

О. С. Шумарова, Н. В. Корнилова

## АВТОМАТИЗАЦИЯ НАХОЖДЕНИЯ ДЕФЕКТОВ НА ОСНОВЕ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА

### Аннотация.

*Актуальность и цели.* Целью данной работы является совершенствование метода обработки информационного сигнала при вихретоковом контроле качества шлифованных поверхностей качения деталей подшипников на основе автоматического нахождения локальных дефектов при помощи фрактального анализа. В соответствии с поставленной целью в работе решаются следующие задачи: разработка метода автоматического выявления локальных дефектов и создание программного модуля для автоматического поиска наиболее распространенных локальных дефектов шлифованной поверхности качения деталей подшипников по данным вихретокового контроля, основанного на определении показателя Херста, на основании графика детализирующих коэффициентов вейвлет-анализ сигнала.

*Материалы и методы.* В основе проведенных исследований лежат методы обработки дискретных сигналов, аппарат фрактального анализа, теория распознавания образов. Обработка результатов вихретокового контроля велась с использованием специально разработанного программного обеспечения, написанного и реализованного с помощью языка программирования Delphi. Экспериментальные исследования проводились с использованием автоматизированной системы вихретокового контроля (АСВК) на базе автоматов контроля деталей подшипников (АВК-Р2 и ПВК-К2М) в производственных условиях ОАО «ЕПК-Саратов».

*Результаты.* Эффективность вихретокового метода контроля качества шлифованной поверхности деталей подшипников повышается за счет автоматического анализа степени неоднородности поверхностного слоя с помощью специальных методов фрактального анализа информационных сигналов.

*Выводы.* Для выявления дефектов разработан специальный программный продукт, позволяющий анализировать дискретные данные, полученные с вихретокового датчика. Внедрение программного обеспечения в автоматическую систему мониторинга качества изготовления прецизионных изделий позволяет эффективно управлять технологическим процессом. Разработанный программный продукт является исследовательским и при некоторой доработке под конкретные технологические процессы подлежит практическому внедрению.

**Ключевые слова:** вихретоковый контроль, локальные дефекты поверхностного слоя деталей подшипников, фрактальный анализ.

О. S. Shumarova, N. V. Kornilova

## AUTOMATION OF FLAW DETECTION ON THE BASIS OF FRACTAL ANALYSIS

### Abstract.

*Background.* The purpose of this work is to enhance a method of information signal processing at eddy-current quality control of polished rolling surfaces of bearing parts on the basis of automatic detection of local flaw by means of the fractal analysis. The goal requires to solve the following objectives: to develop a meth-

od of automatic flaw detection and to create a software module for automatic detection of the most widespread local flaws of polished rolling surfaces of bearing parts according to the eddy-current monitoring, based on defining the Hurst exponent via a diagram of detail coefficients of the signal's wavelet analysis.

*Materials and methods.* The conducted research was based on such methods as discrete signals processing, fractal analysis and the theory of image identification. The eddy-current monitoring results were processed using specially developed software written and realized by means of Delphi programming language. The pilot studies were conducted via an automated system of eddy-current monitoring (ASECM) on the basis of automatic machines for bearing parts monitoring (ABK-P2 and PVK-K2M) in the environment of "EPK-Saratov" JSC.

*Results.* The efficiency of the eddy-current method of quality control for polished surfaces of bearing parts drops due to the automatic analysis of the level of surface non-uniformity by means of special methods of the fractal analysis of information signals.

*Conclusions.* For the purpose of flaw detection we developed the special software allowing to analyze discrete data obtained from eddy-current sensors. The software implementation in the automatic system of precision products' quality monitoring allows to control the technological process effectively. The developed software product is still being researched and after some adjustments for specific technological processes is subject to practical implementation.

**Key words:** eddy-current monitoring, local flaws of bearing parts' surfaces, fractal analysis.

### **Введение**

Задача автоматизации сортировки деталей в зависимости от качества поверхностного слоя, а также обнаружения дефектов поверхностного слоя деталей подшипников является актуальной задачей, так как современная технология производства подшипников требует повышения скоростей автоматического неразрушающего контроля и включения систем контроля непосредственно в технологическую линию [1].

