

точно высокую эффективность и точность. Предложенная структура нейросетевого классификатора характеризуется малым объемом обучающей выборки и отличается высоким уровнем точности классификации при анализе акустического сигнала, что позволяет использовать ее для такого класса объектов, как зубчатые приводы.

Предлагаемый подход в исследовании многовальных зубчатых приводов предполагает минимизировать участие человека непосредственно при процедуре диагностирования, что в свою очередь призвано повысить ее объективность. Данная обученная нейросетевая модель показала адекватные результаты для постановки диагноза на других аналогичных объектах, имеющих схожую природу формирования анализируемого сигнала, что повышает ее универсальность. Предлагаемая методика в ходе дальнейших исследований будет адаптироваться для использования таких видов виброакустического сигнала, как вибрация и угловые колебания, что направлено на совершенствование процедуры диагностики за счет комплексной оценки виброакустической активности.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации [Электронный ресурс] / А.В. Барков, Н.А. Баркова, А.Ю. Азовцев. – Режим доступа: <http://www.vibrotek.com/russian/articles/book/index.htm>.
2. Anil Jacob, Dr. Y. I. Sharaf-Eldeen Диагностирование зубчатой передачи с помощью нового метода контроля состояния роторного оборудования: Перевод с англ. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.vibration.ru/d\\_zub\\_peredach.shtml](http://www.vibration.ru/d_zub_peredach.shtml).

3. Генкин, М.Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М.Д. Генкин, А.Г. Соколова – Москва : Машиностроение, 1987. – 288 с.
4. Костюков, В.Н. Основы виброакустической диагностики машинного оборудования : учеб. пособие / В.Н. Костюков, А.П. Науменко [и др.] – Омск : НПЦ «Динамика», 2007. – 286 с.
5. Драган, А.В. Новые аппаратно-программные средства для исследования и диагностики механических систем / А.В. Драган, И.П. Стецко, Д.А. Ромашко, Н.В. Левкович // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2006. – №4. – С. 17–26.
6. Разработка методов и мобильных средств диагностики механических систем автотракторной техники в процессе ее эксплуатации: отчет о НИР № ГБ 11/101 (аннотированный) / Брестский государственный технический университет; руководитель работы А.В. Драган; № госрегистрации 20111589. – Брест, 2012. – 17 с.
7. Хайкин С. Нейронные сети. – Москва : Вильямс, 2006. – 1103 с.
8. Комашинский, В.И. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи / В.И. Комашинский, Д.А. Смирнов – Москва : Горячая линия – Телеком, 2002. – 94 с.
9. Головкин, В.А. Нейронные сети: обучение, организация, применение / В.А. Головкин // Нейрокомпьютеры и их применение : учеб. пособие / В.А. Головкин. – Москва, 2001 – 256 с.
10. Kohonen, T. Self-organized formation of topologically correct feature maps / T. Kohonen // Biological Cybernetics. – 1982. – N 43. – P. 59–69.

Материал поступил в редакцию 22.11.2017

#### **DRAGAN A.V., PARFIEVICH A.N. The identification of local damages of the teeth of gear wheels multi-shaft drives use of artificial intelligence methods**

In the article the possibility of detecting local damage of gear teeth in the composition of multi-shaft gear of a mechanical system based on the analysis of acoustic signal using neural network model on the example of a box of speeds of the lathe SN-501. The proposed method of identifying damaged gear in the considered object in conditions of high acoustic activity of all its components has shown a sufficiently high efficiency and accuracy with minimal involvement of the specialist diagnostician.

УДК 621.833:517.443

**Омесь Д.В., Сокол В.А.**

### **ПРОЕКТИРОВАНИЕ УНИКАЛЬНЫХ ВЕЙВЛЕТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИАГНОСТИКИ МНОГОВАЛЬНЫХ ЗУБЧАТЫХ ПРИВОДОВ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ**

**Введение.** Теория вейвлетов даёт удобный и эффективный инструмент для решения многих практических задач. Основная область применения вейвлетных преобразований – анализ и обработка сигналов, нестационарных во времени или неоднородных в пространстве, когда результаты анализа должны содержать не только частотную характеристику сигнала, но и сведения о локальных координатах, на которых проявляют себя те или иные группы частотных составляющих или на которых происходят быстрые изменения частотных составляющих сигнала. Вибродиагностика является одной из множества областей применения вейвлет-анализа.

Вибрации зубчатых передач имеют сложную структуру, однако при этом в сложном вибросигнале можно выделить определённые закономерности формирования локальных всплесков. Форма, периодичность и продолжительность всплесков, порождаемых в зубчатом зацеплении, зависит от состояния рабочих поверхностей зубьев, имеет экспоненциальный закон затухания и может быть диагностирована с помощью вейвлет-разложения сигнала вибрации.

Также можно отметить, что не все из вейвлетов, разработанных в настоящее время, подходят для анализа вибросигналов ввиду принципиально неприемлемых свойств. В результате этого актуальной является задача по разработке новых видов вейвлетов, максимально адаптированных для диагностики неисправностей зубчатых передач в составе многовальных приводов.

