



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 56536

(13) A

(51) 7 G01M13/00

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИДЕРЖАВНИЙ ДЕПАРТАМЕНТ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІОПИС
ДО ДЕКЛАРАЦІЙНОГО ПАТЕНТУ
НА ВІНАХІДВИДАЄТЬСЯ ПІД
ВІДПОВІДАЛЬНІСТЬ
ВЛАСНИКА
ПАТЕНТУ

(54) СПОСІБ ВІБРОАКУСТИЧНОЇ ДІАГНОСТИКИ МЕХАНІЗМУ

1

2

(21) 2002075874

(22) 16 07 2002

(24) 15 05 2003

(46) 15 05 2003, Бюл. №5, 2003р

(72) Шевченко Сергій Анатолійович

(73) НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
ІНСТИТУТ ХАРКІВСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО
ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ СІЛЬСЬКОГО
ГОСПОДАРСТВА

(57) Спосіб віброакустичної діагностики механізму, який полягає в тому, що діагностику виконують у два етапи, на першому з яких формують діагностичну модель механізму, для чого задають режим роботи і вимірюють параметр вібрації механізмів навчальної сукупності, випробування яких продовжують до відмови механізмів, а на другому задають режим роботи і вимірюють параметр вібрації механізму, який діагностують, та визначають показник надійності механізму, використовуючи отриману на першому етапі діагностичну модель, який відрізняється тим, що на першому етапі визначають параметри діагностичної моделі за формулами

$$C_0 = \frac{\left(\sum_{i=1}^N \lg T_i \right) \left(\sum_{i=1}^N L_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^N L_i \lg T_i \right) \left(\sum_{i=1}^N L_i \right)}{N \left(\sum_{i=1}^N L_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^N L_i \right)^2}, \quad (1)$$

$$C_1 = \frac{N \left(\sum_{i=1}^N L_i \lg T_i \right) - \left(\sum_{i=1}^N L_i \right) \left(\sum_{i=1}^N \lg T_i \right)}{N \left(\sum_{i=1}^N L_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^N L_i \right)^2}, \quad (2)$$

$$v_m = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(T_i / 10^{C_0 + C_1 L_i} - 1 \right)^2}, \quad (3)$$

де

C_0 та C_1 - коефіцієнти в лінійній апроксимації стохастичної залежності логарифму напрацювання механізму до відмови від початкового рівня вібрації

цїї в смузі частот вібродіагностичної ознаки дефекту виготовлення (C_0 - стала складова, C_1 - коефіцієнт пропорційності),

i - порядковий номер механізму в навчальній сукупності,

N - кількість механізмів у навчальній сукупності,

L_i - початковий рівень вібрації i -го механізму в смузі частот вібродіагностичної ознаки дефекту виготовлення,

T_i - напрацювання i -го механізму до відмови,

v_m - вибіркове відносне середнє квадратичне відхилення напрацювання механізму до відмови від апроксимованого значення,

а на другому етапі задають режим роботи механізму, який діагностують, вимірюють початковий рівень вібрації у смузі частот вібродіагностичної ознаки дефекту виготовлення механізму та визначають ймовірність безвідмовної роботи механізму протягом заданого напрацювання за формулами

$$B = \frac{1,126}{v_m} + \frac{0,011}{v_m^2} - 0,137, \quad (4)$$

$$A = \frac{10^{C_0 + C_1 L_0}}{\Gamma(1 + 1/B)}, \quad (5)$$

$$P(T_N) = \exp \left(- \left(\frac{T_N}{A} \right)^B \right), \quad (6)$$

де

B - параметр форми закону розподілу напрацювання механізму до відмови,

A - параметр масштабу закону розподілу напрацювання механізму до відмови,

L_0 - початковий рівень вібрації в смузі частот вібродіагностичної ознаки дефекту виготовлення механізму,

Γ - символ гамма-функції,

P - ймовірність безвідмовної роботи механізму,

T_N - задане напрацювання

Винахід стосується віброакустичної діагностики і може бути використаний для контролю якості виготовлення механізмів машин, зокрема, зубчастих передач та підшипникових вузлів

Відомий спосіб діагностики машини за побіч-

ними ознаками (переважно параметрами вібрації корпусу), який полягає в тому, що вимірюють значення діагностичних параметрів, визначають відповідні їм значення функцій розподілу ймовірностей діагностичних параметрів, та судять про

(13) A

(11) 56536

(19) UA

технічний стан машин, зважаючи на близькість значень функцій розподілу до граничних. При цьому для відновлення функції розподілу використовують результати вимірювань діагностичних параметрів, отримані при випробуваннях навчальної сукупності машин [Авт. свид. СРСР №1359692, МПК⁴ G01M 7/00]. Спосіб придатний для розподілення знову виготовлених машин за категоріями якості, яким може бути призначений різний ресурс, однак не дає змоги визначити кількісний показник надійності машини, що є його недоліком і обумовлює низьку вірогідність діагностування.

