

УДК 62-83: 681.518.54: 534.647

РАЗРЕЖЕННАЯ ВЕЙВЛЕТНАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ В ЗАДАЧАХ ВИБРОДИАГНОСТИКИ РОТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Ю.П. АСЛАМОВ, А.П. АСЛАМОВ, И.Г. ДАВЫДОВ, А.В. БОРСУК

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 25 сентября 2017

Аннотация. Оценка технического состояния роторного оборудования по вибрационным сигналам традиционно является важной задачей в практике его производства и эксплуатации. На современном этапе развития повышение эффективности вибродиагностики достигается за счет автоматизации решения этой задачи, а также за счет использования согласованных наборов информативных признаков, что обуславливает актуальность разработки алгоритмов по их выделению. В работе предложен алгоритм разреженной вейвлетной декомпозиции для выделения ударных процессов в вибрационных сигналах. Проведено тестирование алгоритма на экспериментальном материале. Представлен анализ результатов эксперимента в сравнении с согласованной вейвлетной фильтрацией.

Ключевые слова: вибродиагностика, цифровая обработка сигналов, декомпозиция, вейвлет преобразование.

Abstract. Evaluation of the technical condition of rotary equipment on vibration signals is traditionally important task in the practice of its production and operation. At the present an increase in the effectiveness of vibration-based diagnostics is achieved by automating the solution of this problem and also by the use of matched sets of informative features, which causes the urgency of the development of algorithms for their detection. The algorithm of sparse wavelet decomposition is proposed to detect shock processes in vibration signals. The algorithm is tested on the experimental material. The results of the experiment are compared with the matched wavelet filtration.

Keywords: vibration-based diagnostics, digital signal processing, decomposition, wavelet transform.

Doklady BGUIR. 2017, Vol. 110, No. 8, pp. 91-98

**Sparse wavelet decomposition in problems
of vibration-based diagnostics of rotary equipment**

Y.P. Aslamov, A.P. Aslamov, I.G. Davydov, A.V. Borsuk

Введение

В настоящее время диагностика технического состояния роторного оборудования осуществляется на основе различных методов [1, 2]. Наибольшее распространение получили методы анализа вибрационных сигналов в частотной области – анализ прямого спектра и спектра огибающей. За многие годы применения данного метода была сформирована обширная база шаблонов информативных признаков для каждого дефекта. Однако при использовании автоматической вибрационной диагностики спектральные методы не всегда позволяют уверенно различать типовые дефекты. Причиной выступает как вариация типов оборудования, режимов работы, внешних условий, так и схожесть спектральных шаблонов некоторых дефектов.

Наиболее очевидным решением данной проблемы является совместная обработка в спектральной и временной областях [3]. Одним из наиболее распространенных методов частотно-временного анализа является вейвлетное преобразование (ВП) [4]. С позиции автоматической вибродиагностики данный метод обладает следующими особенностями.

1. ВП вносит амплитудные искажения во временной сигнал и его спектр, что затрудняет обработку в частотной области, где анализ также ведется по значениям амплитуд отдельных дефектных частот [5].

2. Согласованная вейвлетная фильтрация увеличивает отношение сигнал-шум для целевых компонент сигнала, однако всегда присутствует фоновый шум, который затрудняет поиск периодичностей и выделение шаблонов ударных процессов в случаях слабой выраженности дефекта.

3. Зачастую ВП не способно точно локализовать слабо выраженные ударные процессы на ранних стадиях развития дефектов оборудования.

Для преодоления указанных выше особенностей ВП авторами предложен алгоритм разреженной вейвлетной декомпозиции (РВД), основанный на концепции Смита и Левицки [6, 7]. Данный метод позволяет контролировать степень разложения сигнала, тем самым обеспечивая более точную локализацию ударных процессов, чем ВП, что упрощает обработку во временной и спектральной областях. В статье приводятся краткое описание алгоритма РВД и результаты его применения.

