

## Вейвлет-преобразования как метод диагностики энергетических машин

*А.И. Беляев, А.Ю. Овсянников, К.А. Лапковский, Е.А. Дорофеев*

*Омский государственный технический университет, Омск*

**Аннотация:** В данной статье рассматривается проблема диагностирования оборудования на предмет износа и повреждений. Снижение затрат на сервисное обслуживание оборудования можно достичь своевременным обнаружением неисправностей. Для этого требуется усовершенствование метода диагностирования. Целью статьи является анализ применения аппарата вейвлет-преобразования для обнаружения неисправностей гидравлического и пневматического оборудования. Проанализированы работы других авторов по данной тематике. С помощью математического пакета прикладной программы MATLAB построены трёхмерные скейлограммы вейвлет-преобразования. Уделено внимание сравнению широко применяемого метода преобразования Фурье и малоизученного метода вейвлет-преобразования. Рассмотрено два основных уравнения вейвлет-преобразования, используемых для решения поставленных задач. Внедрение нового алгоритма преобразования даёт более точную и качественную оценку технического состояния оборудования.

**Ключевые слова:** диагностика энергетического оборудования, вибродиагностика, вибросигнал, вейвлет-преобразования, преобразование Фурье.

В настоящее время проблема энергосбережения является весьма актуальной. Энергосбережение должно относиться к стратегическим задачам государства, являясь одновременно и основным методом обеспечения энергетической безопасности. Так в статье 24 Федерального Закона № 261-ФЗ [1] предъявляются требования по сокращению энергетических ресурсов, в размере трёх процентов ежегодно на предприятиях муниципальной и бюджетной сферы. Программа Правительства РФ «Энергоэффективность и развитие энергетики» [2] предполагает сокращение издержек на все виды энергоресурсов.

На большинстве промышленных предприятий доля энергопотребления компрессорными станциями достигает 20% от общих энергозатрат. Своевременное диагностирование износа деталей узлов механизмов позволяет повысить КПД установок и избежать серьезных последствий при преждевременном выходе оборудования из строя.

Возникает актуальная задача развития и разработки новых методов диагностирования энергетического оборудования. В работе [3] авторами предлагается совершенствование системы диагностирования компрессоров объёмного действия с помощью применения методов математического моделирования рабочих процессов. Это позволяет снизить экономические затраты на проведения диагностики и повысить точность обнаружения неисправностей.

В настоящее время для диагностирования энергетического оборудования находит всё более широкое применение метод вейвлет-преобразования, который заключается в обработке исходного сигнала с последующим анализом для выявления неисправностей в работе агрегатов [4-9].

В работе [4] автор ставил своей целью «повысить точность оценки фактического технического состояния центробежных насосных агрегатов (ЦНА)». Для достижения поставленной задачи проводилась обработка полученных в ходе ряда экспериментов, вибросигналов методом вейвлет-преобразования. Данный подход позволил соискателю определить диагностические признаки неисправностей, таких как дефекты смазки в подшипниках электродвигателя, изгибные деформации и др. Также автор выработал дополнительные диагностические признаки для разделения между собой основных неисправностей ЦНА в процессе эксплуатации.

При работе компрессора на нестационарных режимах возникает явление вращающегося срыва, которое приводит к полной потере устойчивости работы агрегата. Исследованием этого явления занимался автор в работе [5]. Основным признаком вращающегося срыва являются неустойчивые низкочастотные пульсации давления, которые использовались в качестве исходного сигнала. При обработке этого сигнала с применением вейвлет-разложения на основе биортогонального вейвлета  $\text{bior} 3.5$  были

---

получены аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты. На основании этих данных автором разработан «метод выявления нестационарных пульсаций давления» [5], по которому можно судить о появлении вращающегося срыва.

Выявлению дефектов подшипников была посвящена работа [6]. Главная задача сводилась к построению фазовых портретов, на основе форм волн вибросигналов насосных агрегатов, которые характеризовали поведения системы. Проводя исследования, автор демонстрирует, что в некоторых случаях в вибросигналах имелась шумовая составляющая, снижающая точность спектрального анализа. Для очищения сигналов от шума было использовано дискретное вейвлет-преобразование с применением вейвлета Добеши.

