

УДК 621.8:519.6:004

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СКАЛОГРАММЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РОТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

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

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 9 ноября 2017

Аннотация. Повышение эффективности вибрационной диагностики осуществляется за счет разработки новых подходов к оценке технического состояния оборудования. В статье оценивается эффективность использования скалограммы в качестве инструмента мониторинга состояния оборудования.

Ключевые слова: вибродиагностика, цифровая обработка сигналов, вейвлет, скалограмма.

Abstract. Increasing the effectiveness of vibration-based diagnosis is carried out by developing new approaches to assess the technical condition of equipment. The effectiveness of the use of a scalogram as a tool for condition monitoring of equipment is estimated in the article.

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

Doklady BGUIR. 2018, Vol. 112, No. 2, pp. 12-17

Efficiency of scalogram use for assessment of the technical condition of rotary equipment

Yu.P. Aslamov, A.P. Aslamov, I.G. Davydov, A.V. Tsurko

Введение

Виброакустическая диагностика оборудования сокращает затраты на эксплуатацию и ремонт промышленного оборудования, а также снижает риски аварий на производстве и в транспорте. Дальнейшее развитие технической диагностики основано на автоматизации анализа и принятия решений, а также интеграции в бизнес-процессы, для чего используется вычислительная техника, сети передачи данных, цифровая обработка сигналов и технологии машинного обучения.

Для анализа нестационарных сигналов целесообразно использовать вейвлетное преобразование. В силу масштабирующих свойств вейвлетного базиса, оно обеспечивает гибкую связь между частотным и временным разрешением. Скалограмма позволяет осуществить поиск основных резонансных частот исследуемого сигнала. Данные частоты являются квазипостоянными величинами, определяемыми только конструктивными особенностями оборудования [1]. Совокупность резонансных частот изменяется вследствие деградации, ремонта оборудования или замены некоторых его частей. Конструктивные изменения также приводят к перераспределению энергии (появлению новых резонансных частот, увеличению или уменьшению удельного вклада старых и т. д.). Таким образом, мониторинг резонансной картины оборудования может позволить обнаружить развивающиеся дефекты его элементов.

В данной работе оценивается эффективность использования скалограммы как инструмента мониторинга резонансной картины оборудования с изменяющейся скоростью вращения вала для оценки его технического состояния. В статье представлены результаты проведенных экспериментов.

Теоретический анализ

Классический частотный анализ основан на исследовании сигналов $s(t) \in L^2(0, 2\pi)$ при помощи преобразования Фурье

$$\hat{s}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-2ift} dt. \quad (1)$$

Данный подход позволяет получить максимально возможное частотное разрешение вследствие того, что ядро преобразования e^{-2ift} не локализовано во времени. Это обстоятельство делает преобразование Фурье прекрасным инструментом для изучения процессов, свойства которых не меняются во времени. Однако это является и существенным недостатком при исследовании иррегулярных функций, свойства которых эволюционируют во времени. Для устранения данного недостатка может быть использовано преобразование Габора

$$GT(f, t_0, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-\frac{(t-t_0)^2}{\alpha^2}} e^{-2ift} dt. \quad (2)$$

Окно преобразования Габора в произвольной точке t_0 имеет фиксированную ширину, определяемую параметром α . Эффективная длина окна определяет величину временного Δt и частотного Δf разрешения, причем

$$\Delta f \propto \frac{1}{\Delta t}. \quad (3)$$

Из (3) следует, что при использовании преобразования Габора возникает проблема выбора оптимальной ширины окна во временной области [2]. Для устранения данного недостатка для исследования сигналов $s(t) \in L^2(\mathbb{R})$ используется вейвлет-преобразование

$$W(a, b) = \frac{1}{|a|^{1/2}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t)\psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)dt, \quad (4)$$

где $\psi^*(t)$ – вейвлет-функция; a – масштабный коэффициент, который определяет размер вейвлета; b – сдвиг, задающий временную локализацию.

