

Разработка методики акустической диагностики шахтного оборудования

авторы: Федоров Е.Е.

Разработка систем для диагностики металлургического и шахтного оборудования в настоящее время особенно актуальна. Так, диагностика 320 подъемных машин выявила, что 111 из них (34 %) имеют дефекты, а к 2015 г. в России выработают свой ресурс 62 % паровых турбин. К наиболее распространенным агрегатам относятся подъемные машины, вентиляторные установки, компрессоры, насосные агрегаты, паровые и газовые турбины. В этих агрегатах самыми аварийными узлами являются подшипники скольжения и качения, рабочий орган, диски рабочего органа, лопаточные аппараты рабочего органа, муфты, редукторы, двигатель. В числе главных отраслевых проблем – снижение аварийности и повышение скорости принятия решений об эксплуатационном состоянии агрегата.

Современные методы вибродиагностики позволяют обнаруживать дефекты либо на ранней стадии их появления, либо, наоборот, незадолго до отказа узла. Чаще всего используются метод спектра огибающей, пик-фактор и эксцесс. В работах [1, 2] приведены системы обнаружения неисправностей, выявляющие только определенные дефекты. Кроме того, многие методы часто имеют высокую вычислительную сложность и требуют дорогостоящего оборудования. В последнее время появилась тенденция сочетать методы вибро- и акустической диагностики (например, в измельчительных комплексах и в самолетостроении), что дает более высокую вероятность распознавания неисправностей. Также для решения задач диагностики стали использоваться методы искусственного интеллекта (нейросети, экспертные системы и др.).

Для повышения надежности обнаружения неисправностей необходимо разработать методику акустической диагностики шахтного оборудования.

Методика акустической диагностики включает в себя расчет собственных частот, а также правила классификации, идентификации эталонов классов, целеобразования, распознавания, принятия решений.

Рассмотрим структуру методики подробнее.

Расчет собственных частот

При работе подшипника с внутренними дефектами во временном вибросигнале появляются характерные частоты и их гармоники, по которым можно достаточно корректно выявить, где имеется дефект. Численные значения частот этих составляющих зависят от соотношения геометрических размеров подшипника и оборотной частоты вращения ротора механизма.

В нагруженном подшипнике можно дифференцировать следующие собственные частоты [1]:

– частота вращения рабочего органа f_1 (Гц):

$$f_1 = \frac{b_1}{60}, \text{ где } b_1 \text{ – частота вращения органа на (об./мин.);}$$

– частота вращения сепаратора относительно наружного кольца f_2 (Гц):

$$f_2 = \frac{\left(1 - \frac{\beta_5}{D_0} \cos \varphi\right)}{2} f_1, \quad \varphi = \beta_2 \frac{\pi}{180}, \quad D_0 = \frac{\beta_1 + \beta_4}{2},$$

где β_2 – угол контакта тел вращения с подшипником (град.) (для радиально-упорного подшипника); β_3 – посадочный размер наружного кольца (мм); β_4 – посадочный размер внутреннего кольца (мм); β_5 – диаметр тела качения (мм);

– частота вращения сепаратора относительно внутреннего кольца f_3 (Гц):

$$f_3 = \frac{\left(1 + \frac{\beta_5}{D_0} \cos \varphi\right)}{2} f_1, \quad \varphi = \beta_2 \frac{\pi}{180}, \quad D_0 = \frac{\beta_1 + \beta_4}{2};$$

– частота перекачивания тел качения по наружному кольцу f_4 (Гц): $f_4 = f_2 \cdot \beta_6$, где β_6 – количество тел качения;

– частота перекачивания тел качения по внутреннему кольцу f_5 (Гц): $f_5 = f_3 \cdot \beta_6$;

– частота вращения тел качения вокруг своей оси f_6 (Гц): $f_6 = \frac{D_0}{\beta_5} \left(1 - \frac{\beta_5^2}{D_0^2} \cos^2 \varphi\right) f_1$, $\varphi = \beta_2 \frac{\pi}{180}$,
 $D_0 = \frac{\beta_1 + \beta_4}{2}$;

– частота зубчатого зацепления: $f_7 = f_1 \cdot \beta_7$, где β_7 – количество зубьев зубчатой муфты или редуктора;

– частота вращения лопаточного аппарата: $f_8 = f_1 \cdot \beta_8$, где β_8 – количество лопаток.

