

ВИБІР МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА ЛОКАЛІЗАЦІЇ ДЕФЕКТІВ ОБ'ЄКТІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Мета. Головною метою проведеного дослідження було вирішення задач адаптивного управління ресурсом машини на основі використання у реальному часі з формуванням гнучких регламентів обслуговування, об'єм і зміст яких адекватний технічному стану механізму.

Методи дослідження. Для вирішення цього завдання використано методи ідентифікації дефектів, прогнозування динаміки зміни технічного стану обладнання та практичного використання програм адаптивного керування надійністю обладнання «за станом», методи обробки випадкових процесів і математичної статистики, а також, аналіз літературних і патентних джерел, наукове узагальнення раніше виконаних досліджень.

Наукова новизна. Показано, що вибір методів ідентифікації дефектів потрібно виконувати з врахуванням рівня їх достовірності і наявних недоліків і переваг практичного застосування.

Практична значимість. Мета дослідження досягається шляхом поєднання методів ідентифікації дефектів складних об'єктів та локалізації їх розташування у реальному часі у програмах експлуатації з метою вибору найбільш придатних для діагностичного моніторингу конструктивно щільних систем з наявністю певної множини близько розташованих типових конструктивно подібних елементів, при умові безрозбірної ідентифікації у режимі реального часу його технічного стану і без виводу з експлуатації, що створить умови адекватності у визначенні регламентів та змісту технічного обслуговування та ремонту (ТОіР). Проведені дослідження і їх результати забезпечують теоретичне обґрунтування застосування і технічної реалізації спрощених алгоритмів діагностичної локалізації дефектів технічного стану, що сприяє підвищенню ефективності процесів експлуатації.

Результати. Доведено, що діагностичний моніторинг технічного стану обладнання доцільно проводити засобами систем технічної діагностики. Саме такий спосіб гарантує забезпечення прийнятної достовірності результатів, мінімальні витрати часу і мінімальну вартість визначення параметрів технічного стану.

Ключові слова: технічна діагностика, визначення технічного стану, ідентифікація дефектів, режим реального часу, промислове обладнання, математична модель.

doi: 10.31721/2306-5451-2022-1-55-82-88

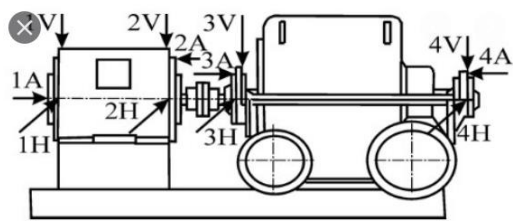
Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Визначення методів локалізації дефектів об'єктів експлуатації, у реальному часі, як наступної операції у програмах ідентифікації дефектів складних об'єктів експлуатації з метою вибору найбільш придатних для діагностичного моніторингу конструктивно щільних систем з наявністю певної множини близько розташованих типових конструктивно подібних елементів, при умові безрозбірної ідентифікації у режимі реального часу його технічного стану і без виводу з експлуатації, що створить умови адекватності у визначенні регламентів та змісту технічного обслуговування та ремонту (ТОіР).

Аналіз досліджень і публікацій. В останніх публікаціях зусилля дослідників зосереджено у напрямі визначення способу діагностичного розпізнавання технічного стану приводу на підставі найбільш достовірних методів ідентифікації дефектів [5, 6].

Вибір методів ідентифікації дефектів потрібно виконувати з врахуванням рівня їх достовірності і наявних недоліків і переваг практичного застосування [6]. Типові схеми розміщення місць зняття діагностичної інформації (місць розташування датчиків) не враховують відстань до місця розташування дефекту у механізмі, через що рівень сигналу може бути ослабленим, а діагностична класифікація технічного стану запізнюю (рис.1).

Постановка задачі. Вирішення задач адаптивного управління ресурсом машини на основі використання у реальному часі з формуванням гнучких регламентів обслуговування, об'єм і зміст яких адекватний технічному стану механізму.