Теоретический анализ

Как известно, временной сигнал $x(t)$ можно представить суперпозицией определенных базисных функций (БФ). Разреженное представление сигнала $x(t)$ имеет вид набора пиков, каждому из которых соответствует БФ φ_m с тремя параметрами: амплитудой, частотой заполнения и временным положением:

$$x(t) = \sum_m \sum_i s_m^i \varphi_m(t - \tau_m^i) + \varepsilon(t), \quad (1)$$

где s_m^i и τ_m^i – амплитудный коэффициент и временная позиция m -й базисной функции; φ_m – базисная функция с частотой заполнения f_m ; $\varepsilon(t)$ – остаточный сигнал (residue). Форма БФ может быть оптимизирована посредством метода градиентного спуска [6].

Большинство дефектов подшипников качения и зубчатых передач характеризуется наличием ударных процессов с одной или несколькими резонансными частотами f_m . Тогда для упрощения сигнал $x(t)$ представляется суперпозицией нескольких сигнальных компонент $x_k(t)$, имеющих наибольший энергетический вклад:

$$x(t) = \sum_{k=1}^K x_k(t) + \varepsilon_0(t), \quad (2)$$

где K – количество значимых резонансных частот; $\varepsilon_0(t)$ – остаточный сигнал.

Фундаментальный подход к анализу виброакустических сигналов выделяет четыре частотных диапазона (низких, средних, высоких и сверхвысоких частот), каждому из которых свойственны свои возмущающие силы, своя физическая и диагностическая модель [1]. Таким образом, компоненты $x_k(t)$, попадающие в разные диапазоны, можно считать условно независимыми, что упрощает обработку как в частотной, так и во временной областях.

Структурная схема алгоритма РВД приведена на рис. 1.

РВД имеет следующий алгоритм работы.

1. Построение нормированной скалограммы $E(f)$ на основе комплексного вейвлета *morlet*, который выбран вследствие высокого частотно-временного разрешения [4].

2. Поиск наиболее выраженных пиков скалограммы $E(f)$ в полосе частот 0,25...20 кГц. Найденные пики соответствуют доминирующим (резонансным) частотам $f_1...f_K$ в составе сигнала.

3. Формирование нормированного по энергии набора БФ $\varphi_1... \varphi_K$ на основе найденных резонансных частот $f_1...f_K$. В качестве БФ для выделения ударных процессов выбрана «sin_row» [8] (рис. 2, а), определяемая выражением (3). Одним из преимуществ «sin_row» является линейный характер зависимости доминирующей частоты от масштабного коэффициента [9]. Доминирующей называется частота, которой соответствует максимум энергетического спектра вейвлет-функции при различных масштабных коэффициентах [8].

$$\psi_m(t) = \begin{cases} \left(\frac{4}{\pi^2} \right) \left(\frac{\pi^2}{4} - (\omega t)^2 \right) \exp\left(\frac{-2(\omega t)^2}{\pi^2} \right), & -\infty < t \leq 0, \\ \cos(\omega t) \exp\left(-\frac{t}{k_0} \right), & 0 < t < \infty, \end{cases} \quad (3)$$

где k_0 – скорость убывания экспоненты; ω – доминирующая циклическая частота.

4. Расчет оптимального количества итераций РВД посредством декомпозиции короткого отрезка входного сигнала ($L_{\text{фраг}} < L$).

5. Декомпозиция входного сигнала $x(t)$ на набор сигнальных компонент $x_1(t) \dots x_k(t)$. Декомпозиция представляет собой итерационную процедуру вычитания БФ из сигнала $x(t)$ до достижения требуемого уровня разложения. Разреженное представление сигнала для каждой БФ формируется в виде набора пиков посредством фиксирования временного положения, амплитуды и частоты заполнения вычитаемых БФ.

