральным – возможность оценки локальных особенностей анализируемого процесса на данной частоте во времени

независимо от длины реализации. Это объясняется тем, что базисные функции вейлета $\phi_{j,k}, \psi_{j,k}$ предусматривают связанные между собой не только масштабное преобразование (j), но и смещение (сдвиг) по времени (k).

Любую функцию на выбранном уровне разложения j можно представить в виде суперпозиции вейвлетов

$$f(x) = \sum_k s_{j_n,k} \phi_{j_n,k} + \sum_{j \geq j_n,k} d_{j,k} \psi_{j,k},$$

где применительно к базису Хаара $s_{j_n,k}, d_{j,k}$ – нормированные суммы и разности последовательных пар отсчетов представлений сигнала на разных масштабах.

На самом детальном уровне $j_n = j_{\max}$ остаются только s -коэффициенты и получается так называемое представление скейлинг-функцией

$$f(x) = \sum_k s_{j_{\max},k} \phi_{j_{\max},k}.$$

Из многообразия вариантов представления вейвлет-преобразования остановимся на указанных выше формулах дискретного преобразования, полученных на основе простейшего базиса Хаара, которые и будут использоваться в настоящей работе в рамках программного обеспечения, разработанного в РГАТА под руководством Т.П. Грызловой [7].

Вибропроцессы, фиксируемые в элементах ГТД при вибрографировании и динамическом тензометрировании двигателя, как правило, имеют сложную частотную структуру с многочисленными узкополосными составляющими колебаний, порожденных регулярными (гармоническими) и широкополосными (шумовыми) источниками кинематической и аэродинамической природы [4, 8 – 10].

Оконный спектральный анализ при корректном выборе параметров расчета позволяет в целом адекватно оценивать указанные процессы в частотной области на стационарных режимах полета и работы двигателя, определяющих стационарность анализируемых процессов [5, 8]. Преобразование Фурье с

базисом, состоящим из синусов и косинусов, лежащее в основе спектрального анализа, имеет четкую физическую интерпретацию применительно к вибропроцессам в ГТД. Поэтому вейвлет-анализ будем рассматривать в качестве естественного дополнения к спектральному при исследовании нестационарных вибропроцессов, для которых последний, как известно, имеет принципиальные ограничения [5].

Известно, что введение разночастотности лопаток в колесе турбомшины – эффективное средство воздействия на их вибронгруженность при автоколебаниях и резонансе [10]. Механизм этого воздействия недостаточно изучен. Поэтому приложение вейвлет-анализа при экспериментальных исследованиях взаимодействия во времени близких форм связанных колебаний лопаток неоднородных рабочих колес турбомашин на работающем двигателе по тензосигналам с лопаток (назовем такую постановку задачей № 1), представляется целесообразным.

Отметим, что гипотеза о слабой стационарности, являющейся необходимым условием применения спектрального анализа, по существу вводит допустимые ограничения нестационарности, которыми исследователь вынужден пользоваться. При этом оказываются неучтенными подробности энергетического взаимодействия между лопатками в венце при их связанных колебаниях, определяемые именно нестационарными процессами, природа которых даже на стационарных режимах работы двигателя может обуславливаться, например, точностью поддержания частоты вращения ротора (роторов).

Так, для ТВД с ротором повышенной жесткости методами спектрального анализа было показано, что причина повышенной вибронгруженности рабочих лопаток последних ступеней компрессора этого двигателя кроется в связанных колебаниях лопаток в венце при одновременном резонансе различных групп лопаток, вызванном 12-ой, 13-ой и 14-ой гармониками возбуждения в условиях малых изменений частоты вращения ротора, определяемых

точностью их поддержания системой автоматического регулирования [8].

Такая ситуация оказалась возможной ввиду большого разброса парциальных частот лопаток в колесе, которому, как показал специально проведенный аппаратурный анализ, соответствовал и диапазон изменения кажущейся частоты колебаний (среднего числа пересечений нулевого уровня) каждой конкретной лопатки.