Мета досягається шляхом поєднання методів ідентифікації дефектів складних об'єктів та локалізації їх розташування у реальному часі у програмах експлуатації з метою вибору найбільш придатних для діагностичного моніторингу конструктивно щільних систем з наявністю певної множини близько розташованих типових конструктивно подібних елементів, при умові безрозбірної ідентифікації у режимі реального часу його технічного стану і без виводу з експлуатації, що створить умови адекватності у визначенні регламентів та змісту технічного обслуговування та ремонту (ТОіР).



ГОСТ ІСО 10816-1				
V(к), мм/с	кл. 1	кл. 2	кл. 3	кл. 4
45,00				D
28,00		D	D	D
18,00	D			C
11,20			C	
7,10		C		B
4,50	C		B	
2,80		B		
1,80	B			A
1,12			A	
0,71		A		
0,45	A			
0,28				
A	Нові агрегати			
B	Дозволена експлуатація довго			
C	Дозволена експлуатація не довго			
D	Агрегат пошкоджено			

Рис. 1. Типові схеми розміщення місць зняття діагностичної інформації (місць розташування датчиків)

Виклад матеріалу та результати. Визначення множини можливих станів машин шляхом безпосереднього вимірювання параметрів станів $S_1(t), S_2(t), \dots, S_n(t)$ називається діагностикою в просторі станів. Як показує практика, у більшості випадків вимірювання станів приводу є технічно неможливим, або економічно недоцільним, при реалізації прийнятих принципів діагностування. Тим більше, що діагностика у просторі станів не дає відповіді про причини погіршення стану і розпізнавання та ідентифікацію цих причин. Це ускладнює перспективу глибокої діагностики технічного стану, так як фактично $S_i(t) = f\{D_1, D_2, \dots, D_m\}$, де D_i – множина дефектів і пошкоджень, що викликають зміну стану будь якого елементу приводу.

На підставі веденого аналізу встановлено, що найбільш чутливою реакцією на появу дефектів стану є зміна рівня і характеру коливального збудження електричної машини, стає можливим визначати стан приводу за результатами побічних вимірювань параметрів вібрації в доступних для контролю місцях. При цьому машина стає контроледоступною $X_i(t) = R(S) S_i(t)$, де $R(S)$ – передавальна функція механізму, що показує закономірність перетворення параметрів технічного стану в параметри діагностичного сигналу $X_i(t)$. Розпізнавання $S_i(t)$ станів приводу відбувається при визначенні оптимального класу параметрів стану, або класу діагностичних параметрів $X_i(t)$, тобто $S_i(t) = X_i(t) \in \{x_1, \dots, x_m\}$, де $\{x_1, \dots, x_m\}$ – параметри діагностичних сигналів X_1, X_2, \dots, X_m , що можуть бути виміряні безпосередньо. Вибір на користь побічних методів контролю технічного стану можливий лише в тому випадку, якщо вибрані діагностичні ознаки і параметри дозволяють встановити зв'язок технічного стану з діагностичним параметром $R(S)$, близький до детермінованого, що забезпечується за умови сильної залежності параметра від стану об'єкту і слабкої – від зовнішніх умов. В дослідженнях адекватності комплексів діагностичних ознак відповідному стану технологічного і енергетичного обладнання [6] і встановлено достатність підстав для визнання залежність $R(S)$ детермінованою.

Метод вирішення діагностичної задачі, тобто визначення поточного технічного стану приводу за результатами контролю сукупності ознак $X_i(t) \in \{x_1, \dots, x_m\}$, називається діагностикою в просторі ознак, де $S_i(t)$ визначається певною множиною $[X]^n(t)$ ознак стану $S_i(t)$, що задовольняє точність визначення стану. При незабезпеченні точності діагностування за допомогою множини $[X]^n(t)$ віброакустичних ознак стану $S_i(t)$, діагностична множина ознак $[X]^n(t)$ доповнюється ознаками іншої природи (наприклад параметри струму, живлення, ізоляції, температури, тощо). Метод діагностики в просторі ознак прийнято як основний при діагностичному забезпеченні експлуатаційних властивостей приводу функціональними методами (віброакустичними), без зупинки і без розбирання. Прогнозування ресурсу, планування регламентів ТОiP забезпечується шляхом порівняння поточного значення $S_i(t)$ із еталонним і граничним станами, визначенні параметрів тренду $S_i(t)$.

