

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ПОДШИПНИКОВ НА ОСНОВЕ МНОГОМЕРНОГО ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА

Данная работа посвящена оценке эффективности методов диагностированию поврежденных подшипников, а также контроля состояния объектов роторного типа в аварийные и прежде всего в предаварийные периоды их работы на основе многомерного фрактального анализа. С учетом предположения о самоподобности процессов, протекающих в нормально функционирующем объекте, рассматривается задача диагностирования поврежденных подшипников с использованием методов RS-анализа и максимума моделей вейвлет – преобразования (ММВП).

Ключевые слова: ФРАКТАЛ, МУЛЬТИФРАКТАЛ, ДИАГНОСТИКА.

Дана робота присвячена оцінці ефективності методів діагностування пошкоджень підшипників, а також контролю стану об'єктів роторного типу в аварійні і перш за все в предаварійні періоди їх роботи на основі багатовимірного фрактального аналізу. З урахуванням припущення про самоподібність процесів, що протікають в нормально функціонуючому об'єкті розглядається задача діагностування пошкоджень підшипників з використанням методів RS-аналізу та максимуму моделей вейвлет - перетворення (ММВП).

Ключові слова: ФРАКТАЛ, МУЛЬТИФРАКТАЛА, ДІАГНОСТИКА.

This paper is devoted to assessing the effectiveness of methods for diagnostics of bearing damage, as well as monitoring of rotary-type objects into emergency and especially in times of near misses of their work based on the multidimensional fractal analysis. Based on the assumption of self-similarity of processes in normal operating facilities, the problem of diagnostics bearing damage using techniques RS-analysis models and maximum wavelet - transformation (WTMM).

Keywords: FRACTAL, MULTIFRACTAL, DIAGNOSTICS.

Введение

Поиск эффективных методов для контроля состояния объектов управления роторного типа (двигатели, энергоустановки и т.д.) в аварийные и прежде всего в предаварийные периоды их работы, попрежнему является актуальным [1]. Особенно это важно для обеспечения бесперебойного функционирования оборудования предприятий непрерывного цикла такого как, например, прокатные станы в металлургии, горнотранспортные системы, автоматизированные линии в машиностроении и т. п.

В данной работе с учетом предположения о самоподобности процессов, протекающих в нормально функционирующем объекте рассматривается задача диагностирования поврежденных подшипников с использованием методов нормированного RS-анализа и максимума моделей вейвлет – преобразования. Обработываемые вибрационные сигналы получены с

помощью акселерометра, установленного со стороны привода двигателя в позиции зоны нагрузки подшипника вала.

Целью исследования является оценка эффективности методов диагностирования поврежденных подшипников качения и сравнение данных методов обработки между собой. В качестве исходных данных использовались сигналы, снятые с объекта без повреждений и с тестовых подшипников со специально нанесенными точечными дефектами, отдельно на внутреннюю дорожку качения, на элемент качения (т.е. шарик) и на внешнюю дорожку качения размером 0.007, 0.014 и 0.021 дюймов в диаметре электроэрозионным способом. Данные измерялись с частотами дискретизации 12 кГц и 48 кГц [2].

Метод R/S – анализа

Пусть $X(t)$ - исследуемая временная зависимость некоторой величины X , измеренной в дискретные целочисленные моменты времени t . Представим себе, что X является некоторой накопленной величиной и может быть представлена как сумма некоторых элементарных вкладов $\xi(t)$. Например, если X - координата броуновской частицы, то ξ - это элементарные смещения флуктуации такой частицы.

Рассмотрим поведение величин X и ξ в некотором ограниченном интервале времени $t \in [1; \tau]$. Для этого интервала времени можно вычислить среднюю величину приращений ξ :

$$\langle \xi \rangle_{\tau} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t). \quad (1)$$

Одновременно можно построить новую величину $X(t, \tau)$, которая будет иметь смысл накопленных отклонений от среднего за данный период:

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t \{ \xi(u) - \langle \xi \rangle_{\tau} \}. \quad (2)$$

при $X(1, \tau) = X(\tau, \tau) = 0$.

