

УДК [658.58-047.25+621.376.4]:534.8

## РАЗЛИЧЕНИЕ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ПОМОЩИ МЕЖКОМПОНЕНТНОЙ ФАЗОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

КЕЧИК Д. А., ДАВЫДОВ И. Г.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
(г. Минск, Беларусь)

E-mail: [ya.dan.kechik@yandex.by](mailto:ya.dan.kechik@yandex.by)

**Аннотация.** В настоящей работе предложен способ различения величин расцентровки валов, основанный на использовании распределений межкомпонентных фазовых отношений сигналов вибрации. Амплитуды компонентов вибросигнала зависят от скорости вращения вала, что затрудняет анализ вибросигналов широко используемыми методами. Предложенный способ позволяет обойти этот недостаток.

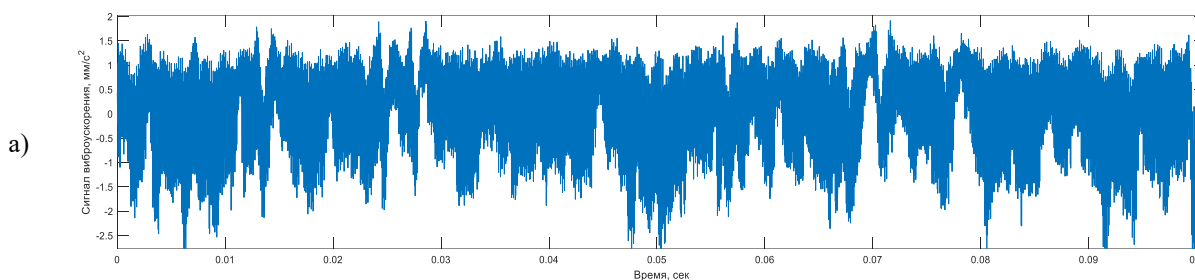
**Abstract.** Shaft misalignment severity distinction approach, based on inter-component phase relations distribution analysis, has been proposed in this work. The vibrational signal components amplitudes are dependent on shaft speed. That complicates vibration analysis based on wide-spread approaches. The proposed approach allows to overcome this issue.

### Введение

Один из способов существенного повышения эффективности производства – внедрение обслуживания оборудования по его фактическому состоянию. Состояние работающего агрегата оценивается методами неразрушающего контроля, в том числе методами виброакустической диагностики. Затраты производства снижаются за счёт уменьшения времени простоя оборудования, предотвращения его внезапных отказов, уменьшения числа ошибок монтажа при сборке за счёт удлинения межремонтного интервала, своевременного выявления подобных ошибок [1].

Одной из распространённых проблем сборки оборудования, приводящая к значительному росту частоты отказа его узлов, является расцентровка соединяемых валов [2]. Выделяют два вида расцентровок: угловая и параллельная. В первом случае, оси соединяемых валов представляют собой пересекающиеся прямые, во втором – параллельные. Наличие обоих видов расцентровки приводит к скрешивающимся осям валов.

Выводы о наличии расцентровки делаются на основании анализа амплитудного спектра вибрации. Как правило, расцентровка характеризуется повышенной амплитудой второй (иногда и третьей) гармоник частоты вращения вала. Пример спектра вибрации, полученной на корпусе подшипника одного из расцентрованных валов, приведён на рисунке 1. Амплитуды составляющих вибрации зависят от мощности оборудования и режима его работы, в том числе нагрузки и скорости. Соотношение между амплитудами так же зависит от скорости вала, поскольку частоты составляющих вибрации могут приближаться к собственным частотам агрегата.



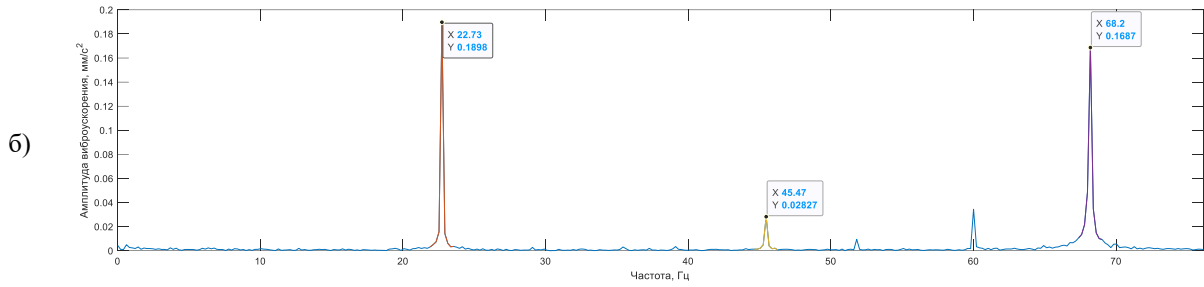


Рис.1. Временная реализация (а) и спектр (б) сигнала вибрации

Чтобы устранить указанные недостатки, в настоящей работе предлагается различие видов и степеней выраженности расцентровки при помощи методов межкомпонентной фазовой обработки сигналов (МКФОС). МКФОС состоит в вычислении линейных комбинаций полных фаз узкополосных компонентов сигнала. Данные комбинации не зависят от начала отсчёта времени.

