



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) **UA** (11) **67741** (13) **U**
(51) МПК (2012.01)
G01N 22/00

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

(21) Номер заявки: u 2011 07221	(72) Винахідник(и): Федоров Євген Євгенович (UA), Чичикало Ніна Іванівна (UA), Харченко Володимир Петрович (UA), Купцова Катерина Юріївна (UA), Ларін Віталій Юрійович (UA)
(22) Дата подання заявки: 07.06.2011	
(24) Дата, з якої є чинними права на корисну модель: 12.03.2012	
(46) Публікація відомостей про видачу патенту: 12.03.2012, Бюл.№ 5	(73) Власник(и): НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ, проспект Комарова, 1, м. Київ, 03680, Україна (UA)

(54) СПОСІБ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ДІАГНОСТИКИ ВИРОБНИЧИХ ОБ'ЄКТІВ

(57) Реферат:

Спосіб інтелектуальної діагностики виробничих об'єктів, при якому на дослідних стендах у процесі виготовлення й налагодження формують акустичний або вібраційний паспорт об'єкта, для чого: для кожного вузла й об'єкта вимірюють акустичні або вібраційні сигнали, які характеризують його технічний номінальний стан; після чого перетворюють їх до векторів ознак за допомогою дискретного Фур'є- або вейвлет-перетворення; і на основі отриманих векторів ознак формують еталони, які використовують як усереднену характеристику його технічного номінального стану; потім адаптують структуру нечіткої нейромережі, за допомогою якої розпізнають стан об'єкта; після чого вибирають показники якості, за допомогою яких оцінюють точність, швидкість й надійність; далі обчислюють за допомогою генетичного алгоритму параметри нейромережі й уточнюють значення еталонів з урахуванням заданих показників якості; потім задають правила бази знань експертної системи, за допомогою яких визначають номінальний стан вузлів й об'єкта в цілому й формують їх паспорт; а на стадії експлуатації вимірюють і перетворюють акустичний або вібраційний сигнал до вектора ознак, який зіставляють із паспортними даними вузлів й об'єктів за допомогою нейромережі; після чого на основі застосування правил експертної системи за результатами розпізнавання приймають рішення, відповідно до якого виробляють керуючий вплив.

UA 67741 U

Корисна модель належить до області розпізнавання вібраційних й акустичних образів виробничих об'єктів на стадії виготовлення й налагодження й може бути використаний в системах підтримки прийняття рішень, віброаналізаторах.

При діагностиці виробничих об'єктів використовують цифрову обробку сигналу, що заснована на спектральному аналізі.

Відомий спосіб діагностики технічних об'єктів [1] заснований на визначенні ексцесу, пік-фактора. Розпізнавання стану об'єкта й вузла здійснюється на основі зіставлення інформативних частот з порогом. Недоліком цього способу є те, що дефекти виявляються тільки на певній стадії, аналізується тільки вібросигнал і не використовуються інтелектуальні технології (нейромережі, нечітка логіка, генетичні алгоритми), а також показники якості для оцінки проведеного аналізу.

Найближчим за технічною суттю до способу, що заявляється, є спосіб діагностики технічних об'єктів [2]. Суть прототипу полягає в наступному. Визначається вектор ознак, які зв'язані зі огинаючою спектра, котра виділяється за допомогою Фур'є-перетворення. Розпізнавання стану об'єкта й вузла здійснюється на основі зіставлення інформативних частот з порогом. Недоліком цього способу є те, що не використовуються інтелектуальні технології (нейромережі, нечітка логіка, генетичні алгоритми), показники якості для оцінки проведеного аналізу, дефекти виявляються тільки на певній стадії, аналізується тільки вібросигнал.

В основу запропонованої корисної моделі поставлена задача вдосконалення способу розпізнавання акустичних образів, у якому за рахунок використання нейромереж, нечіткої логіки, генетичного алгоритму, експертної системи виконується підвищення якості навчання й розпізнавання. Даний спосіб забезпечує підвищення точності, надійності й швидкодії діагностики виробничих об'єктів.