**Постановка задачи.** Вибрационный всплеск, возникающий в зубчатом зацеплении при взаимодействии зубьев, имеет во временной области характерную форму – быстро возникающий импульс с последующим быстрым экспоненциальным затуханием. Частота таких затухающих колебаний зависит от резонансных свойств элементов конструкции зубчатой передачи. Период следования таких импульсов в вибросигнале соответствует частоте пересопределения зубьев в передаче, их начальная амплитуда будет зависеть от перегренности зацепления и состояния рабочих поверхностей зубьев.

При решении задач вибродиагностики зубчатых передач требуется найти характерные всплески вибрационной энергии, происходящие

**Омесь Д.В., магистр технических наук, старший преподаватель кафедры начертательной геометрии и инженерной графики Брестского государственного технического университета.**

**Сокол В.А., магистр технических наук, старший преподаватель кафедры машиностроения и эксплуатации автомобилей Брестского государственного технического университета.**

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

Вейвлет-преобразование

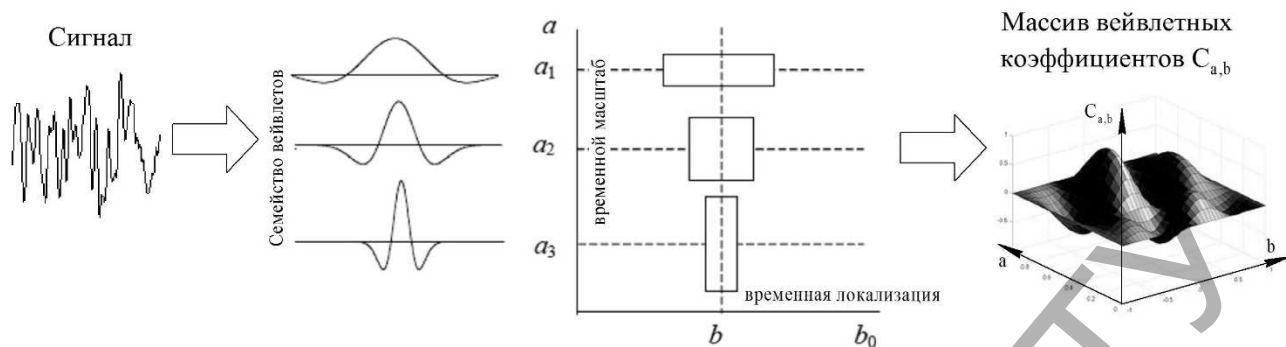


Рисунок 1 – Принцип определения вейвлетных коэффициентов  $C_{a,b}$

при зацеплении зубьев колёс. Для обнаружения таких колебаний при помощи непрерывного вейвлет-преобразования желательно использовать вейвлет, временная форма которого имеет вид, похожий на этот всплеск [1, 2]. Если среди существующих вейвлетов нет удовлетворяющих этому требованию, то существует возможность спроектировать новую вейвлетную функцию с заранее определенными свойствами, использование которой позволит более эффективно выявлять поврежденные зубчатые колеса и оценивать степень их повреждения.

Исходя из теории вейвлетов и задач вибродиагностики, можно обозначить основные положения проектирования новых вейвлетных функций для непрерывного преобразования вибросигналов зубчатых передач:

- форма вейвлета должна быть максимально приближена к форме всплеска сигнала вибрации, характерного зубчатому зацеплению;
- вейвлетная функция может быть задана аналитически либо таблично;
- вейвлетная функция должна иметь компактный носитель, т. е. быстро затухать в обоих направлениях;
- вейвлет для непрерывного преобразования должен иметь нулевой интеграл на интервале своего компактного носителя;
- для вейвлетов непрерывного преобразования без необходимости реконструкции сигнала условия ортогональности и симметричности не обязательны;
- для удобства анализа результатов преобразования вейвлет должен иметь центральную частоту меньше 1.

**Основные положения проектирования вейвлетов.** Прямое непрерывное вейвлет-преобразование вибрационного сигнала  $S(t)$  задается путем вычисления вейвлет-коэффициентов по формуле [2, 3, 4]:

$$C_{a,b} = \int_{a,b} s(t) \psi_{a,b} \left( \frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (1)$$

где  $a$  – временной масштаб;  $b$  – временная локализация;  $\psi_{a,b}(t)$  – анализирующий вейвлет.

На рисунке 1 показан принцип «сканирования» сигнала при вычислении вейвлетных коэффициентов.

Непрерывным такое преобразование является условно, т. к. при порождении материнских вейвлетов  $\psi_{a,b}(t)$  параметры  $a$  и  $b$  изменяются дискретно с малым шагом. Таким образом вейвлет-коэффициенты  $C_{a,b}$  определяются интегральным значением скалярного произведения сигнала на вейвлет-функцию заданного вида, т. е. локализованную во времени  $t$  и имеющую масштаб сжатия-растяжения  $a$ .

Проектирование уникальных вейвлетов в настоящих исследованиях осуществлялось с помощью пакета расширений Wavelet Toolbox системы компьютерной математики MATLAB [5]. При этом последовательность создания вейвлета включала следующие этапы:

- 1) подготовка прототипа вейвлета (паттерна) любой формы в виде числового ряда (вектора) значений функции произвольной длины на основе аналитического выражения;
- 2) импорт подготовленного паттерна в интерфейс «New wavelet for CWT»;

- 3) задание параметров адаптации будущего вейвлета – метод аппроксимации, степень аппроксимирующего полинома, граничные условия;

- 4) расчет адаптированного вейвлета;

- 5) создание вейвлетной функции для вычисления семейства анализирующих вейвлетов.

