

(19)



**Евразийское  
патентное  
ведомство**

(11) **034627**(13) **B1**(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ЕВРАЗИЙСКОМУ ПАТЕНТУ**

(45) Дата публикации и выдачи патента  
**2020.02.28**

(51) Int. Cl. **G01M 7/02 (2006.01)**  
**G01M 13/04 (2019.01)**

(21) Номер заявки  
**201800244**

(22) Дата подачи заявки  
**2018.03.06**

---

(54) **СПОСОБ ВИБРАЦИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ РОТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ**

---

(43) **2019.09.30**

(56) US-B2-8226568

(96) **2018/EA/0015 (BY) 2018.03.06**

AL-RAHEEM Khalid F. et al. Rolling bearing fault diagnostics using artificial neural networks based on Laplace wavelet analysis. International Journal of engineering, Science and Technology, 2010, vol. 2, No. 6, pp. 278-290

(71)(73) Заявитель и патентовладелец:  
**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ  
ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ  
"СИТЕЛ" (BY)**

RU-C2-2356021  
SU-A1-1472781

(72) Изобретатель:  
**Асламов Юрий Павлович (BY)**

(74) Представитель:  
**Вашук Т.В., Королева С.В.,  
Емельянова В.А. (BY)**

(57) Изобретение относится к области вибрационной диагностики роторного оборудования с использованием систем и способов обработки вибрационных сигналов и может использоваться для раннего выявления дефектов промышленного оборудования, возникающих в процессе эксплуатации, что позволит проводить его своевременное техническое обслуживание и ремонт. Предложен способ вибрационной диагностики роторного оборудования для выявления дефектов подшипников качения путем обработки сигнала вибрации заключается в том, что вибрационный сигнал, полученный от установленного на оборудовании акселерометра, подвергают вейвлет-преобразованию с применением базисной функции  $\psi_m(t)$

$$\psi_m(t) = \begin{cases} \left( \frac{4}{\pi^2} \right) \left( \frac{\pi^2}{4} - (\omega t)^2 \right) \exp \left( -\frac{2(\omega t)^2}{\pi^2} \right); & \text{при } -\infty < t \leq 0 \\ \cos(\omega t) \exp \left( -\frac{t}{k} \right); & \text{при } 0 < t < \infty \end{cases}, \quad (1)$$

где параметр  $k$  задает скорость убывания экспоненты, а параметр  $\omega$  - доминирующую циклическую частоту вейвлета, формируют матрицу вейвлет-коэффициентов и строят скейлограмму сигнала; определяют доминирующие собственные частоты оборудования, содержащие ударные процессы, на основе поиска максимумов скейлограммы; выбирают наборы вейвлет-коэффициентов, соответствующие найденным на скейлограмме частотам; для каждого выбранного набора вейвлет-коэффициентов при помощи преобразования Гильберта строят огибающую, на основе которой определяют местоположение ударных импульсов во временном сигнале; рассчитывают преобразование Фурье от огибающей набора вейвлет-коэффициентов, осуществляют поиск набора подшипниковых частот в спектре и формируют матрицу найденных подшипниковых частот; по результатам сравнения совокупности найденных подшипниковых частот с шаблоном делают заключение о техническом состоянии подшипника.

**B1****034627****034627****B1**

Изобретение относится к области вибрационной диагностики роторного оборудования с использованием систем и способов обработки вибрационных сигналов и может использоваться для раннего выявления дефектов промышленного оборудования, возникающих в процессе эксплуатации, что позволит проводить его своевременное техническое обслуживание и ремонт.

Известен способ вибрационной диагностики подшипников качения, который заключается в анализе спектра Фурье огибающей вибросигнала. Вибросигнал подвергается полосовой фильтрации и вычисляется его огибающая. Рассчитывается спектр Фурье от огибающей вибросигнала. Вычисляются основные подшипниковые частоты. Осуществляется поиск подшипниковых частоты в спектре огибающей. Заключение о наличии дефекта подшипника и степени его выраженности делается на основе схожести найденных спектральных компонент с шаблоном конкретного дефекта [1].

Недостатком указанного способа является сильная зависимость качества работы способа от выбранной полосы фильтрации, что влияет на достоверность результата диагностики.

Известны также способы вибрационной диагностики роторного оборудования, которые заключаются в использовании спектрального куртозиса для оценки центральной частоты и полосы пропускания полосового фильтра [2, 3].

Недостатком указанных способов является их низкая чувствительность к зарождающимся дефектам из-за отсутствия анализа формы временного сигнала (ударных процессов).

Известен также способ выделения физиологической информации на основе базисных функций и непрерывного вейвлет-преобразования, который заключается в поиске интересующих областей в частотной области при помощи набора базисных функций и непрерывного вейвлет-преобразования [4].