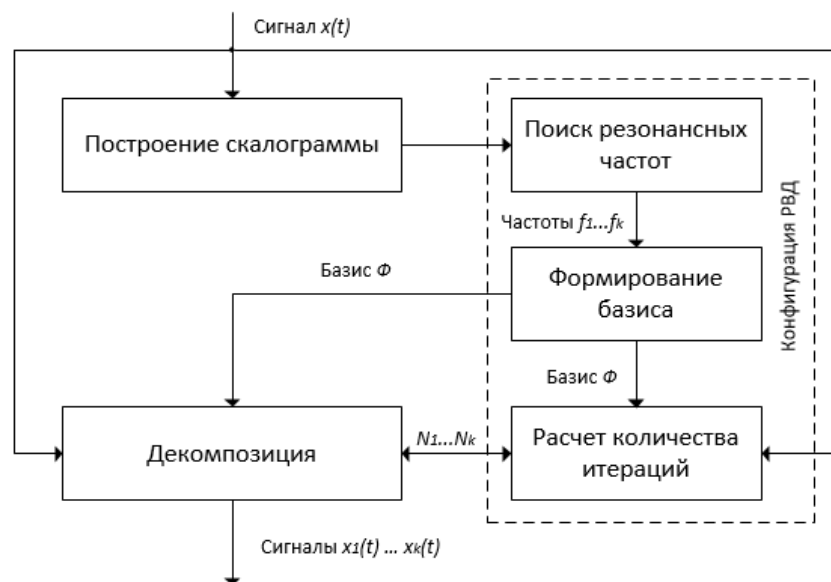


Рис. 1. Структурная схема алгоритма разреженной вейвлетной декомпозиции

Точность восстановления исходного сигнала существенно зависит от количества итераций разложения. Под итерацией разреженной вейвлетной декомпозиции понимается процедура вычитания из сигнала одной БФ. Для расчета оптимального количества итераций использовался куртозис, характеризующий степень подобия закона распределения сигнала нормальному. Процедура поиска оптимального количества итераций заключается в разложении фрагмента сигнала ($L_{\text{фраг}} < L$) по сформированному базису. Процедура осуществляется последовательно для K значений количества итераций $N = [N_1, N_2, \dots, N_M]$. После интерполяции вектор значений куртозиса принимает вид, представленный на рис. 2, б.

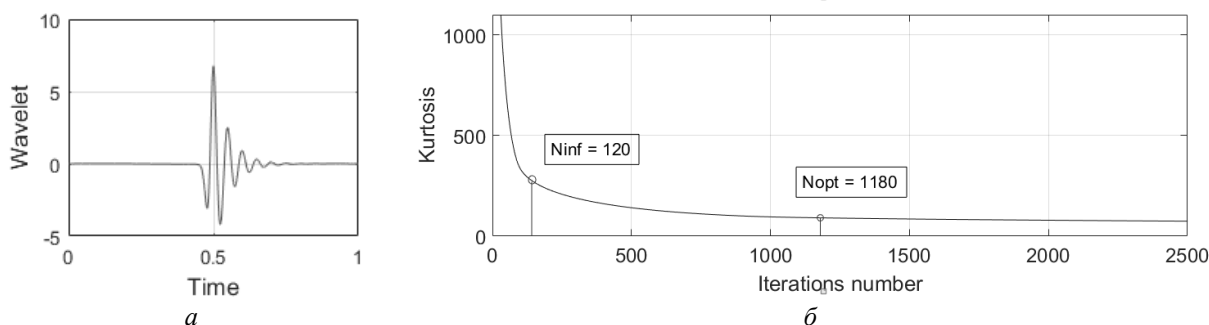


Рис. 2. Поиск оптимального количества итераций: а – вейвлет «sin_pow»; б – кривая куртозиса

Эмпирически установлено, что для сигналов дефектов с различной степенью выраженности для полного восстановления требуется не более N_{max} количества итераций.

$$N_{\text{max}} = T / T_0 \cdot k_1, \quad (4)$$

где T – длительность сигнала, с; T_0 – эффективная длительность БФ, с; $k_1 = 2$ – коэффициент перекрытия.

По мере увеличения количества итераций от N_{min} до N_{max} куртозис асимптотически убывает (рис. 2, б), стремясь к значению куртозиса для оригинального сигнала. На первой части кривой восстанавливаются наиболее выраженные ударные процессы, на второй – менее выраженные и фоновый шум. Оптимальное количество итераций N_{opt} может быть выбрано как на первой, так и на второй части кривой в зависимости от решаемой задачи. Количество итераций N_{inf} , соответствующее точке перегиба кривой куртозиса, оказалось недостаточным для качественного

выделения всех ударных процессов. Для решения задачи фильтрации оптимальная точка должна выбираться на второй части кривой (рис. 2, б). Значение N_{opt} может быть рассчитано, как

$$Kurtosis(N_{opt}) = Kurtosis(N_i) \cdot k_2, \quad (5)$$

где $Kurtosis(N_i)$ – значение куртозиса при количестве итераций N_i ; $k_2 = 1,5 \dots 1,7$ – поправочный коэффициент.