Как было отмечено ранее, вейвлет для непрерывного преобразования должен иметь нулевой интеграл в пределах своего компактного носителя. Однако характерный всплеск вибрации, который необходимо идентифицировать, может иметь ненулевой интеграл. Для решения проблемы нулевого интеграла паттерна используется функция адаптации вейвлета, которая находит достаточно регулярное приближение с нулевым интегралом к указанному паттерну методом наименьших квадратов. После этого адаптированный вейвлет содержит ряды значений  $X$  и  $Y$ , по которым воспроизводится форма материнского вейвлета  $\psi(t)$ . Чтобы использовать полученный адаптированный вейвлет, необходимо создать функцию MATLAB, которая будет использоваться системой при вычислении семейства анализирующих вейвлетов  $\psi_{ab}(t)$  разных масштабов.

**Проектирование вейвлета «Мехтог».** Вейвлетная функция, проектируемая для диагностики повреждения зубчатых колес, должна быть ассиметрична, иметь узкий частотный образ и экспоненциальный закон убывания. Для построения прототипа будущего вейвлета «Мехтог» используем левую часть вейвлета «Мексиканская шляпа» и правую часть вейвлета «Morlet» и запишем составную функцию  $C$  в следующем виде:

$$\psi(t) = \begin{cases} e^{-\frac{t^2}{2}} (1 - t^2), & -\infty < t \leq 0, \\ e^{-\frac{t^2}{2}} \cos(5t), & 0 < t < +\infty. \end{cases} \quad (2)$$

Приведенная составная функция непрерывна, интегрируема по всей длине, обладает свойством самоподобия. Для исключения разрыва в точке  $t=0$  был удален коэффициент перед экспонентой в аналитической записи вейвлета «Мексиканская шляпа». График составной функции (2) на интервале  $[-5, 5]$  приведен на рисунке 2.

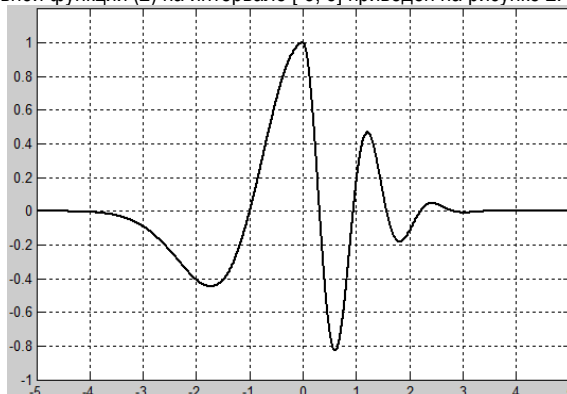


Рисунок 2 – График составной функции  $\psi(t)$

Из графика (рисунок 2) и выражения (2) очевидно, что левая и правая части вейвлетной функции будут иметь существенно различные частоты Фурье-образа. Для того чтобы обеспечить наследование доминирующей частоты при переходе от одного закона изменения к другому, введем в выражение левой части вейвлета  $(-\infty, 0]$  коэффициент  $k=(5/\pi)$ , величина которого была определена аналитически. Тогда выражение (2) примет вид:

$$\psi(t) = \begin{cases} e^{-\frac{(2kt)^2}{2}} (1 - (kt)^2), & -\infty < t \leq 0, \\ e^{-\frac{t^2}{2}} \cos(5t), & 0 < t < +\infty. \end{cases} \quad (3)$$

Согласно выражению (3) временной образ прототипа вейвлета и его спектр примут вид, показанный на рисунке 3.

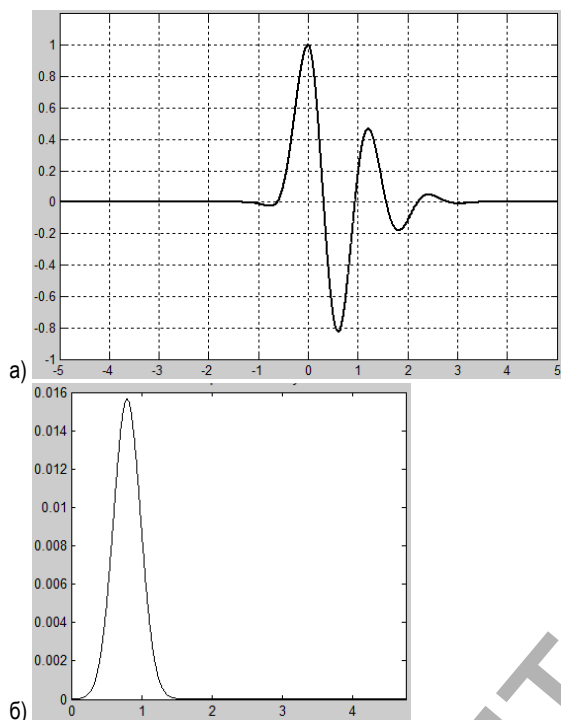


Рисунок 3 – График составной функции  $\psi(t)$  (а) согласно выражению (3) и ее частотный образ  $\psi(f)$  (б)

Частотный образ или спектр функции  $\psi(f)$ , приведенный на рисунке 3б, имеет явно выраженную доминирующую (центральную) частоту  $f_c=0,7946$  Гц и узкий диапазон, что наиболее предпочтительно при выполнении вейвлет-анализа и интерпретации скейлграммы в частотной области. Кроме того, на интервале  $[-2,4]$  содержится 99,9% энергии импульса, поэтому можно ограничить компактный (эффективный) носитель вейвлетной функции этим интервалом.