Недостатком указанного способа является низкая чувствительность метода при обнаружении зарождающихся дефектов на ранней стадии их развития из-за использования базисных функций, неадаптированных для решения задач вибрационной диагностики.

Задача, решаемая изобретением, заключается в увеличении чувствительности способа вибрационной диагностики роторного оборудования для выявления дефектов подшипников качения и повышении достоверности результатов диагностики. Поставленная задача решается заявляемым способом вибрационной диагностики роторного оборудования для выявления дефектов подшипников качения на основе анализа спектра огибающей вибрации при помощи предварительной вейвлет-фильтрации с использованием базисной функции, оптимизированной для выделения ударных процессов подшипников качения.

В соответствии с изобретением способ вибрационной диагностики роторного оборудования для выявления дефектов подшипников качения путем обработки сигнала вибрации, заключается в том, что вибрационный сигнал, полученный от установленного на оборудовании акселерометра, подвергают непрерывному вейвлет-преобразованию с применением базисной функции  $\psi_m(t)$ :

$$\psi_m(t) = \begin{cases} \left(\frac{4}{\pi^2}\right)\left(\frac{\pi^2}{4} - (\omega t)^2\right) \exp\left(-\frac{2(\omega t)^2}{\pi^2}\right); & \text{при } -\infty < t \leq 0 \\ \cos(\omega t) \exp\left(\frac{-t}{k}\right); & \text{при } 0 < t < \infty \end{cases}, \quad (1)$$

где параметр  $k$  задает скорость убывания экспоненты, а параметр  $\omega$  -доминирующую циклическую частоту вейвлета;

формируют матрицу вейвлет-коэффициентов и строят скейлограмму сигнала;

определяют доминирующие собственные частоты оборудования, содержащие ударные процессы, на основе поиска максимумов скейлограммы;

выбирают наборы вейвлет-коэффициентов, соответствующие найденным на скейлограмме частотам;

для каждого выбранного набора вейвлет-коэффициентов при помощи преобразования Гильберта строят огибающую, на основе которой определяют местоположение ударных импульсов во временном сигнале;

рассчитывают преобразование Фурье от огибающей набора вейвлет-коэффициентов, осуществляют поиск набора подшипниковых частот в спектре и формируют матрицу найденных подшипниковых частот;

по результатам сравнения совокупности найденных подшипниковых частот с шаблоном делают заключение о техническом состоянии подшипника.

По сравнению с известным решением [1] предлагаемый способ осуществляет выбор полосы частот для фильтрации адаптивно на основе анализа скейлограммы, что повышает выраженность спектральных компонент в анализируемой полосе частот и, следовательно, повышает чувствительность и точность вибрационной диагностики подшипников качения.

По сравнению с известными решениями [2, 3] предлагаемый способ анализирует форму временного сигнала, т.е. осуществляет выбор полосы фильтрации, содержащей ударные процессы подшипников качения. Предлагаемый способ имеет большую чувствительность при обнаружении зарождающихся дефектов подшипников качения.

По сравнению с известным решением [4] базисная функция предлагаемого способа оптимизирована для выделения ударных процессов подшипников качения, поэтому обладает большей точностью при поиске собственных частот подшипника и, как следствие, большей чувствительностью при детектировании дефектов подшипников качения.

Заявляемый способ увеличивает чувствительность спектральных методов вибрационной диагностики по обнаружению дефектов подшипников качения на 8-12%. Для специалиста очевидно, что данный способ диагностики можно распространить и на другие элементы роторного оборудования, такие как зубчатые передачи, соединительные муфты и т.д.

Изобретение поясняется с помощью фигур.

Фиг. 1 - схема диагностируемого оборудования с установленным датчиком вибрации;

фиг. 2 - вибрационный сигнал подшипника качения 6213 с дефектом наружного кольца;

фиг. 3 - базисная вейвлет-функция;

фиг. 4 - скейлограмма, построенная на основе вейвлет-функции  $\psi_m(t)$ ;

фиг. 5 - скейлограмма и найденные собственные частоты Fr1 и Fr2;

фиг. 6 - спектр Фурье огибающей вибрации для частоты Fr1;

фиг. 7 - спектр Фурье огибающей вибрации для частоты Fr2.

Заявляемый способ иллюстрируется примером диагностики подшипника 6213, установленного на испытательном стенде, схематично изображенном на фиг. 1, где 1, 4 - шарикоподшипник радиальный 6213 (подшипник001, подшипник002); 2 - вал (вал001); 3 - электродвигатель АИР160S4, 5 - датчик вибрации.

На первом этапе от акселерометра (датчика вибрации), установленного на диагностируемом элементе оборудования (фиг. 1 подшипник002), получают вибрационный сигнал (фиг. 2).