При разработке и внедрении на промышленных предприятиях автоматизированных систем мониторинга качества изготовления подшипников может быть достигнуто повышение качества этих изделий. Соответственно эти системы позволяют вывести процесс производства продукции предприятия на более высокий уровень и значительно снизить или практически исключить брак, обеспечить конкурентное преимущество в борьбе за потребителя [2].

Максимально возможная степень автоматизации контроля качества поверхностного слоя деталей подшипников на этапе шлифования позволяет целенаправленно воздействовать на причины возникновения выявляемых типов неоднородностей, снижает себестоимость контроля качества и охватывает большой объем выборки контролируемых изделий, что повышает эффективность всей системы мониторинга.

Со стороны подшипниковой промышленности в наибольшей степени всем требованиям отвечает автоматизированный прибор вихретокового контроля ПВК-К2М, который применяется на ОАО «Саратовский подшипниковый завод».

Возможности автоматизации контроля деталей с помощью данного прибора очень высоки и до конца не исчерпаны. Применение ЭВМ позволяет с наименьшими затратами проводить статистические и иные методы анализа

сигнала вихретокового преобразователя с целью наработки базы данных контроля деталей подшипников, определяя классификационные признаки дефектов деталей, что обеспечит возможность автоматизированного их распознавания для улучшения технологического процесса [2].

### **1. Анализ основных математических методик для обработки сигнала вихретокового преобразователя**

Сигнал вихретокового преобразователя (ВТП), снимаемый с прибора ПВК-К2М, включает в себя фазовую и амплитудную составляющие, каждая из которых представляет собой дискретный сигнал. В данном сигнале содержится часть информации о поверхности контролируемой детали.

Проанализировав произвольные сигналы, функции в частотной области и точное восстановление после преобразования, необходимо отметить важные недостатки применения преобразования Фурье (ПФ):

- недостаточная информативность анализа нестационарных сигналов и практически невозможный анализ их особенностей;
- неспособность гармонических базисных функций разложения показывать перепады сигналов с бесконечной крутизной типа прямоугольных импульсов;

- ПФ отображает глобальные сведения о частотах рассматриваемого сигнала и не дает представления о локальных свойствах сигнала при быстрых временных изменениях его спектрального состава [3].

Для того чтобы получить спектральную информацию с помощью ПФ, необходимо учитывать значения сигнала и в прошлом, и в будущем, при этом не учитывается возможность изменения его частотных характеристик со временем. Оконное преобразование Фурье (ОПФ) позволяет лишь частично обойти эту трудность. Вейвлет-преобразования (ВП), в отличие от ОПФ, вместо гармонических функций используют функции особого рода, называемые вейвлетами. Бесконечная осциллирующая базисная функция в преобразовании Фурье ограничивает возможность традиционного спектрального анализа с точки зрения временной локализации спектральных характеристик. Вейвлеты, напротив, хорошо локализованы во времени, однако ценой этого является некоторое ухудшение разрешения в частотной области. Также ВП, в отличие от ОПФ, обладает изменяемым временным окном, узким на малых временных масштабах и широким на больших. Вейвлет-анализ является отличным инструментом для исследования коротких высокочастотных сигналов или сигналов с изменяющимися во времени частотными характеристиками, какими и являются сигналы с ВТП, так как его базисные функции имеют хорошую временную локализацию и обладают изменяемым частотно-временным окном [3].

Также одним из математических методов обработки дискретной информации является фрактальный анализ. Актуальность и целесообразность его использования подтверждаются возможностью исследовать сигналы, являющиеся «белым шумом» или броуновским движением (с точки зрения ковариационной и спектральной теории). Одним из важнейших показателей фрактального анализа служит показатель Херста  $H$  (или статистика Херста  $R/S$ ). Он указывает на наличие или отсутствие смещения в анализируемом ряду. Основными достоинствами показателя Херста являются: устойчивость

при исследовании временных рядов, возможность проведения их классификации и способность выявления отличия случайного ряда от неслучайного [4].