В окремих випадках діагностування (10%), коли точність розпізнавання технічного стану об'єкту є незадовільною, використовують альтернативні до методу діагностики в просторі ознак, статистичні методи діагностики.

Статистичні методи діагностики [6] засновані на розділенні простору діагностичних сигналів $[X]^n(t)$ на класи, що характеризують справні і несправні стани об'єктів діагностики. Задачею діагностики є розпізнавання станів шляхом оцінки ймовірності визначення стану $P\{S_i(t)\}$ за да-

ними вектору діагностичного сигналу, тобто $P[S_i(t) = X_i(t) \in \{x_1, \dots, x_m\}] \geq P_{\text{доп}}$, і віднесення до одного з класів за умови, що вірогідність такого вирішення не повинна бути нижче заданого значення $P_{\text{доп}}$. Такий напрям вирішення задачі носить назву статистичної класифікації станів. Цей метод може розширити свої інформаційні можливості при великому числі діагностичних параметрів і класів станів об'єкту для визначення причин відмови і прогнозування стану об'єкту за допомогою логічних методів діагностики. На практиці застосування методу класифікації станів ускладнюється потребою у проведенні значної кількості діагностичних процедур (статистично значущих масивів), для гарантії прийнятних рівнів $P_{\text{доп}}$, і може бути доцільним лише для окремих випадків.

Розробка методичних засад локалізації та розпізнавання дефектів на підставі використання інваріантного до виду (неградаційного процесу, конструкції об'єкта експлуатації) інтегрального діагностичного сигналу

Практика застосування методів ідентифікації дефектів використовує обмеження, що це можливо лише в доступних для контролю місцях (рис.2).

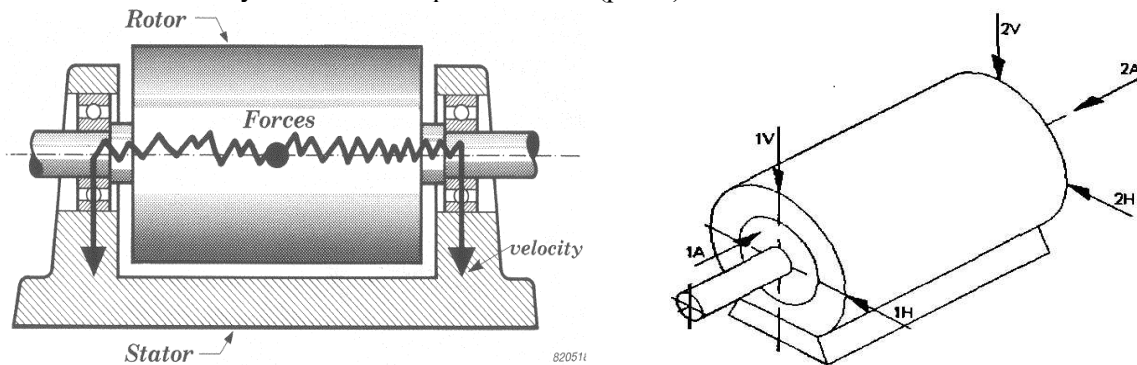


Рис.2. Схеми просторового рознесення місця зародження і фіксації наявності дефекту

Найбільш оперативна, проста діагностична ідентифікація дефекту забезпечується наявністю інформації оцінки про коливальне збудження машини від дії дефекту (рис. 3).