Предложено оценивать состояния оборудования на основании оценок параметров распределения МКФО. Показано, что распределения МКФО различаются при различных состояниях оборудования. Обоснован выбор теоретического закона распределения.

### Предложенный способ обработки вибрации

Полигармоническая вибрация вала моделируется в виде суммы узкополосных колебаний:

$$x(t) = \sum_{h=1}^H x_0(h, t) = \sum_{h=1}^H A_h(t) \cos \Psi_0(h, t) = \sum_{h=1}^H A_h(t) \cos(h\Phi_0(h, t) + \theta(h) + \gamma(h, t)), \quad (1)$$

$$\Phi_0(h, t) = 2\pi \cdot F_0 t + \Delta\phi(t) + \phi_0, \quad \Delta\phi(t) = 2\pi \int_0^T \Delta f_0(t) dt, \quad (2)$$

где  $H$  – число квазигармонических колебаний,  $A_h(h, t)$  – амплитуда  $h$ -го колебания.  $\Phi_0(h, t)$  состоит из неинформативных составляющих:  $\Delta\phi(t)$  – случайная составляющая, обусловленная флуктуацией частоты,  $\phi_0$  – начальная постоянная фаза компонентов вибрации, обусловленная случайным моментом начала записи.  $\theta(h)$  – постоянная величина, обусловленная запаздыванием возникновения кинематических сил, порождающих колебания на разных частотах.  $\gamma(h, t)$  – составляющая, обусловленная влиянием шума.

Существуют линейные комбинации фаз составляющих сигнала, не содержащие неинформативных составляющих  $\Phi_0(h, t)$ . Такие комбинации называются межкомпонентными фазовыми отношениями (МКФО). Запишем общее выражение МКФО:

$$\begin{aligned} \Theta(k, t) &= \sum_{h=0}^H k(h) \cdot \Psi_0(h, t) = \sum_{h=1}^H k(h) \cdot (h\Phi_0(h, t) + \theta(h) + \gamma(h, t)) = \\ &= \Phi_0(h, t) \cdot \sum_{h=1}^H k(h)h + \sum_{h=1}^H k(h) \cdot (\theta(h) + \gamma(h, t)) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Theta(k, t) &= \sum_{h=0}^H k(h) \cdot \Psi_0(h, t) = \\ &= \sum_{h=1}^H k(h) \cdot (h\Phi_0(h, t) + \theta(h) + \gamma(h, t)) = \\ &= \Phi_0(h, t) \cdot \sum_{h=1}^H k(h)h + \sum_{h=1}^H k(h) \cdot (\theta(h) + \gamma(h, t)) \end{aligned}$$

Здесь  $k \in Z$  – коэффициенты линейной комбинации. Выражение (3) не зависит от  $\Phi_0(h, t)$  при условии

$$\sum_{h=1}^H k(h)h = 0 \quad (4)$$

В качестве информативных признаков состояния оборудования удобно использовать средние значения  $\Theta(k, t)$ :  $\Theta(k) = E[\Theta(k, t)]$ . Тогда возможно оценить распределение величины  $\Theta(k)$  при различных состояниях оборудования: типах расцентровки и её величине. На основании полученных эмпирических распределений возможно установить пороговые значения  $\Theta(k)$ . Решение о текущем состоянии оборудования принимается путём сравнения значения  $\Theta(k)$  с порогом.

Схема алгоритма оценки  $\Theta(k)$  приведена на рисунке 2. Комплексный односторонний спектр  $X_h(\omega)$ ,  $i = 1, 2, \dots, H$ ,  $h$ -й составляющей сигнала вибрации  $x(t)$  получается умножением комплексного спектра сигнала  $X(\omega)$  на оконную функцию:

$$X_h(\omega) = X(\omega) \cdot W(h, \omega),$$

$$W(h, \omega) = \begin{cases} 0, & \text{if } \omega \notin [2\pi \cdot h \cdot (F_0 - \Delta F), 2\pi \cdot h \cdot (F_0 + \Delta F)] \\ 1, & \text{if } \omega \in [2\pi \cdot h \cdot (F_0 - \Delta F), 2\pi \cdot h \cdot (F_0 + \Delta F)] \end{cases} \quad (5)$$