Эмпирический закон Херста определяется следующим соотношением:

$$\frac{R(\tau)}{S(\tau)} \sim \tau^H, \quad (1)$$

где  $R(\tau)$  – разница между максимальными и минимальными значениями приращений наблюдаемой величины на временном интервале длиной  $\tau$ ;  $S(\tau)$  – стандартное отклонение;  $H$  – показатель Херста, который определяется в пределах (0;1).

Формула для оценки показателя Херста имеет вид

$$H = \frac{\log\left(\frac{R}{S}\right)}{\log\left(\frac{n}{2}\right)}, \quad (2)$$

где  $n$  – количество наблюдений.

Известны три основных состояния показателя Херста, относительно которых можно исследовать дискретный сигнал:

1. Значение показателя  $H = 0,5$  определяет случайный ряд, и события в данном случае случайны и некоррелированы. Согласно теории статистики это означает, что природа следует нормальному распределению, это опровергает открытие Херста. Показатель  $H$  обычно больше 0,5, а вероятностные распределения не являются нормальными.

2. В диапазоне изменения  $0 < H < 0,5$  ряд антиперсистентный, или эргодический. Такой тип системы еще называют «возврат к среднему». Если система показывает рост в предыдущий период, то, вероятнее всего, в следующем периоде будет спад. Данный ряд более волатилен, чем случайный ряд из-за частых реверсов спад-подъем.

3. Диапазон  $0,5 < H < 1,0$  определяет персистентные (трендоустойчивые) ряды. Если ряд возрастает (убывает) в предыдущий период, то, скорее всего, он будет какое-то время сохранять эту динамику и в будущем. При этом тренды очевидны, а трендоустойчивость поведения (или сила персистентности) возрастает при приближении  $H$  к единице.

Показатель Херста нашел практическое применение и в подшипниковом производстве для определения и классификации дефектов детали. Показатель Херста характеризует структуру поверхности исследуемой детали, по значению этого показателя можно дать анализ о качестве исследуемого объекта. Оценка показателя проводят для вейвлет-разложения сигнала на детализирующих коэффициентах [5].

## **2. Программный анализ данных ВТП**

Для нахождения дефектов разработан специальный программный продукт, имеющий графический интерфейс. Он позволяет анализировать дискретные данные, которые снимаются с вихретокового датчика, а также предоставлять персоналу все необходимые промежуточные и итоговые результаты.

При помощи вейвлет-преобразования сигнал ВТП раскладывается на две составляющие: детализирующую и аппроксимирующую. Информацией о структуре объекта является его детализирующая составляющая, которая подвергается фрактальному анализу.

Сигнал с вихретокового преобразователя имеет различные значения и перемененно изменяется на различных отсчетах (рис. 1). Значения сигнала зависят от свойств исследуемого материала. Произведя вейвлет-преобразование, выделим информационную составляющую данного сигнала по детализирующим коэффициентам (рис. 2).



Рис. 1. Сигнал ВТП, содержащий дефект

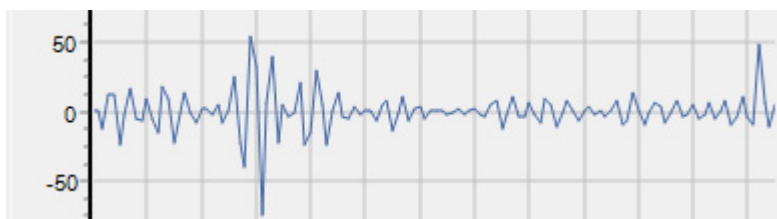


Рис. 2. Коэффициенты детализации

Информационная составляющая сигнала принимает волатильный вид. График разложенного сигнала имеет неравномерную волатильность. Волатильность сигнала зависит от свойств и структуры исследуемого объекта, следовательно, по этому признаку можем характеризовать структуру материала и, следовательно, наличие дефекта.

Из свойств показателя Херста следует: чем сигнал менее волатильнее, т.е. персистентнее, тем выше значение показателя Херста превосходит над обычным шумом. Судя по информационной составляющей сигнала, дефект должен характеризоваться наличием значительной антиперсистентности сигнала. Отсюда следует, что показатель Херста должен быть менее 0,5.