Найбільш близьким по технічній суті до винаходу, що заявляється, є спосіб прогнозування технічного стану підшипника кочення, який полягає в тому, що прогнозування здійснюють у два етапи, на першому з яких формують діагностичну модель, а на другому прогнозують по цій моделі технічний стан підшипника, який діагностують. На першому етапі випробують навчальну сукупність механізмів із підшипниковим вузлом. При цьому в міру збільшення напрацювання повторюють вимірювання амплітуди вібрації корпусу механізму при відключенні приводу і зниженні частоти обертання валу. Випробування продовжують до викришування підшипника і одержують у такий спосіб діагностичну модель, що складається із сімейства залежностей амплітуд вібросигналів від напрацювання у вигляді кривих, характер яких залежить від початкового стану підшипникового механізму. На другому етапі вимірюють амплітуду вібросигналів на початковій стадії напрацювання, зіставляють отриману залежність вібрації від напрацювання із залежностями діагностичної моделі й оцінюють залишковий ресурс підшипника [Патент РФ №2013756, МПК⁵ G01M 13/04]. Недоліком способу є необхідність виконання кількох вимірів вібрації в міру збільшення напрацювання, що унеможливає його застосування для контролю якості виготовлення механізмів.

В основу винаходу поставлена технічна задача створення способу віброакустичної діагностики механізму, який забезпечує визначення показника надійності за результатами вимірювання початкового значення параметра вібрації знову виготовленого механізму.

Поставлена задача вирішується тим, що у відомий спосіб діагностики механізму за параметрами вібрації, який полягає в тому, що діагностику виконують у два етапи, на першому з яких формують діагностичну модель механізму, для чого задають режим роботи і вимірюють параметр вібрації навчальної сукупності механізмів, випробування яких продовжують до відмови механізмів, а на другому задають режим роботи і вимірюють параметр вібрації механізму, який діагностують, та визначають показник надійності, використовуючи отриману на першому етапі діагностичну модель, вводять нові операції на першому етапі - операції з визначення параметрів діагностичної моделі, які відображають залежність напрацювання механізму до відмови від початкового рівня вібрації механізму в смузі частот вібродіагностичної ознаки дефекту виготовлення (далі - інформаційна смуга частот), а на другому етапі - операції з визначення ймовірності безвідмовної

роботи механізму протягом заданого на-робітку за результатами вимірювання початкового рівня вібрації механізму в інформаційній смузі частот.

Технічним результатом способу віброакустичної діагностики механізму, що заявляється, є зменшення кількості вимірювань вібрації, необхідних для визначення показника надійності. Це обумовлено тим, що введення нових операцій, згідно з формулою винаходу, дає змогу за результатами випробувань навчальної сукупності механізмів встановити кількісний зв'язок між початковим рівнем вібрації механізму в інформаційній смузі частот та напрацюванням до відмови, а при діагностуванні знову виготовленого механізму визначити ймовірність безвідмовної роботи протягом заданого напрацювання за результатами вимірювання початкового рівня вібрації в інформаційній смузі частот.

Додатковою перевагою способу, що заявляється, є збільшення вірогідності діагностики, оскільки спосіб дає змогу визначити показник надійності механізму для довільного напрацювання.

Суть способу віброакустичної діагностики механізму, що заявляється, полягає в тому, що діагностику виконують в два етапи, причому на першому етапі формують діагностичну модель механізму, для чого задають режим роботи механізмів навчальної сукупності, випробування яких продовжують до відмови механізмів, і вимірюють початковий рівень вібрації механізмів в інформаційній смузі частот, а по закінченні випробувань визначають параметри діагностичної моделі за формулами

$$C_0 = \frac{\left(\sum_{i=1}^N \lg T_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^N L_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^N L_i \lg T_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^N L_i \right)}{N \left(\sum_{i=1}^N L_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^N L_i \right)^2}, \quad (1)$$

$$C_1 = \frac{N \left(\sum_{i=1}^N L_i \lg T_i \right) - \left(\sum_{i=1}^N L_i \right) \cdot \left(\sum_{i=1}^N \lg T_i \right)}{N \left(\sum_{i=1}^N L_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^N L_i \right)^2}, \quad (2)$$

$$v_m = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(T_i / 10^{C_0 + C_1 L_i - 1} \right)^2}, \quad (3)$$