Анализ распределения энергии по частотно-временной шкале осуществляется на основе скалограммы, которая для дискретного сигнала может быть записана как

$$S(a_i, b_j) = |W_A(a_i, b_j)|^2. \quad (5)$$

В данной статье для расчета скалограммы использован вейвлет Morlet, обладающий минимальным частотно-временным разрешением [3]

$$\psi(t) = e^{-t^2/4} e^{i2\pi t}. \quad (6)$$

Для мониторинга резонансной картины оборудования целесообразно перейти от скалограммы (5) к скейлограмме (7) и скейлограмме, нормированной по энергетическому вкладу (8). Скейлограмма является аналогом сглаженного спектра мощности в классическом частотном анализе. Для упрощения анализа осуществляется переход от сетки масштабов a к сетке частот \hat{f} [4, 5].

$$Sc(f_i) = \sqrt{\frac{\sum_j^N S(\hat{f}_i \cdot k_f, b_j)}{N}}, \quad (7)$$

$$Sc^E(f_i) = \frac{1}{k_A} \cdot \frac{Sc(f_i)}{RMS(s(t))}, \quad (8)$$

где k_f – коэффициент коррекции сетки частот \hat{f} ($k_f \neq 1$ для вейвлетов со смещенным энергетическим центром, для Morlet $k_f=1$); N – количество масштабов для усреднения [5]; k_A – коэффициент коррекции амплитудных коэффициентов (для Morlet $k_A=1/\sqrt{2}$); $RMS(s(t))$ – среднеквадратическое значение сигнала $s(t)$ в диапазоне измерений.

Методика эксперимента

Источником вибрационных сигналов является тестовый стенд, содержащий электродвигатель АИР80В6 с частотным управлением. Объектом анализа является роликовый подшипник 6213. Сигналы вибрации получены в формате WAV-файлов, снятых при помощи одноканальных ИСР-датчиков V&R (чувствительность $s_0 = 100$ мВ/г), измерительный диапазон $F_R = 0 \dots 10$ кГц. Для проведения эксперимента использована вычислительная среда MATLAB.

Проанализировано 62 реализации для подшипников в нормальном состоянии и 108 реализаций для подшипников с дефектами. В силу ограничений статьи ниже представлена небольшая часть этой выборки.

Целью эксперимента являлось:

а) оценка инвариантных свойств скейлограммы вибросигнала в зависимости от изменения режима работы оборудования;

б) оценка возможности применения скейлограммы в качестве метрического показателя для мониторинга технического состояния промышленного оборудования.

Скорость вращения вала изменялась в диапазоне $S = 270 \dots 975$ об/мин по линейному закону (рис. 1, з). Значение скорости вращения ротора тестового стенда контролировалось посредством индикатора системы частотного управления электромотора. Для сравнения скейлограмм при различных скоростях вращения вала использовались реализации длительностью $T = 60$ с.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены результаты эксперимента по изменению скорости вращения вала тестового стенда. Спектрограммы исследуемого сигнала представлены на рис. 1, а, б. Изменение значений частоты основных спектральных компонент $k*FTF$ и $n*F1$ (рис. 1, а) происходит по линейному закону, соответствующему закону изменения скорости вращения вала (рис. 1, з). Наиболее выраженными резонансными частотами в диапазоне $F_R = 0 \dots 7$ кГц являются $f_1 = 1,3$ кГц, $f_2 = 3$ кГц и $f_3 = 5$ кГц (рис. 1, б). Скалограмма исследуемого сигнала представлена на рис. 1, в.

Значения резонансных частот оборудования не зависят от скорости вращения вала (рис. 1, б, в) и определяются конструктивными особенностями элементов [1]. Однако их амплитудные значения при изменяющейся скорости вращения не являются постоянными величинами (рис. 1, в).