Методика эксперимента

Для проведения эксперимента использована вычислительная среда MATLAB. Источником записей являются 9 образцов оборудования. Исходные данные о вибрации получены в форме WAV-записей, одно- и двухканальных (в случае двух перпендикулярных осей вибрации в одной точке). В общей сумме обработано и проанализировано около 120 реализаций. В качестве датчика вибрации использовался MEMS-акселерометр с частотой дискретизации $F = 96$ кГц и чувствительностью $s = 16$ мВ/г. Длительность всех тестовых сигналов $T = 10$ с. В силу ограничений статьи ниже представлена небольшая часть этой выборки.

Сравнение результатов работы РВД и ВП в спектральной области производится в терминах выраженности спектральных компонент $p(f_i)$:

$$p(f_i) = S(f_i) / \text{rms}(S([f_i - \Delta f; f_i + \Delta f])), \quad (6)$$

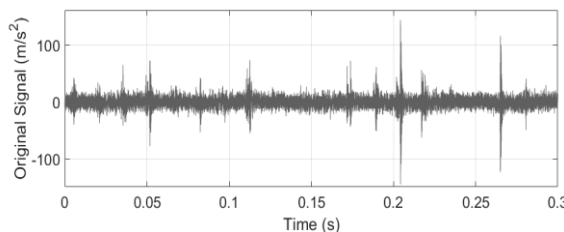
где f_i – спектральная компонента, Гц; $\Delta f = 1 \dots 5$ Гц – окрестность спектральной компоненты; $S(f)$ – спектр вибрации; $\text{rms}(x)$ – среднеквадратическое значение.

Результаты и их обсуждение

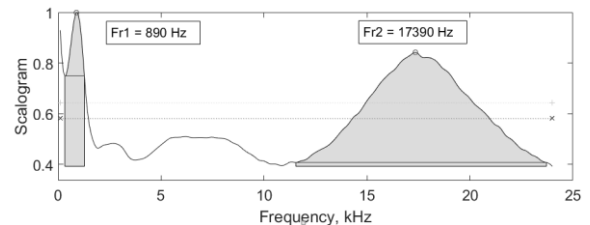
Рассмотрим 2 типа дефектов оборудования: сильно и слабо выраженных. На рис. 3 представлены результаты применения РВД и ВП для сигнала подшипника качения 6213 с сильно выраженным дефектом наружного кольца.

Рассматриваемый вибрационный сигнал (рис. 3, а) разложен по базису, состоящему из двух БФ «sin_row» с резонансными частотами $F_{r1} = 890$ Гц и $F_{r2} = 17390$ Гц, которые определены по пикам скалограммы (рис. 3, б). Сигнальные компоненты для указанных резонансных частот, полученные при помощи РВД (рис. 3, в, ж), в точности повторяют ударные процессы оригинального сигнала (рис. 3, а) и имеют нулевой уровень фонового шума, в отличие от соответствующих сигнальных компонент, полученных при помощи ВП (рис. 3, з, з).

