УДК 517.444:534.232

Д. В. Омесь
Учреждение образования «Брестский государственный технический университет», Брест

ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Введение. Наиболее распространенными механизмами в машиностроении являются зубчатые передачи с эвольвентным зацеплением. В процессе эксплуатации непременно происходит появление дефектов зубчатых колес, чрезмерное развитие которых может привести к нарушению работы или поломке привода.

Работа зубчатой передачи сопровождается периодическими ударами при входе пары зубьев в зацепление, что приводит к возникновению шума и вибрации, амплитуда которых зависят от таких факторов, как тип зубьев, скорость работы, нагрузка, точность изготовления и сборки, условия эксплуатации, а также от наличия и степени эксплуатационных дефектов. Если первые факторы можно учесть при проектировании, изготовлении, сборке и выборе режимов работы привода, то последний можно выявить при контроле и диагностике в процессе эксплуатации.

Колебания, возбуждаемые соударением деталей, принято называть акустическими колебаниями. Они отличаются высокими частотами, малыми амплитудами смещения и значительными ускорениями. Виброакустический сигнал имеет сложную структуру, содержит полезную составляющую и помеху, которая препятствует точной расшифровке информации, содержащейся в сигнале. Помехи, нельзя смешивать с искажениями, которым подвергается диагностический сигнал при прохождении по каналам, т.е. от источника к датчику. Так, исходным сигналом является короткий импульс, вырабатываемый в зубчатой паре при соударении, между тем, датчик воспринимает не этот сигнал, а затухающее колебание. Поэтому при разработке системы диагностики стоит выбирать оптимальный способ обработки сигнала, при котором влияние помех минимизируется [1].

Основная часть. Спектральный анализ – один из наиболее распространенных классических методов обработки виброакустических сигналов, который позволяет охарактеризовать частотный состав измеряемого сигнала. В основе спектрального анализа сигналов лежат преобразования Фурье, которые использует в качестве базисных функций синусы и косинусы, представленные комплексной экспонентой.

Стоит упомянуть кепстральный анализ, когда спектр рассматривают так, как будто он является временной реализацией, которая подвергается преобразованию Фурье. Полезность кепстра заключается в том, что, что он выделяет периодичности, или повторяющиеся структуры, в спектре точно так же, как спектр выделяет периодичности из временной реализации. Часто спектр многовальных зубчатых приводов является очень сложным и содержит большое количество наборов гармоник от различных узлов и несколько наборов боковых полос, вызванных различными модуляциями.

Исходя из требований анализа сложных нестационарных сигналов, можно отметить определённые «недостатки» Фурье-преобразования, которые и привели к появлению вначале оконного преобразования Фурье и стимулировали в дальнейшем появление и развитие вейвлет-преобразования [2]:

– недостаточная информативность при анализе нестационарных сигналов и практически полное отсутствие возможностей анализа их особенностей, так как в частотной области происходит «размазывание» особенностей сигналов (разрывов, ступенек, пиков и т.п.) по всему частотному диапазону спектра;

– преобразование Фурье отображает общие сведения о частотах исследуемого сигнала в целом и не дает представления о локальных свойствах сигнала при быстрых временных изменениях его спектрального состава; классический алгоритм преобразования Фурье в принципе не предоставляет возможности анализировать частотные характеристики сигнала в произвольные моменты времени;

– используя преобразование Фурье, можно работать с нестационарным сигналом либо только во временной области, либо только в частотной; отсутствует возможность получения информации о том, какие частоты присутствуют в сигнале в данный момент времени.

Для временной локализации спектральных компонентов необходимо сконструировать частотно-временное представление сигнала. Эту задачу в некоторой степени может решить так называемое оконное преобразование Фурье, однако наиболее полно её решает вейвлет-преобразование [2]. В работах И. Добеши показаны фундаментальные ограничения Фурье-преобразования в части представления нестационарных сигналов и сигналов с быстрыми перепадами уровня (амплитуды). Эти серьезные ограничения были преодолены за счет специального аппарата представления произвольных сигналов на основе нового математического базиса – вейвлетов.