Применение вейвлет-преобразования к подобным вибропроцессам позволит изучать динамическое взаимодействие лопаток при их связанных колебаниях во времени с существенно большими подробностями, чем при использовании методов спектрального анализа, при том, что теоретическое исследование такого взаимодействия представляют собой большую проблему ввиду невозможности задать точные граничные условия в уравнениях динамики для реальных рабочих колес.

Следующая актуальная область приложения вейвлет-преобразования (задача № 2) – идентификация интенсивных колебаний рабочих лопаток КНД на нестационарных режимах работы силовой установки с ТРДДФ, когда эта нестационарность определяется кратковременным забросом частоты вращения ротора N_1 вблизи частоты $N_{1рез}$, соответствующей резонансу. При этом турбулентное воздействие на лопатки так же, как и возбуждающая резонанс окружающая неравномерность потока на входе в ступень, изменяется не только вследствие изменения расхода воздуха через двигатель, но и вследствие изменения геометрии воздухоподводящего канала.

Подобная задача идентификации колебаний лопаток в условиях многофакторного нестационарного воздействия актуальна для переходных процессов ТРДДФ при резком изменении режима двигателя в полете вследствие взаимодействия программ регулирования (ограничения) частоты вращения роторов двигателя, положения створок реактивного сопла и

положения панели сверхзвукового воздухозаборника. При этом не исключено наложение на условия многофакторного нестационарного воздействия и условий, соответствующих минимальным запасам устойчивости лопаток рабочего колеса к флаттеру (например, по приведенной частоте вращения ротора и давлению).

Не менее актуальная задача летно-прочностных испытаний авиационных ГТД (назовем ее задачей № 3), которую представляется удобным решать с помощью вейвлет-анализа – ранее обнаружение по низкочастотной составляющей вибросигнала колебаний двигателя, как твердого тела, либо его совместных колебаний с элементами планера. В качестве такого сигнала может быть использован замер вибраций на корпусе двигателя или переменный тензосигнал с рабочей лопатки турбокомпрессора.

Отметим, что в этом случае используется преимущество вейвлетов (по сравнению с преобразованием Фурье) в более эффективной локализации низкочастотных «деталей» по оси частот [1, 2]. Поэтому частота и уровень анализируемого сигнала может быть на порядок меньше частот и уровня как роторных составляющих вибраций, так и вибрационного отклика лопаток, соответствующих группам форм их колебаний в венце.

Вейвлет-преобразование сигналов может оказаться полезным и в задачах бортового виброконтроля двигателей (задача № 4). В современных системах такого контроля предусмотрено слежение за уровнем первой роторной гармоникой вибраций, измеренных в штатном месте. При этом применяются следящая фильтрация по опорному сигналу с каждого из роторов, либо, что бывает гораздо чаще, контролируется суммарный вибросигнал, замеренный на двигателе в достаточно широкой полосе частот, ограниченной фильтрами ФНЧ и ФВЧ. Во втором случае все другие составляющие вибраций в полосе частот пропускания виброизмерительной аппаратуры воспринимаются, как шумовые, и могут приво-

дуть к завышению нормируемых значений вибраций, которые обычно задаются в виде СКЗ сигнала.

Эффективность бортового виброконтроля в этом случае можно повысить, если взамен использования ФНЧ и ФВЧ фильтров предусмотреть вейвлет-преобразование вибросигнала с обнулением при его восстановлении коэффициентов разложения на масштабах вне рабочей полосы изменения контролируемых роторных частот двигателя.

2.2. Примеры W-анализа реальных вибропроцессов в ГТД на основе базиса Хаара. Такая особенность вейвлет-анализа, как строгая заданность полос фильтрации, определяемая числом используемых коэффициентов (шкал масштабирования), и то обстоятельство, что вместо физически осязаемых и привычных для исследователя-динамика и прочниста понятий энергии колебаний в полосе частот, определяемой формами колебаний системы, приходится иметь дело с осцилляцией вейвлет-коэффициентов относительно частот, не обязательно совпадающих с частотами анализируемого вибропроцесса, заставляют искать качественные закономерности в протекании вейвлет-коэффициентов во времени в надежде получить взаимосвязь этих закономерностей с особенностями диагностированного вибропроцесса на стадии обучения, как это было продемонстрировано в [3].