На втором этапе при помощи вейвлет-функции  $\psi_m(t)$  (1) (фиг. 3) и непрерывного вейвлет-преобразования рассчитывают скейлограмма вибросигнала (фиг. 4), которая описывает распределение энергии сигнала по частоте (масштабам вейвлет-преобразования). Производят ее нормировку по амплитуде. Осуществляют поиск максимумов (гребней) скейлограммы и определяют доминирующие собственные частоты оборудования (масштабные коэффициенты вейвлета  $\psi_m(t)$ ) (фиг. 5). Например, для приведенного на фиг. 2 вибрационного сигнала на скейлограмме найдены собственные частоты Fr1=1115 Гц и Fr2=4172 Гц.

На третьем этапе рассчитывают огибающую по Гильберту для наборов вейвлет-коэффициентов, соответствующих собственным частотам Fr1 и Fr2. Вычисляют спектр Фурье для огибающей каждого полученного наборов вейвлет-коэффициентов.

На четвертом этапе в соответствии с моделью подшипника и скоростью вращения вала, на котором подшипник установлен, рассчитывают значения основных подшипниковых частот. Осуществляют поиск подшипниковых частот в спектрах Фурье огибающей вибрации для собственных частот Fr1 и Fr2.

На пятом шаге по результатам сравнения наборов найденных подшипниковых частот для Fr1 и Fr2 с шаблонами, хранящимися в базе данных, делают заключение о наличии/отсутствии дефектов подшипника качения и их выраженности (фиг. 6 и 7). Спектр Фурье огибающей вибрации для собственной частоты Fr2, представленный на фиг. 7, указывает на выраженный дефект наружного кольца подшипника 6213 (подшипник002), сходство с шаблоном 78%. Спектр Фурье огибающей вибрации для собственной частоты Fr1, представленный на фиг. 6, указывает на биение вала вал001, сходство с шаблоном 61%. Сходство рассчитывается как сумма весовых коэффициентов найденных подшипниковых частот.

Источники информации:

[1] Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации: учеб. пособие / СПб.: СПбГМТУ, 2004. - 156 с.

[2] CN 106053069 A, 2016.02.04, G 06 M 13/00.

[3] CN 102866010 B, 2015.10.26, G 06 N 13/04.

[4] US 8226568 (B2), 2012.07.24, G 06 A 15/00; G 11 C 17/00.

#### ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Способ вибрационной диагностики роторного оборудования для выявления дефектов подшипников качения путем обработки сигнала вибрации, полученного от акселерометра, отличающийся тем, что вибрационный сигнал подвергают непрерывному вейвлет-преобразованию с применением базисной функции  $\psi_m(t)$ :

$$\psi_m(t) = \begin{cases} \left(\frac{4}{\pi^2}\right)\left(\frac{\pi^2}{4} - (\omega t)^2\right) \exp\left(\frac{-2(\omega t)^2}{\pi^2}\right); & \text{при } -\infty < t \leq 0 \\ \cos(\omega t) \exp\left(\frac{-t}{k}\right); & \text{при } 0 < t < \infty \end{cases} \quad (1)$$

где параметр k задает скорость убывания экспоненты, а параметр  $\omega$  - доминирующую циклическую

частоту вейвлета;

формируют матрицу вейвет-коэффициентов и строят скейлограмму сигнала;

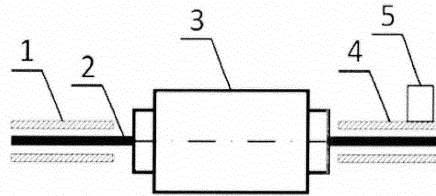
определяют доминирующие собственные частоты оборудования, содержащие ударные процессы, на основе поиска максимумов скейлограммы;

выбирают наборы вейвет-коэффициентов, соответствующие найденным на скейлограмме частотам;

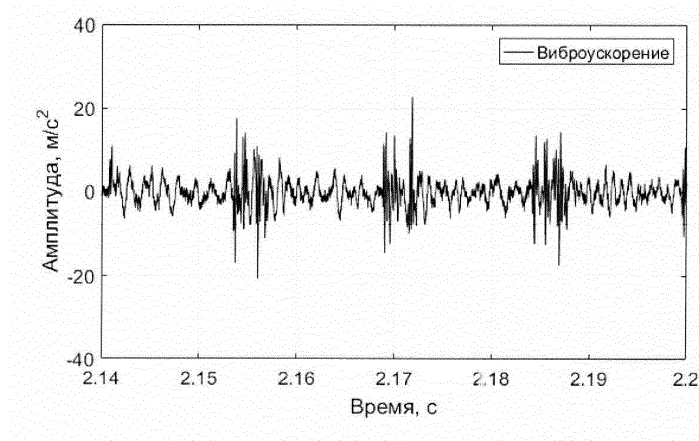
для каждого выбранного набора вейвет-коэффициентов при помощи преобразования Гильберта строят огибающую, на основе которой определяют местоположение ударных импульсов во временном сигнале;

