

УДК 62-83:534.647:004.855.5:004.93'11

## **ПРОСТРАНСТВО ПРИЗНАКОВ РАЗРЕЖЕННОЙ ВЕЙВЛЕТНОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ СИГНАЛОВ ВИБРАЦИИ ДЛЯ ЗАДАЧ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ**

**Ю. П. АСЛАМОВ, И. Г. ДАВЫДОВ**

*Учреждение образования «Белорусский государственный  
университет информатики и радиоэлектроники»,  
г. Минск*

**Ключевые слова:** вибродиагностика, разреженная декомпозиция, вейвлет, пространство признаков, машинное обучение.

### **Введение**

Автоматические системы вибрационной диагностики позволяют существенно продлить ресурс промышленного оборудования и тем самым повысить эффективность функционирования производственных предприятий. Повышение достоверности работы подобных систем достигается за счет непрерывной разработки новых методов и подходов оценки технического состояния оборудования.

Современная практика применения вибрационной диагностики для оценки технического состояния роторного оборудования, работающего в квазистационарном режиме, базируется на методах анализа спектра вибрации и спектра огибающей высокочастотной вибрации [1], [2]. Однако указанные методы имеют ряд недостатков, а именно:

- 1) требуется максимально полная кинематическая схема оборудования с указанием точных параметров его элементов;
- 2) достоверность диагностики напрямую связана с точностью определения частоты вращения ротора (рабочего колеса);
- 3) параметры некоторых элементов оборудования, например, подшипников качения, могут изменяться в процессе длительной эксплуатации или при смене режима работы оборудования [3], что уменьшает достоверность диагностической модели.

С одной стороны, для решения обозначенных проблем требуется набор вспомогательных методов, таких, как алгоритмы слежения за частотой и передискретизации сигналов [4], методы уточнения частоты [5], алгоритмы статистической оценки параметров элементов и др. С другой стороны – решением является анализ сигналов в частотно-временной или временной областях (анализ формы сигналов вибрации), свободных от указанных недостатков.

Ранее авторами был представлен алгоритм разреженной декомпозиции сигналов [6] на базе избыточного вейвлетного словаря [7], позволяющий описать временную форму сигналов вибрации в компактном виде. Сформированное на основе данного метода пространство признаков является предметом исследования.

Цель работы – оценка возможности применения пространства признаков разреженной вейвлетной декомпозиции в задачах машинного обучения. В частности, в работе рассмотрен случай различения вибрационных сигналов подшипников качения и зубчатых передач на базе пространства признаков разреженной вейвлетной декомпозиции с применением машины на опорных векторах.

### **Теоретический анализ**

Разреженная вейвлетная декомпозиция [6] представляет собой итерационную процедуру разложения вибрационного сигнала  $x(t)$  в окрестности некоторой частоты  $f_0$

по набору базисных функций [7], в качестве которых используются семейства вейвлетов  $MEXH$ ,  $MEXP$ ,  $MORL$ ,  $SINP$  [8], [9]. Результатом работы алгоритма является так называемое разреженное представление сигнала  $X$  и спектр базисных функций  $W^{BF}$  (БФ-спектр).

Разреженное представление  $X$  характеризует сигнал наборами из четырех коэффициентов  $\{f_0, \psi_m, c_m, \tau_m\}_{m \in \mathbb{N}}$ , где  $f_0$  – центральная частота;  $\psi_m$  – тип базисной функции;  $c_m$  и  $\tau_m$  – амплитудный коэффициент и временное положение базисной функции  $\psi_m$ , соответственно.

В свою очередь, БФ-спектр  $W^{BF}$  описывает распределение энергии сигнала по базисным функциям  $\psi$  словаря  $\mathcal{D} = \{\mathcal{D}^{MEXH}, \mathcal{D}^{MEXP}, \mathcal{D}^{MORL}, \mathcal{D}^{SINP}\}$  [7]. На рис. 1, а, б приведены примеры БФ-спектров вибрационных сигналов подшипника качения 6213 с дефектом наружного кольца ( $f_0 = 5,2$  кГц) и зубчатой передачи – с дефектом шестерни ( $f_0 = 1$  кГц). На рис. 1 имеются следующие обозначения:  $N$  – вейвлет  $MEXH$  (*Mexican Hat*);  $m$  – вейвлеты семейства  $MEXP$  [8];  $g$  – вейвлеты семейства  $MORL$  [8], [9];  $s$  – вейвлеты семейства  $SINP$  [9]. Увеличение порядкового номера вейвлетов от 1 до 10 соответствует кратному увеличению длины их эффективного носителя [7].

