

Концепция оценки технического состояния оборудования на основе ННТ- преобразования виброакустических сигналов

А.Р. Загретдинов¹, С.О. Гапоненко¹, В.В. Серов²

¹Казанский государственный энергетический университет

²ООО «РСК», Казань

Аннотация: Предложена концепция оценки технического состояния на основе анализа спектров Гильберта. Подробно описаны алгоритмы обработки виброакустических сигналов и принцип принятия решений об исправности оборудования.

Ключевые слова: преобразование Гильберта-Хуанга, модовая эмпирическая декомпозиция сигналов, эмпирические моды, внутренние колебания, функции корреляционного типа, доверительный интервал, виброакустический сигнал, оценка технического состояния, преобразование Фурье, вейвлет-преобразование, спектр Гильберта.

Для эффективного использования виброакустического контроля необходимо, чтобы информация о состоянии оборудования была должным образом извлечена из вибросигналов.

Традиционно для анализа вибросигналов использовался спектр Фурье. В некоторых случаях этого не достаточно, потому что преобразование Фурье не раскрывает особенности поведения спектральных составляющих во времени. Анализ виброакустических сигналов необходимо производить как по частоте, так и по времени.

Во многих современных системах диагностики проблема частотно-временного преобразования сигналов решается применением вейвлет-анализа [1-3]. Однако достоверность такого анализа во многом зависит от выбора базисной функции, с помощью которой происходит преобразование сигнала. В связи с этим возникает проблема формирования адаптивного базиса частотно-временного преобразования, функционально зависящего от содержания самих виброакустических сигналов.

Решить проблему повышения достоверности анализа виброакустических сигналов представляется возможным с применением частотно-временного преобразования Гильберта-Хуанга (Hilbert-Huang

transform, ННТ), не требующего априорного функционального базиса преобразования [4]. Здесь функции базиса получаются адаптивно непосредственно из самих сигналов процедурами отсеивания «эмпирических мод» или «внутренних колебаний» (intrinsic mode functions, IMF).

Алгоритм ННТ-преобразования

Метод реализуется в два этапа – эмпирическая модовая декомпозиция и преобразование Гильберта [4-7].

Процедура эмпирической модовой декомпозиции заключается в следующем.

1. В сигнале $y(k)$ определяется положение всех локальных экстремумов.

2. Кубическим сплайном вычисляется верхняя $u_t(k)$ и нижняя $u_b(k)$ огибающие процесса соответственно. Определяется функция средних значений $m_1(k)$ между огибающими.

$$m_1(k) = \frac{u_t(k) + u_b(k)}{2} \quad (1)$$

Разность между сигналом $y(k)$ и функцией $m_1(k)$ дает первую компоненту отсеивания – функцию $h_1(k)$, которая является первым приближением к первой функции IMF:

$$h_1(k) = y(k) - m_1(k) \quad (2)$$

3. Повторяются операции 1 и 2, принимая вместо $y(k)$ функцию $h_1(k)$, и находится второе приближение к первой функции IMF – функция $h_2(k)$.

$$h_2(k) = h_1(k) - m_2(k) \quad (3)$$

Останов операций отсеивания может осуществляться по заданному значению нормализованной квадратичной разности между двумя

последовательными итерациями или по заданному ограничению числа итераций.

4. Последнее значение $h_i(k)$ итераций принимается за наиболее высокочастотную функцию $c_1(k) = h_i(k)$ семейства IMF, которая непосредственно входит в состав исходного сигнала $y(k)$. Это позволяет вычесть $c_1(k)$ из состава сигнала и оставить в нем более низкочастотные составляющие:

$$r_1(k) = y(k) - c_1(k) \quad (4)$$

Функция $r_1(k)$ обрабатывается как новые данные по аналогичной методике с нахождением второй функции IMF – $c_2(k)$, после чего процесс продолжается.