де C_0 та C_1 - коефіцієнти в лінійній апроксимації стохастичної залежності логарифму напрацювання механізму до відмови від початкового рівня вібрації в смузі частот вібродіагностичної ознаки дефекту виготовлення (C_0 - стала складова, C_1 - коефіцієнт пропорційності),

i - порядковий номер механізму в навчальній сукупності,

N - кількість механізмів у навчальній сукупності,

L_i - початковий рівень вібрації i -го механізму в смузі частот вібродіагностичної ознаки дефекту виготовлення,

T_i - напрацювання i -го механізму до відмови,

V_m - вибіркове відносне середнє квадратичне відхилення напрацювання механізму до відмови від апроксимованого значення,

а на другому етапі задають режим роботи механізму, який діагностують, вимірюють початковий рівень вібрації в інформаційній смузі частот та визначають ймовірність безвідмовної роботи механізму протягом заданого напрацювання за формулами

$$B = \frac{1,126}{v_m} + \frac{0,011}{v_m^2} - 0,137, \quad (4)$$

$$A = \frac{10^{C_0+C_1L_0}}{\Gamma(1+1/B)}, \quad (5)$$

$$P(T_N) = \exp\left[-\left(\frac{T_N}{A}\right)^B\right], \quad (6)$$

де B - параметр форми закону розподілу напрацювання механізму до відмови,

A - параметр масштабу закону розподілу напрацювання механізму до відмови,

L_0 - початковий рівень вібрації в смузі частот вібродіагностичної ознаки дефекту виготовлення механізму,

Γ - символ гамма-функції,

P - ймовірність безвідмовної роботи механізму,

T_N - задане напрацювання

Спосіб віброакустичної діагностики механізму, що заявляється, ґрунтується на залежності між величиною дефекту виготовлення механізму та його напрацюванням до відмови, оскільки дефект виготовлення призводить до динамічних навантажень спряжень деталей, що, у свою чергу, прискорює зношення деталей та їх руйнацію. Викликані дефектом виготовлення динамічні навантаження супроводжуються підвищенням рівня вібрації в інформаційній смузі частот (наприклад, на частоті зубозачеплення), що є вібродіагностичною ознакою дефекту, яку виявляють методом частотної селекції.

Для апроксимації закону напрацювання механізмів до відмови використовують двопараметричний закон Вейбулла-Гнеденко [Аншгович В. Я., Гринченко А. С., Литвиненко В. Л. Надежность машин в задачах и примерах - Харьков: Око, 2001 - 320с.]

$$B = \frac{1,126}{v} + \frac{0,011}{v^2} - 0,137, \quad (7)$$

$$A = \frac{T_s}{\Gamma(1+1/B)}, \quad (8)$$

$$P(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{A}\right)^B\right], \quad (9)$$

де V - коефіцієнт варіації напрацювання механізму до відмови,

T_s - середнє напрацювання механізму до відмови,

t - напрацювання

Проаналізуємо залежність напрацювання механізму до відмови через досягнення зношенням граничного значення від початкового рівня вібрації

знову виготовленого механізму в інформаційній смузі частот

Відомо, що залежність напрацювання до відмови від узагальненого навантаження є ступеневою функцією [Анилович В. Я., Гринченко А. С., Литвиненко В. Л. Надежность машин в задачах и примерах - Харьков: Око, 2001 - 320с.]

$$T \sim 1/Q^\alpha \quad (10)$$

де T - напрацювання до відмови,

Q - узагальнене навантаження,

α - показник ступеня

Показником узагальненого навантаження спряження деталей є контактна напруга, залежність якої від діючої в спряженні деталей сили, відповідно до теорії Герца, є ступеневою функцією

$$\sigma \sim F^\gamma \quad (11)$$

де σ - контактна напруга,

F - сила,

γ - показник ступеня

Таким чином,

$$T \sim 1/F^{\alpha\gamma} \quad (12)$$

Віброзміщення механізму обмежується силою пружності і пропорційно діючій в спряженні деталей силі. Тому