Для выявления природы вибрационного отклика лопаток вентилятора ТРДДФ при многофакторном нестационарном воздействии вследствие кратковременного заброса частоты вращения ротора N_1 в конце разгона самолета до больших чисел M (задача № 2, сформулированная в разделе 2.1.) сравним результаты W-разложения переменных тензосигналов, замеренных на одних и тех же лопатках для двух ситуаций. Соответствующей задаче №2 и при достаточно быстром (в течение 1,5 секунды) проходе через резонанс лопаток, вызываемый 3-ей гармоникой возбуждения, в процессе увеличения N_1 в стартовых условиях работы двигателя.

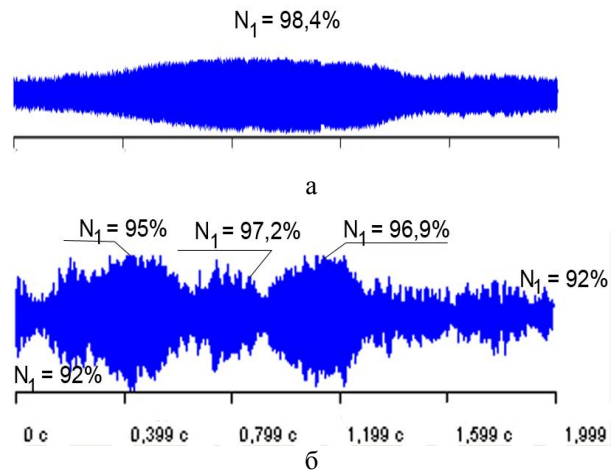


Рис. 1. Осциллограммы переменных напряжений в лопатке при проходе через резонанс (а) и забросе N_1 в полете при уменьшении режима двигателю (б)

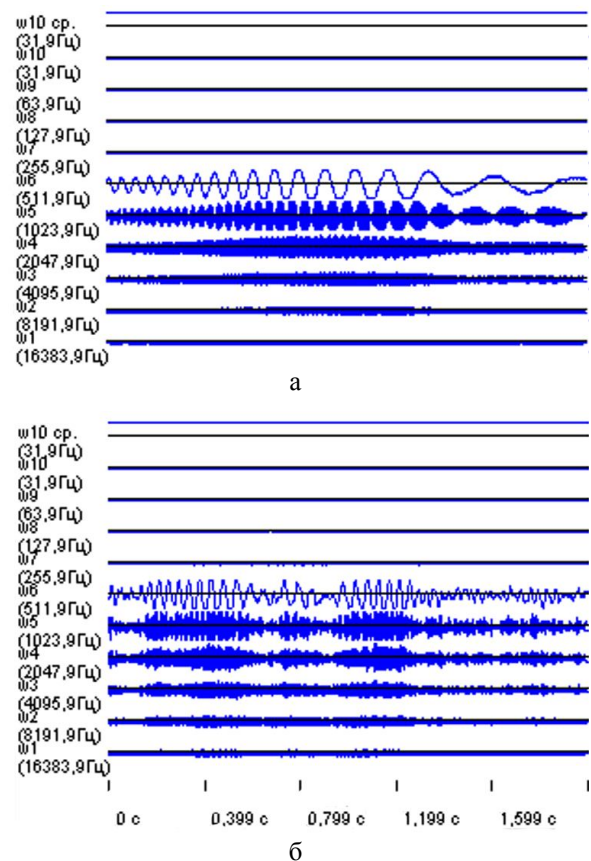


Рис. 2. Разложение вибропроцессов, показанных на рис. 1 по базису Хаара

Как можно видеть из рис. 1 и 2, W-разложение анализируемых вибропроцессов по базису Хаара на 10 масштабах выявило наиболее значимые характерные колебания коэффициентов относительно 6-го и 5-го масштабов 511,9 и 1023 Гц, близких к средним значениям частот первых двух групп форм

колебаний лопаточного венца 509 и 995 Гц соответственно. Рассматриваемые вейвлеты достаточно регулярны и синхронно отслеживают изменения интенсивности исходного вибропроцесса. Значения частот максимальных колебаний коэффициентов 6-го масштаба составили величины ~ 7 и ~ 18 Гц для стартовых условий и полета соответственно. Примечательно, что значения частот колебаний коэффициентов 5-го масштаба для рассматриваемых ситуаций получаются удвоением соответствующих частот 6-го масштаба.