На основе заданного прототипа вейвлета (рисунок 3) построен адаптированный вейвлет для достижения условия нулевого интеграла, который эффективно обнаруживает всплески вибросигнала, характерные зацеплению зубьев.

Спроектированный вейвлет хранится в виде массива значений  $[X, Y]$ . Стоит отметить, что все вейвлеты, построенные с помощью функции «New Wavelet for CWT», имеют эффективный носитель  $X \in [0, 1]$ , что отличается от соответствующего интервала прототипа. Поэтому адаптированный вейвлет оказывается сжатым вдоль оси времени, что приводит к повышению доминирующей частоты  $f_c$ . Этот недостаток устраним путем масштабирования вектора значений  $X$  на интервале  $[0, 6]$ .

Уникальный спроектированный вейвлет «Мехтог» и его частотный образ показаны на рисунке 4.

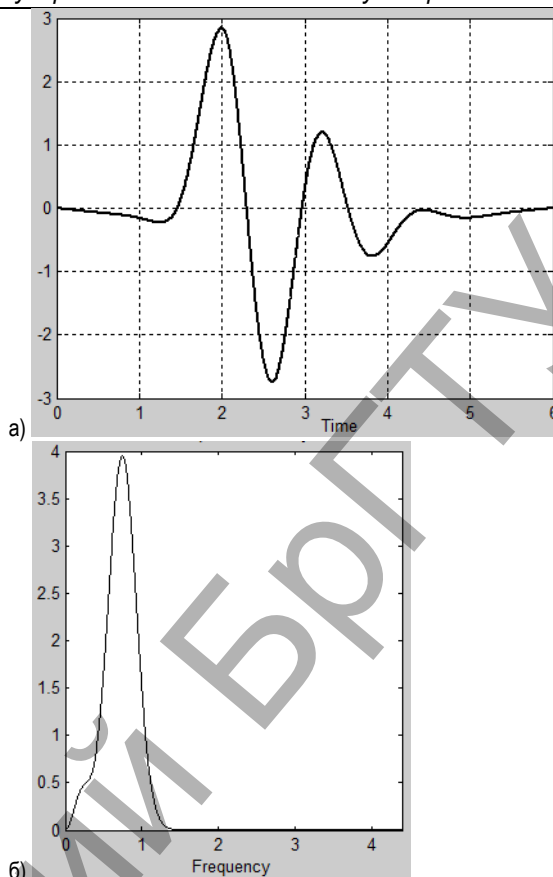


Рисунок 4 – Новый вейвлет «Мехтог» (а) и его частотный образ (б)

Временной образ вейвлета «Мехтог» (рисунок 4а) имеет размах  $(-2,7, 2,8)$ , что значительно больше размаха прототипа (рисунок 3а). Это приведет к увеличению коэффициентов вейвлет-преобразования при выявлении характерных всплесков, что повысит чувствительность данного вейвлета при анализе вибросигналов. Пик частотного образа соответствует частоте  $f=0,7459$  Гц, однако центральная частота спроектированного вейвлета  $f_c=0,6667$  Гц. В левой части спектра появились низкочастотные составляющие, являющиеся следствием сдвига вейвлета-прототипа для достижения нулевого интервала. Степень выраженности характерных импульсов на скейлграмме будет зависеть от наличия и степени развития локального повреждения зубчатого колеса.

**Проектирование вейвлета «Cosines».** При «склеивании» разных функций, как было сделано при проектировании вейвлета «Мехтог», происходит нарушение периодичности вейвлетной функции, что приводит к увеличению ширины частотного образа вейвлета, а при определенных условиях и к появлению второй доминирующей частоты. Поэтому спроектирован еще один вейвлет по подобию вейвлета «Morlet», но состоящий из двух одинаковых тригонометрических функций, имеющих разную скорость экспоненциального затухания.

Составная функция будет иметь вид:

$$\psi(t) = \begin{cases} e^{-16t^2} \cos(5t), & -\infty < t \leq 0, \\ e^{-\frac{t^2}{3}} \cos(5t), & 0 < t < +\infty. \end{cases} \quad (4)$$

Числовые коэффициенты в показателях степени экспоненты были подобраны эмпирически так, чтобы левая часть вейвлета имела только одну полуволну, а в правой части было три волны до практически полного затухания. При таком задании вейвлетной функции обе части имеют одинаковую доминирующую частоту, что дало узкий частотный образ прототипа вейвлета.

Область задания вейвлета ограничена интервалом  $[-5, 5]$ . На рисунке 5 представлены временной и частотный образы прототипа нового вейвлета, описанного выражением (4).