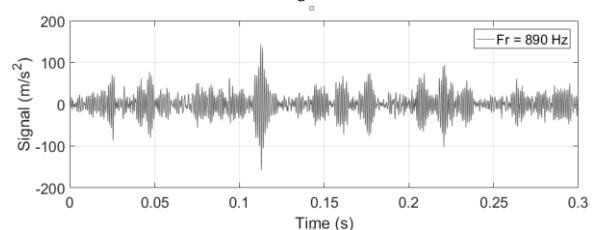
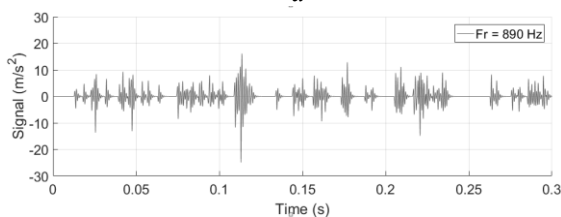
Спектры огибающей виброускорения сигналов РВД и ВП для резонансных частот F_{r1} (рис. 3, д, и) и F_{r2} (рис. 3, е, к) имеют только амплитудные отличия. Резонансной частоте $F_{r2} = 17390$ Гц соответствует набор компонент перекачивания тел качения по наружному кольцу $m \cdot BPFO$, где $m = 1 \dots 8$, $BPFO = 65,59$ Гц, что указывает на сильно выраженный дефект наружного кольца подшипника качения. Резонансной частоте $F_{r1} = 890$ Гц соответствует набор валовых компонент $n \cdot F1$, где $n = 1 \dots 10$, $F1 = 16,25$ Гц, что указывает на наличие биений по линии вала как следствие возбуждения внешней и внутренней обоймы подшипника. Выраженность спектральных компонент p в спектрах огибающей виброускорения для РВД и ВП отличается не более чем на $\Delta p = 2,5$ %.



а



б



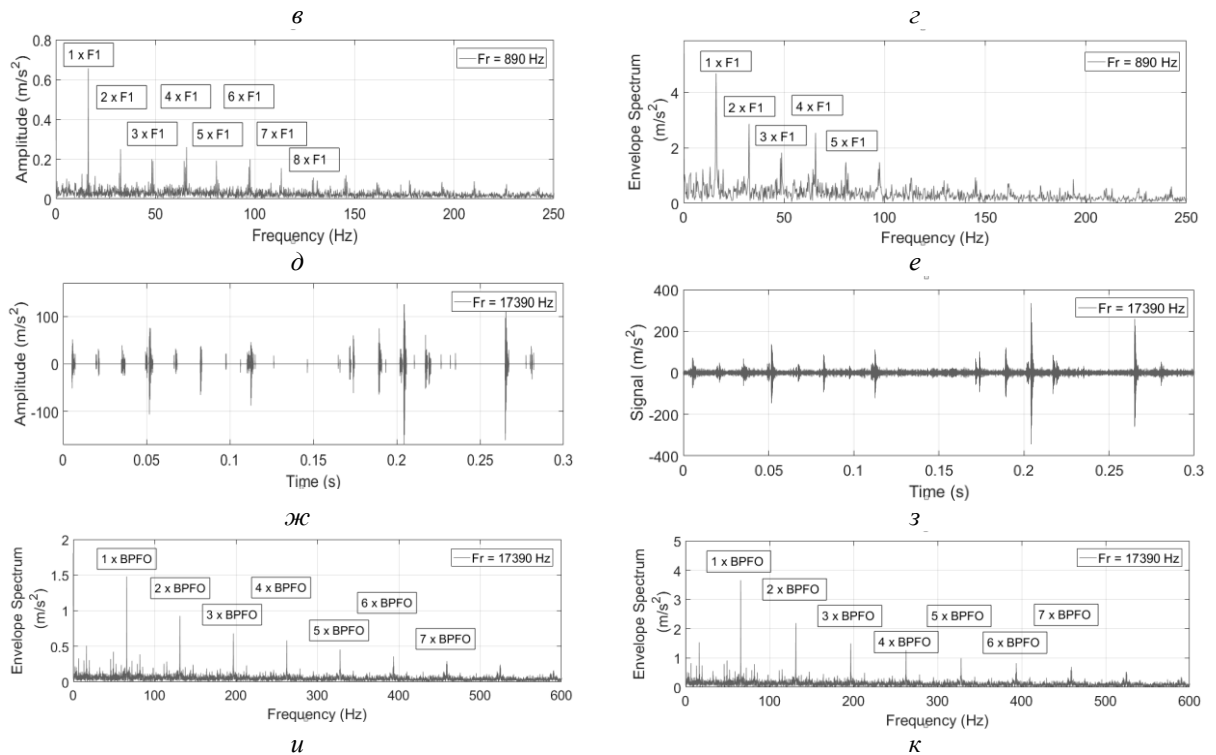
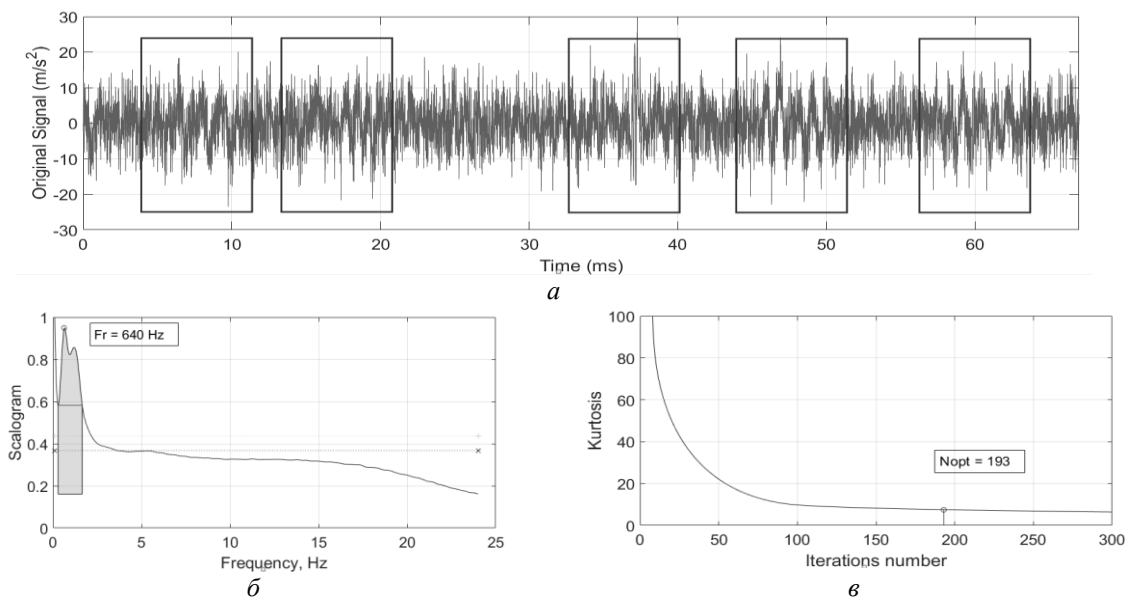