На основании полученных вибросигналов построены фазовые портреты, отражающие текущее состояние системы. Они позволяют отслеживать проявление различных неисправностей ЦНА, связанных с дефектами подшипников качения.

Исследование эффективности применения группы методов контроля для анализа виброакустических сигналов представлено в работе [7]. Данная оценка необходима для выявления неисправностей компрессорных установок. Комплексный диагностический подход включает в себя анализ огибающей, метод прямого спектрального анализа, синхронное накопление и эксцесс. Для диагностики компрессорного оборудования высокой мощности применяют вейвлет-преобразования. Исследования, основанные на приведённом выше методе, позволяют более точно определить текущее техническое состояние оборудования, увеличить безопасность эксплуатации компрессорных установок и снизить затраты на их обслуживание.

Суммарный опыт применения данного подхода на практике позволит в будущем перейти на «систему обслуживания техники по фактическому

---

техническому состоянию» [7], одним из элементов которой является стационарный аппаратно-программный комплекс.

Проблема диагностики погружного электрооборудования описана в работе [8]. Предлагается метод вибродиагностики с использованием непрерывного вейвлет-преобразования вибросигнала, позволяющий определить характер дефектов и место их возникновения. В результате преобразования получают скейлограммы, при анализе которых автор предлагает использовать количество локальных максимумов и их координаты в качестве идентификации дефектов.

В результате проведённого анализа была разработана «методика количественной оценки степени развития дефектов погружного оборудования» и ряд других методов диагностики неисправностей.

Работа [9] направлена к изучению неустойчивых колебаний при флаттере лопаток аксиального компрессора низкого давления. Для колебаний с относительно малым спектром частот используется демпфирование на этих частотах. Доказано, что «при снижении отношения сигнал/шум в записи колебания ошибка в определении спектра демпфирования больше, чем ошибка в определении спектра собственных частот». Показано, что посредством дискретного стационарного вейвлет-преобразования обеспечивается стабильное определение демпфирования на собственных частотах по методу Прони для предварительной линейной фильтрации записей неустойчивых колебаний, их последующему прореживанию и удалению шума из прореженных записей. Данный метод позволяет распознать «флаттер лопаток компрессора по записям пульсаций давления встречного воздушного потока и записям вибрации корпуса компрессора» [9].

Энергетические машины, в частности насосы и компрессоры, составляют большую долю от всех агрегатов, работающих на предприятиях

---

различного рода деятельности. Любая машина имеет свой ресурс работы. Выход её из строя негативно влияет на весь технологический процесс. Поэтому требуется своевременная диагностика, ремонт или замена оборудования.

Одним из известных методов определения неисправностей работы агрегата является вибродиагностика. Применяемый в качестве исходных данных вибросигнал подвергается спектральному анализу, который базируется на первичном преобразовании Фурье [4,12].

Преобразование Фурье состоит в представлении сигнала  $y(x)$  в виде бесконечной суммы синусоид вида  $F(\omega) \cdot \sin(\omega \cdot x)$ . Функция  $F(\omega)$  – называется преобразованием Фурье, или – спектром сигнала [10,13].

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} y(x) \cdot \exp(-i\omega x) dx \quad (1)$$

Произвольный сигнал  $y(x)$  может быть представлен ортогональной системой функций:

$$y(x) = C_0\varphi_0(x) + \dots + C_n\varphi_n(x) + \dots = \sum_{n=0}^{\infty} C_n\varphi_n(x), \quad (2)$$

где  $\varphi_n(x)$  – базисная функция; произведение вида  $C_n\varphi_n(x)$  – спектральная составляющая сигнала  $y(x)$ . Совокупность коэффициентов  $[C_0, \dots, C_n]$  – спектр сигнала. Его графическое изображение представлено на рис.1, называемым спектральной диаграммой, которая даёт наглядное представление о спектре сигнала [11,13].