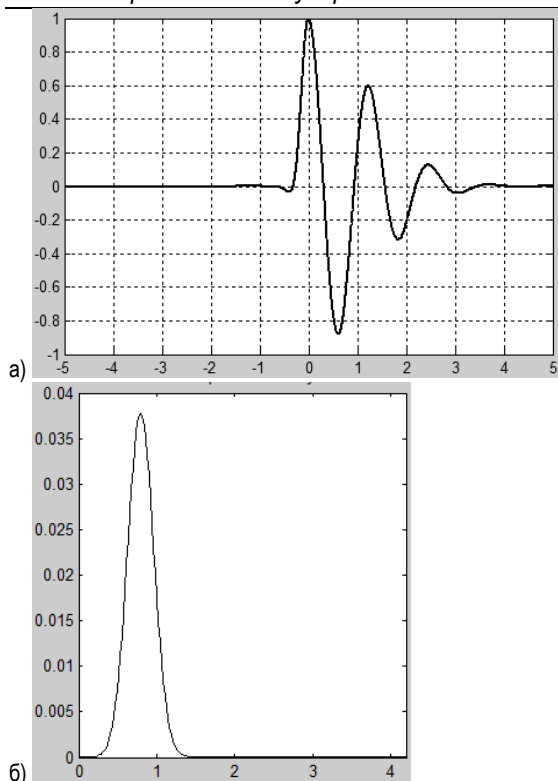


Рисунок 5 – График составной функции  $\psi(t)$  (а) согласно выражению (4) и ее частотный образ  $\psi(f)$  (б)

Частотный образ вейвлетной функции имеет доминирующую частоту  $f=0,7987$  Гц и узкий диапазон. Однако данная вейвлетная функция имеет ненулевой интеграл, поэтому ее также необходимо адаптировать. При значениях  $t < -2$  значения функции  $\psi(t)$  ничтожно малы, поэтому компактный носитель будущего вейвлета ограничен интервалом  $[-2.5, 5]$ .

На основе прототипа построен адаптированный вейвлет «Cosines», временной и частотный образы которого представлены на рисунке 6.

Временной образ вейвлета «Cosines» (рисунок 6а) имеет размах  $(-3.5, 3.8)$ , что повысит чувствительность данного вейвлета при анализе вибросигналов. Пик частотного образа соответствует частоте  $f_c=0,7782$  Гц. Частотный образ относительно узкий и имеет единственную доминирующую частоту. Согласно результату вычисления встроенной функции, центральная частота спроектированного вейвлета составляет  $f_c=0,8$  Гц, что соотносится с построенным спектром вейвлета.

**Применение уникальных вейвлетов и сравнение с классическими.** Выполнено непрерывное вейвлет-преобразование вибросигналов экспериментального многояльного зубчатого привода с использованием спроектированных уникальных вейвлетов. Вибросигналы были измерены при работе экспериментального привода на режиме  $n_{в,х}=1120$  мин<sup>-1</sup> и различными степенями повреждения одного из колес – полностью исправное, скол зуба 25, 50, 75%, полная поломка зуба. Частота пересопряжения зубьев экспериментального колеса на этом режиме работы привода составляла  $f_{z2}=631$  Гц. Частота дискретизации сигнала составляла  $f_{\delta}=46875$  Гц.

Преобразование осуществлялось с применением равномерной шкалы временных масштабов  $a$ . Технология применения равномерной шкалы подробно описана в работе [6]. При вычислении вейвлет-коэффициентов частоты просмотра ограничивались интервалом  $[50, 1600]$  Гц, который включает в себя гармоники  $f_{z2}$  и  $2f_{z2}$ .

На рисунках 7 и 8 приведены скейлограммы для сигналов вибрации, соответствующих полностью исправному приводу и имеющему поломку одного зуба экспериментального колеса, построенные с

равномерной шкалой временных масштабов и использованием уникальных вейвлетов.

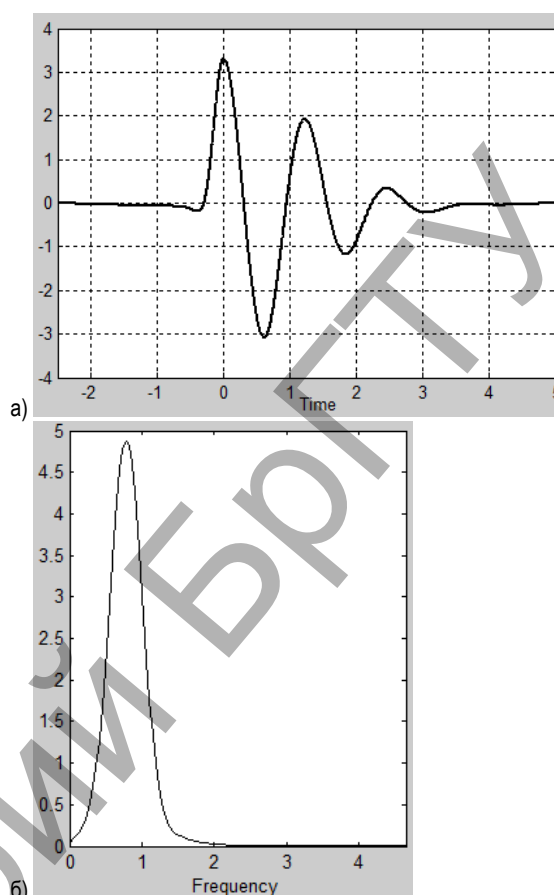


Рисунок 6 – Новый вейвлет «Cosines» (а) и его частотный образ (б)