Рис. 3. РВД и ВП для сигнала подшипника с сильным дефектом наружного кольца:
 а – сигнал вибрации; б – скалограмма; в – виброускорение (РВД, F_{r1}); з – виброускорение (ВП, F_{r1});
 д – спектр огибающей (РВД, F_{r1}); е – спектр огибающей (ВП, F_{r1}); ж – виброускорение (РВД, F_{r2});
 з – виброускорение (ВП, F_{r2}); и – спектр огибающей (РВД, F_{r2}); к – спектр огибающей (ВП, F_{r2})

На рис. 4 приведен пример выделения слабых ударных процессов, возникших в результате зарождающегося износа внутреннего кольца подшипника качения 6213.

Исследуемый сигнал (рис. 4, а) имеет одну выраженную резонансную частоту $F_{r1} = 640$ Гц на скалограмме (рис. 4, б). Метод РВД (рис. 4, з) точнее указывает местоположение слабых ударных процессов, чем ВП (рис. 4, д). Спектры огибающей виброускорения (рис. 4, е, ж) содержат набор валовых компонент $n \cdot F_1$, $n = 1 \dots 10$, $F_1 = 16,23$ Гц, указывающий на бой вала как результат износа внутреннего кольца. Спектральные компоненты в спектре огибающей РВД (рис. 4, е) имеют выраженность

в среднем на $\Delta p = 13\text{--}78\%$ большую, чем аналогичные компоненты спектра огибающей ВП (рис. 4, ж).