Введем размах $R(\tau)$ как максимальное отклонение $X(t, \tau)$ за рассматриваемый интервал времени:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau). \quad (3)$$

Тогда для анализа фрактальной размерности D исходной кривой $X(t)$ достаточно построить эмпирическую зависимость Херста (5), безразмерного отношения R/S от величины временного интервала τ , где S - среднеквадратическое отклонение ξ от среднего за тот же интервал времени:

$$S(\tau) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \{ \xi(t) - \langle \xi \rangle_{\tau} \}^2}. \quad (4)$$

$$M \left[\frac{R(\tau)}{S(\tau)} \right] \sim \lambda \tau^H, \quad (5)$$

где M – математическое ожидание, $\lambda = \text{const} > 0$, H - показатель Херста.

При этом фрактальная размерность:

$$D = 2 - H. \quad (6)$$

Таким образом, для определения фрактальной размерности D исследуемого процесса необходимо построить нормированую зависимость $R(\tau)/S(\tau)$ в двойном логарифмическом масштабе и провести линейную аппроксимацию. Тангенс угла наклона β непосредственно даст значение показателя Херста $H = \beta$, связанного с величиной фрактальной размерности D соотношением (6).

В изложенном выше алгоритме метода нормированого R/S – анализа зависимости $R(\tau)$ и $S(\tau)$ всегда рассчитываются только для начального интервала времени τ . Вместе с тем метод может быть усовершенствован, если проводить усреднение $R(\tau)$ и $S(\tau)$ по нескольким временным окнам продолжительностью τ , взятым в разных положениях на анализируемой кривой $X(t)$ [3].

Метод максимумов модулей вейвлет – преобразования

Алгоритм ММВП предусматривает проведение исследования нерегулярного поведения функции $g(x)$ в два этапа. На первом этапе осуществляется прямое вейвлет-преобразование по формуле:

$$W(a, x_0) = \frac{1}{a} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi\left(\frac{x - x_0}{a}\right) g(x) dx. \quad (7)$$

Результат вейвлет-преобразования интерпретируется как поверхность в трехмерном пространстве (рис. 1а). При этом важная информация содержится в скелетоне, или линиях локальных экстремумов поверхности коэффициентов $W(a, x)$, поиск которых проводится на каждом масштабе a (рис. 1б).

Выбор базисной вейвлет-функции определяется тем, какую информацию необходимо получить из сигнала $g(x)$. Необходимым условием является то, чтобы выбранный вейвлет был бы не менее широкополосным, чем анализируемый сигнал. При этом относительно выбора параметра m

для m -вейвлета в $\Psi^{(m)} = (-1)^m \frac{\partial^m}{\partial x^m} \left[\exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \right]$ следует отметить, что, с

одной стороны, увеличение m позволяет проигнорировать крупномасштабные полиномиальные составляющие (устранить тренд) и анализировать мелкомасштабные вариации данной функции, с другой стороны, многократное дифференцирование приводит к увеличению числа линий локальных экстремумов вейвлет - коэффициентов и появлению большого количества дополнительных линий, обрывающихся на малых

масштабах. Такие линии являются слишком короткими для того, чтобы

$$W(a, x_0) \sim a^{h(x_0)}$$

проводить по ним оценки степенных зависимостей вида $W(a, x_0) \sim a^{h(x_0)}$, и представляют собой помехи при проведении численного анализа сингулярностей, исследуемого сигнала $g(x)$.

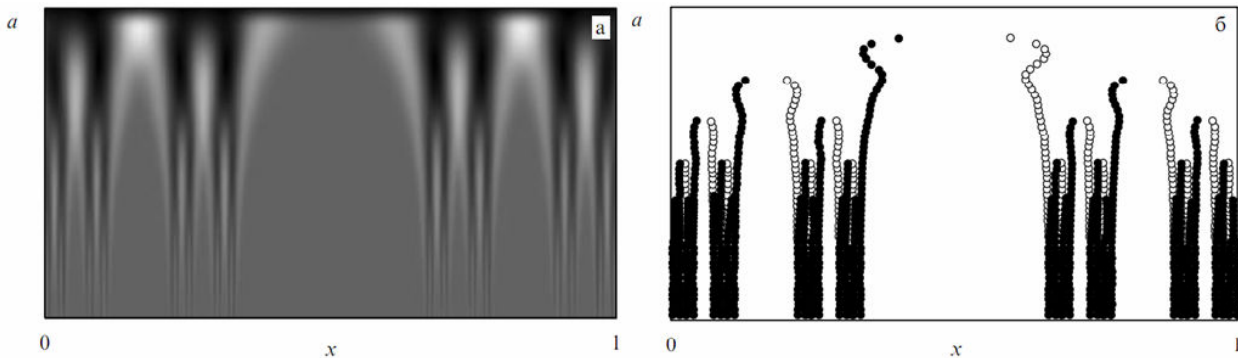


Рисунок 1 - (а) Результат вейвлет - преобразования в проекции на плоскость aOx : большие значения вейвлет - коэффициентов $W(a, x)$ соответствуют более темным участкам. (б) Линии локальных экстремумов поверхности коэффициентов $W(a, x)$: минимумов (светлые кружки) и максимумов (темные кружки)