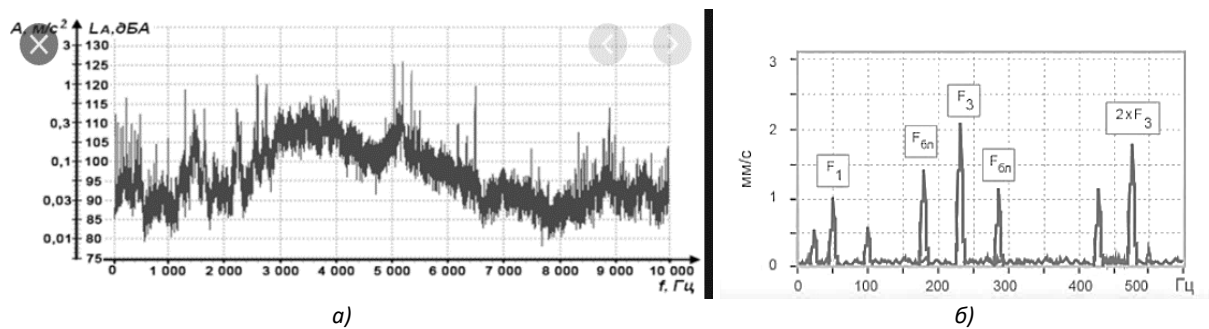


Рис.3. Діагностична інформація для класифікації дефекту

Коливальне збудження від дії дефекту проходить від точки зародження до точки фіксації певний шлях (рис.2), що обумовлює перекручення і втрату інформації через опір середовища проходженню хвиль.

Через це в умовах безрозбірної діагностики потрібно для задачі локалізації дефекту досліджувати вібраційне поле, яке утворюється від дії коливального збудження (рис.4).

Рівняння коливань i -ї точки зони збудження від дії дефектів, як наслідків деградаційних процесів, складається на основі загальних для коливальних систем методів. Коливальні збудження від впливу дефектів механізму можуть бути описані диференціальними рівняннями або рівняннями що приводяться до лінійних (для незначних коливань). Ці рівняння описуються на основі законів Ньютона або Д'аламбера, що представляють при поступальних коливаннях рівність нулю геометричної суми сил реакції зв'язків і інерційних сил в будь-якій точці коливальної системи.

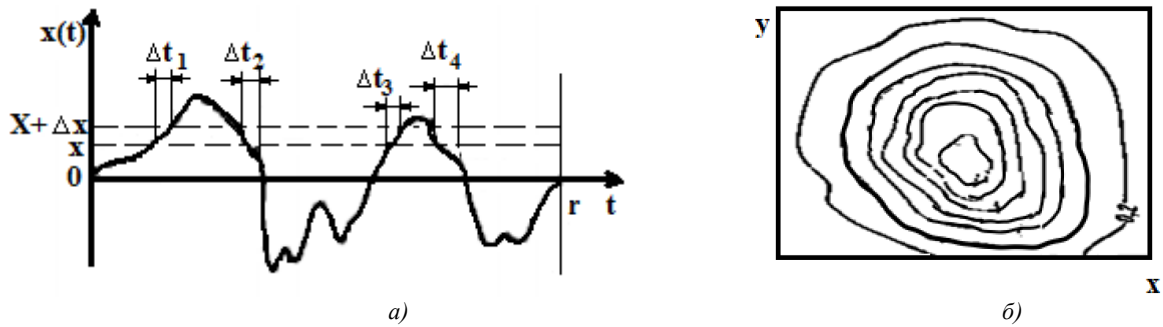


Рис. 4. Дослідження вібраційного поля: а - форма діагностичного сигнал; б - топографія вібраційного поля від дії дефекту

Поява дефектів на різних стадіях їх існування (зародження, розвиток, катастрофічний вплив) має одну особливість: вони не змінюють динамічну рівновагу елементів механізмів, але відповідно принципу Д'аламбера змінюють енергетичний рівень процесів взаємодії цих елементів від появи примусових сил від дії відповідних дефектів

$$[m - \Delta m]a(t) + [r - \Delta r]v(t) + [c - \Delta c]x(t) = F_0 + F_1(t),$$

де $\Delta m = F_4 a / a(t)$ – зміна масових характеристик ланок механізмів від дії дефектів; $\Delta r = F_3 v / v(t)$ – зміна дисипативних характеристик ланок механізмів від дії дефектів; $\Delta c = F_2 x / x(t)$ – зміна характеристик жорсткості ланок механізмів від дії дефектів.