Поставлене завдання вирішується тим, що в способі інтелектуальної діагностики виробничих об'єктів на дослідних стендах у процесі виготовлення й налагодження формують акустичний або вібраційний паспорт об'єкта, для чого: для кожного вузла й об'єкта вимірюють акустичні або вібраційні сигнали, які характеризують його технічний номінальний стан; після чого перетворюють їх до векторів ознак за допомогою дискретного Фур'є- або вейвлет-перетворення; і на основі отриманих векторів ознак формують еталони, які використовують як усереднену характеристику його технічного номінального стану; потім адаптують структуру нечіткої нейромережі, за допомогою якої розпізнають стан об'єкта; після чого вибирають показники якості, за допомогою яких оцінюють точність, швидкість й надійність; далі обчислюють за допомогою генетичного алгоритму параметри нейромережі й уточнюють значення еталонів з урахуванням заданих показників якості; потім задають правила бази знань експертної системи, за допомогою яких визначають номінальний стан вузлів й об'єкта в цілому й формують їх паспорт; а на стадії експлуатації вимірюють і перетворюють акустичний або вібраційний сигнал до вектора ознак; який зіставляють із паспортними даними вузлів й об'єктів за допомогою нейромережі; після чого на основі застосування правил експертної системи за результатами розпізнавання приймають рішення, відповідно до якого виробляють керуючий вплив.

Як ознаки акустичного або вібраційного сигналу для діагностики вузлів об'єкта вибираються інформативні частоти [3], що отримані за наступною методикою [4].

Блок 1. - Обчислення безлічі частот дефектації K_i , K_{ir}

$$K_1 = \bigcup_{r=1}^4 K_{1r}, \quad K_{11} \subset \left\{ l \cdot \frac{f_1}{m} \right\}, \quad K_{12} \subset \left\{ l \cdot \frac{f_4}{m} \right\}, \quad K_{13} \subset \left\{ l \cdot \frac{f_5}{m} \right\}, \quad K_{14} \subset \left\{ l \cdot \frac{f_m}{m} \right\}, \quad K_2 \subset \left\{ l \cdot \frac{f_1}{m} \right\}, \quad K_3 \subset \left\{ l \cdot \frac{f_7}{m} \right\},$$

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

де \mathbb{N} - множина натуральних чисел,

f_i - інформативні частоти (табл. 1),

r - номер класу деталей вузлів,

j - номер класу вузла,

l - номер гармоніки ($m-1$) або субгармоніки ($m>1$),

$$j = \begin{cases} 1, & \text{підшипник кочення} \\ 2, & \text{підшипник ковзання} \\ 3, & \text{редуктор/зубчата муфта} \\ 4, & \text{лопатковий апарат} \end{cases}, \quad r = \begin{cases} 1, & \text{зборка вузла} \\ 2, & \text{зовнішнє кільце} \\ 3, & \text{внутрішнє кільце} \\ 4, & \text{тіла кочення} \end{cases}.$$

Блок 2. - Обчислення спектра $A^{up}(k)$ акустичного сигналу $x^p(n)$ для кожної p -ї реалізації експерименту на вузлах за допомогою:

- прямого дискретного перетворення Фур'є (ДПФ)

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

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

де N - довжина сигналу;

5 - прямого дискретного вейвлет-перетворення (ДВП)

$$d_{lm} = a_0^{1/2} \sum_{n=0}^{N/2^{l-1}-1} c_{l-1,n} g_{n+2m}, \quad c_{lm} = a_0^{1/2} \sum_{n=0}^{N/2^{l-1}-1} c_{l-1,n} h_{n+2m}, \quad c_{0n} = x^p(n),$$

$$A^{2p}(k) = \begin{cases} c_{Lm}, & k = m \wedge m \in \overline{0, N/2^{L-1}-1} \\ d_{lm}, & k = N/2^l + m \wedge m \in \overline{0, N/2^{l-1}-1} \wedge l \in \overline{1, L} \end{cases}, \quad m \in \overline{0, N/2^{l-1}-1},$$

де c_{lm}, d_{lm} - коефіцієнти ДВП, які апроксимують і деталізують,

L - кількість рівнів розкладання.