$$T(S) = \frac{C}{S^{\alpha\gamma}} \quad (13)$$

де C - коефіцієнт, що характеризує стійкість матеріалу до зношення,

S - віброзміщення

Обчислимо міру пошкодження деталі відповідно до теорії лінійного накопичення пошкоджень з урахуванням того, що діюча в спряженні деталей сила змінюється з напрацюванням внаслідок збільшення зазору в спряженні деталей

$$M(t) = \int_0^t \frac{dt}{T(S(t))} \quad (14)$$

де M - міра пошкодження

Зміну логарифмічного рівня вібрації з напрацюванням апроксимують лінійною залежністю [Попков В. К., Мышинский Э. Л., Попков О. Н. Виброакустическая диагностика в судостроении - Л.: Судостроение, 1989 - 257с.]

$$L(t) = L_0 + k_v t \quad (15)$$

$$S(t) = S_0 10^{k_v t / 20}, \quad (16)$$

де L - рівень вібрації в інформаційній смузі частот,

S_0 - початкове віброзміщення в інформаційній смузі частот,

k_v - швидкість зростання рівня вібрації

Відомо також, що діагностичною ознакою досягнення механізмом граничного стану є перевищення рівня вібрації над початковим рівнем на певну величину [ІСО 2372-74 Станки. Правила оценки механической вибрации при рабочих скоростях от 10 до 200 об/с. Введ. 01.06.71 - М.: Изд-во стандартов, 1971 - 13с.]. Отже,

$$K_v = \frac{\Delta L}{T} \quad (17)$$

де ΔL - перевищення рівня вібрації над початковим рівнем, яке є ознакою досягнення граничного стану

Обчислимо міру пошкодження, відповідну граничному стану вузла

$$M(T) = \int_0^T \frac{dt}{T(S(t))} = \int_0^T C S_0^{\alpha \gamma} \cdot 10^{\Delta L \alpha \gamma t / 20 T} dt =$$

$$= S_0^{\alpha \gamma} T \frac{20 C}{\Delta L \alpha \gamma \ln 10} \left(e^{\Delta L \alpha \gamma \ln 10 / 20} - 1 \right) \approx C S_0^{\alpha \gamma} T. \quad (18)$$

За визначенням, $M(T) = 1$. Таким чином,
 $T \sim 1/S_0^{\alpha \gamma}$ (19)

Отже, залежність середнього напрацювання механізму до відмови від початкового рівня вібрації має вигляд прямої у логарифмічних координатах. Тому результати випробувань навчальної сукупності механізмів слід вирівнювати за допомогою функції виду

$$\lg(T) = C_0 + C_1 L_0 \quad (20)$$

Коефіцієнти C_0 та C_1 визначають методом найменших квадратів за формулами (1, 2)

Середній наробіток механізму до відмови, відповідний початковому рівню вібрації L_0 , визначають згідно (20) за формулою

$$T_s(L_0) = 10^{C_0 + C_1 L_0} \quad (21)$$

Згідно (21), коефіцієнт варіації напрацювання до відмови механізмів з однаковим початковим рівнем вібрації не залежить від початкового рівня вібрації. Оцінкою коефіцієнта варіації напрацювання до відмови є вибіркове середнє квадратичне відношення відхилення напрацювання механізму до відмови від обчисленого згідно (21) середнього напрацювання до відмови механізмів із відповід-

ним початковим рівнем вібрації

$$v_m = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{T_i - T_s(L_i)}{T_s(L_i)} \right)^2} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(T_i / 10^{C_0 + C_1 L_i} - 1 \right)^2} \quad (22)$$

Параметр форми закону розподілу напрацювання механізму до відмови визначають через коефіцієнт варіації напрацювання механізму до відмови згідно (7)

Підставляючи (21) в (8), визначимо параметр масштабу закону розподілу напрацювання механізму до відмови

$$A = \frac{10^{C_0 + C_1 L_0}}{\Gamma(1 + 1/B)} \quad (25)$$

За визначеними параметрами закону розподілу напрацювання механізму до відмови визначають ймовірність безвідмовної роботи протягом заданого напрацювання за формулою (9)

Таким чином, визначення параметрів діагностичної моделі механізму за формулами (1 - 3) за результатами випробувань навчальної сукупності механізмів дає змогу на етапі діагностування знову виготовленого механізму визначити ймовірність безвідмовної роботи протягом заданого напрацювання за формулами (5 - 8) за результатами вимірювання початкового рівня вібрації механізму в інформаційній смузі частот, що і є вирішенням технічної задачі, поставленої в основу винаходу