При цьому a , v , x параметри коливальних рухів (відповідно прискорення, швидкість, переміщення) ланок механізмів обумовлених коливальними силами $F_{i=(2,3,4)}$ – від дії дефектів, F_0 – узагальнена сила, що врівноважує механізм (при відсутності дефектів); F_1 – додаткова узагальнена сила, що врівноважує механізм (при наявності дефектів). Примусові сили, що обумовлені появою дефектів, прискорюють процеси спрацювання обладнання.

Розкриття природи примусових сил $F_{i=(2,3,4)}$ і в першу чергу в енергетичній площині, може дати відповідь про умови вибору уніфікованого, інформативного методу локалізації і розпізнавання дефектів і як наслідок мінімізації швидкості спрацювання ресурсу обладнання.

Визначення і пояснення появи примусових сил $F_{i=(2,3,4)}$ від дії конструктивно-технологічних дефектів та пошкоджень механічних вузлів можливо на підставі аналізу породженої ними коливальної активності зони збудження. Характер коливальної активності можна сприймати як динамічні реакції системи механізмів технологічного обладнання, які контролюються засобами діагностичного контролю. Для локалізації дефекту і визначення процесів спрацювання, що їх породжують, потрібно використати характеристики коливань i -ї точки, і розглянути рівняння цих коливань, де координати коливань i -ї точки відповідають узагальненим координатам точки зняття інформації.

Опис коливального руху механізму у прийнятій точці контролю є недостатнім для ідентифікації і локалізації дефекту, розуміння темпів його зростання. Точка локалізації може бути встановлена при дослідженні закономірностей змін у вібраційному полі за критерієм визначення зон приросту енергії від дії дефекту. Це можливо встановити за допомогою коливань, які можуть бути описані рівнянням Лагранжа. Рівняння Лагранжа можна записати в узагальнених координатах

$$\sum_{i=1}^s (a_{ij} q_i + b_{ij} \dot{q}_i + c_{ij} q_i) = Q_i,$$

де q_i – узагальнені координати, що однозначно визначають положення системи; Q – узагальнена сила, що діє в напрямі i -ї координати; s – число мір свободи; узагальнена сила Q_i – є результуюча діючих в коливальній системі сил: змушуючих $f_i(t)$; потенційних $Q_{ni}(t) = -\frac{\partial W_n}{\partial q_i}$, де (W_n – потенційна енергія системи); дисипативних $Q_{vi} = -b q_i$ (b – коефіцієнт втрат).

Тобто як система S лінійних диференціальних рівнянь 2-го порядку відносно S узагальнених координат.

Локалізація дефекту обумовлена локальними змінами енергетичних характеристик вібраційного поля машини в зоні дії дефекту

$$\frac{d\partial W_k}{dt\partial q_i} - \frac{\partial W_k}{\partial q_i} = Q_i \quad (i = 1, 2, \dots, s),$$

де W_k – кінематична енергія системи; q_i – узагальнені координати, що однозначно визначають положення системи.

З позицій логіки, напрям зміни енергетичних зон вібраційного поля, від точки контролю (координати i -ї точки) можна відстежити за зміною координат коливального руху у трьох-вимірному просторі (при якому узагальнені координати джерела коливань залишаються незмінними).

Для вибору характеристик коливального руху, що визначають енергетичні показники коливального руху та зміщення зон коливальної активності у вібраційному полі машини потрібно скористатись умовою динамічної рівноваги матеріальної точки механізму.

У коливальних системах, що розглядаються, змушуючи сили є гармонічними (тобто описують коливання поза зонами резонансу). Підстановка виразів q_i та їх похідних у це рівняння дає систему алгебраїчних рівнянь відносно амплітуд коливань [5]. Аналіз складових цього рівняння може пояснювати основні закономірності розвитку дефектів та пошкоджень.

При малих коливаннях від дії дефектів та пошкоджень, кінетична енергія системи, що містить зосереджену масу m_k ($k = 1, 2, \dots, n$), є квадратичною функцією їх швидкостей.

$$W_k = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n m_r v_k^2 = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n m_k (x_k^2 + y_k^2 + z_k^2),$$

де v_k – швидкість руху k -ї маси; x_k, y_k, z_k – проекція вектора швидкості v_k – у декартових координатах.