Таким образом, достигается декомпозиция сигнала в n -эмпирическом приближении:

$$y(k) = \sum_{i=1}^n c_i(k) + r_n(k) \quad (5)$$

Выполнение преобразования Гильберта на каждой компоненте IMF позволяет выделить такие признаки, характеризующие сигнал, как мгновенные частоты и амплитуды каждой моды.

Н. Хаунг предложил построение Гильбертова Спектра, при этом первоначальные данные можно представить в следующем виде:

$$H(w, t) = y(t) = R \left\{ \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j \int w_i(t) dt} \right\} \quad (6)$$

где R - действительная часть, $a_i(t)$ - амплитуда i -ой компоненты, $w_i(t)$ - мгновенная частота i -ой компоненты.

Преобразование Гильберта-Ханга дает нам возможность представить амплитуду и мгновенную частоту как функции времени в трехмерном графике, в котором амплитуда может быть очерченной на частотно-временной плоскости.

Принцип определения технического состояния оборудования

Для определения технического состояния оборудования необходимым условием является создание эталона, сформированного из виброакустических сигналов характеризующих бездефектное состояние оборудования.

В качестве мер сходства эталона и очередного сигнала получаемого при контроле оборудования предлагается применение функций корреляционного типа.

В качестве таких функций могут быть приняты [8]:

1. Функция, подобная метрике Хаудсдорфа:

$$k_1(A, B) = \frac{1}{G} \max |a_{ij} - b_{ij}| \quad (7)$$

где a_{ij} – значение амплитуды на i -ой частоте и j -том отсчете времени эталонного спектра Гильберта A , b_{ij} – значение амплитуды на i -ой частоте и j -том отсчете времени очередного спектра Гильберта B , G – максимальное значение амплитуды.

2. Функция, подобная вычислению городской метрики:

$$k_2(A, B) = \frac{1}{GN^2} \sum_{i,j=1}^N |a_{ij} - b_{ij}| \quad (8)$$

3. Функция, подобная вычислению усредненной городской метрики:

$$k_3(A, B) = \frac{1}{GN^2} \sum_{i,j=1}^N |a_{ij} - b_{ij} - m(A) + m(B)| \quad (9)$$

где $m(A)$ и $m(B)$ – средние значения амплитуд спектров Гильберта A и B .

4. Функция подобная вычислению евклидовой метрики (среднеквадратичная погрешность):

$$k_4(A, B) = \frac{1}{GN} \sqrt{\sum_{i,j=1}^N (a_{ij} - b_{ij})^2} \quad (10)$$

5. Коэффициент корреляции:

$$k_5(A, B) = 1 - \frac{\sum a_{ij} b_{ij}}{(\sum a_{ij}^2 \sum b_{ij}^2)^{1/2}} \quad (11)$$

6. Сумма квадратов разностей:

$$k_6(A, B) = \frac{1}{G^2 N^2} \sum_{i,j=1}^N (a_{ij} - b_{ij})^2 \quad (12)$$

7. Взвешенная сумма квадратов разностей:

$$k_7(A, B) = \frac{\sum_{i,j=1}^N (a_{ij} - b_{ij})^2}{G \sqrt{\sum_{i,j=1}^N a_{i,j}^2 \sum_{i,j=1}^N b_{i,j}^2}} \quad (13)$$

Следует отметить, что целесообразным является сравнение спектров Гильберта в диапазонах частот, характеризующих их наиболее явные отличия.

Для классификации технического состояния оборудования на «годное» или «неисправное» предлагается использовать подход, характерный для процедур отбраковки аномалий. Интерпретируется совокупность вычисленных значений функции корреляционного типа как множество измеренных значений (p_1, p_2, \dots, p_m) некоторого абстрактного параметра и применяется следующая процедура [9,10]:

- 1) вычисляется оценка положения \bar{p} ;
- 2) вычисляется оценка разброса S ;
- 3) для заданного уровня значимости α строится доверительный интервал:

$$\bar{p} \pm St\left(1 - \frac{\alpha}{2}, m - 2\right) \quad (14)$$

где $t(\alpha, m)$ – α -квантиль распределения Стьюдента с m степенями свободы.