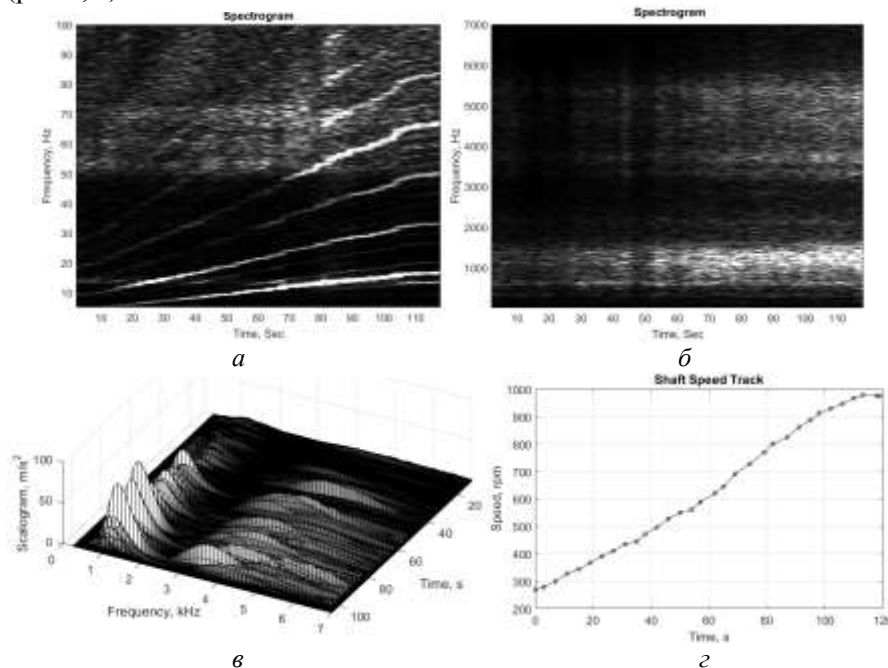


Рис. 1. Частотно-временное представление нестационарного сигнала:
а, б – спектрограмма; в – скалограмма; з – закон изменения скорости вращения вала

Для исследования процессов перераспределения энергии между резонансными частотами при изменении скорости вращения использовалась скейлограмма Sc^E , нормированная по энергетическому вкладу (8). Сравнение производилось на подшипниках в нормальном состоянии и с выраженными дефектами (рис. 2, 3).

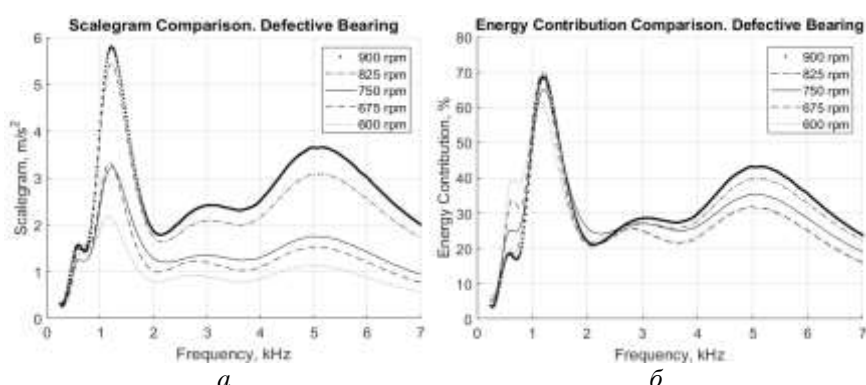


Рис. 2. Дефектный подшипник при различных скоростях вращения:
 а – скейлограмма, б – энергетический вклад

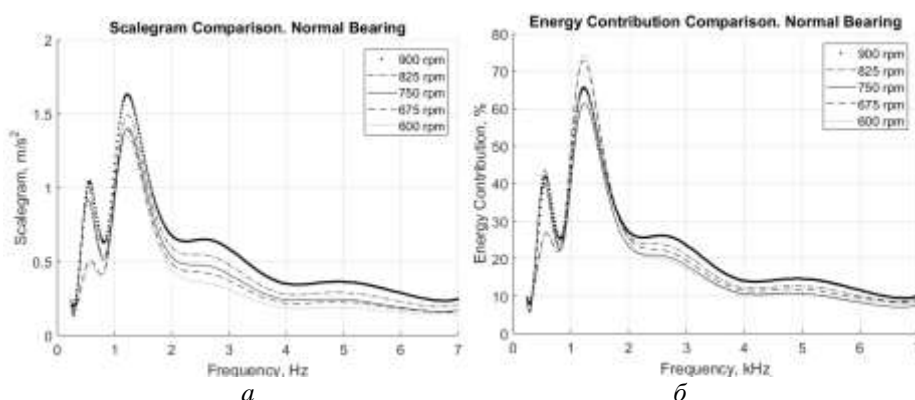


Рис. 3. Нормальный подшипник при различных скоростях вращения:
 а – скейлограмма; б – энергетический вклад

Численное сравнение скейлограмм производилось в терминах:

- 1) разница коэффициента корреляции (correlation coefficient difference – CCD);
- 2) разница энергетического вклада (energy contribution difference – ECD).

Разница коэффициента корреляции вычисляется как

$$CCD(\delta_{\%}) = [1 - \text{corrcoef}(Sc(f, s_i), Sc(f, s_i \cdot (1 \pm \delta_{\%} / 100)))] \cdot 100 \%, \quad (9)$$

где $Sc(f, s_i)$ – скейлограмма сигнала при скорости вращения вала s_i , $\delta_{\%}$ – процентная разница в скоростях вращения вала, $\text{corrcoef}(Sc_i, Sc_j)$ – коэффициент корреляции двух нормированных скейлограмм Sc_i и Sc_j .