На рис. 3. представлен график значения показателя Херста на каждом отсчете сигнала.

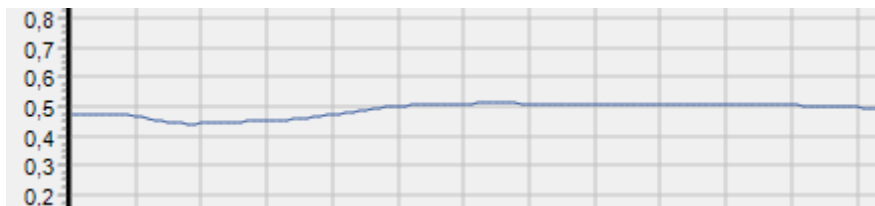


Рис. 3. Показатель Херста на каждом отсчете сигнала

Сопоставляя графики показателя Херста и разложенного сигнала, можно заметить высокую волатильность в начальных значениях сигнала по отношению к другим значениям сигнала. Давая качественный анализ значений показателя Херста, можно отметить, что в области высокой волатильности имеется более неравномерная структура материала, это означает, что в данной области имеет место наличие дефекта.

Были исследованы множество сигналов ВТП с дефектами различных видов и без них, которые были подвержены вейвлет-фрактальному анализу. Вейвлет-анализ проводился на основе вейвлета Симлет.

Если визуально наблюдается локальное превышение амплитуды по отношению к остальным участкам сигнала при его детализации и показатель Херста находится на уровне 0,3–0,36, можно сделать вывод о наличии локального дефекта в этой области. В данном случае показатель выявляет менее различимый из сигнала дефект, который в результате обработки только вейвлет-преобразованием мог не обнаружиться.

Если сигнал более однородный и стабильный, но имеется сложная периодичность приращений амплитуд и показатель Херста принимает значение, близкое к первому (0,25), то можно сделать вывод об отсутствии дефекта. Но судя по изрезанности структуры, можно прогнозировать возможность его появления при последующей эксплуатации, что поможет своевременно исключить бракованную деталь.

В случае, когда структура менее изрезанная, но локально наблюдаются ярко выраженные дефекты и показатель Херста имеет значение  $>0,5$ , можно сделать вывод о наличии дефекта на поверхности детали.

Волатильность информационного сигнала при различных видах дефекта различается, следовательно, можно классифицировать различные виды дефекта с помощью данного показателя.

Программная реализация автоматического метода нахождения дефектов на основе фрактального анализа наиболее практична. Она позволяет определять различные характеристики и проводить сравнение сигналов, учитывая не только графическое отображение значений, но и применяя математические критерии оценки определенных параметров.

Полученные данные содержат достаточный объем необходимой информации для определения дефектов. Это, в свою очередь, позволяет разработать методику автоматизированной сортировки деталей по степени неоднородности поверхностного слоя.

### Заключение

Применение вихретокового контроля с использованием вейвлет-преобразований и фрактального анализа для выявления локальных дефектов

поверхностного слоя деталей подшипников представляет большой интерес, который исследователи и производители проявляют к ним в течение последних лет [2], с учетом преимуществ, которые дают интеллектуальные технологии в задачах классификации и распознавания.

Фрактальный анализ позволяет исследовать сигналы с более сложной структурой. Используя определенные показатели, можно построить фрактальную модель, привязав к определенному фракталу, что позволит судить о структуре сигнала, и привязать качественные свойства к определенному виду сигнала. При исследовании фактических данных сигнала ВТП дефект наблюдался при значениях показателя Херста больше 0,3–0,36, что позволяет данный показатель использовать как дополнительный показатель при обнаружении и распознавании дефектов.

Фрактальный анализ, а именно показатель Херста, является мощным инструментом для анализа сигнала, так как позволяет более точно характеризовать поведение сигнала и отличать его от обычного шума.