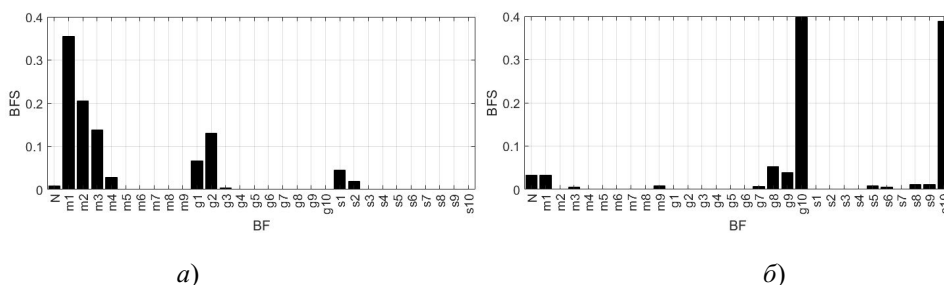


Рис. 1. Спектры базисных функций сигналов вибрации: а – подшипник качения; б – зубчатая передача

Как представлено на рис. 1, а, наибольшим вкладом в энергетику вибрационного сигнала для неисправного подшипника качения обладают базисные вейвлет-функции семейства  $MEXP$  ( $m_1$ – $m_3$ ), что указывает на наличие в сигнале большого количества ударных экспоненциальных импульсов. В свою очередь, в БФ-спектре вибрационного сигнала для дефектной зубчатой передачи (рис. 1, б) преобладают вейвлеты семейств  $MORL$  ( $g_{10}$ ) и  $SINP$  ( $s_{10}$ ) с большой длиной эффективного носителя, что указывает на большой вклад в энергетику сигнала амплитудно-модулированных колебаний.

БФ-спектр является основой для формирования пространства признаков разреженной вейвлетной декомпозиции. Одним из главных его недостатков является эффект «растекания спектра», при котором на воздействие фиксированной формы откликаются одновременно две и более соседних базисных функций [9]. Причиной этому может являться неравномерный результирующий отклик словаря  $\mathcal{D}$  по всей длине шкалы коэффициентов формы  $FF$  базисных функций [7], [9] или флуктуации формы анализируемого вибрационного сигнала.

Для устранения указанного недостатка производится «свертка» БФ-спектра, при которой базисные функции группируются по длине эффективного носителя в соответствии с их индексами в несколько классов (0, I, II, III и IV) по следующему правилу:

- 1) свертка I рода:  $\{N\} \rightarrow 0$ ;  $\{1\} \rightarrow I$ ;  $\{2, 3\} \rightarrow II$ ;  $\{4, 5, 6\} \rightarrow III$ ;  $\{7, 8, 9, 10\} \rightarrow IV$ .
- 2) свертка II рода:  $\{N\} \rightarrow 0$ ;  $\{1, 2\} \rightarrow I$ ;  $\{3, 4, 5\} \rightarrow II$ ;  $\{6, 7, 8, 9, 10\} \rightarrow III$ .

Также могут быть рассчитаны БФ-спектры, описывающие распределение энергии сигнала в окрестности частоты  $f_0$  по семействам базисных функций ( $N$  –  $MEXH$ ;

$M - MEXP$ ;  $G - MORL$ ;  $S - SINP$ ) и по длинам их эффективного носителя (0, I, II, III, IV). Сформированные таким образом БФ-спектры для сигналов дефектного подшипника качения и дефектной зубчатой передачи представлены на рис. 2. При этом были введены следующие обозначения:

- $BFS$  – оригинальный БФ-спектр (рис. 1, а, б);
- $BFS-C-I$  – свертка БФ-спектра I рода (рис. 2, а);
- $BFS-C-II$  – свертка БФ-спектра II рода (рис. 2, б);
- $BFS-F$  – БФ-спектр семейств базисных функций (рис. 2, в);
- $BFS-L-I$  – БФ-спектр длин базисных функций I рода (рис. 2, г);
- $BFS-L-II$  – БФ-спектр длин базисных функций II рода (рис. 2, д).