Разница энергетического вклада определяется как

$$ECD(\delta_{\%}) = |Sc^E(f, s_i) - Sc^E(f, s_i \cdot (1 \pm \delta_{\%} / 100))| \cdot 100 \%, \quad (10)$$

где $Sc^E(f, s_i)$ – скейлограмма, нормированная по энергетическому вкладу.

Из табл. 1, 2 следует, что скейлограммы сигналов с выраженными резонансными частотами менее подвержены искажениям при смене режима работы. Это выражается как в более высокой коррелированности скейлограмм (табл. 1), так и в меньшей разнице в энергетическом вкладе (табл. 2). Объяснением данного факта является уменьшение удельного вклада шумовых составляющих в общую энергетику сигнала при наличии дефектов элементов. С увеличением процентного отклонения скорости вращения вала от номинального значения разница в энергетическом вкладе отдельных компонент возрастает.

Данный факт затрудняет использование скейлограммы как инструмента мониторинга состояния оборудования с сильно изменяющейся скоростью вращения вала ($\delta_{\%}$ более 10%). Причиной является увеличение зоны неопределенности для установки пороговых значений и, как

следствие, меньшая чувствительность скейлограммы к изменениям в состоянии оборудования. Однако скейлограмма может быть эффективно использована для диагностики оборудования с медленно меняющейся скоростью вращения вала ($\delta_{\%}$ менее 5 %). В качестве примера на рис. 4 приведены результаты применения скейлограммы для мониторинга состояния подшипника качения 6213 в пределах фиксированной скорости вращения вала ($\delta_{\%}$ менее 5 %).

Таблица 1. Разница коэффициента корреляции

Тип элемента	CCD (1 %)		CCD (5 %)		CCD (10 %)		CCD (20 %)		CCD (50 %)	
	Макс.	Сред.	Макс.	Сред.	Макс.	Сред.	Макс.	Сред.	Макс.	Сред.
Нормальный	0,4	0,33	1,32	1,08	3,1	2,8	9,61	8,14	35,56	24,6
Дефектный	0,11	0,08	0,14	0,10	0,44	0,40	0,85	0,75	4,52	2,65

Таблица 2. Разница энергетического вклада

Тип элемента	ECD (1 %)		ECD (5 %)		ECD (10 %)		ECD (20 %)		ECD (50 %)	
	Макс.	Сред.	Макс.	Сред.	Макс.	Сред.	Макс.	Сред.	Макс.	Сред.
Нормальный	0,65	0,65	1,53	0,84	4,08	1,87	8,07	4,32	21,94	7,53
Дефектный	0,43	0,43	1,12	0,63	3,83	1,64	5,57	3,72	14,98	4,30