Временной масштаб  $a$  пропорционально связан с частотой просмотра  $f_a$  вибросигнала. Так как частотный образ любого вейвлета имеет некоторую ширину, пусть даже и малую, с пиком на доминирующей частоте (центральная частота)  $f_c$ , полного соответствия между  $a$  и  $f_a$  добиться невозможно. Поэтому частоту просмотра  $f_a$  называют псевдо-частотой и приближенно определяют по формуле:

$$f_a = \frac{f_c \cdot f_{\delta}}{a}, \text{ Гц.} \quad (5)$$

Произведение в числителе выражения (5) есть ничто иное, как псевдо-частота, на которую настроен материнский вейвлет  $\psi(t)$  при  $a=1$ . Центральная частота вейвлета не всегда соответствует пику частотного образа вейвлета, а больше соответствует центру тяжести площади, ограниченной частотным образом, что вносит некоторую погрешность при частотной интерпретации скейлограмм и вейвлетных коэффициентов.

В таблице 1 для сравнения приведена выборка максимальных вейвлет-коэффициентов и соответствующих им значений временных масштабов для различных вейвлетов.

Таблица 1 – Сравнение вейвлет-коэффициентов непрерывного преобразования вибросигнала

Вейвлет	Morlet	Mexmor	Cosine		
Центральная частота $f_c$ , Гц	0.8125	0.6667	0.8000		
Масштаб $a$ , соответ. $f_{z2}/2f_{z2}$	60/30	49/25	59/30		
Максимальное значение $C_{a,b}^{\max}$ при разной степени повреждения зуба/соотв. масштаб $a$	овреждение, %	0	129/75	262/69	320/71
		25	181/69	358/67	451/70
		50	223/74	444/65	544/73
		75	241/69	485/66	631/74
		100	308/29	640/29	810/30

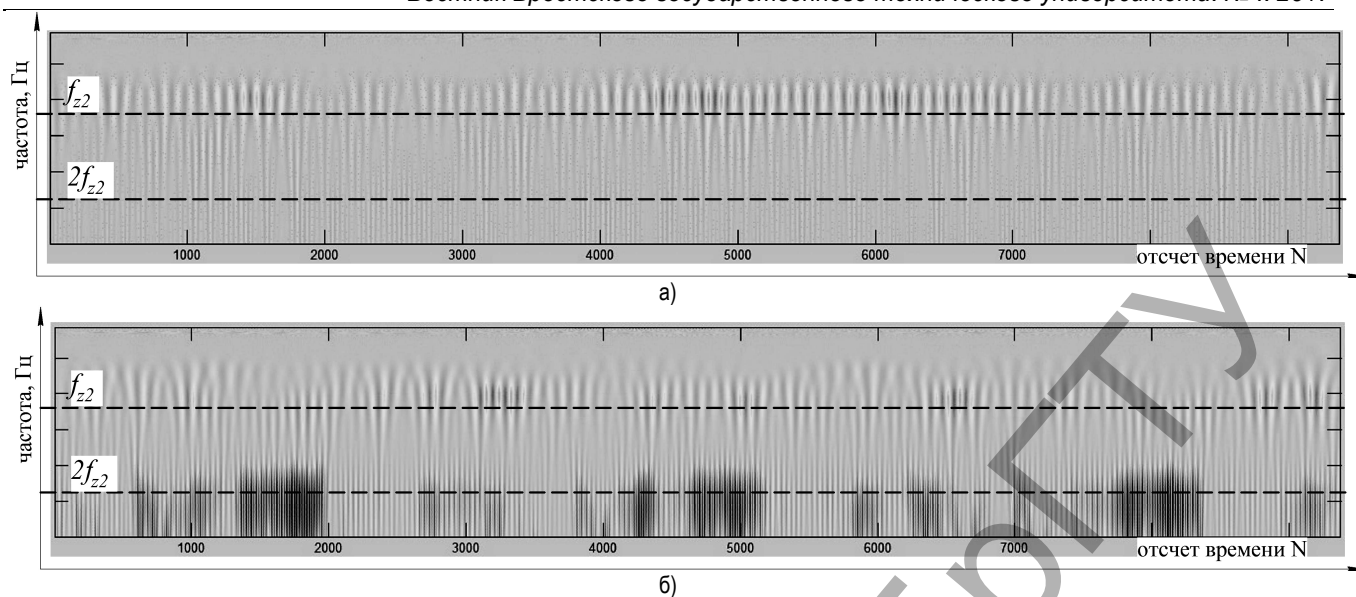


Рисунок 7 – Скейлограмма разложения вибросигнала вейвлетом «Mexmor» для исправного привода (а) и привода с поломкой одного зуба (б)