Проблемы монтажа подшипников определяются преимущественно по гармоникам f_1 .

Дефекты элементов подшипников типа скол и раковина определяются преимущественно на наружном кольце по гармоникам f_4 , на внутреннем кольце по гармоникам f_5 , на телах качения по гармоникам f_6 .

Дефекты зубчатой муфты определяются по гармоникам f_7 .

Структура нейросетевого классификатора

Для проведения акустической диагностики используется полносвязный многослойный перцептрон. Структура нейросети представлена на рисунке 1.

Количество нейронов в скрытом слое определялось по формуле [3]:

$$\frac{N^{(2)} \cdot P}{1 + \log_2 P} \leq N^{(1)} \leq N^{(2)} \left(\frac{P}{N^{(2)}} + 1 \right) (N^{(2)} + N^{(2)} + 1) + N^{(2)},$$

где $N^{(2)}$ – количество нейронов входного слоя; $N^{(1)}$ – количество нейронов скрытого слоя; $N^{(2)}$ – количество нейронов выходного слоя, $N^{(2)} = 2$; P – количество обучающих реализаций.

Правила идентификации эталонов классов

Формирование множества собственных частот К агрегата:

$$K = \bigcup_{i=1}^4 K_{1,i}, \quad (1)$$

$$K_1 = \bigcup_{i=1}^4 K_{1i}, \quad K_{11} \subset \left\{ l \cdot \frac{f_1}{m} \right\}, K_{12} \subset \left\{ l \cdot \frac{f_4}{m} \right\}, K_{13} \subset \left\{ l \cdot \frac{f_5}{m} \right\}, K_{14} \subset \left\{ l \cdot \frac{f_6}{m} \right\},$$

$$K_2 \subset \left\{ l \cdot \frac{f_1}{m} \right\}, K_3 \subset \left\{ l \cdot \frac{f_7}{m} \right\}, K_4 \subset \left\{ l \cdot \frac{f_8}{m} \right\}, \quad l, m \in \mathbb{N},$$

где \mathbb{N} – множество натуральных чисел; l – номер гармоники ($m=1$) или субгармоники ($m>1$); i – номер класса узла агрегата,

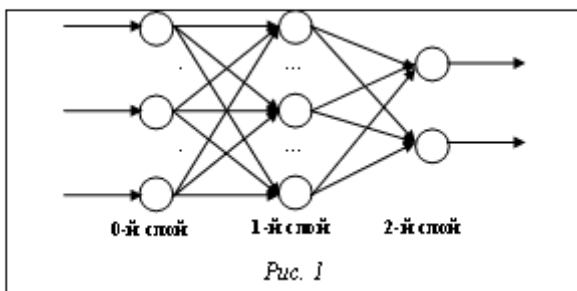
$$i = \begin{cases} 1 - \text{подшипник качения,} \\ 2 - \text{подшипник скольжения,} \\ 3 - \text{редуктор/зубчатая муфта,} \\ 4 - \text{лопаточный аппарат;} \end{cases}$$

f_1 – собственная частота вращения рабочего органа; f_4 – собственная частота перекачивания тел качения по наружному кольцу; f_5 – собственная частота перекачивания тел качения по внутреннему кольцу; f_6 – собственная частота вращения тел качения вокруг своей оси; f_7 – собственная частота редукторов и зубчатых муфт; f_8 – собственная частота лопаточного аппарата.

2) Вычисление спектра акустического сигнала $x^r(n)$ для каждой r -й реализации эксперимента на агрегатах посредством прямого дискретного преобразования Фурье (ДПФ) [4]:

$$X^r(k) = \sum_{n=0}^{N^r-1} x^r(n) e^{-j2\pi kn}, \quad k \in \overline{0, N^r-1}, \quad (2)$$

$$A^r(k) = |X^r(k)|, \quad k \in \overline{0, N^r-1}, \quad (3)$$



где N^r – длина сигнала.