Известно, что вейвлет - преобразование характеризуется регулярной функцией $W(a, x_0)$ даже при нерегулярности исследуемого сигнала $g(x)$. При этом вся информация о возможной особенности $g(x)$, включая ее локализацию x_0 и показатель $h(x_0)$, отражается в асимптотическом поведении коэффициентов $W(a, x_0)$ при малых масштабах a . Если коэффициенты на малых масштабах расходятся, то функция $g(x)$ имеет особенность в x_0 и экспонента Гельдера $h(x_0)$ может быть определена путем представления зависимости $W(a, x_0) \sim a^{h(x_0)}$ в двойном логарифмическом масштабе и вычисления наклона зависимости $\ln Z(q, a) / (\ln a)$. Если коэффициенты $W(a, x_0)$ близки к нулю в окрестности x_0 на малых масштабах, то функция $g(x)$ является регулярной в этой точке.

Следует обратить внимание на такое важное обстоятельство при расчете гельдеровских экспонент, которое состоит в требовании теоретической независимости искомых характеристик от выбора базисных функций вейвлет - преобразования. Последнее позволяет говорить, в некотором смысле, об универсальности анализа локальных нерегулярностей (хотя разложение по вейвлетам, разумеется, зависит от выбранного базиса).

Выделением скелетона заканчивается первый шаг алгоритма ММВП. Анализ выделенных линий локальных экстремумов или локальных максимумов модулей вейвлет - преобразования теоретически позволяет вычислять гельдеровские экспоненты, т.е. анализировать сингулярности исследуемого процесса $g(x)$. Однако такой подход $h(x_0)$ является неточным - при увеличении масштаба сказывается влияние соседних нерегулярностей, что приводит к различным ошибкам. В многомерном фрактальном анализе проводят расчеты на основе так называемых обобщенных частичных сумм

$Z(q, a)$, позволяющих получать более надежные оценки характеристик исследуемых процессов [4]. Отсюда второй шаг метода ММВП заключается в построении обобщенных частичных сумм по формуле

$$Z(q, a) = \sum_{l \in L(a)} |W(a, x_l(a))|^q, \quad (8)$$

где $L(a)$ - множество всех линий (l) локальных максимумов модулей вейвлет-коэффициентов, существующих на масштабе a ; $x_l(a)$ характеризует положение на этом масштабе максимума, относящегося к линии l . В данном случае принципиальным моментом, обеспечивающим устойчивость метода, является то, что рассматриваются модули вейвлет-коэффициентов. Без этого (с учетом информации о фазах) метод не позволил бы получить устойчивое решение, поскольку в общем случае вычисление максимумов может создавать проблемы, связанные с устойчивостью метода. В то же время сама процедура вейвлет-преобразования подразумевает вычисление коэффициентов в пределах частотно - временного окна, что автоматически обеспечивает усреднение. Из этого следует, что формула (8) не подходит для отрицательных значений q , поскольку возможна ситуация, в которой $W(a, x_l(a))=0$. В этой связи на практике используется другая формула:

$$Z(q, a) = \sum_{l \in L(a)} \left(\sup_{a' \leq a} |W(a', x_l(a'))| \right)^q, \quad (9)$$

т.е. выбирается максимальное значение модуля коэффициентов вейвлет-преобразования вдоль каждой линии на масштабах, меньших заданного значения a . Выполняется следующая зависимость:

$$Z(q, a) \sim a^{\tau(q)}, \quad (10)$$

где величину $\tau(q)$, которая определяется для некоторого значения q путем вычисления наклона зависимости $\ln Z(q, a) / (\ln a)$, называют *скейлинговой экспонентой*. В свою очередь, вариация степеней q при построении частичных сумм (9) позволяет получить линейную зависимость для монофрактальных объектов ($H=d\tau/dq=const$) и нелинейную зависимость $\tau(q)=qh-D(h)$ с большим числом гёльдеровских экспонент $h(q)=d\tau/dq \neq const$ в случае мультифракталов. С другой стороны, известно [4]:

$$Z(q, a) \sim a^{(q-1)D_q}. \quad (11)$$

Тогда $\tau(q) = (q-1)D_q$.