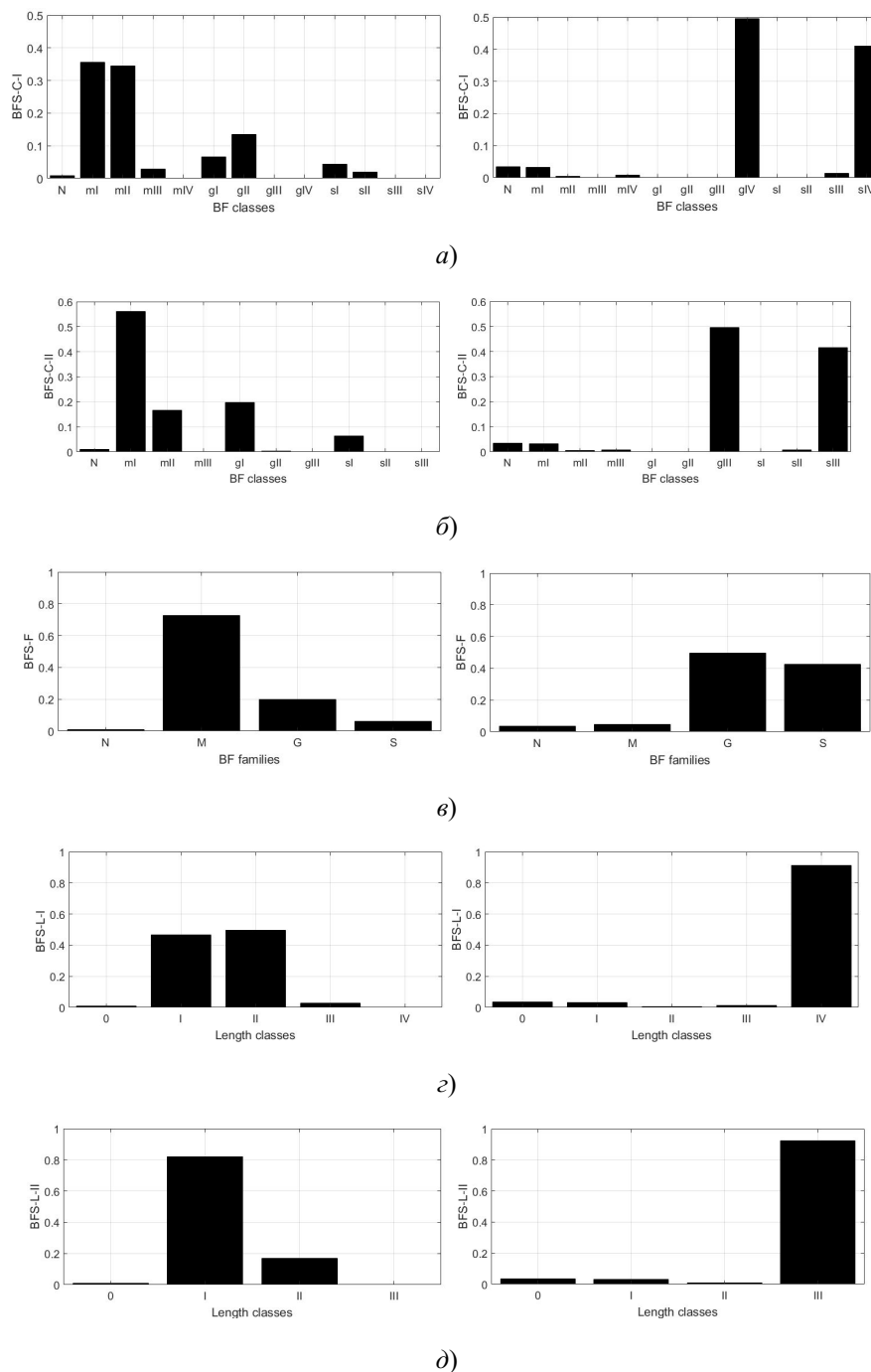


Рис. 2. Спектры базисных функций сигналов вибрации: 1 – подшипник качения; 2 – зубчатая передача; а –  $BFS-C-I$ ; б –  $BFS-C-II$ ; в –  $BFS-F$ ; г –  $BFS-L-I$ ; д –  $BFS-L-II$

Таким образом, наиболее детальное описание временной формы вибрационного сигнала обеспечивает оригинальный БФ-спектр (рис. 1). В то же время рассчитанные на его основе подпространства (рис. 2) имеют более интегральный характер, однако в меньшей степени подвержены эффекту «растекания спектра». Для анализа свойств сформированных пространств признаков и оценки возможности их применения в задачах машинного обучения необходимо проведение эксперимента.

### Методика эксперимента

Целью эксперимента является оценка возможности различения сигналов вибрации подшипников качения и зубчатых передач на основе пространства признаков разреженной вейвлетной декомпозиции.

Для проведения эксперимента были использованы наборы следующих данных: *High Speed Gearbox Dataset* (режим доступа: <http://data-acoustics.com/measurements/gear-faults/>) и *High Speed Bearing Dataset* (режим доступа: <http://data-acoustics.com/measurements/bearing-faults/>), полученные с коробки передач ветрогенератора. Указанные наборы данных содержат сигналы вибрации как дефектных зубчатых передач, так и зубчатых передач в нормальном состоянии.

Также было сформировано два набора данных *Bearing 6213 OR Dataset* и *Bearing 6213 Norm/OR*, снятых с подшипника качения 6213 в нормальном и дефектном состоянии при различных скоростях его вращения (от 600 до 900 об/мин). Чувствительность используемого при этом датчика вибрации *B&R* составляла  $s = 100$  мВ/г; частота дискретизации  $F_s = 96$  кГц.