10 Блок 3. - Локалізація максимумів у спектрі $A^{up}(k)$

$$\hat{A}^{up}(k) = \begin{cases} A^{up}(k), & A^{up}(k-1) < A^{up}(k) > A^{up}(k+1), \quad u \in \overline{1, 2}. \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}$$

Блок 4. - Граничні обмеження в спектрі $\hat{A}^{up}(k)$

$$\check{A}^{up}(k) = \begin{cases} \hat{A}^{up}(k), & \hat{A}^{up}(k) > T, \quad T = \frac{\sum_{k=0}^N \hat{A}^{up}(k)}{\sum_{k=0}^N |\text{sign}(\hat{A}^{up}(k))|} - \text{порог}, \quad u \in \overline{1, 2}. \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}$$

Блок 5. - Обмеження по множинам частот дефектації

15 - для вузлів

$$q^{up}(k) = \begin{cases} \check{A}^{up}(k), & \check{A}^{up}(k) > 0 \wedge k \in K_j, \quad u \in \overline{1, 2}; \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}$$

- для деталей вузлів

$$q^{up}(k) = \begin{cases} \check{A}^{up}(k), & \check{A}^{up}(k) > 0 \wedge k \in K_{jr}, \quad u \in \overline{1, 2}. \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}$$

У результаті формуються наступні системи ознак вузла й деталі вузла

20 $Q^{up} = (q^{up}(0), \dots, q^{up}(N-1))$.

Визначення частот вузлів та їхніх елементів наведено у табл.

Як ознаки акустичного або вібраційного сигналу довжиною N для діагностики об'єкта вибирають середньоквадратичне значення, пік-фактор й ексцес [5], які виділяють за допомогою наступної методики [4]:

25 Блок 1. - Обчислення спектра $B^p(k)$ акустичного сигналу $x^p(n)$ для кожної p -ї навчальної реалізації вузлів за допомогою прямого ДПФ:

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

$$B^p(k) = |X^p(k)|, \quad k \in \overline{0, N-1},$$

де N - довжина сигналу.

30 Блок 2. - Виділення смуги спектра сигналу на основі частотних діапазонів для об'єкта $[k_1, k_2]$ і його вузла $[k_{1j}, k_{2j}]$:

$$\bar{B}^p(k) = \begin{cases} B^p(k), & k_1 \leq k \leq k_2, \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}$$

$$k_1 = \min_j(k_{1j}), \quad k_2 = \max_j(k_{2j}),$$

$$\bar{B}_j^p(k) = \begin{cases} B^p(k), & k_{1j} \leq k \leq k_{2j}. \\ 0, & \text{інакше} \end{cases}$$

35 Блок 3. - Обчислення зворотного перетворення Фур'є:

$$\bar{B}^p(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \bar{B}^p(k) e^{j(2\pi/N)nk}, \quad n \in \overline{0, N-1},$$

$$\bar{B}_j^p(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \bar{B}_j^p(k) e^{j(2\pi/N)nk}, \quad n \in \overline{0, N-1}.$$

Блок 4. - Обчислення середньоквадратичного значення (СКЗ), пік-фактора й ексцесу:

- для об'єктів

$$5 \quad q^{3p}(0) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left(\bar{B}^p(n) \right)^2},$$

$$q^{3p}(1) = \frac{\max_{n \in \overline{0, N-1}} \bar{B}^p(n)}{\bar{B}^p(1)},$$

$$q^{3p}(2) = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} - 3,$$

$$\mu_4 = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left(\bar{B}^p(n) - \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \bar{B}^p(n) \right)^4,$$

$$\mu_2^2 = \left(\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left(\bar{B}^p(n) - \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \bar{B}^p(n) \right)^2 \right)^2,$$

10 - для вузлів об'єктів

$$q^{3p}(0) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left(\bar{B}_j^p(n) \right)^2},$$

$$q^{3p}(1) = \frac{\max_{n \in \overline{0, N-1}} \bar{B}_j^p(n)}{\bar{B}_j^p(1)},$$

$$q^{3p}(2) = \frac{\mu_{4j}}{\mu_{2j}^2} - 3,$$

$$\mu_{4j} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left(\bar{B}_j^p(n) - \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \bar{B}_j^p(n) \right)^4,$$

$$15 \quad \mu_{2j}^2 = \left(\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left(\bar{B}_j^p(n) - \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \bar{B}_j^p(n) \right)^2 \right)^2.$$

У результаті формують наступні системи ознак об'єкта й вузлів об'єкта $Q^{3p} = (q^{3p}(0), q^{3p}(1), q^{3p}(2))$.