Здесь D_q – обобщённая фрактальная размерность [5].

При некоторых значениях q скейлинговые экспоненты $\tau(q)$ имеет простую интерпретацию. Так, существует взаимосвязь между $\tau(2)$ и показателем степени β функции спектральной плотности мощности $S(f) \sim 1/f^\beta$ исследуемого сигнала с частотой $f=1/T$:

$$\beta=2+\tau(2). \quad (12)$$

При этом известно, что спектральная плотность мощности связана с автокорреляционной функцией преобразованием Фурье. Отсюда по известным β можно определить скорость спада корреляций $\psi(\tau) \sim \tau^\gamma$, т.е. показатель γ [4].

Спектр сингулярности $f(a)$ можно вычислить при помощи масштабируемого показателя $\tau(q)$ из обобщенных частичных функций $Z(q,a)$. В случае, если $\tau(q)$ является непрерывно дифференцируемой функцией, то можно записать следующее соотношение [5]:

$$\begin{cases} q = \frac{df}{da}, \\ \tau(q) = qa - f(a). \end{cases} \quad (13)$$

С другой стороны соотношение (13) можно переписать следующим образом:

$$\begin{cases} \alpha = \frac{d\tau}{dq}, \\ f(\alpha) = q\alpha - \tau(q) \end{cases} \quad (14)$$

В отличие от метода структурных скелетоновых функций, основанный на вейвлет-преобразовании мультифрактальный анализ позволяет исследовать сингулярности при отрицательных значениях q . При этом обобщенные частичные функции $Z(q,a)$ при $q < 0$ характеризуют особенности скейлинга для слабых сингулярностей (малых флуктуаций), а при $q > 0$ – для сильных сингулярностей (больших флуктуаций) [4].

Практическая часть. Рассмотрим применение вышеизложенных методов для технического диагностирования подшипников.

1. Метод R/S – анализа

1.1 Анализ данных, измеренных с частотой дискретизации 12 кГц:

Испытания объекта без повреждений подшипника (рис. 2а).

В результате расчета коэффициента Херста получено:

$$H=0.5273.$$

Коэффициент Херста находится в пределах $0.5 < H < 1$, что говорит о персистентности исследуемого процесса.

Зная коэффициент Херста, можно найти фрактальную размерность:

$$D=2-0.5273=1.4721.$$

Испытания объекта при повреждении подшипников с размером $0.007''$ (рис. 2б).

$$H=0.3621; D=1.6379.$$

Коэффициент Херста находится в пределах $0 < H < 0.5$. Это говорит о антиперсистентности процесса, что характеризует объекта с хаотичной дискретизацией.