Формирование пространства признаков разреженной вейвлетной декомпозиции происходило по следующему алгоритму:

1. Проводилась оценка значимых частот сигнала  $f = f_1 \dots f_k$ , в окрестности которых сосредоточена значительная часть энергии (энергетический вклад  $> 5\%$ ), на основе алгоритма разреженной декомпозиции скейлограммы.
2. Осуществлялась разреженная декомпозиция сигналов вибрации в окрестности выделенных частот  $f$  и оценивалась эффективность декомпозиции  $\xi$  [6].
3. Пространства признаков формировались только для тех частот  $f$ , эффективность декомпозиции в окрестности которых превышает пороговое значение  $\xi_0 = 50\%$ .

В результате описанной процедуры было сформировано 208 наборов БФ-спектров: 120 – для подшипников качения и 88 – для зубчатых передач. Отношение обучающей и тестовой выборок составляло 4 : 1, таким образом для тестирования было использовано 42 набора БФ-спектров.

В качестве классификатора была выбрана машина на опорных векторах (МОВ) и ее реализация *libSVM* (режим доступа: <https://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin/libsvm>). Было рассмотрено три типа ядер МОВ: линейное (*linear*); радиальное (*radial*) и полиномиальное (*polynomial*) [10]. Классификация вибрационных сигналов проводилась на основе восьми комбинаций пространств информативных признаков (табл. 1), при этом не применялись алгоритмы уменьшения их размерности (*feature selection*). Символом «+» в табл. 1 обозначены пространства признаков, входящие в пронумерованные композиции.