Сравним фазовые сдвиги между вейвлетами одинакового масштаба, полученными для одних и тех же лопаток рабочего колеса при максимальной интенсивности их колебаний в условиях прохода через резонанс на старте и при резком уменьшении режима двигателя в конце разгона самолета до сверхзвуковой скорости полета. Это можно сделать из рассмотрения рис. 3 и 4.

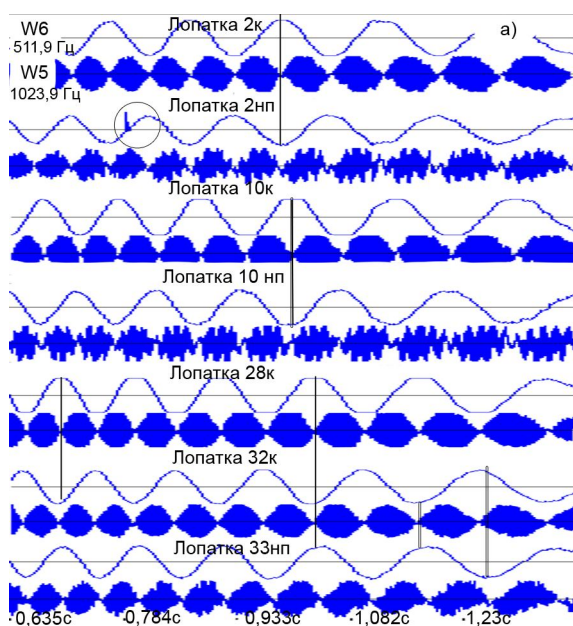


Рис. 3. Иллюстрация фазовых сдвигов между вейвлетами шестого и пятого масштабов для вибропроцессов в лопатках при проходе через резонанс в стартовых условиях

Обращает на себя внимание совпадение относительной фазировки вейвлетов вибропроцессов, замеренных в одних и тех же лопатках для рассматри-

ваемых ситуаций. В частности, вейвлеты, полученные по тензосигналам у корня лопатки 28 и над полкой 33 лопатки, а также над полкой для лопаток №№ 10 и 2 не имеют сдвига по фазе.

Вейвлеты же, полученные преобразованием тензосигналов у корня и над полкой для одних и тех же (№№ 2 и 10) лопаток, находятся строго в противофазе. Для вейвлетов 5-го масштаба (частота 1023,9 Гц) ситуация несколько изменилась.

Колебания коэффициентов, полученных для одной и той же лопатки, оказались в фазе при сохранении фазовых сдвигов для вейвлетов, полученных по тензосигналам с других лопаток, как для 6-го масштаба.

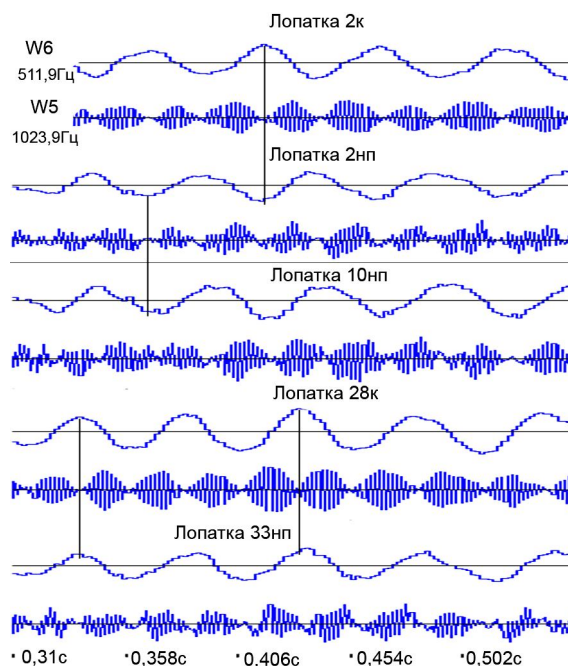


Рис. 4. Иллюстрация фазовых сдвигов между вейвлетами шестого и пятого масштабов для вибропроцессов в лопатках при уменьшении режима двигателя в сверхзвуковом полете

Идентичность относительных сдвигов фаз между вейвлетами одинакового масштаба, полученными в одних и тех же точках замера обследуемой динамической системы для двух проверяемых проявлений нестационарного вибрационного отклика, можно трактовать как следствие одинаковой природы возбуждения колебаний.