Вейвлеты и их применение – новейшее научное направление, возникшее на стыке, математики, информатики и техники. Технология вейвлетов базируется на обобщенном представлении сигналов $s(t)$ в векторном пространстве в виде базисных функций $\psi_{a,b}(t)$ помноженных на коэффициенты $C_{a,b}$:

$$s(t) = \sum_{a,b} C_{a,b} \psi_{a,b}(t),$$

где a, b – временной масштаб и временная локализация.

Репозиторий БрГТУ

Такие функции $\psi_{a,b}(t)$ предельно локализованы в частотной области, вырождаясь на спектрограмме в вертикальную линию, но не локализованы во временной области [3]. Способность вейвлет-спектрограмм обнаруживать артефакты (перепады) сигналов не имеет прецедентов в технике спектрального анализа. Вейвлеты локализованы как во временной так и в частотной областях: Непрерывное ВП нашло широкое применение в обработке виброакустических сигналов. В частности, вейвлет-анализ дает уникальные возможности распознавать локальные и «тонкие» особенности сигнала.

Прямое непрерывное вейвлет-преобразование сигнала $s(t)$ задается по формальной аналогии с преобразованием Фурье, путем вычисления вейвлет-коэффициентов по формуле:

$$C_{a,b} = \int_{a,b} s(t)\psi_{a,b}\left(\frac{t-b}{a}\right)dt$$

Результатом вейвлет-преобразования сигнала является двумерный массив значений коэффициентов $C_{a,b}$. Распределение этих значений в пространстве (a,b) дает информацию об изменении во времени относительного вклада в сигнале вейвлетных компонент разного масштаба и называется спектром коэффициентов вейвлет-преобразования, масштабно-временным (частотно-временным) спектром или просто вейвлет-спектром. На рисунке 1 показан принцип «сканирования» сигнала при вычислении вейвлетных коэффициентов.

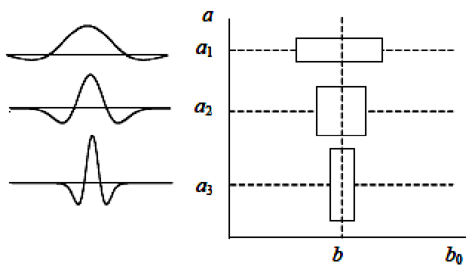


Рисунок 1 – Принцип определения вейвлетных коэффициентов $C_{a,b}$

Малые значения a соответствуют мелкому масштабу $\psi_{a,b}(t)$ или высоким частотам ($\omega \sim 1/a$), большие параметры a – крупному масштабу $\psi_{a,b}(t)$, т.е. растяжению вейвлета $\psi(t)$ и сжатию его спектра.

С помощью вейвлетов можно осуществить анализ и синтез локальной особенности любого сигнала. Выбор конкретного вейвлета (будь то непрерывный или дискретный) целиком зависит от характера поставленной задачи и от конкретного анализируемого сигнала. Разные сигналы удается анализировать тем или иным способом, и критерием успеха обычно служит простота получаемого разложения [4].

Вейвлет-преобразование позволяет смотреть на исследуемый процесс с другой точки зрения. Поэтому при анализе нестационарных сигналов за счет свойства локальности вейвлетов получают существенное преимущество перед преобразованием Фурье. Локальные особенности сигнала (разрывы, ступеньки, пики и т.п.) дают едва заметные составляющие спектра, по которым обнаружить эти особенности, и тем более их место и характер, практически невозможно [4].

Многие исследователи называют вейвлет-анализ «математическим микроскопом». Это название хорошо отражает замечательные свойства метода сохранять хорошее разрешение на разных масштабах. Параметр сдвига b фиксирует точку фокусировки микроскопа, масштабный коэффициент a – увеличение, и, наконец, выбором материнского вейвлета $\psi(t)$ определяют оптические качества микроскопа. Вейвлет-спектрограмма демонстрирует мельчайшие детали частотного образа сигнала: в нижней части отчетливо видны высокочастотные компоненты, а в верхней – низкочастотные [4].

В качестве иллюстрации приведем результаты спектрального и вейвлет анализа виброакустического сигнала, измеренного при работе коробки скоростей токарно-винторезного станка. На втором валу было установлено зубчатое колесо с искусственно созданным локальным дефектом (скол одного зуба). Целью исследования является разработки методики обработки сигнала и определения критериев оценки технического состояния многовального зубчатого привода, а также выявления вида, степени дефекта и его локализации.