Таблица 1

## Комбинации пространств признаков

Номер комбинаций пространств признаков	Модификации спектра базисных функций					
	<i>BFS</i>	<i>BFS-C-I</i>	<i>BFS-C-II</i>	<i>BFS-F</i>	<i>BFS-L-I</i>	<i>BFS-L-II</i>
1	+	–	–	–	–	–
2	–	–	–	+	–	–
3	+	–	–	+	–	–
4	–	+	+	–	–	–
5	–	+	+	+	–	–
6	+	+	+	+	–	–
7	–	+	+	+	+	+
8	+	+	+	+	+	+

Оценка качества классификации сигналов вибрации подшипников качения и зубчатых передач проводилась в терминах [12]:

1. Чувствительность *TPR* (*recall* или *true positive rate*):

$$recall = TPR = \frac{TP}{P} = \frac{TP}{TP + FN},$$

где *TP* (*true positive*) – количество истинно положительных решений (верно идентифицированных образцов); *P* – количество положительных (идентифицированных) образцов; *FN* (*false negative*) – количество ложноотрицательных решений (ложно отклоненных образцов).

2. Специфичность *TNR* (*specificity* или *true negative rate*):

$$specificity = TNR = \frac{TN}{N} = \frac{TN}{TN + FP},$$

где *TN* (*true negative*) – количество ложноположительных решений (ложно идентифицированных образцы); *N* – количество отрицательных (отклоненных) образцов; *FP* (*false positive*) – количество истинно отрицательных решений (верно отклоненных образцов).

3. Точность *PPV* (*precision* или *positive predictive value*):

$$precision = PPV = \frac{TP}{TP + FP}.$$

4. Общая точность классификации *ACC* (*accuracy*):

$$accuracy = ACC = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN}.$$

5. Гармоническое среднее (или *F1*-мера):

$$F1 = \frac{2TP}{2TP + FP + FN}.$$

**Результаты и их обсуждение**

Результаты классификации наборов тестовых данных на основе сформированных пространств признаков (табл. 1) для различных типов ядерных функций МОВ представлены в табл. 2. При этом для повышения достоверности классификации сигналов подшипников качения и зубчатых передач эксперимент повторялся 20 раз, а в табл. 2 занесены медианные значения параметров качества  $ACC$ ,  $TPR$ ,  $TNR$ ,  $PPV$  и  $F1$ . Серым цветом в табл. 2 выделены лучшие результаты для каждого типа используемой функции ядра МОВ.

Таблица 2

**Результаты классификации сигналов подшипников качения и зубчатых передач**

Номер комбинации пространств признаков	ACC	TPR	TNR	PPV	F1
<i>Linear</i>					
1	0,845	0,827	0,921	0,947	0,874
2	0,821	0,921	0,735	0,812	0,857
3	0,857	0,828	0,933	0,950	0,878
4	0,893	0,888	0,941	0,959	0,916
5	0,881	0,870	0,881	0,907	0,891
6	0,857	0,833	0,889	0,926	0,875
7	0,893	0,885	0,882	0,912	0,900
8	0,881	0,848	0,944	0,952	0,899
<i>Radial</i>					
1	0,869	0,873	0,773	0,954	0,845
2	0,887	0,866	0,819	0,896	0,857
3	0,884	0,807	0,703	1,000	0,857
4	0,935	0,917	0,878	1,000	0,929
5	0,917	0,871	0,786	1,000	0,905
6	0,876	0,844	0,655	1,000	0,821
7	0,933	0,908	0,774	1,000	0,905
8	0,895	0,878	0,833	0,963	0,869
<i>Polynomial</i>					
1	0,952	0,964	1,000	1,000	0,957
2	0,762	0,952	0,657	0,800	0,817
3	0,952	0,982	0,944	0,959	0,961
4	0,929	0,980	0,944	0,958	0,933
5	0,929	0,947	0,950	0,961	0,937
6	0,964	1,000	0,974	0,982	0,972
7	0,929	0,955	0,939	0,957	0,933
8	0,952	0,962	0,935	0,965	0,962

В результате проведенных экспериментов был сделан вывод, что сигналы вибрации подшипников качения и зубчатых передач в пространстве признаков разреженной вейвлетной декомпозиции являются *линейно разделимыми*. Данный вывод был сделан на том основании, что точность классификации указанных вибрационных сигналов в пространствах признаков № 4 и 7 с применением линейного ядра МОВ составила  $ACC = 0,893$ . Иными словами, алгоритм разреженной вейвлетной декомпозиции линеаризует пространство признаков для описания временной формы вибрационных сигналов.