В качестве  $F_0$  принимается частота вращения вала.  $\Delta F = 1$  Гц установлена опытным путём. Аналитические сигналы  $x_h(t)$ , получаемые обратным быстрым преобразованием Фурье (ОБПФ), можно представить в виде:

$$x_h(t) = A_h(t) \cdot \exp(j \cdot \Psi_0(h, t)) \quad (6)$$

Комплексный сигнал  $y(t)$ , фаза которого представляет собой искомое МКФО, вычисляется по формуле:

$$y(t) = \prod_{h=0}^H (x_h(t))^{k(h)} = \prod_{h=0}^H (A_h(t))^{k(h)} \cdot \exp(j \cdot k(h) \cdot \Psi_0(h, t)) =$$

$$= \left( \prod_{h=0}^H (A_h(t))^{k(h)} \right) \cdot \exp(j \cdot \sum_{h=0}^H k(h) \cdot \Psi_0(h, t)) = A_\Theta(t) \cdot \exp(j \cdot \Theta(h, t)) \quad (7)$$

$\Theta(k, t)$  находится при помощи функции *angle* пакета MatLab по формуле:

$$\Theta(k, t) = \begin{cases} \text{arctg}(S / C), & \text{if } S > 0, C > 0, \\ \text{arctg}(S / C) + \pi, & \text{if } S > 0, C < 0, \\ \text{arctg}(S / C) - \pi, & \text{if } S < 0, C < 0, \\ \text{arctg}(S / C), & \text{if } S < 0, C > 0; \end{cases} \quad (8)$$