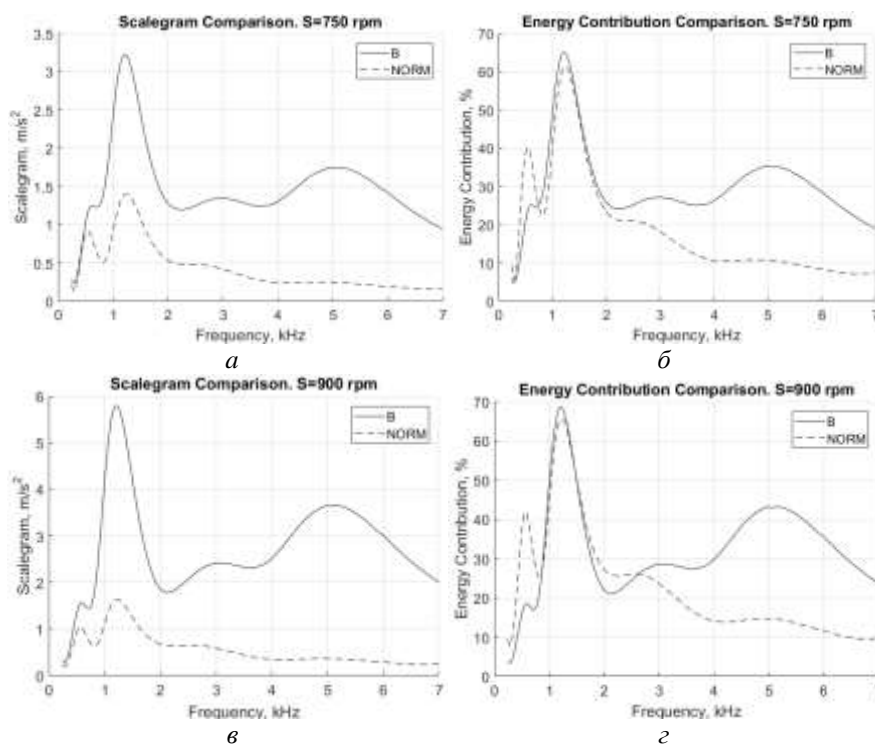


Рис. 4. Развитие дефекта тел качения: а – скейлограмма ($S=750$ об/мин); б – энергетический вклад ($S = 750$ об/мин); в – скейлограмма ($S = 900$ об/мин); г – энергетический вклад ($S = 900$ об/мин)

Скейлограмма Sc^E позволяет определить «драйверы» развития дефектов, т. е. резонансные частоты, удельный вклад которых значительно увеличивается. Скейлограмма, нормированная по энергетическому вкладу, определяет источниками дефекта подшипника 6213 резонансные частоты $f_2 = 3$ кГц и $f_3 = 5$ кГц, увеличившие свой энергетический вклад в среднем на 5 % и 27 % соответственно (рис. 4, б, г). Каждая из обозначенных резонансных частот содержит спектральные составляющие $k \cdot FTF, k=1...5$ и $2n \cdot BSF, n=1, 2$. Данный шаблон указывает на наличие выраженного дефекта тел качения. Как представлено на рис. 4, а, в, следствием развития дефекта подшипника стало повышение общего уровня сигнала и, следовательно, общего уровня скейлограммы.

Заключение

В статье приведена оценка возможности использования скалограммы вибросигнала как инструмента мониторинга резонансной картины оборудования. Экспериментально установлено,

что наибольшую эффективность предложенный метод демонстрирует на сигналах оборудования со слабо меняющейся скоростью вращения вала ($\delta_{\%}$ менее 5 %). В результате скейлограмму предложено использовать как инструмент мониторинга и как метод выделения наиболее информативных резонансных частот оборудования. Дальнейшие исследования предлагается направить на разработку методов расширения пространства информативных признаков для анализа резонансной картины оборудования, а также на разработку частотно-временных моделей на основе вейвлет-анализа для оценки технического состояния оборудования.

Список литературы

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. 2-е изд. М.: Высшая школа. 446 с.
2. Преобразование Габора и непрерывное вейвлетное преобразование для модельных импульсных сигналов / Д.А. Андреев [и др.] // Журнал технической физики. 2014. Т. 84, № 10. С. 10–15.
3. Mallat S.G. A Wavelet Tour of Signal Processing. The Sparse Way. Academic Press, 2009. 805 p.
4. Optimum Time-Frequency Resolution of Seismic Data using Continuous Wavelet Transform / S.K. Sinha [et al.] // 5th Conference & Exposition on Petroleum Geophysics «Hyderabad-2004». P. 984–987.
5. Витязев В.В. Вейвлет-анализ временных рядов. СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2001. 58 с.

References

1. Baskakov S.I. Radiotekhnicheskie tsepi i signaly. 2-e izd. M.: Vyschaya shkola. 446 s. (in Russ.)
2. Preobrazovanie Gabora i nepreryvnoe vejvletnoe preobrazovanie dlja model'nyh impul'snyh signalov / D.A. Andreev [i dr.] // Zhurnal tehnicheckoj fiziki. 2014. T. 84, № 10. C. 10–15. (in Russ.)
3. Mallat S.G. A Wavelet Tour of Signal Processing. The Sparse Way. Academic Press, 2009. 805 p.
4. Optimum Time-Frequency Resolution of Seismic Data using Continuous Wavelet Transform / S.K. Sinha [et al.] // 5th Conference & Exposition on Petroleum Geophysics «Hyderabad-2004». P. 984–987. (in Russ.)
5. Vitjazev V.V. Vejvlet-analiz vremennyh rjadov. SPb.: Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2001. 58 s. (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.

Цурко А.В., научный сотрудник НИЛ 1.5 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Aslamov Y.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 of information radiotechnologies department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Tsurko A.V., researcher of SRL 1.5 of R&D department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-86-79;
e-mail: aslamov.yura@gmail.com;
Асламов Юрий Павлович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
tel. +375-17-293-86-79;
e-mail: aslamov.yura@gmail.com;
Aslamov Yury Pavlovich