В самом деле, один из сравниваемых случаев соответствует резонансу лопаток, вызываемому 3-ей гармоникой возбуждения, что означает бегущую против вращения колеса волну деформации с тремя узловыми диаметрами и фиксированным сдвигом фаз между колебаниями различных лопаток. Таким образом, можно утверждать, что два характерных интенсивных «всплеска» колебаний лопаток КНД при кратковременном забросе частоты вращения ротора N_1 в полете до величины, существенно меньшей той, при которой отмечался резонанс лопаток при более медленных темпах изменения N_1 , также вызваны резонансом 3-й гармоники возбуждения.

Использование вейвлет-преобразования для раннего обнаружения низкочастотных динамических процессов в ГТД по тензосигналу с рабочей лопатки КНД иллюстрируется рис. 5. Обращает на себя внимание, что появление низкочастотной составляющей тензосигнала на физической частоте 39 Гц по его спектру было обнаружено лишь на 8-й секунде против альтернативы – через 2,5 секунды по вейвлетам.

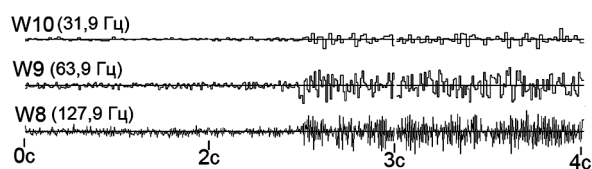


Рис. 5. Иллюстрация обнаружения низкочастотной составляющей тензосигнала на частоте 39 Гц в лопатке по вейвлетам 8, 9 и 10 масштабов

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности использования вейвлет-преобразования при анализе вибропроцессов в ГТД применительно к идентификации колебаний в условиях нестационарных воздействий, в том числе и для раннего обнаружения опасных динамических процессов в ГТД.

Литература

1. Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование // Успехи физических наук РАН. – 2001. – Т. 171, № 5. – С. 465-501.
2. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук РАН. – 1996. – Т. 166, № 11. – С. 1145-1170.
3. Control / I.M. Dremin, V.I. Furletov, O.V. Ivanov et al. // Eng / Pract/ 2001.
4. Коровин Б.Б. Оценка нагружения элементов конструкции ГТД в условия полета // Летные испытания газотурбинных двигателей / Под ред. Г.П. Долголенко. – М.: Машиностроение, 1983. – С. 83-91.
5. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов. – М.: Мир, 1967. – 280 с.
6. Коровин Б.Б., Червонюк В.В., Климова С.Н. Анализ вибрационных процессов в ГТД с помощью специализированных систем обработки. – М.: ЦИАМ, 1982. – № 970. – 240 с.
7. Грызлова Т.П., Пиралишвили Г.Ш., Шепель В.Т. Методическое и программное обеспечение обработки нестационарных процессов на основе Wavelet-анализа // Вестник двигателестроения: Научн. техн. журн. – 2006. – № 3. – С. 135-139.
8. Коровин Б.Б. Идентификация аэроупругих явлений в лопатках турбомашин методами спектрального анализа // Аэроупругость турбомашин. – К.: Наук. думка, 1980. – С. 159-168.
9. Иванов В.П. Колебания рабочих колес турбомашин. – М.: Машиностроение, 1983. – 190 с.
10. Динамика авиационных двигателей / Под ред. И.А. Биргера и Б.Ф. Шорра. – М.: Машиностроение, 1981. – 380 с.

Поступила в редакцию 30.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук М.В. Колотников, ФГУП ММП «Салют», Москва.