

**Р.П. МИГУЩЕНКО**, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»;  
**О.Ю. КРОПАЧЕК**, канд. техн. наук, доц., НТУ «ХПІ»;  
**М.П. АРТЬОМОВ**, канд. техн. наук, доц., ХНТУСГ ім. П.Василенка,  
Харків

## **ОДНОПАРАМЕТРОВИЙ КОНТРОЛЬ СТАНУ ДИНАМІЧНИХ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ТЕСТОВИХ СТАТИСТИК**

Розглянуті питання оцінки ефективності однопараметрового контролю функціонального стану вібраційних промислових об'єктів за вібросигналами їх вузлів при допомозі тестових  $Q$ -статистик. При оцінці отримані і досліджені характеристики вимірювального вібросигналу, що забезпечує інформаційну складову для контролю; розроблено та проаналізовано методичний базис для оцінки стану промислових динамічних об'єктів за їх вібраційними характеристиками; розроблені і досліджені однопараметрові моделі інформаційного вібросигналу.

**Ключові слова:** вібраційні характеристики, тестові статистики, динамічні об'єкти, контроль стану.

**Постановка проблеми.** Відомо, що одним з найбільш ефективних способів оцінки поточного функціонального стану більшості промислових об'єктів та його вузлів є визначення стану цих об'єктів за вібраційними процесами, що їх супроводжують. При цьому, важливою задачею контролю або альтернативної діагностики стану складних промислових об'єктів є виконання цієї задачі в динаміці, в режимі реального часу. Неперервний контроль в режимі реального часу дозволяє оптимізувати технологічні процеси в об'єктах, формувати уставки для систем управління, здійснювати неперервну індикацію стану вузлів, вчасно отримувати інформацію про аварійні ситуації в обладнанні тощо.

Неперервний контроль чи альтернативна діагностика стану динамічних промислових об'єктів в реальних виробничих умовах стикається з суттєвим впливом зовнішніх збурень, які пов'язані з різноманітністю режимів контрольованих об'єктів, та зовнішніми дестабілізуючими факторами. Такі збурення призводять до того, що робоча точка, яка відповідає стану контрольованого об'єкту, може змінювати своє положення в просторі інформативних ознак [1]. Причому такі зміни в реальних виробничих умовах, особливо коли об'єкти характеризуються малими постійними часу та транспортними запізненнями, можуть бути досить частими. Визначення дійсного стану об'єкту пов'язане з виконанням відповідної статистичної обробки вібросигналу. При виконанні прикладних задач контролю стану в інженерній практиці найбільш уживаними є одномодельні статистики [2]. Одномодельні статистики як параметри контролю змін спектральних характеристик інформаційних сигналів найбільш прийнятні у випадках, коли час спостереження обмежено триваліс-

тю перехідних процесів, що несуть інформацію про вигляд стану об'єкта контролю [3]. У цьому випадку ймовірнісна модель сигналу є випадковим процесом, який періодично нестационарний за дисперсією і за спектральною щільністю [4].

**Мета статті** полягає у визначенні ефективності однопараметрового контролю функціонального стану вібраційних промислових об'єктів за вібросигналами їх вузлів при допомозі тестових  $Q$ -статистик.

**Теоретичні засади.** Вібраційні процеси, які досліджуються в даній статті, є процесами нестационарними за спектральною щільністю і характеризуються зміною своїх частотних властивостей у часі. У цьому випадку загальна потужність випадкового процесу (дисперсія процесу) може залишатися практично незмінною, що накладає певні обмеження на вибір тестових статистик. Зміна частотних властивостей вібраційного процесу  $X(t)$  знаходить своє відображення в зміні нормованої автокореляційної функції  $R(\tau)$ . Оскільки остання пов'язана з енергетичним спектром (*теорема Вінера-Хінчина* [5]), виявлення змін автокореляційної функції зручно проводити за допомогою  $Q$ -статистик, які функціонально залежать від інтервалу кореляції  $\tau_0$ , що розділяє практично некорельовані один з одним відліки вібраційного процесу  $X(t)$ .

Відомо [4], що оцінкою інтервалу кореляції  $\tau_0$  є подвоєний середній інтервал між нулями реалізації  $x(t_i)$  процесу  $X(t)$ . Якщо скористатися методом тимчасової дискретизації для визначення щільності розподілу ймовірності між нулями стаціонарного нормального випадкового процесу, припускаючи, що стан об'єкта контролю –  $S_0$ , то можна замінити реалізації процесу  $x(t_i)$  послідовністю опорних імпульсів однакової тривалості

$$\Delta t = \frac{1}{2F_m}, \quad (1)$$

де  $F_m$  – максимальна частотна складова вібросигналу  $X(t)$ .