На рисунке 2 приведен вибрационный сигнал и его спектр. При проведении замеров колесо с локальным дефектом вращалось с частотой $f_o \approx 14{,}82$ *Гц*, при этом частота пересопряжения зубьев была $f_z \approx 637{,}1$ *Гц*. Спектральный анализ производился на основе классического Фурье-преобразования сигнала.

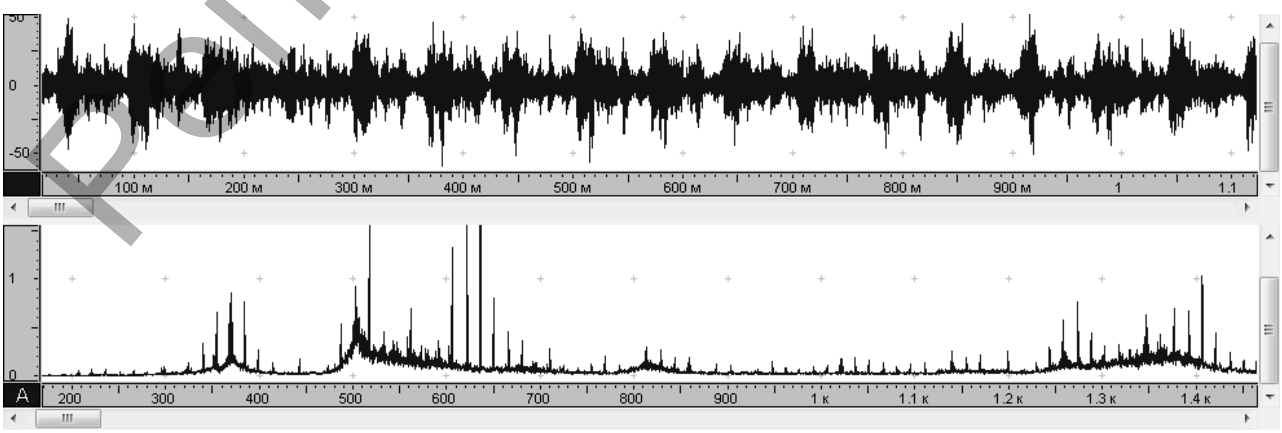
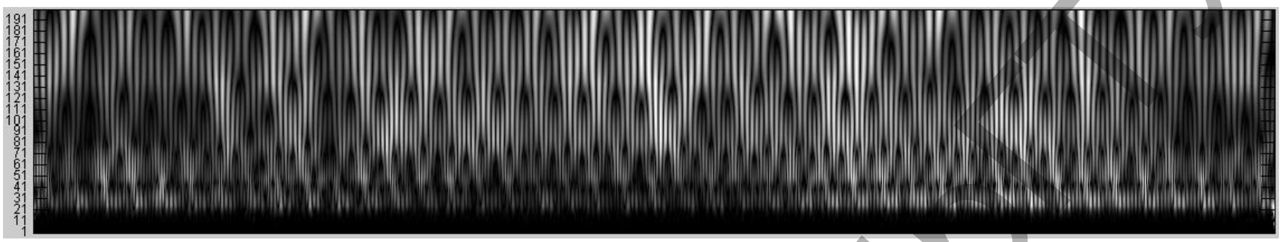