Наилучшие результаты классификации вибрационных сигналов были получены с применением полиномиального ядра МОВ. При этом для пространства признаков № 6

точность классификации в среднем имеет близкое к единице значение:  $ACC = 0,964$ ;  $TPR = 1$ ;  $TNR = 0,974$ .

Лучшим пространством признаков, обеспечивающим в среднем наиболее высокую точность классификации для различных типов ядерных функций МОВ, является пространство признаков № 4 ( $BFS-C-I + BFS-C-II$ ). В среднем точность классификации на его основе составила  $ACC = 0,919$ .

Наименьшую точность классификации для всех типов ядер МОВ имеет пространство признаков № 2, сформированное на базе  $BFS-F$ , при этом среднее значение точности классификации для него составляет  $ACC = 0,823$ . Однако ввиду низкой размерности указанного пространства признаков на его основе может быть построен классификатор для грубой интегральной оценки формы сигналов вибрации.

### Заключение

Рассмотрены пространства признаков разреженной декомпозиции сигналов вибрации по избыточному вейвлетному словарю для задач машинного обучения. Приведены результаты классификации вибрационных сигналов подшипников качения и зубчатых передач на базе машины на опорных векторах. Показано, что пространство признаков разреженной вейвлетной декомпозиции позволяет различать вибрационные сигналы указанных элементов с применением линейных классификаторов. Наибольшая точность классификации ( $ACC = 0,974$ ) рассмотренных в данном исследовании вибрационных сигналов была достигнута при использовании полиномиального ядра машины на опорных векторах.

### Литература

1. Барков, А. В. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации : учеб. пособие / А. В. Барков, Н. А. Баркова. – СПб. : СПбГМТУ, 2004. – 156 с.
2. Абрамов, И. Л. Вибродиагностика энергетического оборудования : учеб. пособие по дисциплине «Диагностика в теплоэнергетике» / И. Л. Абрамов. – Кемерово : КузГТУ, 2011. – 80 с.
3. An experimental based assessment of the deviation of the bearing characteristic frequencies / P. Pennacchi [et al.] // Proceedings of 6th international conference acoustical and vibratory surveillance methods and diagnostic techniques, Compiègne, France, 24–26 oct 2011. – Compiègne, 2011.
4. Eltabach, M. Rotating machine speed estimation using vibration statistical approach / M. Eltabach, G. Govaert // 1st World Congress of Condition Monitoring, London, United Kingdom, 13–16 June 2017. – London, 2017. – P. 263–271.
5. Алгоритмы уточнения частоты вращения вала в задачах вибродиагностики роторного оборудования / Ю. П. Асламов [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2017. – № 11. – С. 51–58.
6. Разреженная вейвлетная декомпозиция в задачах вибродиагностики роторного оборудования / Ю. П. Асламов [и др.] // Докл. Белорус. гос. ун-та информатики и радиоэлектроники. – 2017. – № 8. – С. 91–98.
7. Асламов, Ю. П. Избыточный вейвлетный словарь для разреженной декомпозиции сигналов вибрации / Ю. П. Асламов, И. Г. Давыдов / Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С. – 2018. – № 4. – С. 86–94.
8. Асламов, Ю. П. Вейвлет-функция для диагностики подшипников качения / Ю. П. Асламов, И. Г. Давыдов / Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2018. – № 11. – С. 14–22.

9. Вейвлет-функции для диагностики зубчатых передач / Ю. П. Асламов [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. – 2018. – № 3. – С. 38–46.
10. Shawe-Taylor J. An Introduction to Support Vector Machines and Other Kernel-based Learning Methods. 1st Edition / J. Shawe-Taylor. – Cambridge University, 2000. – 198 p.
11. Powers, D. From Precision, Recall and F-Factor to ROC, Informedness, Markedness & Correlation / D. Powers // Journal of Machine Learning Technologies. – 2011. – 2 (1). – P. 37–63.

*Получено 30.08.2018 г.*