Вводячи умову статистичної залежності між імпульсами, розділеними інтервалом, не більше ніж  $2\Delta t$  (1), скористаємося наближеним виразом для розподілу інтервалів  $\tau_0$  між нулями стаціонарного центрованого процесу з автокореляційною функцією  $R(\tau)$  [5]:

$$P(\tau_0) = \frac{2 \arccos R(\tau_0) - \arccos R(2\tau_0)}{2 \arccos R(\tau_0)}.$$

Оскільки в експериментальній практиці мають справу з оцінками нормованої автокореляційної функції, то за величину  $\tau_0$  беруть інтервал відповідно до умови:

$$R(\tau_0) \approx R(2\tau).$$

У цьому випадку встановлюється ймовірність  $P(\tau_0) = 0.5$ , що відповідає такому вибору інтервалу дискретизації  $\Delta t$ , коли кількість перетинів вібро-сигналу нульового рівня  $n_1$  в два рази менше, ніж кількість відліків  $n_2$  процесу  $x(t_i)$  на інтервалі спостереження  $T$ .

Позначимо ймовірність зміни знака реалізації центрованого процесу  $X(t)$  як

$$q = \frac{n_1}{n_2}.$$

Тоді статистичні моменти ймовірності  $q$  визначаються наступним чином:

$$\left\{ m_q = q; D_q = \sqrt{\frac{q(1-q)}{n_2}} \right.$$

Введемо статистику виявлення зміни частоти перетину нульового рівня процесом  $X(t)$ :

$$Q = \frac{q - m_q}{\sqrt{D_q}}.$$

Якщо в стані  $S_0$  виконується умова  $n_2 = 2n_1$ , то нормована статистика

$$Q = \frac{q - 0.5}{0.5} \sqrt{n_2}$$

має симетричне біноміальне розподілення з нульовим середнім значенням і одиничною дисперсією:

$$\left\{ m_Q^{(0)} = 0; D_Q^{(0)} = 1 \right.$$

Зміна інтервалу кореляції внаслідок переходу контрольованого об'єкта з базового стану  $S_0$  в новий  $S_1$  міняє ймовірність зміни знаку в  $q$ . Якщо ймовірність для нового стану об'єкта позначити як  $q_1$ , то середнє і дисперсія  $Q$ -статистики стануть відповідно:

$$\left\{ m_Q^{(1)} = \frac{q_1 - 0.5}{0.5} \sqrt{n_2}; D_Q^{(1)} = 4q_1(1 - q_1) \right.$$

При виконанні умови  $n_1 q > 10$  [6], умовні щільності розподілення  $Q$ -статистики для станів  $S_0$  і  $S_1$  можуть бути замінені нормальними розподіленнями:

$$\left\{ f(Q/S_0) \sim N(0,1); f(Q/S_1) \sim N\left(\frac{q_1 - 0.5}{0.5} \sqrt{n_2}, 4q_1(1 - q_1)\right) \right.$$

Ймовірності помилок першого  $\alpha$  і другого  $\beta$  роду при використанні  $Q$ -статистик для виявлення зміни інтервалу кореляції, а отже, і нормованої спектральної щільності процесу  $X(t)$ , визначаються наступним чином:

$$\left\{ \alpha = 1 - 2\Phi\left(U_{\alpha/2}\right); \beta = \Phi_0\left(\frac{U_{\alpha/2} - m_Q^{(1)}}{\sqrt{D_Q^{(1)}}}\right) - \Phi_0\left(\frac{-U_{\alpha/2} - m_Q^{(1)}}{\sqrt{D_Q^{(1)}}}\right), \right. \quad (2)$$

де  $\Phi_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-t^2/2} dt$  – нормована функція Лапласа [6];  $U_{\alpha/2}$  – процентна точка нормованого розподілення для заданого рівня значущості  $\alpha$ .

**Експериментальні дослідження.** Проаналізуємо ефективність застосування  $Q$ -статистик при однопараметровому контролі змін спектральної щільності вібросигналу.