Заключение

Преобразование Гильберта-Хуанга в сочетании с изложенным принципом оценки технического состояния позволит создать весьма эффективный инструмент контроля оборудования, чувствительный к внутренним особенностям виброакустических сигналов. В дальнейших публикациях планируется привести результаты экспериментальных исследований, раскрывающие потенциал предложенной концепции.

Литература

1. Акутин М.В., Ваньков Ю.В., Кондратьев А.Е., Петрушенко Ю.Я. Оценка технического состояния подшипников качения виброакустическим методом // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2009. №2. С. 55-57.
2. Махов В.Е., Орлов Д.В. Исследование алгоритмов виброакустической диагностики автотранспортных средств // Инженерный вестник Дона, 2014, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2422.
3. Brémaud P. Mathematical Principles of Signal Processing. Fourier and Wavelet Analysis // Springer Science & Business Media. 2002. 263 p.
4. Norden E. Huang, Samuel S.P. Shen. The Hilbert-Huang transform and its applications // World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2005. 325 p.
5. Павлов А.Н., Филатова А.Е., Храмов А.Е. Частотно-временной анализ нестационарных процессов: концепции вейвлетов и эмпирических мод // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. №2. С. 141-157.
6. Берстень М.П., Зенов А.Ю. Концепция организации обработки информации в системах диагностики и распознавания // Инженерный вестник Дона, 2013, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1568.

7. Сафиуллин Н.Т. Разработка методики анализа временных рядов с помощью преобразования Хуанга-Гильберта: дис. канд. техн. наук: 05.13.01. Новосиб., 2015. 193 с.

8. Старовойтов В.В. Локальные геометрические методы цифровой обработки и анализа изображений. Минск: Институт технической кибернетики НАН Беларуси, 1997. 283 с.

9. Загретдинов А.Р., Кондратьев А.Е., Зиганшин Ш.Г. Аппаратно-программное обеспечение ударно-акустического контроля композиционных конструкций // Инженерный вестник Дона, 2014, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2597.

10. Бусаров А.В., Ваньков Ю.В., Акутин М.В., Александрович Ю.П. Автоматизированный диагностический комплекс для контроля клепаного соединения лопаток газотурбинной установки // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2008. №12. С. 37-40.

References

1. Akutin M.V., Van'kov Yu.V., Kondrat'ev A.E., Petrushenko Yu.Ya. Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika. 2009. №2. pp. 55-57.

2. Makhov V.E., Orlov D.V. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2422.

3. Brémaud P. Mathematical Principles of Signal Processing. Fourier and Wavelet Analysis // Springer Science & Business Media. 2002. 263 p.

4. Norden E. Huang, Samuel S.P. Shen. The Hilbert-Huang transform and its applications // World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 2005. 325 p.

5. Pavlov A.N., Filatova A.E., Khramov A.E. Izvestiya vuzov. Prikladnaya nelineynaya dinamika. 2011. №2. pp. 141-157.

6. Bersten' M.P., Zenov A.Yu. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2013/1568.



7. Safiullin N.T. Razrabotka metodiki analiza vremennykh ryadov s pomoshch'yu preobrazovaniya Khuanga-Gil'berta [The method of time series analysis using the Hilbert-Huang transform]: dis. kand. tekhn. nauk: 05.13.01. Novosibirsk, 2015. 193 p.
8. Starovoytov V.V. Lokal'nye geometricheskie metody tsifrovoy obrabotki i analiza izobrazheniy [Local geometric methods of digital image processing and analysis]. Minsk: Institut tekhnicheskoy kibernetiki NAN Belarusi, 1997. 283 p.
9. Zagretdinov A.R., Kondrat'ev A.E., Ziganshin Sh.G. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2014/2597.
10. Busarov A.V., Van'kov Yu.V., Akutin M.V., Aleksandrovich Yu.P. Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. 2008. № 12. pp. 37-40.