Рисунок 2 – Сигнал и его спектр

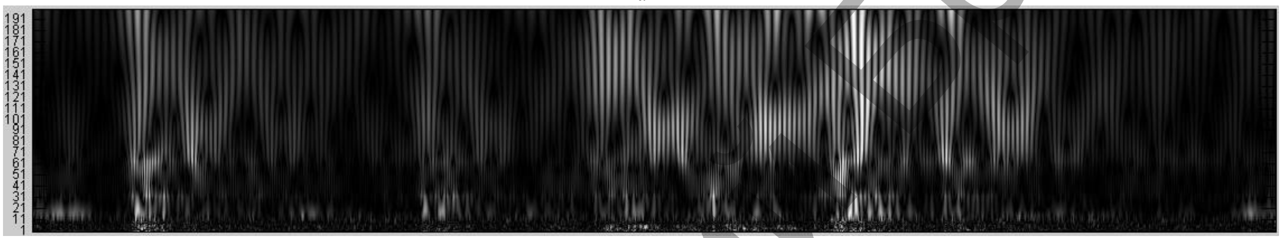
Репозиторий БрГТУ

На графике сигнала видны всплески амплитуд, которые соответствуют входу в зацепление дефектного зуба. На спектре также можно наблюдать пик на частоте пересопряжения зубьев f_z, окруженный боковыми частотами с интервалом равным оборотной частоте второго вала f_o. Это признаки частотной модуляции сигнала при наличии дефекта в зубчатой паре, а интервалы боковых полос позволяют судить о том, какому именно колесу пары принадлежит дефект. Повышения амплитуд в области 500 и $1350\ Гц$ связаны с резонансными явлениями.

С помощью системы компьютерной математики MATLAB выполнено непрерывное вейвлет-преобразование данного виброакустического сигнала. Преобразование производилось с помощью вейвлета Морле, имеющего центральную частоту $fc=0{,}8125\ Гц$. На рисунке 3 приведена вейвлет-спектрограмма сигнала, подвергнутого синхронному накоплению с вращением второго вала. Ось x – временная локализация b (время), ось y – временной масштаб a (частота).



а



б

Рисунок 3 – Вейвлет-спектрограмма виброакустического сигнала работы коробки скоростей: а – при исправном колесе; б – при частичном сколе одного зуба

Можно отметить явное изменение картины. Равномерность вейвлет-спектрограммы при исправном зубчатом колесе сменилась неравномерностью при появлении скола одного зуба. Также значительно возросли коэффициенты $C_{a,b}$ практически для всех временных масштабов a, что подтверждает теорию удара, согласно которой ударный импульс формирует широкополосные затухающие колебания. Количество темных областей на рисунке 3,а при масштабе $a\approx130$ соответствует количеству зубьев исследуемого колеса. При наличии скола в виброакустическом сигнале появились высокочастотные составляющие, которые можно видеть на рисунке 3,б в диапазоне масштабов $a\approx1\ldots30$.

Заключение. Вейвлет-преобразование виброакустического сигнала открывает новые возможности для его анализа в целях диагностики эксплуатационных дефектов механических систем. Данный метод обработки сигналов зародился в середине 80-х годов XX века и развивается большими темпами параллельно с развитием вычислительных мощностей компьютерной техники. В виду этого появляется все больше областей применения вейвлетов. Своеобразность графического и аналитического представления вейвлет-преобразований и недостаточная освещенность в литературе на постсоветском пространстве заставляет исследователей самостоятельно разрабатывать методики анализа результатов преобразования.

При «расшифровке» вейвлет-спектрограмм и количественной оценке степени дефектов механических систем следует применять сравнение с картами-эталонами и использовать методы распознавания образов. Современные системы компьютерной математики снабжены функциями вейвлет-преобразования и содержат большой аппарат вейвлетов, а также позволяют исследователю проектировать собственные вейвлеты для исследования особенностей виброакустических сигналов. При вейвлет-анализе вибросигналов многовального зубчатого привода можно судить о наличии и степени развития локальных дефектов зубчатых колес. При этом не следует пренебрегать классическими методами анализа сигналов, основанными на Фурье-преобразовании, которые дают обобщенную картину виброактивности исследуемой системы и позволяют локализовать дефект.

Список цитируемых источников

1. Костюков, В. Н. Основы виброакустической диагностики машинного оборудования : Учебное пособие / В. Н. Костюков, А. П. Науменко, С. Н. Бойченко, Е. В. Тарасов ; под ред. В. Н. Костюкова. — Омск : НПЦ «Динамика», 2007. — 286 с.

2. Нагорнов, О. В. Вейвлет-анализ в примерах : Учебное пособие / О. В. Нагорнов, В. Г. Никитаев, В. М. Простокишин и др. ; под ред. О. В. Нагорнова. — М. : НИЯУ МИФИ, 2010. — 120 с.

3. Дьяконов, В. П. Вейвлеты. От теории к практике. — СПб. : Питер, 2008. — 440 с.

4. Яковлев, А. Н. Введение в вейвлет-преобразования : Учебное пособие. — Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2003. — 104 с.

Репозиторий БНТУ