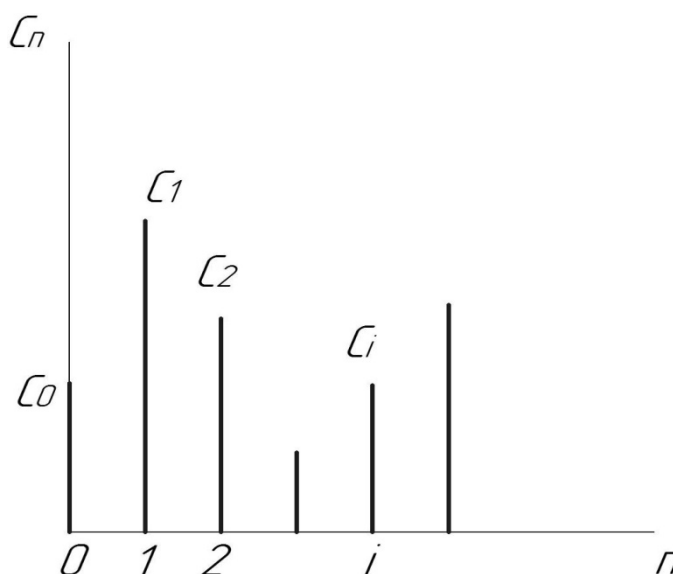


Рис. 1. – Спектральная диаграмма

Применяемый метод вибродиагностики, основанный на первичном преобразовании Фурье очень широко используется. Объясняется это тем, что технически этот метод легко реализовать на практике посредством аналогово-цифровой техники [4,12]. Важно отметить, что при заданной системе базисных функций, метод Фурье обеспечивает наилучшую аппроксимацию, давая минимум среднеквадратичной ошибки [11].

«Наряду с неоспоримыми достоинствами, это преобразование обладает и определенными недостатками: вследствие потери информации о временном факторе искажается представление о динамике изменения спектрального состава сигнала. В отдельных случаях это приводит к невозможности однозначного определения дефектов, также возникают сложности выявления скрытых дефектов. Более того, Фурье-анализ крайне нестабилен в отношении возмущений (ударных и динамических нагрузок). В ряде случаев этот метод оказывается малоэффективным для сигналов с локальными особенностями. Это связано с тем, что базисная функция рядов Фурье является синусоидой, которая определена в области от  $-\infty$  до  $+\infty$  и по своей природе является гладкой и строго периодической функцией. Такая функция на практике принципиально не способна описывать произвольные

сигналы и функции. Традиционный спектральный анализ неэффективен для нестационарных сигналов с временным масштабом нестационарности много меньшим продолжительности подлежащей анализу реализации» [4,12].

Все эти недостатки не позволяют решить проблему выявления дефектов оборудования комплексным образом.

Отсюда актуальность данных проблем приводит к необходимости разработки других или дополнительных методов анализа сигналов в области вибродиагностики, которые позволят их решить.

Таким новым методом является вейвлет-преобразование. Данный метод преобразования является детальным и масштабированным по времени или по аргументу пространства представлением сигналов. Вейвлет-преобразование одномерных сигналов обеспечивает их двухмерное представление, при этом частота и координата рассматриваются как независимые переменные, что отличает его от преобразований Фурье и позволяет проводить анализ сигналов сразу в двух измерениях [12].