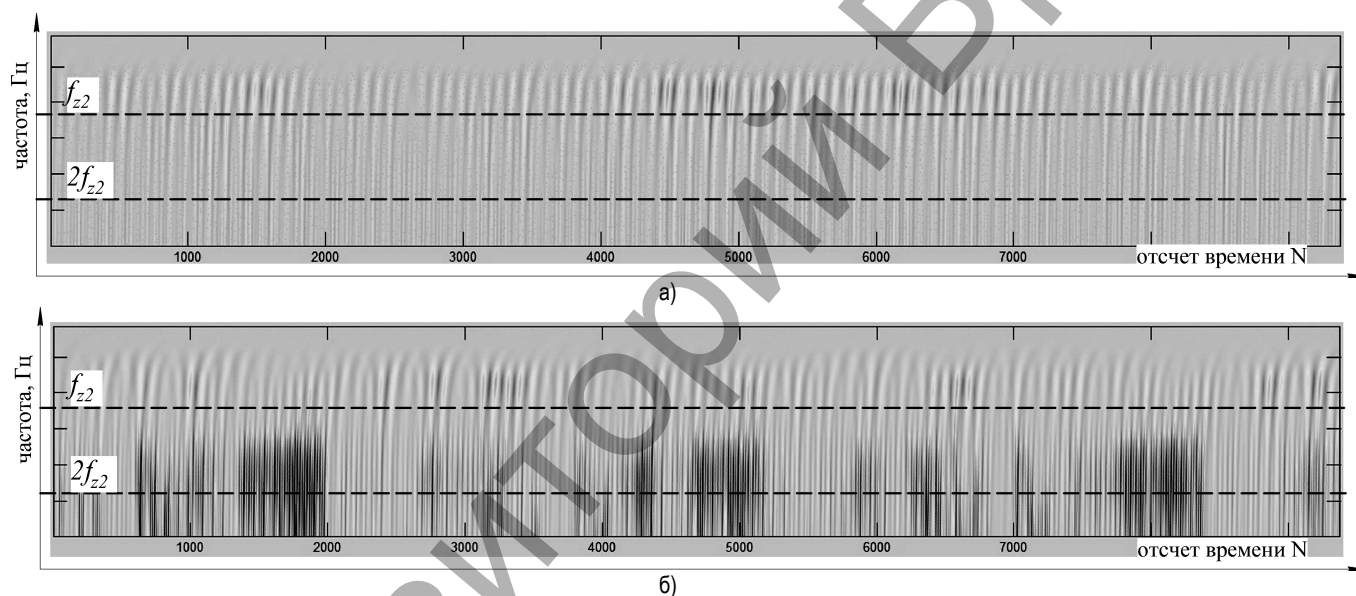


Рисунок 8 – Скейлограмма разложения вибросигнала вейвлетом «Cosines» для исправного привода (а) и привода с поломкой одного зуба (б)

На рисунке 9 приведены зависимости максимальных значений вейвлет-коэффициентов при деградации зубчатого колеса многовального привода, полученных преобразованием вибрационных сигналов с использованием стандартного вейвлета «Morlet» и спроектированных уникальных вейвлетов «Mexmor» и «Cosines».

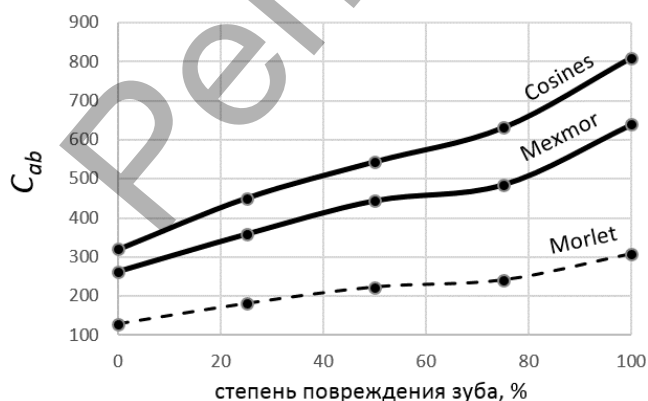


Рисунок 9 – Графики максимальных вейвлет-коэффициентов, полученных с помощью различных вейвлетов

Стоит отметить, что при зарождении и развитии повреждения рабочей поверхности зуба, максимальные значения вейвлет-коэффициентов  $C_{ab}$  наблюдаются на временных масштабах, соответствующих псевдо-частотам, близким к частоте пересопряжения зубьев  $f_{z2}$  передачи с поврежденным колесом. При полной поломке зуба максимальные значения коэффициентов зафиксированы на масштабах, соответствующих кратной зубцовой частоте  $2f_{z2}$ . Этот факт позволяет однозначно диагностировать полную поломку зуба колеса в составе многовального привода.

**Заключение.** Технология создания прототипов вейвлетов и их аналитического описания требует глубокого представления о частотных характеристиках применяемых функций. Произвольную форму прототипа вейвлета можно задать и набором значений, однако такой подход приведёт к сложному частотному образу и, как следствие, к сложному трудноанализируемому массиву вейвлетных коэффициентов. Поэтому желаемую форму всплеска необходимо аппроксимировать в некоторое количество периодических функций, обеспечить непрерывность составной функции в точках сопряжения и сохранить приемлемую форму частотного образа будущего вейвлета.

Создание новых вейвлетов позволяет заранее определять некоторые их свойства в соответствии с характером решаемой задачи.

Спроектированные уникальные вейвлеты «Mexmor», «Cosines», показали свою высокую информативность при непрерывном вейвлет-преобразовании. За счёт более высоких значений функции материнского вейвлета и его приближённости к форме характерных всплесков в результате вейвлет-преобразования получены коэффициенты, значительно превышающие коэффициенты преобразования обычными вейвлетами. Это говорит о большей чувствительности уникальных вейвлетов к изменению структуры вибрационного сигнала многовального зубчатого привода.