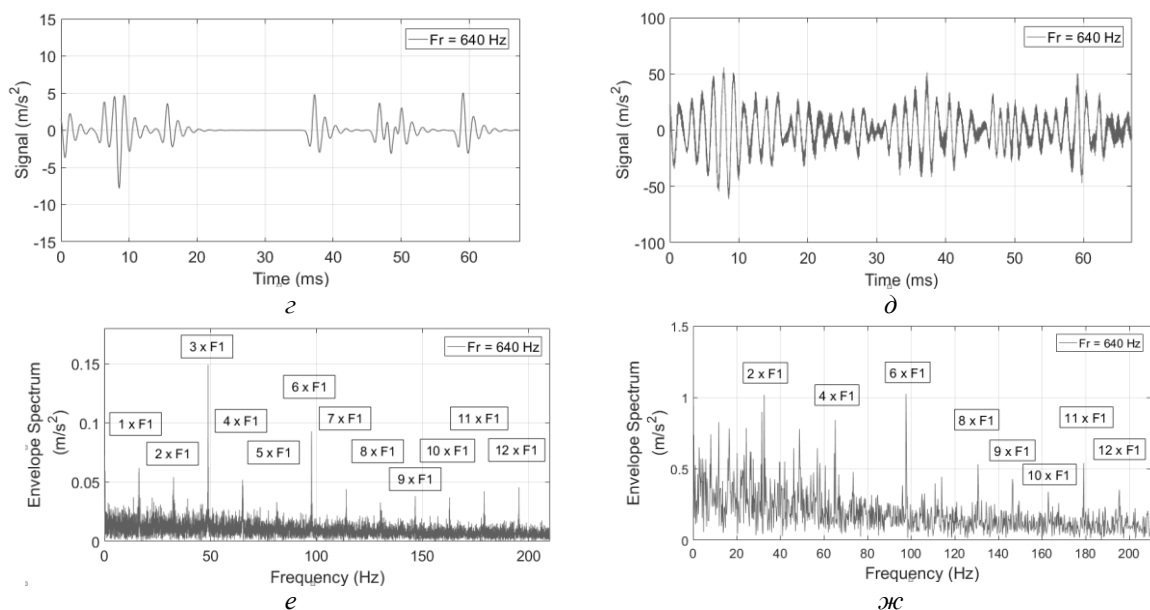


Рис. 4. Результаты работы РВД и ВП для сигнала подшипника со слабым дефектом:
a – сигнал вибрации; *б* – скалограмма; *в* – кривая куртозиса; *г* – виброускорение (РВД, F_{r1});
д – виброускорение (ВП, F_{r1}); *е* – спектр огибающей (РВД, F_{r1}); *ж* – спектр огибающей (ВП, F_{r1})

Заключение

Предложен алгоритм разреженной вейвлетной декомпозиции для выделения ударных процессов в сигналах вибрации на основе вейвлет-функции «*sin_row*». Эффективность алгоритма проверена путем обработки данных, полученных с подшипников качения с сильным и зарождающимся дефектами. Как показано на рис. 3 и 4, вследствие использования узкого базиса (одной резонансной частоте соответствует одна вейвлетная функция), РВД имеет схожие характеристики с ВП. При наличии сильного дефекта с выраженными ударными процессами (рис. 3) РВД и ВП показывают практически идентичные результаты в частотной области. Во временной области сигнальные компоненты ВП имеют фоновый шум, в отличие от сигнальных компонент РВД. Выраженности спектральных компонент для РВД и ВП отличаются незначительно. При анализе сигнала со слабо выраженным дефектом (рис. 4, *a*) результаты, полученные на основе РВД и ВП, значительно отличаются как во временной, так и в частотной областях (рис. 4, *г-ж*). РВД, в отличие от ВП, хорошо локализует ударные процессы во временной области, причем они в точности совпадают по амплитуде и местоположению с ударными импульсами в оригинальном сигнале (рис. 4, *г*). Наличие фонового шума в сигнальных компонентах ВП затрудняет автоматический анализ спектра огибающей, вследствие отсутствия или слабой выраженности спектральных компонент.

Представленный метод продемонстрировал удовлетворительные результаты, что позволяет рекомендовать его к внедрению в практическую вибродиагностику роторного оборудования. Предметом дальнейших исследований являются алгоритмы выделения шаблонов ударных процессов на основе РВД.