Вектори ознак Q^{up} формують для кожної і-ї зони вібрації [6]

$$i = \begin{cases} 1, \text{ зона А} \\ 2, \text{ зона В} \\ 3, \text{ зона С} \\ 4, \text{ зона D} \end{cases}.$$

20 Розпізнавання стану об'єкта й вузла виробляють на основі відповідної нечіткої мережі [4], яка обчислює номер зони вібрації й представлена у вигляді

$$f_u(x) = \arg \max_i \min_k \left[\exp \left[- \left(\frac{x_k - m_{uik}}{\sigma_{uik}} \right)^2 \right] \right], \quad i \in \overline{1, 4}, \quad k \in \overline{1, N}.$$

де m_{uik} - математичне очікування чисельного значення k-ї компоненти u-го вектора ознак для об'єкта або вузла в і-ї зони вібрації,

$$m_{uik} = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P q^{up}(k), \quad k \in \overline{1, N},$$

σ_{uik} - середньоквадратичне відхилення чисельного значення k-й компоненти вектора ознак для об'єкта або вузла в i-й зоні вібрації,

$$\sigma_{uik} = \sqrt{\frac{1}{P} \sum_{p=1}^P (q^{up}(k))^2 - (m_{uik})^2}, \quad k \in \overline{1, N},$$

5 x_k -k-а компонента вектора ознак.

У роботі вибирають наступні показники якості розпізнавання акустичних або вібраційних сигналів:

1. Критерій швидкодії, що для даного випадку означає вибір такої кількості нейронів першого й другого шару, що доставляють мінімум часу розпізнавання по нейромережі,

$$10 \quad F = T \rightarrow \min_{N^{(1)}, N^{(2)}}.$$

2. Критерій надійності, що для даного випадку означає вибір таких значень компонент еталонів, які доставляють максимум імовірності правильного розпізнавання (відносини кількості неправильно розпізнаних станів вузла або деталі по моделі (нейромережі) до їхньої загальної кількості),

$$15 \quad F = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P I(f_u(X_p), d_p) \rightarrow \max_{m_u, \sigma_u},$$

$$I(a, b) = \begin{cases} 1, & a = b \\ 0, & a \neq b \end{cases},$$

де d_p - бажані виходи,

P - кількість тестових реалізацій.

3. Критерій точності, що для даного випадку означає вибір таких значень компонент еталонів, які доставляють мінімум середньоквадратичної помилки (різниці виходу по нейромережі та бажаного виходу),

$$20 \quad F = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P (f_u(X_p) - d_p)^2 \rightarrow \max_{m_u, \sigma_u}.$$

Для зменшення трудомісткості адаптації чисельних значень компонент векторів m_{ui} , σ_{ui} у роботі використовують генетичний алгоритм, що містить у собі наступні блоки [4]:

25 1. Подання особин і створення вихідної популяції - як особина популяції з речовинними генами, виступають чисельні значення компонентів еталонів.

2. Фітнес-функція - критерій надійності.

3. Оператор репродукції - пропорційний відбір.

4. Оператор кросингверу - дискретна рекомбінація.

30 5. Оператор мутації - алгоритм імітації опалювання.

6. Оператор редукції - селекційна схема.

Далі формують набір правил експертної системи, для чого використовують результати нейромережевого розпізнавання стану об'єктів і вузлів і представляють у вигляді:

$$i \in M_d \wedge f_u(x) = i \rightarrow q = 1 \wedge \Pi_i = E_i$$

$$35 \quad i \notin M_d \wedge f_u(x) = i \rightarrow q = 0,$$

де Π_i - паспорт об'єкта або його вузла в i-й зоні,

M_d - множина номерів припустимих зон вібрації, $M_d = \{1, 2\}$,

q - стан об'єкта або його вузла (q=1 - об'єкт або вузол справний, q=0 - об'єкт або вузол несправний).

40 Даний спосіб забезпечує підвищення точності, надійності й швидкодії діагностики виробничих об'єктів.