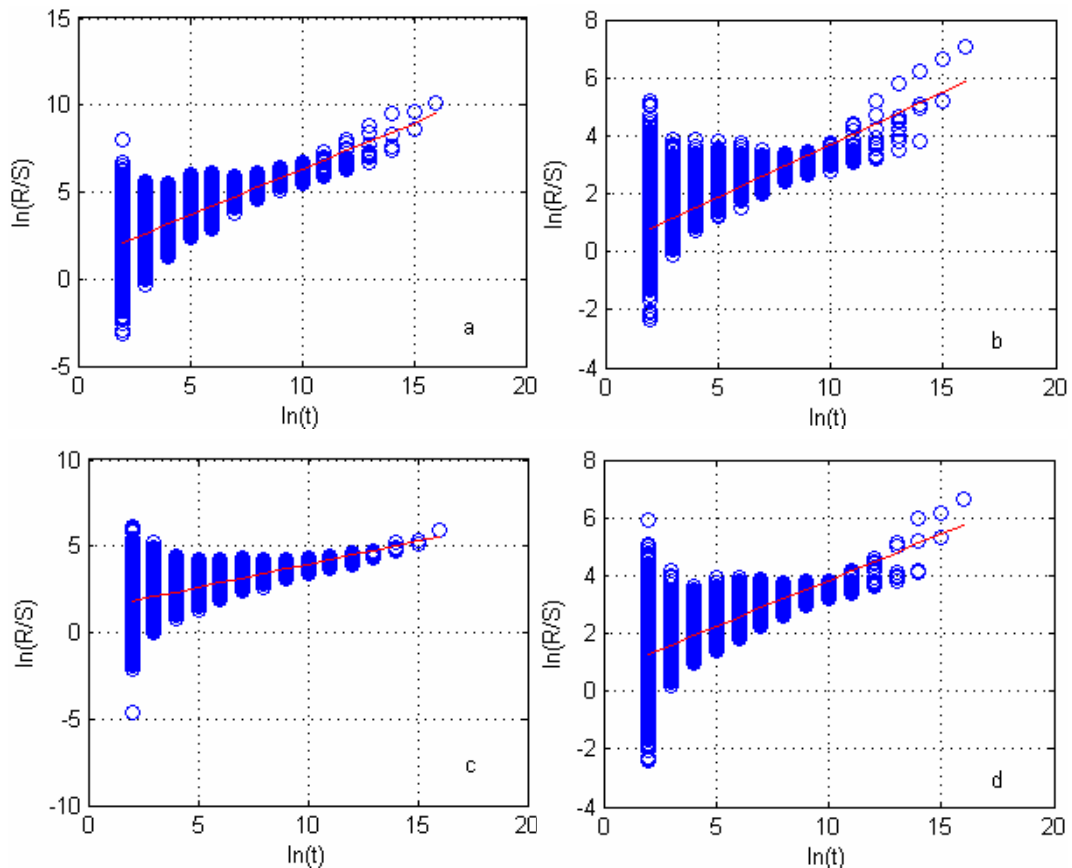


Рисунок 2 - Зависимости $\ln(R/S)$ от $\ln(t)$ при различных повреждениях подшипника исследуемого объекта; (а) Испытания объекта без повреждений подшипника; (б) Испытания объекта при повреждении шарика подшипника с дефектом размером $0.007''$; (с) Испытания объекта при повреждении шарика подшипника с дефектом размером $0.014''$; (д) Испытания объекта при повреждении шарика подшипника с дефектом размером $0.021''$

Испытания объекта при повреждении подшипников с размером $0.014''$ (рис. 2с).

$$H=0.2691; D=1.7309.$$

С увеличением повреждения до $0.014''$, значение коэффициента Херста стало еще меньше, т.е. возрастает хаотичность процесса, фрактальная размерность выше. Чем ближе фрактальная размерность к двум, тем ниже степень самоподобности сигнала и в большей степени наблюдается хаотичность объекта.

Испытания объекта при повреждении подшипников размером $0.021''$ (рис. 2д).

$$H=0.3198; D=1.6802.$$

Испытания объекта при повреждениях различных элементов подшипника сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Испытания объекта при частоте дискретизации 12 кГц

Размер повреждения, [дюйм]	Фрактальная размерность D при повреждении шарика	Фрактальная размерность D при повреждении внутренней дорожки качения	Фрактальная размерность D при повреждении внешней дорожки качения
0''	1.4721	1.4721	1.4721
0.007''	1.6379	1.7706	1.7263
0.014''	1.7309	1.7299	1.6781
0.021''	1.6802	1.7503	1.7463

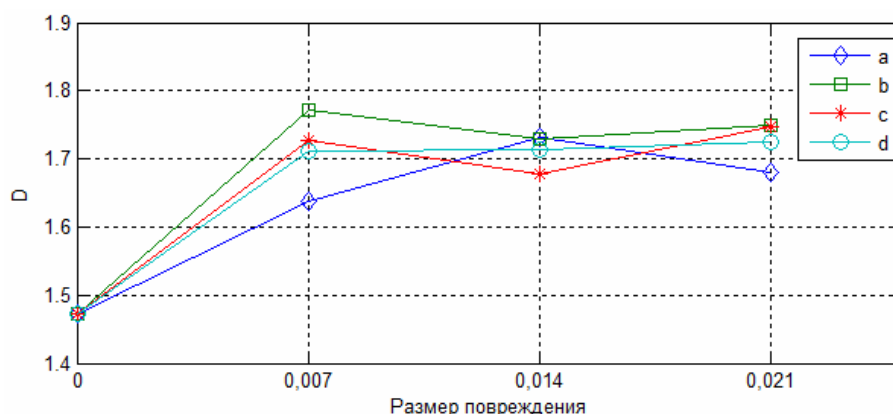


Рисунок 3 – Зависимость фрактальной размерности от размера повреждения при частоте дискретизации 12 кГц; (а) Фрактальные размерности при повреждении шарика; (б) Фрактальные размерности при повреждении внутренней дорожки качения; (с) Фрактальные размерности при повреждении внешней дорожки качения; (d) Среднеарифметическая фрактальная размерность повреждений подшипника