Список литературы

1. Костюков В.Н., Науменко А.П. Основы виброакустической диагностики и мониторинга машин. Омск: ОмГТУ, 2011. 360 с.
2. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации. СПб: СПбГМТУ, 2004. 156 с.
3. Яковлев А.Н. Введение в вейвлет-преобразования. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. 104 с.
4. Малла С. Вэйвлеты в обработке сигналов. М.: Мир, 2005. 671 с.
5. Кулаичев А.П. Критика вейвлет анализа ЭЭГ // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2016. Т. 1, № 12. С. 47–57.
6. Smith E.C., Lewicki M.S. Efficient auditory coding // Nature. 2006. Vol. 439, № 7079. P. 978–982.
7. Smith E., Lewicki M.S. Efficient coding of time relative structure using spikes // Neural Computation. 2005. Vol. 17, № 1. P. 19–45.

8. Давыдов И.Г., Лыньков Л.М., Левкович В.Н. Диагностика качества подшипников качения с применением вейвлет-анализа // Докл. БГУИР, 2005. Т. 3, № 3. С. 48–52.
9. Васюкевич С.Ю., Давыдов И.Г., Мигалевиц С.А. Исследование смещения максимума спектра мощности базисной вейвлет-функции в зависимости от масштабного вейвлет-коэффициента // Тез. докл. VIII Белорусско-российской науч.-техн. конф. «Технические средства защиты информации», Браслав, 24–28 мая 2010. С. 106–107.

References

1. Kostjukov V.N., Naumenko A.P. Osnovy vibroakusticheskoy diagnostiki i monitoringa mishan. Omsk: OmGTU, 2011. 360 s. (in Russ.)
2. Barkov A.V., Barkova N.A. Vibracionnaja diagnostika mashin i oborudovaniya. Analiz vibracii. SPb: SPbGMTU, 2004. 156 s. (in Russ.)
3. Jakovlev A.N. Vvedenie v vejvlet-preobrazovaniya. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2003. 104 s. (in Russ.)
4. Malla S. Vjevlety v obrabotke signalov. M.:Mir, 2005. 671 s. (in Russ.)
5. Kulaichev A.P. Kritika vejvlet analiza JeJeG // Aktual'nye problemy gumanitarnyh i estestvennyh nauk. 2016. T. 1, № 12. S. 47–57. (in Russ.)
6. Smith E.C., Lewicki M.S. Efficient auditory coding // Nature. 2006. Vol. 439, № 7079. P. 978–982. (in Russ.)
7. Smith E., Lewicki M.S. Efficient coding of time relative structure using spikes // Neural Computation. 2005. Vol. 17, № 1. P. 19–45. (in Russ.)
8. Davydov I.G., Lyn'kov L.M., Levkovich V.N. Diagnostika kachestva podshipnikov kachenija s primeneniem vejvlet-analiza // Dokl. BGUIR, 2005. T. 3, № 3. S. 48–52. (in Russ.)
9. Vasjuevich S.Ju., Davydov I.G., Migalevich S.A. Issledovanie smeshhenija maksimuma spektra moshhnosti bazisnoj vejvlet-funkcii v zavisimosti ot masshtabnogo vejvlet-kojefficienta // Tez. dokl. VIII Belorussko-rossijskoj nauch.-tehn. konf. «Tehicheskie sredstva zashhity informacii», Braslav, 24–28 maja 2010. S. 106–107. (in Russ.)

Сведения об авторах

Асламов Ю.П., аспирант кафедры программного обеспечения информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Асламов А.П., аспирант кафедры программного обеспечения информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Давыдов И.Г., к.т.н., доцент, доцент кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Борсук А.В., магистрант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный
университет информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-89-11;
e-mail: aslamov.yura@gmail.com
Асламов Юрий Павлович

Information about the authors

Aslamov A.P., PG student of software for information technologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Aslamov A.P., PG student of software for information technologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Davydov I.G., PhD, associate professor, associate professor of information radiotechnologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Borsuk A.V., master's degree student of Information radiotechnologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
tel. +375-17-293-89-11;
e-mail: aslamov.yura@gmail.com
Aslamov Yury Pavlovich