Радіус-вектор k -ї точки коливальної системи зі стаціонарними зв'язками, що має n мір свобод, є функцією узагальнених координат q_i системи. Координати x_k, y_k, z_k можуть представитися функціями $x_k = x_k(q_1, \dots, q_s)$, $y_k = y_k(q_1, \dots, q_s)$, $z_k = z_k(q_1, \dots, q_s)$. З урахуванням того, що

$$X_k = (\partial x_k / \partial q_1) q_1 + \dots + (\partial x_k / \partial q_s) q_s,$$

де $q_i = \partial q_i / dt$ (для y_k і z_k аналогічно), вираження кінетичної енергії в узагальнених координатах має вид)

$$W_k = (1/2)(a_{1,1}q_1^2 + \dots + a_{ss}q_s^2 + 2a_{1,2}q_1q_2 + \dots + 2a_{s-1}q_{s-1}q_s),$$

де $a_{ij} = a_{ji} = \partial^2 W_k / \partial q_i \partial q_j$ – коефіцієнти інерції, що визначаються масою (моментами інерції) елементів або що є їх функціями. Таким чином, кінетична енергія при малих коливаннях – це квадратична функція узагальнених швидкостей системи. Аналогічно потенційна енергія цієї системи є квадратичною функцією самих узагальнених координат q_i

$$W_n = (1/2)(c_{1,1}q_1^2 + \dots + c_{ss}q_s^2 + 2c_{1,2}q_1q_2 + \dots + 2c_{s-1}q_{s-1}q_s),$$

де $c_{ij} = c_{ji} = \partial^2 W_n / \partial q_i \partial q_j$ – коефіцієнти жорсткості системи. Для систем із загасанням коливань, зумовлених силами опору Q_{vi} пропорційними швидкостям V_i системи, вводиться дисипативна функція втрат (функція розсіювання), яка також є квадратичною функцією узагальнених швидкостей

$$\Phi = (1/2)(b_{1,1}q_1^2 + \dots + b_{ss}q_s^2 + 2b_{1,2}q_1q_2 + \dots + 2b_{s-1}q_{s-1}q_s),$$

де $b_{ij} = b_{ji}$ – коефіцієнти втрат.

Таким чином, у тримірному вібраційному полі (рис.5), за напрямом і величиною приросту показників швидкості коливальних рухів i -ї точки поля, що змінюється від дії узагальнюючих сил за рівнянням Лагранжа (зміна вектору і величини Q_i) можлива локалізація дефектів та пошкоджень при умові використання інваріантного інструменту для оцінки впливу деградаційних процесів різної природи на технічний стан машини.

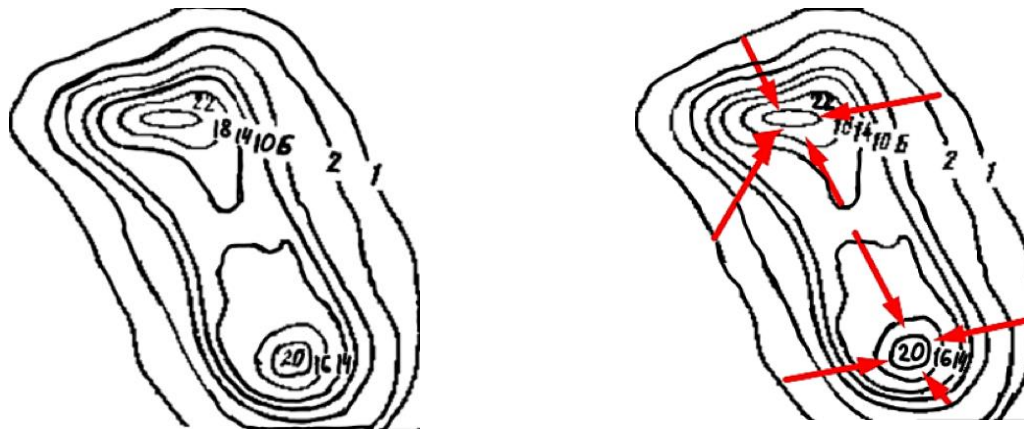


Рис. 5. Схема локалізації дефекту за напрямом до зон концентрації енергетичного збудження