$$S = \text{Im}\{y(t)\}, C = \text{Re}\{y(t)\}.$$

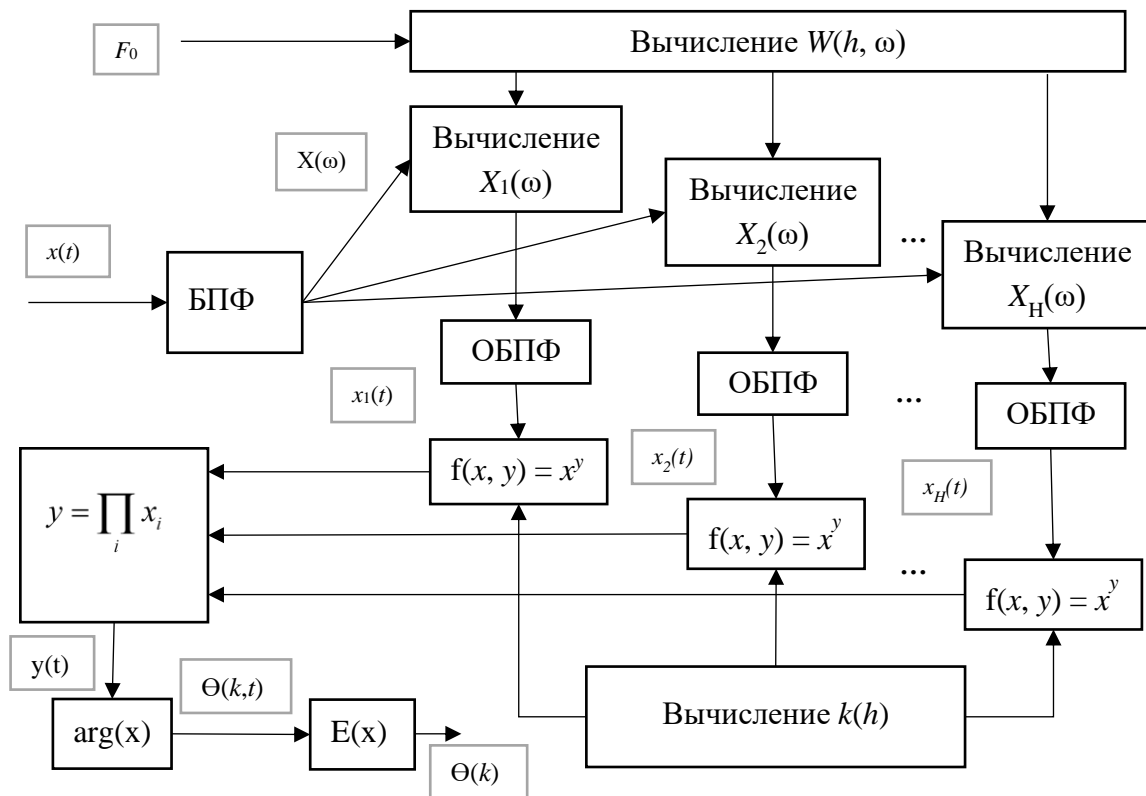


Рис. 2. Схема алгоритма оценки  $\Theta(k)$

В настоящей работе оценивались две комбинации:  $k_1 = \{2, -1, 0\}$ ,  $k_2 = \{1, -2, 1\}$ . Опытным путём установлено, что  $\Theta(k)$  быстро изменяется при малом изменении частоты вращения вала, если частота составляющей с номером  $h \in K$ , где  $K$  – множество индексов ненулевых коэффициентов вектора  $k$ , близка к собственной частоте агрегата. При использовании нескольких комбинаций  $\Theta(k)$ , возможно оценить распределение тех из них, которые не зависят от частоты вращения вала в диапазоне частот её изменения.

### Статистические распределения

Пусть  $\theta_j, j = 1, \dots, n$  – независимые, одинаково распределённые случайные величины, причём  $-\pi < \theta_j \leq \pi$ ,  $E(\theta) = 0$ ,  $E(x)$  – математическое ожидание  $x$ . Тогда, согласно [3], распределение величины

$$S_n = 1/\sqrt{n} \cdot \sum \theta_j \pmod{2\pi} \quad (9)$$

стремится к обратному нормальному распределению [4]. Его плотность вероятности определяется выражением:

$$f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \sum_{k=-\infty}^{\infty} \exp\left(-\frac{(x + 2\pi k - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (10)$$

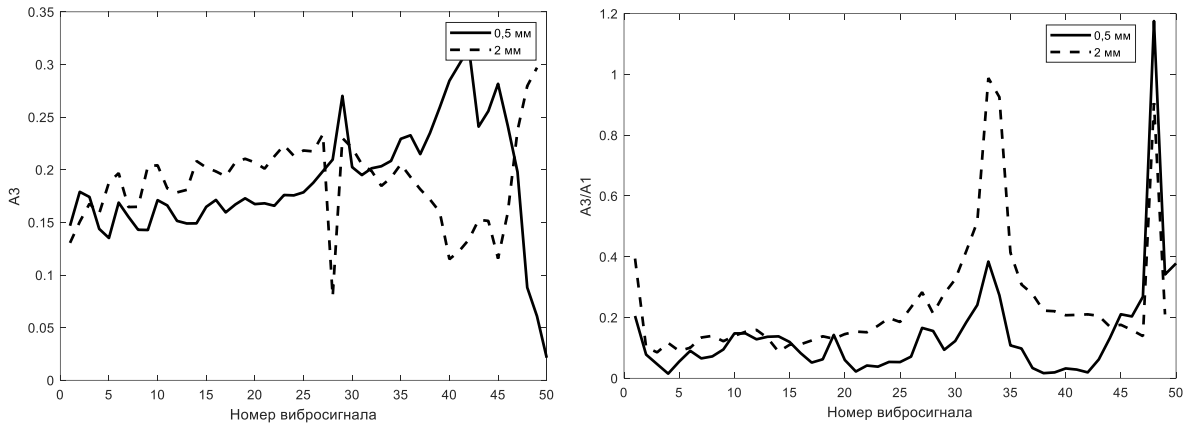
где  $x \in [0, 2\pi)$ ,  $\mu \in [0, 2\pi)$  – среднее значение,  $\sigma$  – концентрация распределения, связанная с дисперсией выражением  $\text{var} = 1 - \exp(-\sigma^2/2)$ .

### Результаты

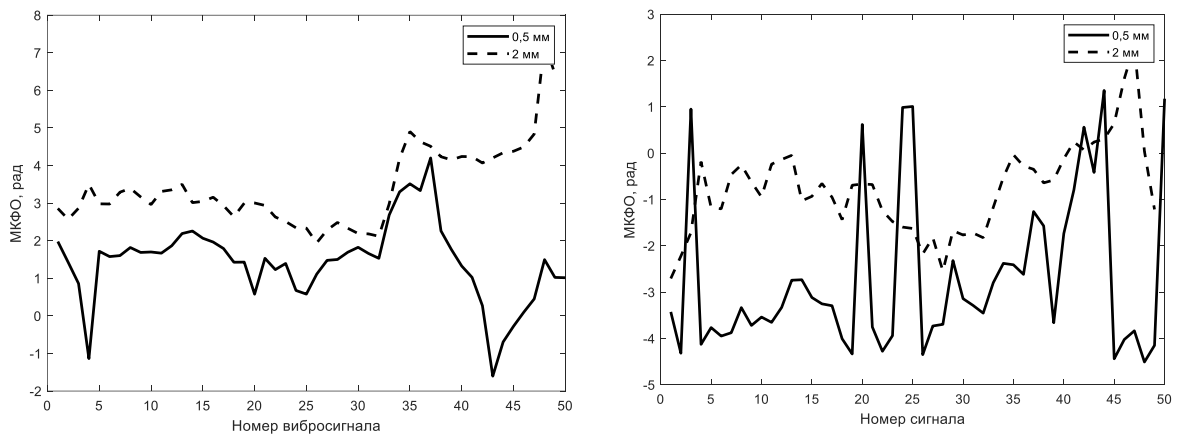
В настоящей работе использовались сигналы виброускорения, измеренные на поверхности корпуса подшипника, на который опирается один из расцентрованных валов [5]. 50 сигналов записаны при условии горизонтальной параллельной расцентровки величиной в 0,5 мм, а 49 – величиной в 2 мм. Частота вращения вала менялась в каждой записи в диапазоне от 12 до 61 Гц в обоих случаях.