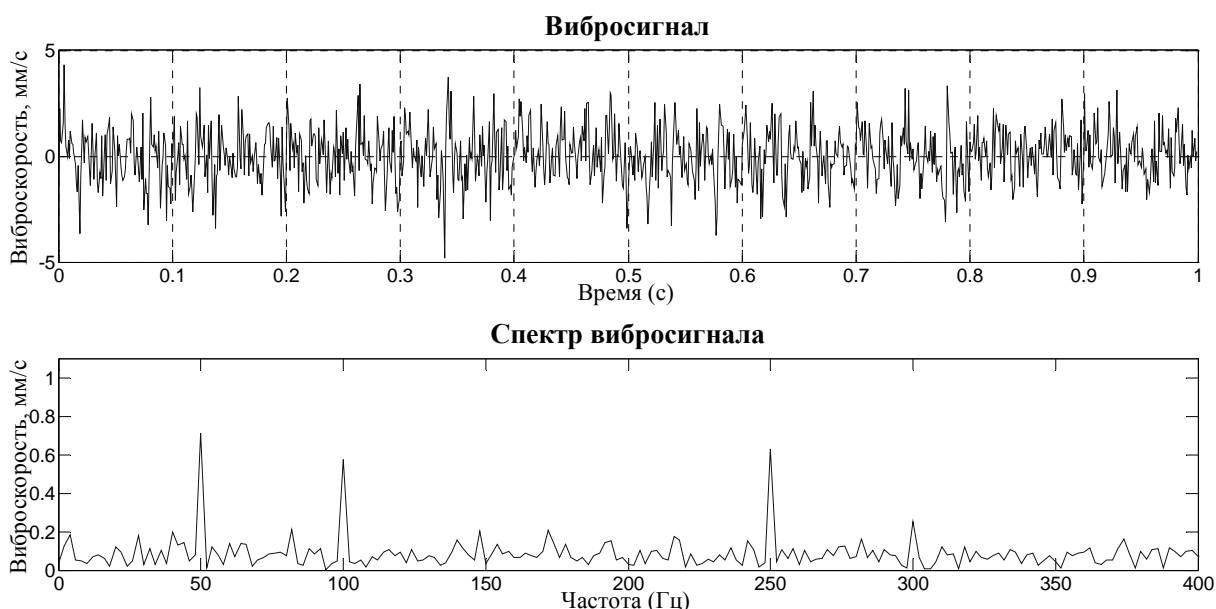


Рис. 2. – Исследуемый вибросигнал и его преобразование Фурье

Одномерное вейвлет–преобразование сигнала  $f(x)$  является двумерной функцией:

$$W_{\psi} f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{C_{\psi}}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{b-x}{a}\right) f(x) dx, \quad (3)$$

где  $\Psi$  – вейвлет функция;  $b$  – сдвиг;  $a$  – масштаб или шкала.

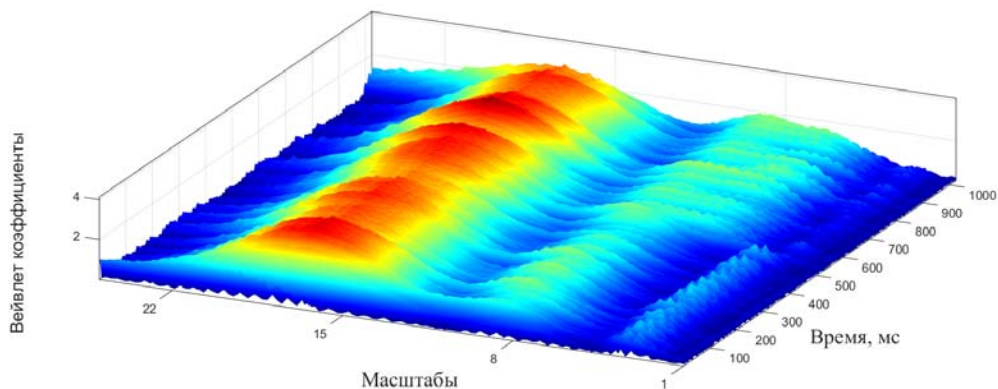
Нормирующий коэффициент равен

$$C_{\psi} = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty, \quad (4)$$

где  $\psi(\omega)$  – Фурье–образ вейвлета  $\Psi$ .

Свобода в выборе базисных функций  $\Psi_{a,b}(x)$  позволила ввести многие типы вейвлетов: вейвлет Хаара, Добеши, Гаусса, Морле и пр.

Проведя непрерывное вейвлет преобразование исследуемого вибросигнала (рис. 3) становится очевидным, что различные частотные компоненты вибрации присутствуют в определенные промежутки времени (циклы работы). Следует отметить, что в момент времени  $t = 500$  (мс) в сигнале происходит изменение частотных компонент. Основной сигнал можно охарактеризовать как биения (наложение двух близких частот).