1.2 Анализ данных измеренных с частотой дискретизации 48 кГц

Таблица 2

Испытания объекта при повреждениях с частотой дискретизации 48 кГц

Размер повреждения, [дюйм]	Фрактальная размерность D при повреждении шарика	Фрактальная размерность D при повреждении внутренней дорожки качения	Фрактальная размерность D при повреждении внешней дорожки качения
0''	1.4317	1.4317	1.4317
0.007''	1.5478	1.6413	1.7487
0.014''	1.6291	1.4735	1.4993
0.021''	1.5799	1.7162	1.6662

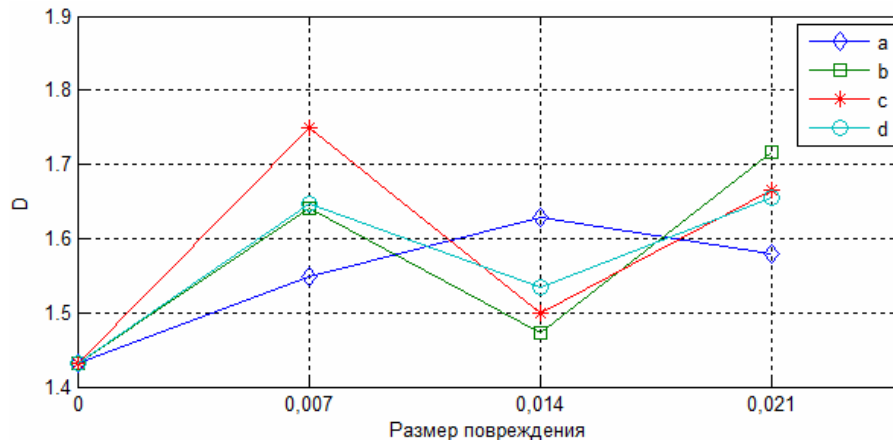


Рисунок 4 – Зависимость фрактальной размерности от размера повреждения при частоте дискретизации 48 кГц; (а) Фрактальные размерности при повреждении шарика; (б) Фрактальные размерности при повреждении внутренней дорожки качения; (с) Фрактальные размерности при повреждении внешней дорожки качения; (d) Среднеарифметическая фрактальная размерность повреждений подшипника

2. Метод максимумов модулей вейвлет – преобразования

2.1 Анализ данных, измеренных с частотой дискретизации 12 кГц:

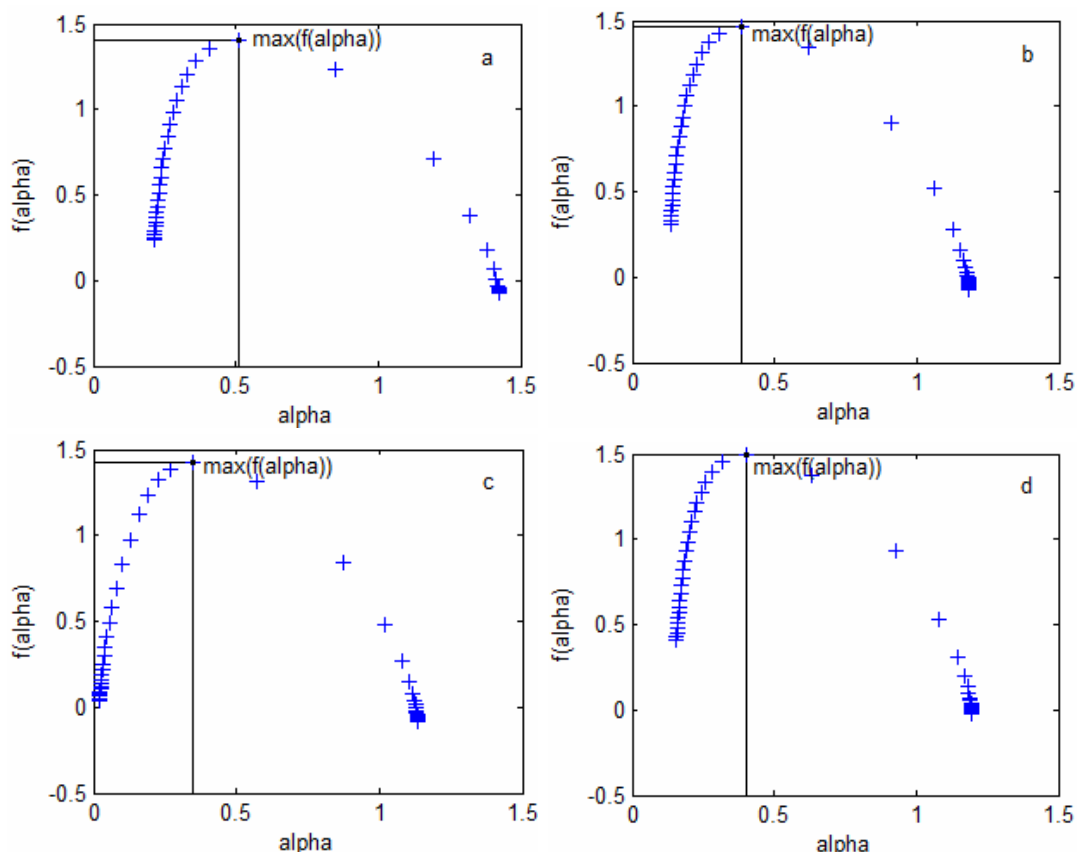


Рисунок 5 – Спектры сингулярностей; (а) Испытания двигателя без повреждений; (б) Испытания объекта при повреждении шарика подшипника с 0.007''; (с) Испытания объекта при повреждении шарика подшипника с 0.014''; (d) Испытания объекта при повреждении шарика подшипника с 0.021''

Таблица 3

Испытания объекта при частоте дискретизации 12 кГц

Размер повреждения, [дюйм]	Фрактальная размерность D при повреждении шарика	Фрактальная размерность D при повреждении внутренней дорожки качения	Фрактальная размерность D при повреждении внешней дорожки качения
0''	1.4077	1.4077	1.4077
0.007''	1.4694	1.4522	1.5317
0.014''	1.4263	1.4594	1.4655
0.021''	1.4966	1.4561	1.4809

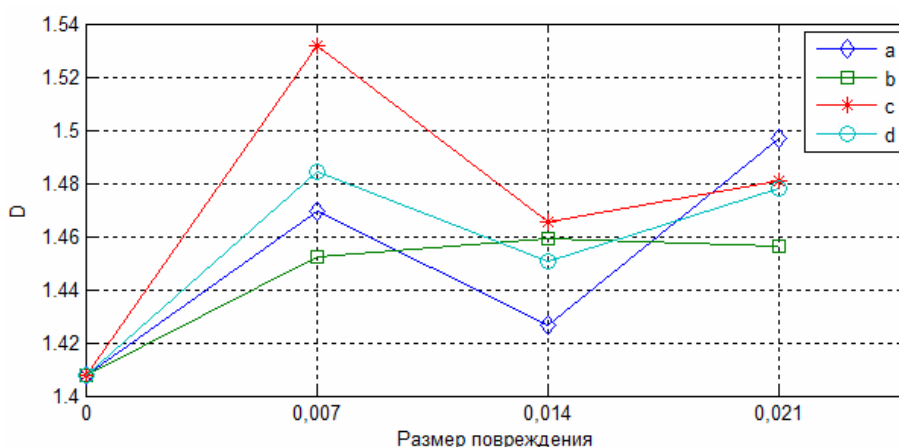


Рисунок 6 – Зависимость фрактальной размерности от размера повреждения при частоте дискретизации 12 кГц; (а) Фрактальные размерности при повреждении шарика; (б) Фрактальные размерности при повреждении внутренней дорожки качения; (с) Фрактальные размерности при повреждении внешней дорожки качения; (д) Среднеарифметическая фрактальная размерность повреждений подшипника

2.2 Анализ данных, измеренных с частотой дискретизации 48 кГц:

Таблица 4

Испытания двигателя при повреждениях с частотой дискретизации 48 кГц

Размер повреждения, [дюйм]	Фрактальная размерность D при повреждении шарика	Фрактальная размерность D при повреждении внутренней дорожки качения	Фрактальная размерность D при повреждении внешней дорожки качения
0''	1.3470	1.3470	1.3470
0.007''	1.3544	1.3368	1.3545
0.014''	1.3587	1.3621	1.3595
0.021''	1.3773	1.3660	1.3654

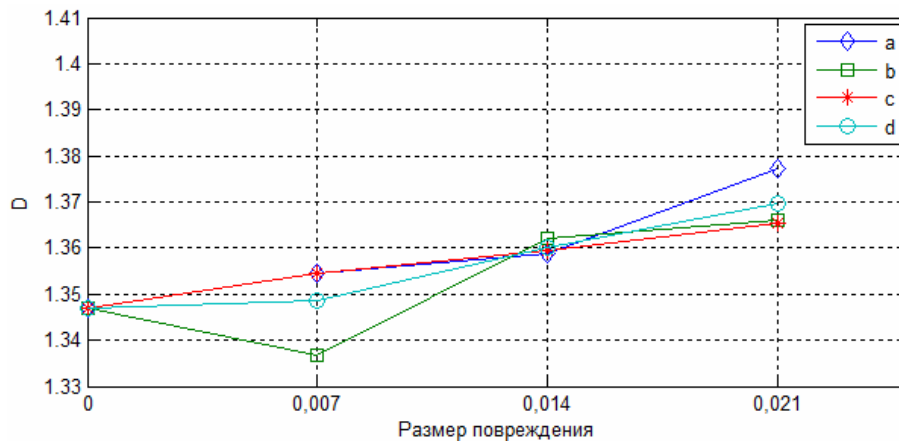


Рисунок 7 – Зависимость фрактальной размерности от размера повреждения при частоте дискретизации 48 кГц; (а) Фрактальные размерности при повреждении шарика; (б) Фрактальные размерности при повреждении внутренней дорожки качения; (с) Фрактальные размерности при повреждении внешней дорожки качения; (d) Среднеарифметическая фрактальная размерность повреждений подшипника

Выводы

Методы фрактального вейвлет – анализа позволяют вычислить предел предсказуемости, характеризующий внутреннее свойство динамической системы, связанное с неустойчивостью, хаотичностью, затуханием корреляций и её диссипативными свойствами, т.е. определяют текущее состояние системы. Вычисления коэффициента Херста показывают, что сигнал, измеренный на подшипниках, без повреждений относится к персистентным процессам. В то же время результаты исследования показали, что значение фрактальности меняется в соответствии с размером повреждений подшипников. Это значит, что с помощью метода Херста и метода ММВП можно выявить степень дефектности подшипника. По полученным результатам видно, что результаты имеют одинаковый характер при разных частотах дискретизации 12 и 48 кГц. В свою очередь, это лишь дополнительным образом доказывает самоподобность системных процессов. Частота дискретизации по сути это масштаб, а как известно, фрактальная размерность на разных масштабах сохраняется. Метод R/S – анализа показал подобные результаты выявления дефектов, что таким же образом, доказывает корректность применения фрактальных методов для технического диагностирования повреждения подшипников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Михалёв А.И., Журавлев В.Н., Сухомлин Р.А. Комбинированный метод анализа сигналов на основе Гильберта-Хуанга и вейвлет-преобразований в задаче диагностики дефектов подшипников // Системные технологии. Региональный межвузовский сборник научных работ. - Выпуск 1 (78). - Днепропетровск, 2012. – С. 165-177.
2. Case Western Reserve University Bearing Data Center. Seeded Fault Test Data [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://csegroups.case.edu/bearingdatacenter/pages/welcome-case-western-reserve-university-bearing-data-center-website>.

3. Шишкин Е.И. Моделирование и анализ пространственных и временных фрактальных объектов. Методические заметки. Екатеринбург. - 2004. - С. 60 – 62.
4. Павлов А.Н., Анищенко В.С. Мультифрактальный анализ сложных сигналов. Методические заметки. – Успехи физических наук. – 2007. – С. 859 – 876.
5. Muzy J.F., Bacry E, Arneodo A. The multifractal formalism revisited with wavelets. International Journal of Bifurcation and Chaos, Vol. 4, No. 2 – 1994. pp. 245-302.