рассчитывают преобразование Фурье от огибающей набора вейвет-коэффициентов, осуществляют поиск набора подшипниковых частот в спектре и формируют матрицу найденных подшипниковых частот;

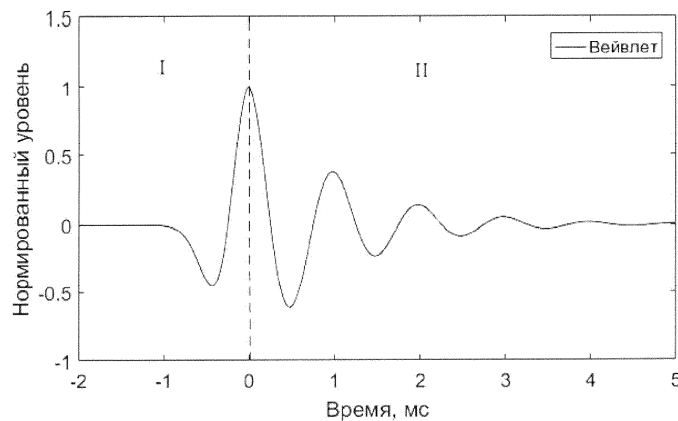
по результатам сравнения совокупности найденных подшипниковых частот с шаблоном делают заключение о техническом состоянии подшипника.



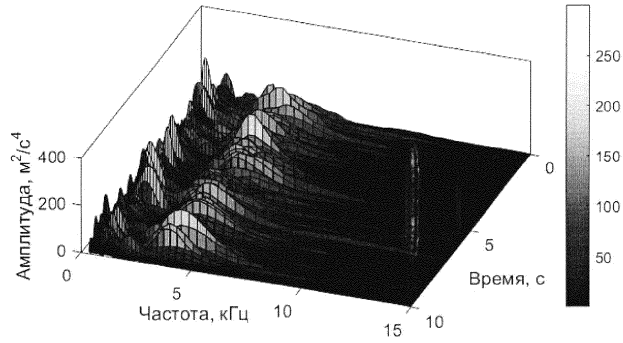
Фиг. 1



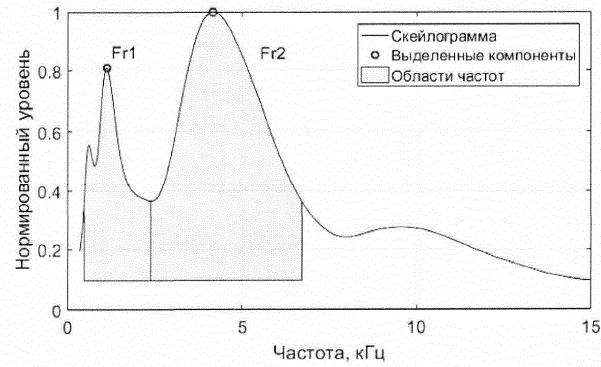
Фиг. 2



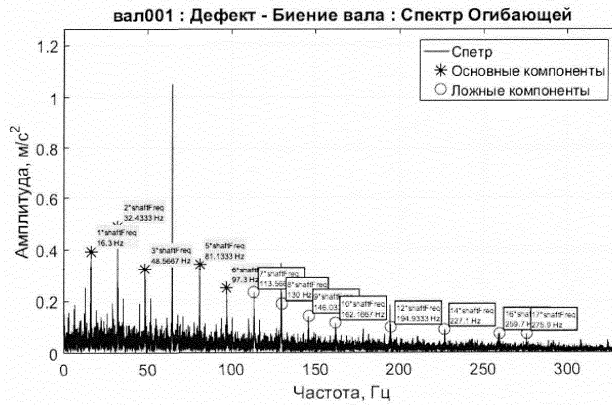
Фиг. 3



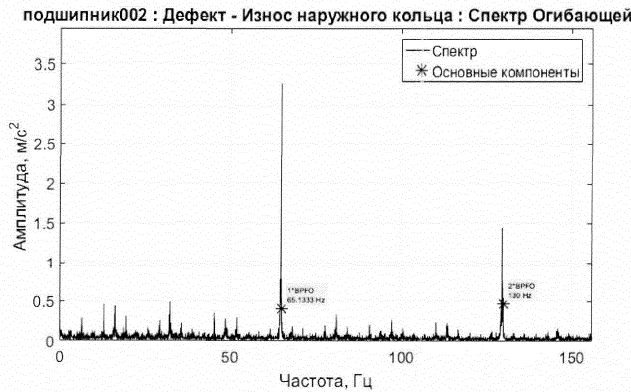
Фиг. 4



Фиг. 5



Фиг. 6



Фиг. 7