3) Локализация максимумов в спектре $A^r(k)$:

$$\hat{A}^r(k) = \begin{cases} A^r(k), & A^r(k-1) < A^r(k) > A^r(k+1), \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases} \quad (4)$$

4) Пороговые ограничения в спектре $\hat{A}^r(k)$:

$$\check{A}^r(k) = \begin{cases} \hat{A}^r(k), & \hat{A}^r(k) > T, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases} \quad (5)$$

$$T = \frac{\sum_{k=0}^R \hat{A}^r(k)}{R} \quad \text{– порог,} \quad (6)$$

где R – количество частот с ненулевой амплитудой.

5) Центрирование сигнала на основе множества собственных частот K :

$$\tilde{A}^*(k) = \begin{cases} \tilde{A}^*(k), & \tilde{A}^*(k) > 0 \wedge k \in K, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases} \quad (7)$$

6) Обучение нейросети p -й реализации происходит в соответствии с алгоритмом обратного распространения ошибки [3].

Правила целеобразования

Функционал цели представлен в виде

$$F = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{K^{(2)}} \left(f_2 \left(w_{i0}^{(2)} + \sum_{i=1}^{K^{(1)}} w_{ki}^{(2)} f_1 \left(w_{i0}^{(1)} + \sum_{j=1}^{K^{(0)}} w_{ij}^{(1)} \tilde{A}^*(j) \right) \right) - d_k \right)^2 \rightarrow \min_{\mathbf{w}} \quad (8)$$

где $w_{i0}^{(l)}$ – порог; $w_{ij}^{(l)}$ – весовые коэффициенты; d_k – ожидаемый результат.

Правила распознавания состояния агрегата

1) Вычисление спектра $A(k)$ виброакустического сигнала $x(n)$ посредством прямого ДПФ:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j(2\pi/N)nk}, \quad k \in \overline{0, N^{(2)}-1}, \quad (9)$$

$$A(k) = |X(k)|, \quad k \in \overline{0, N^{(2)}-1}. \quad (10)$$

2) Локализация максимумов в спектре $A(k)$:

$$\hat{A}(k) = \begin{cases} A(k), & A(k-1) < A(k) > A(k+1), \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases} \quad (11)$$

3) Пороговые ограничения в спектре $\hat{A}(k)$:

$$\check{A}(k) = \begin{cases} \hat{A}(k), & \hat{A}(k) > T, \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases} \quad (12)$$

$$T = \frac{\sum_{k=0}^K \hat{A}(k)}{R} \quad \text{– порог,} \quad (13)$$

где R – количество частот с ненулевой амплитудой.

4) Центрирование сигнала на основе множества собственных частот K :

$$\tilde{A}(k) = \begin{cases} \check{A}(k), & \check{A}(k) > 0 \wedge k \in K, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases} \quad (14)$$

5) Нейросетевое распознавание:

$$y_k = f_2 \left(w_{k0}^{(2)} + \sum_{i=1}^{N(1)} w_{ki}^{(2)} f_1 \left(w_{i0}^{(1)} + \sum_{j=1}^{N(0)} w_{ij}^{(1)} \bar{A}(j) \right) \right),$$