Висновки та напрямок подальших досліджень:

1. Проведені дослідження і їх результати забезпечують теоретичне обґрунтування застосування і технічної реалізації спрощених алгоритмів діагностичної локалізації дефектів технічного стану за рахунок використання закономірностей змін у топографії вібраційного поля за критерієм визначення зон приросту енергії від дії дефекту.

2. Найбільша діагностична достовірність досягається при скануванні 3D рельєфу топографії вібраційного поля вздовж осі роторної машини встановлюючи напрям зміни енергетичних зон вібраційного поля.

3. Для ідентифікації та локалізації дефектів і пошкоджень об'єкту експлуатації достатньо застосовувати інваріантні стандартні векторні параметри (віброшвидкість) для оцінки впливу деградаційних процесів різної природи на технічний стан машини, але у тримірному вібраційному полі, за напрямом і величиною приросту показників швидкості коливальних рухів i -ї точки поля, що є пропорційним енергії деградаційних процесів в елементах об'єкту експлуатації.

4. Проведені дослідження сприяють підвищенню ефективності процесів експлуатації шляхом запобігання втрати працездатності завдяки діагностичному моніторингу технічного стану, де методи технічної діагностики побудова ні на рельєфній ідентифікації енергетичних зон вібраційного поля, що гарантує забезпечення прийнятної достовірності результатів, мінімальні витрати часу і мінімальну вартість визначення параметрів технічного стану на умовах використання уніфікованих параметричних моделей надійності з вибором узагальнюючого параметра технічного стану інваріантного до фізичної природи деградаційних процесів (дефектів), конструктивної будови і властивостей об'єкта експлуатації обладнання.

Список літератури

1. Тараканов К.В., Овчаров Л.А., Тыришкин А.Н. Аналитические методы исследования систем. - М.: Сов. Радио, 1974. - 240 с.
2. Дедков В.К., Северцев Н.А. Основные вопросы эксплуатации сложных систем. -М.: Высшая школа, 1976. - 406 с.
3. Калиткин Н.Н. Численные методы. - М.: Наука, 1978. - 512 с.
4. Надежность и долговечность машин. / Под ред. Костецкого Б.И. К.: Техника, 1975. - 273 с.
5. Генкин М.Д, Соловьева А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. - М.: Машиностроение, 1987 -288 с.
6. Кіяннівський М.В. Діагностичне забезпечення технічного обслуговування та ремонту (ТОіР) гірничо-металургійного обладнання. Навчальний посібник. Кривий ріг. Видавництво ДВНЗ КНУ «Мінерал». 2016. С. 364.
7. Пономарев А. Н. О возможности применения виброакустических методов для диагностирования элементов автоматки пневмогидравлических систем питания ракет-носителей / А. Н. Пономарев, А. В. Сичевой // Проблемы высокотемпературной техники. – Дніпропетровськ. – 2001. – С. 103–106.
9. Сичевой А. В. Разработка концепции диагностирования исходного технического состояния элементов автоматки пневмогидравлических систем РН / А. В. Сичевой, А. Н. Пономарев // Космічна наука і технологія. – Київ. – 2002. – Вип. 8, №1, додаток. С. 36–40. <https://doi.org/10.15407/knit2002.01s.036>
10. С. М. Harris, and A. G. Piersol. Harris' shock and vibration handbook, vol. 5. New York: McGraw-Hill, 2002.
11. Е. О. Zaitsev, V. E. Sydorhuk, and A. N. Shpilka. "Application of the spectrum analysis with using Berg method to developed special software tools for optical vibration diagnostics system", Devices Methods Meas., vol. 7, no. 2, pp. 186-194, 2016.

Рукопис подано до редакції 12.10.2022