*Настоящие исследования проводились при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.*

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Давыдов, И.Г. Алгоритм оценки частоты повторения ударных импульсов на основе периодического вейвлет-преобразования / И.Г. Давыдов, С.Ю. Васюкевич, А.В. Цурко, И.М. Сеглюк // Доклады БГУИР. – 2014. – № 6(84). – С. 22–27.
2. Смоленцев, Н.К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB. – 4-е изд., доп. и перераб. – Москва : ДМК Пресс, 2014. – 628 с.
3. Нагорнов, А.В. Вейвлет-анализ в примерах : учеб. пособие / О.В. Нагорнов, В.Г. Никитаев [и др.] – Москва : НИЯУ МИФИ, 2010. – 120 с.
4. Юдин, М.Н. Введение в вейвлет-анализ : учеб.-практич. пособие / М.Н. Юдин, Ю.А. Фарков [и др.] – Москва : МГА, 2001. – 72 с.
5. MathWorks. MATLAB Documentation [Electronic resource] / Developer of mathematical computing software for engineers and scientists. – Natick: Official homepage, 2017. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/matlab/>
6. Омесь, Д.В. Применение вейвлет-анализа при исследовании ударных взаимодействий в зубчатых передачах многовальных приводов / Д.В. Омесь, А.В. Драган // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2015. – № 4(94): Машиностроение. – С. 4–8.

*Материал поступил в редакцию 27.12.2017*

#### **OMES D.V., SOKOL V.A. Unique wavelets design for improving effectiveness of multishaft gear drives diagnostics based on vibrational signals wavelet analysis**

The article is devoted to the design of new wavelet functions for wavelet transformation of vibrational signals in gear drives diagnostics. When designing, it is proposed to take into account the shape of the characteristic vibration spike when the teeth are engaged. At the stage of preparation of the wavelet prototypes, the necessary characteristics of the time and frequency wavelets representation were modeled, it made possible to improve the efficiency of diagnosing damaged gears in multi-shaft drives.

УДК 621.793

**Девойно О.Г., Кардаполова М.А., Яцкевич О.К.**

## **СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ И СВОЙСТВА ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ, ПРОШЕДШИХ ТЕРМОДИФФУЗИОННУЮ ОБРАБОТКУ В ПРИСУТСТВИИ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

**Введение.** Керамические покрытия на основе оксида алюминия в зависимости от условий протекания процесса напыления могут состоять из различных фаз, имеющих значительные отличия в физико-механических свойствах.

Газопламенные покрытия в основном состоят из метастабильной  $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$  с включениями высокотемпературной фазы  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  в количестве до 30 % [1]. Плазменные покрытия, даже полученные при напылении порошка оксида алюминия, состоящего исключительно из  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , в зависимости от условий и режимов напыления могут состоять из нескольких промежуточных фаз, таких как  $\beta$ ,  $\delta$  и  $\alpha$  [2], или  $\gamma$  и  $\alpha$  [3].

Условия протекания фазовых переходов низкотемпературной модификации ( $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) в высокотемпературную ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ) с учетом наличия всех промежуточных состояний и итоговое количественное соотношение фаз в полученных покрытиях непостоянны и в различных литературных источниках носят противоречивый характер. В [3] показано, что содержание  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  может изменяться от 5% до 30%, сильно зависит от условий формирования покрытия плазменно-детонационным методом и не может быть спрогнозировано заранее.

Таким образом, процесс перехода одной фазы в другую зависит от технологии напыления, от технологических параметров процесса, от особенностей строения и свойств порошка. Поэтому изменить фазовый состав и управлять полиморфными превращениями в плазменных керамических покрытиях на основе оксида алюминия

можно не только за счет изменения условий напыления, но и путем оптимизации исходного состава порошка, используемого при получении покрытия. Кроме того, введение дополнительных элементов позволяет не только изменить фазовый состав оксида алюминия, но и улучшить эксплуатационные свойства полученных покрытий, повысить прочность сцепления с основой и износостойкость при снижении пористости [4].

В данной работе керамические порошковые материалы для плазменного напыления на основе оксида алюминия предлагается подвергать термодиффузионной обработке. Данная технология модифицирования порошков направлена на активацию поверхности и введение определенного количества легирующего элемента, которое осуществляется при высокой температуре и постоянном перемешивании порошковой смеси гравитационным способом. При таких условиях обеспечивается равномерное распределение легирующих элементов по частицам при условии их несепаемости.

Выбор легирующих элементов для термодиффузионной модификации проводили на основе анализа влияния различных типов соединений и простых металлов и неметаллов на эксплуатационные характеристики покрытий. Наиболее распространено использование керамических оксидов, образующих эвтектики и влияющих на структуру напыляемых покрытий. Во многих работах приводятся примеры двухкомпонентных керамических покрытий  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  [5],  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$  [6],  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$  [7]. Введение таких оксидов, как  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{MgO}$ , согласно [8], в отличие от других рассматриваемых оксидов, оказывает влияние на

*Девойно Олег Георгиевич, д.т.н., профессор, заведующий НИЛ плазменных и лазерных технологий Белорусского национального технического университета.*

*Кардаполова Маргарита Анатольевна, к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник НИЛ плазменных и лазерных технологий Белорусского национального технического университета.*

*Яцкевич Ольга Константиновна, старший преподаватель Белорусского национального технического университета. Беларусь, БНТУ, 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.*