$$k \in \overline{1, N^{(2)}}. \quad (15)$$

Правила принятия решений

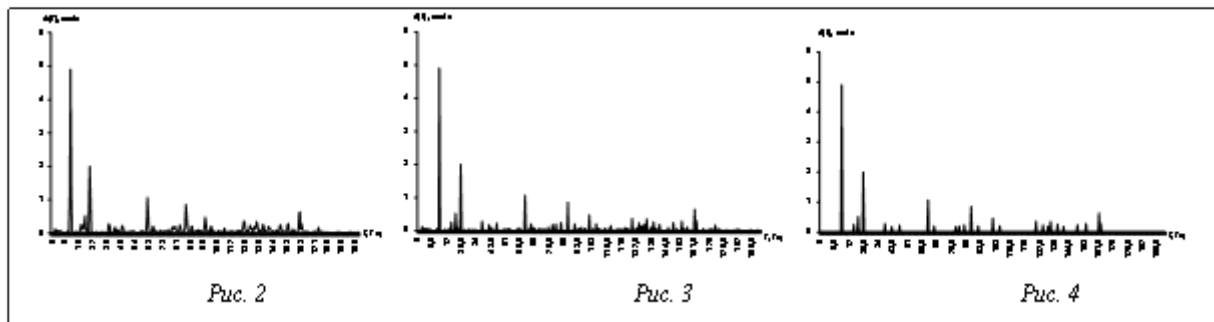
Правила принятия решений представлены в виде

$$\text{ceil}(y_1) = 1 \wedge \text{ceil}(y_2) = 0 \rightarrow q = 1, \quad (16)$$

$$\text{ceil}(y_1) = 0 \wedge \text{ceil}(y_2) = 0 \rightarrow q = 0, \quad (17)$$

где $\text{ceil}(y) = \begin{cases} 1, & y \geq 0,5 \\ 0, & y < 0,5 \end{cases}$, q – состояние агрегата ($q=1$ – агрегат исправен, $q=0$ – агрегат неисправен).

Численное исследование



Для проведения численного исследования методика акустической диагностики шахтных агрегатов была программно реализована. В качестве измерительных и регистрирующих средств использовался акустический датчик.

Для осевого двухступенчатого вентилятора ВОД-21 шахты «Кировская» (г. Кировское, Донецкая обл.) акустический датчик устанавливался рядом с подшипником качения.

Для нейросети были определены следующие характеристики: $N(0)=200$, $N(1)=32$, $N(2)=2$,

$$P=128, \quad f_1(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}, \quad f_2(x) = \tanh(x).$$

На рисунках 2–3 приведены исходный спектр акустического сигнала (рис. 2) и спектр с выделением строгих максимумов (рис. 3). В изображенном на рисунке 4 спектре амплитуда частоты 12,5 Гц превышает допустимый порог 4,5 мм/с. Этот спектр подается на вход нейросети. В результате нейросетевого распознавания получено, что $y_1=0,1$, $y_2=0,9$. В соответствии с правилом (17) получено $q=0$, значит, подшипник агрегата нуждается в ремонте.

В заключение можно отметить следующее. В статье была предложена методика

акустической диагностики шахтного оборудования, базирующаяся на методах цифровой обработки сигнала (преобразовании Фурье) и нейросетях (многослойном персептроне). Эта методика учитывает собственные частоты агрегата и включает в себя создание структуры нейросетевого классификатора, правил идентификации эталонов классов, целеобразования, распознавания, принятия решений. На основе предложенной методики проведено численное исследование осевого двухступенчатого вентилятора ВВД-21 и определены неисправности.

Основные положения данной работы предназначены для реализации в интеллектуальных системах диагностики неисправностей шахтного оборудования. Они могут использоваться в системах акустической диагностики и интеллектуального управления динамическими объектами.

Литература

1. Современные методы и средства виброакустического диагностирования машин и конструкций // Ф.Я. Балицкий, М.Д. Генкин, М.А. Иванова [и др.]; под ред. акад. К.В. Фролова. М., 1990. 252 с.
2. Barkov A.V. Optimization of Monitoring and Diagnostics Methods for the Rotating Machines by Vibration and Noise Measurements // Proc. of the 4th International Congress on Sound and Vibration. St. Petersburg, Russia, 1996, Vol. 3, pp. 1573–1578.
3. Уоссермен Ф. Нейрокомпьютерная техника. М.: Мир, 1992. 102 с.
4. Рабинер Л.Р., Шафер Р.В. Цифровая обработка речевых сигналов. М.: Радио и связь, 1981. 496 с.