Ниже приведены результаты измерений МКФО и амплитуд на сигналах вибрации с горизонтальной параллельной расцентровкой. На рисунке . 3 (а) и (б) изображены графики изменения амплитуд составляющих сигнала (1) и изменения отношения амплитуд высших составляющих к амплитуде первой соответственно. Видно, что амплитуды растут с ростом номера сигнала, т.к. растёт частота вращения вала. Вблизи критической частоты амплитуды резко возрастают.

На рисунке 4 (а) приведён график изменения  $\Theta(k_1)$  с ростом номера сигнала. Зависимости от растущей частоты вращения вала не наблюдается, за исключением сдвига на  $\pi$  радиан при прохождении критической частоты агрегата.  $\Theta(k_2)$  не претерпевает подобных сдвигов, рисунок 4 (б). На рисунке 4 (в) изображена гистограмма эмпирического распределения  $\Theta(k_2)$ . Величины расцентровок, при которых были записаны вибросигналы, различимы по распределениям  $\Theta(k_2)$ .

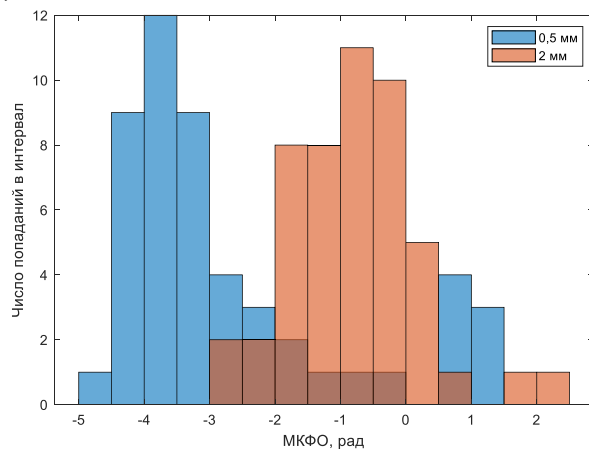


**Рис. 3.** Изменение амплитуды (а) и отношения амплитуд (б)



а)

б)



в)

**Рис. 4.** Изменение МКФО  $\Theta(k_1)$  (а),  $\Theta(k_2)$  (б) и гистограмма эмпирического распределения  $\Theta(k_2)$  (в)

### **Заключение**

Опытным путём показано, что средние значения МКФО представляют собой стационарный временной ряд. Ряд МКФО сохраняет свойство стационарности в том числе при условии, что частота вращения вала приближается к критическим частотам оборудования. Параметры распределения МКФО могут быть использованы для различения величин расцентровки. Достоинство метода состоит в независимости результатов измерений от скорости вращения вала.

### **Список использованных источников**

1. Абрамов, И.Л. Вибродиагностика энергетического оборудования / И.Л. Абрамов. – Кемерово : КузГТУ, 2011. – 81 с.
2. Hariharan, Dr.V. Vibration analysis of misaligned shaft – ball bearing system / Dr.V. Hariharan // Indian J. Sci. Technol. – 2009. – Т. 2. – С. 45-50.
3. Mardia, K.V. Statistics of Directional Data / K.V. Mardia. – Academic Press, 2014. – 380 p.
4. Мардиа, К. Статистический анализ угловых наблюдений / К. Мардиа. – М. : Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1978. – 240 с.
5. MAFAULDA :: Machinery Fault Database [Online] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www02.smt.ufrj.br/~offshore/mfs/page\\_01.html#SEC2](http://www02.smt.ufrj.br/~offshore/mfs/page_01.html#SEC2). – Дата доступа: 08.09.2022.