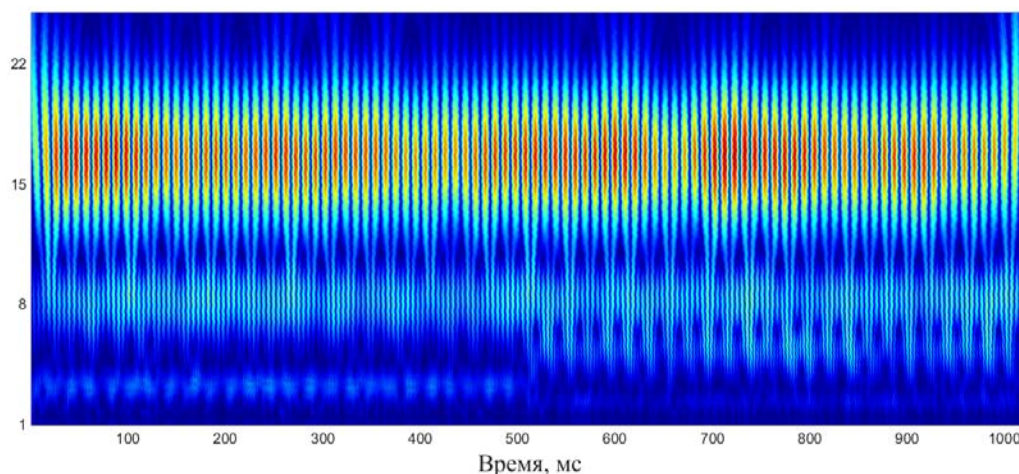


Рис.3. – Трехмерная скейлограмма вейвлет преобразования

По своей сути вейвлет-преобразование представляет собой представление сигнала в виде одинаковых по форме коротких «всплесков», которые можно сдвигать и растягивать по временной оси. В этом и заключается принципиальное отличие от бесконечных волн преобразования Фурье [4,5].

Вейвлет-анализ выражается в виде зависимости параметров:

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (5)$$

где  $\psi$  – основная или материнская функция;  $\psi_{ab}$  – анализирующая функция. Обозначения в формуле (5) были расшифрованы выше. Если  $(a > 1)$  это расширение основной функции,  $(a < 1)$  сжатие [4].

В интегральной форме вейвлет-анализ выглядит следующим образом:

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (6)$$

где функция  $\psi(t)$  – называется вейвлетом (анализирующим, базисным, материнским вейвлетом); параметр  $a$  – определяет размер вейвлета и называется масштабом; параметр  $b$  – задаёт временную локализацию вейвлета и называется сдвигом. Этот параметр не имеет аналога в Фурье преобразовании. Символом  $*$  в формуле (6) обозначается комплексное сопряжение [14].

Помимо рассмотренного выше непрерывного вейвлет-преобразования, существует дискретное преобразование, в котором имеет место процесс фильтрации. Благодаря этому возникает два таких понятия как аппроксимация (приближение) и детали. Аппроксимация представляет собой высоко-смаштабированные высокочастотные компоненты, детали - это низко-смаштабированные высокочастотные компоненты. В итоге получается, что первоначальный сигнал разбивается на два сигнала, дополняющих друг друга, что даёт в два раза больше данных о первоначальном сигнале [4,12].

По сравнению с разложением сигналов на ряды Фурье, вейвлеты обладают способностью представлять локальные особенности сигналов с большей степенью точности и решать проблемы выявления дефектов оборудования более точным, комплексным способом.

## Литература

---

1. Федеральный закон от 23.11.2009г №261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации»

2. Программа Правительства РФ «Энергоэффективность и развитие энергетики»

3. Щерба В.Е., Зеленова Л.А., Павлюченко Е.А. Применение метода математического моделирования для технической диагностики компрессоров объемного действия // Россия молодая: передовые технологии – в промышленность! – 2013. – № 1. – С. 38-39.

4. Д.В. Корнишин. Вейвлет-анализ и мультифрактальная параметризация при оценке технического состояния центробежных насосных агрегатов: Дис. ... канд. техн. наук. – Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2015. –171с.

5. А.А. Лебедев Вейвлет-анализ нестационарных процессов в центробежном компрессоре: Автореф. ... канд. техн. наук. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2008. – 16 с.

6. А.Ф. Нафиков Выявление дефектов подшипников качения с использованием метода фазовых портретов при вибродиагностике насосных агрегатов: Автореф. ... канд. техн. наук.– Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2015. – 24 с.

7. П.Б. Герике Определение фактического технического состояния промышленных компрессоров на основе контроля по параметрам механических колебаний // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2013. – № 6(100). – С. 37-40.

8. А.Н. Китабов Интеллектуальная система диагностики погружного электрооборудования на основе вейвлет-преобразования с использованием

правил вывода по прецедентам: Автореф. ... канд. техн. наук. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2013. – 19 с.