В результате процесса автоматизации нахождения дефектов поверхности деталей подшипников по сигналу ВТП на основе показателя Херста выявлен ряд преимуществ:

- повышение результативности мер при проведении корректировки технологического процесса,
- снижение сроков простоя оборудования,
- повышение качества обучения персонала по процессу шлифования деталей подшипников.

Итогом внедрения программного обеспечения в автоматическую систему мониторинга качества изготовления подшипников станет: возможность эффективного управления технологическим процессом, минимизация влияния человеческого фактора, снижение или даже исключение брака и обеспечение конкурентоспособности в борьбе за потребителя.

#### **Библиографический список**

1. **Шумарова, О. С.** Автоматизированная обработка данных вихретокового контроля колец подшипников с применением вейвлет-преобразований / О. С. Шумарова, С. А. Игнатьев, Е. М. Самойлова // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2014. – № 2. – С. 192.
2. **Игнатьев, А. А.** Мониторинг станков и процессов шлифования в подшипниковом производстве / А. А. Игнатьев, М. В. Виноградов, В. В. Горбунов и др. – Саратов : СГТУ, 2004. – С. 124.
3. **Шумарова, О. С.** Оптимальный выбор вида вейвлета при обработке сигнала с вихретокового датчика / О. С. Шумарова, С. А. Игнатьев // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2013. – Т. 4, № 1 (73). – С. 128–132.
4. **Федер, Е.** Фракталы : пер. с англ. / Е. Федер. – М. : Мир, 1991. – 254 с.
5. **Вишик, М. И.** Фрактальная размерность множеств / М. И. Вишик // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 1. – С. 122–127.

#### **References**

1. Shumarova O. S., Ignat'ev S. A., Samoylova E. M. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Saratov State Technical University]. 2014, no. 2, p. 192.

2. Ignat'ev A. A., Vinogradov M. V., Gorbunov V. V. et al. *Monitoring stankov i protsessov shlifovaniya v podshipnikovom proizvodstve* [Gridning machine tools and processes monitoring in bearing manufacturing]. Saratov: SGTU, 2004, p. 124.
3. Shumarova O. S., Ignat'ev S. A. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Saratov State Technical University]. 2013, vol. 4, no. 1 (73), pp. 128–132.
4. Feder E. *Fraktaly: per. s angl.* [Fractals: translation from English]. Moscow: Mir, 1991, 254 p.
5. Vishik M. I. *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal* [Soros educational journal]. 1998, no. 1, pp. 122–127.

---

**Шумарова Ольга Сергеевна**

кандидат технических наук, ассистент,  
кафедра информатики и управления  
в технических системах, Балаковский  
инженерно-технологический институт –  
филиал Национального  
исследовательского ядерного  
университета «МИФИ» (Россия,  
Саратовская область, г. Балаково,  
ул. Чапаева, 140)

E-mail: shumarova.olga@mail.ru

**Shumarova Ol'ga Sergeevna**

Candidate of engineering sciences, assistant,  
sub-department of informatics and  
management in technical systems,  
Balakovo Engineering Institute  
of Technology – branch of National  
Research Nuclear University "MEPhI"  
(140 Chapaeva street, Balakovo,  
Saratov region, Russia)

**Корнилова Наталья Валерьевна**

кандидат технических наук, доцент,  
кафедра информатики и управления  
в технических системах, Балаковский  
инженерно-технологический институт –  
филиал Национального  
исследовательского ядерного  
университета «МИФИ» (Россия,  
Саратовская область, г. Балаково,  
ул. Чапаева, 140)

E-mail: kor-nata@mail.ru

**Kornilova Natal'ya Valer'evna**

Candidate of engineering sciences, associate  
professor, sub-department of informatics  
and management in technical systems,  
Balakovo Engineering Institute  
of Technology – branch of National  
Research Nuclear University "MEPhI"  
(140 Chapaeva street, Balakovo,  
Saratov region, Russia)

---

УДК 681.5

**Шумарова, О. С.**

**Автоматизация нахождения дефектов на основе фрактального анализа** / О. С. Шумарова, Н. В. Корнилова // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2017. – № 4 (44). – С. 37–44. DOI 10.21685/2072-3059-2017-4-4