Таблиця

Визначення інформативних частот вузлів й їхніх елементів

Частота	Методи визначення частот
обертання робочого органу f_1 , Гц	$f_1 = \frac{\beta_1}{60}$, де β_1 - частота обертання робочого органа в об./хв
обертання сепаратора зовнішнього кільця f_2 , Гц щодо	$f_2 = \frac{\left(1 - \frac{\beta_5}{D_0} \cos \varphi\right)}{2}$, $\varphi = \beta_1 \frac{\pi}{180}$, $D_0 = \frac{\beta_3 + \beta_4}{2}$ де β_2 - кут контакту тіл обертання з підшипником у градусах β_3 - посадковий розмір зовнішнього кільця в мм β_4 - посадковий розмір внутрішнього кільця в мм β_5 - діаметр тіла кочення в мм
обертання сепаратора внутрішнього кільця f_3 , Гц щодо	$f_3 = \frac{\left(1 + \frac{\beta_5}{D_0} \cos \varphi\right)}{2}$, $\varphi = \beta_2 \frac{\pi}{180}$, $D_0 = \frac{\beta_3 + \beta_4}{2}$
перекочування тіл кочення по зовнішньому кільцю f_4 , Гц	$f_4 = f_2 \cdot \beta_6$, де β_6 - кількість тіл кочення
перекочування тіл кочення по внутрішньому кільцю f_5 , Гц	$F_5 = f_3 \cdot \beta_6$
обертання тіл кочення навколо своєї осі f_6 , Гц	$f_6 = \frac{D_0}{\beta_5} \left(1 - \frac{\beta_5^2}{D_0} \cos^2 \varphi\right) f_1$, $\varphi = \beta_2 \frac{\pi}{180}$, $D_0 = \frac{\beta_3 + \beta_4}{2}$
зубчастого зачеплення	$f_7 = f_1 \cdot \beta_7$, де β_7 - кількість зубів зубчатої муфти або редуктора
обертання лопаткового апарата f_8 , Гц	$f_8 = f_1 \cdot \beta_8$, де β_8 - кількість лопаток

Джерела інформації:

- 5 1. Балицкий Ф.Я. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф.Я. Балицкий. М.А. Иванова, А.Г. Соколова. - М.: Наука, 1984 - 120 с.
2. Пат. 2110781 Российская Федерация, G01M 13/04. Способ прогнозирования технического состояния межвального подшипника качения двухвальной турбомашины / Кузменко М.Л.; Коряковцев П.С.; Грязен Г.П.; Макаров В.П.; Кириевский Ю.Е.; заявитель и патентообладатель акционерное общество "Авиадвигатель". - № 95103534/28; заявл. 14.03.1995; опубл. 10.05.1998.
- 10 3. Решетов Д.Н. Детали машин: Учебник для студентов машиностроительных и механических специальностей вузов / Д.Н. Решетов. - М.: Машиностроение, 1989. - 496 с.
4. Федоров Е.Е. Методики интеллектуальной диагностики / Е.Е. Федоров. - Донецк: Ноулидж, 2010.-303 с.
- 15 5. Барков А.В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А.В. Барков, Н.А. Баркова, А.Ю. Азовцев. - СПб.: Изд. центр СПбГМТУ, 2000. - 169 с.
6. Методические указания по проведению экспертных обследований вентиляторных установок главного проветривания (РД 03-427-01). - М.: Государственное унитарное предприятие "Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России", 2002. - Серия 03. - Выпуск 11. - 104 с.
- 20

ФОРМУЛА КОРИСНОЇ МОДЕЛІ

- 25 Спосіб інтелектуальної діагностики виробничих об'єктів, заснований на аналізі акустичних або вібраційних сигналів методами цифрової обробки сигналу, у процесі якого, використовують нейронну мережу, нечітку логіку, генетичний алгоритм, експертну систему, розпізнавання акустичних і вібраційних образів, який **відрізняється** тим, що на дослідних стендах у процесі виготовлення й налагодження формують акустичний або вібраційний паспорт об'єкта, для чого: для кожного вузла й об'єкта вимірюють акустичні або вібраційні сигнали, які характеризують

- його технічний номінальний стан; після чого перетворюють їх до векторів ознак за допомогою дискретного Фур'є- або вейвлет-перетворення; і на основі отриманих векторів ознак формують еталони, які використовують як усереднену характеристику його технічного номінального стану; потім адаптують структуру нечіткої нейромережі, за допомогою якої розпізнають стан об'єкта;
- 5 після чого вибирають показники якості, за допомогою яких оцінюють точність, швидкодію й надійність; далі обчислюють за допомогою генетичного алгоритму параметри нейромережі й уточнюють значення еталонів з урахуванням заданих показників якості; потім задають правила бази знань експертної системи, за допомогою яких визначають номінальний стан вузлів й об'єкта в цілому й формують їх паспорт; а на стадії експлуатації вимірюють і перетворюють
- 10 акустичний або вібраційний сигнал до вектора ознак; який зіставляють із паспортними даними вузлів й об'єктів за допомогою нейромережі; після чого на основі застосування правил експертної системи за результатами розпізнавання приймають рішення, відповідно до якого виробляють керуючий вплив.

Комп'ютерна верстка Л. Ціхановська

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601