9. B.G. Kukhareno Indirect identification of low-pressure compressor blade flutter with oscillation record preprocessing in use // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2008. – № 4. – С. 37-43.

10. А.Б. Сергиенко Цифровая обработка сигналов. - СПб: Питер, 2002. – 608с.: ил.

11. А.Н. Яковлев Введение в Вейвлет-преобразование: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 104 с.

12. В.П. Дьяконов Вейвлеты. От теории к практике. - СПб: Солон-Р, 2002. – С. 3-427

13. Н.М. Астафьева Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук, 1996, т.166, № 11. – С. 1145-1170.

14. В.В. Витязев Вейвлет-анализ временных рядов: Учеб. пособие. - СПб.: Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2001. – 58 с.

### Reference

1. Federal'nyj zakon ot 23.11.2009g №261FZ «Ob jenergosberezhenii i o povyshenii jenergeticheskoj jeffektivnosti i o vnesenii izmenenij v otдел'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federacii»; [About energy saving and about increase of power efficiency and about certain legislative acts of the Russian Federation of 23.11.2009].

2. Programma Pravitel'stva RF «Jenergojeffektivnost' i razvitie jenergetiki»; [Russian Federation administration's agenda « Energy efficiency and energy development».]

3. L.A. Zelenova, E.A. Pavljuchenko, V.E. Shherba Rossiya molodaja: peredovyje tehnologii v promyshlennost'! 2013. № 1. pp. 38-39.

4. D.V. Kornishin Vejvlet-analiz i mul'tifraktal'naja parametrizacija pri ocenke tehničeskogo sostojanija centrobezhnyh nasosnyh agregatov; [Kornishin Wavelet analysis and multifractal parameterization in estimating technical state of centrifugal unit pump]: Dis. ... kand. tehn. nauk: 05.02.12 Mashiny, agregaty i processy. Ufa: Ufimskij gosudarstvennyj neftjanoj tehničeskij universitet, 2015.171p.

5. A.A. Lebedev: Avtoref. ... kand. tehn. nauk: 05.04.06 Vakuumnaja, kompressornaja tehnika i pnevmosistemy. Sankt Peterburg: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj politehničeskij universitet, 2008. 16 p.

6. A.F. Nafikov Vyjavlenie defektov podshipnikov kachenija s ispol'zovaniem metoda fazovyh portretov pri vibrodiagnostike nasosnyh agregatov; [Localization of roller bearing faults using phase-plane plot method at vibration monitoring of pumping units]: Avtoref. ... kand. tehn. nauk: 05.02.13. Ufa: Ufimskij gosudarstvennyj neftjanoj tehničeskij universitet, 2015. 24 p.

7. P.B. Gerike Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. 2013. № 6(100). P. 37-40.

8. A.N. Kitabov Intellektual'naja sistema diagnostiki pogruzhnogo jelektrooborudovanija na osnove vejvlet-preobrazovanija s ispol'zovaniem pravil vyvoda po precedentam; [Intelligence system of submersible electrical equipment diagnostics based on wavelet analysis by applying precedent derivation rules]: Avtoref. ... kand. tehn. nauk: 05.13.01 Sistemnyj analiz, upravlenie i obrabotka informacii (v promyshlennosti). Ufa: Ufimskij gosudarstvennyj aviacionnyj tehničeskij universitet, 2013. 19 p.

9. B.G. Kukharenko. Problemy mashinostroenija i avtomatizacii. 2008. № 4. pp. 37-43.

10. A.B. Sergienko Cifrovaja obrabotka signalov; [Digital signal processing]: SPb: Piter, 2002. 608: il.



11. A.N. Jakovlev Vvedenie v Vejvlet-preobrazovanie; [Yakovlev Introduction to Wavelet analysis]: Ucheb. posobie. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2003. 104 p.
12. V.P. D'jakonov Vejvlety. Ot teorii k praktike; [Wavelets. Bedside approach.]: SPb: Solon-R, 2002. pp. 3-427
13. N.M. Astaf'eva Uspehi fizicheskikh nauk, 1996, t.166, № 11. pp. 1145-1170.
14. V.V. Vitjazev Vejvlet-analiz vremennyh rjadov; [Wavelet analysis of timing series]: Ucheb. posobie. SPb.: Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 2001. 58 p.