Ефективність тестових  $Q$ -статистик, як інформаційних параметрів, була перевірена експериментально на вібросигналах з двигуна автомобіля ГАЗ. Були оцінені кількісні дані тестових  $Q$ -статистик при насильній зміні режимів роботи двигуна відносно його заданого базового стану  $S_0$ . Нові стани двигуна автомобіля сформуvalи вектор:

$$\left(S_1, S_2, S_3, S_4\right).$$

Таблиця 1 – Числові характеристики  $Q$ -статистик

Характеристики $Q$ -статистик	$S_0$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$
$q$	0.5	0.383	0.356	0.312	0.274
$m_Q$	0	-1.878	-2.521	-2.634	-3.985
$\sqrt{D_Q}$	1	0.964	0.953	0.945	0.868

При цьому, використовувався ємнісний перетворювач вібрації з вимірюванням віброприскорень в трьох геометричних координатах:

- $X_k$  – поздовжня вісь відносно руху;
- $Y_k$  – поперечна вісь відносно руху;
- $Z_k$  – вертикальна вісь,

який встановлювався безпосередньо на двигун автомобіля.

За даними експерименту авторами були отримані нормовані дані вібро-сигналів, які відповідають станам  $S_0 \div S_4$ , проаналізовані спектральні властивості вібро-сигналів шляхом побудови вейвлет-зображень та їх автокореляційних функцій.

При аналізі вібро-сигналів на основі  $Q$ -статистик враховувався періодичний характер нестационарності процесу  $X(t)$  і використовувались максимальні значення статистик  $Q$  при фіксованому розмірі часового вікна ідентифікації моделі  $T = 2.32$  сек. та інтервалі дискретизації  $\Delta t = 5 \cdot 10^{-2}$  сек.

У табл. 1 наведені значення ймовірностей переходу через нуль центрованого вібросигналу, а також його числові характеристики (середнє  $m_Q$  і середнє квадратичне відхилення  $\sqrt{D_Q}$ )  $Q$ -статистик для базового  $S_0$  і чотирьох насильно введених режимів об'єкту  $S_1 \div S_4$ .

Важливою оцінкою одинірних статистик є їх потужність  $\gamma_{0j} = 1 - \beta_{0j}$  при переході об'єкту контролю зі стану  $S_0$  в стани  $S_j$  ( $j = \overline{1, 4}$ ), а також ймовірність помилки ідентифікації при перевірці *основної гіпотези*  $H_0$  і *альтернативної гіпотези*  $H_j$  ( $j = \overline{1, 4}$ ) при рівні значущості  $\alpha = 0.05$ .

В табл. 2 представлені результати обчислень потужності і ймовірності помилки за (2) критеріальних  $Q$ -статистик при виявленні змін кореляційних властивостей вібросигналу  $X(t)$  при парній перевірці основної і однієї з конкуруючих гіпотез.

Як видно з табл. 2 ймовірності помилок однопараметрового контролю по  $Q$ -статистикам досить суттєві (мінімум в три рази більше заданого рівня значущості ( $\alpha = 0.05$ )).

Таблиця 2 – Дані потужності та ймовірності помилок для  $Q$ -статистик при різних гіпотезах стану об'єкта

Гіпотези	Потужність $Q$ -статистики	Ймовірність помилки
$(H_0, H_1)$	0.563	0.245
$(H_0, H_2)$	0.665	0.202
$(H_0, H_3)$	0.764	0.145
$(H_0, H_4)$	0.783	0.152

**Висновки.** Дослідження у статті дозволили отримати наступні результати:

- отримані і досліджені характеристики вимірювального вібросигналу, що забезпечує інформаційну складову для контролю та діагностики;
- розроблено та проаналізовано методичний базис для оцінки стану промислових динамічних об'єктів за їх вібраційними характеристиками;
- на основі  $Q$ -статистик, розроблені і досліджені однопараметрові моделі інформаційного вібросигналу.

**Список літератури:** 1. Мигущенко Р.П. Классификация состояния форсунок дизель-генераторной установки по числовым характеристикам / Р. П. Мигущенко, В. К. Гусельников, О. Ю. Валуцкая // Вестник НТУ «ХПИ». Сер. Энергетика и преобразовательная техника. – 2004. – №5. – С. 88 – 92. 2. Малайчук В.П. Інформаційно-вимірювальні технології неруйнівного контролю: [навчальний посібник] / В. П. Малайчук, О. В. Мозговой, О. М. Петренко. – Дніпропетровськ: РВВ ДНУ, 2001. – 2001 с. 3. Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем / [М. Басвиль, А. Вилеки, А. Бенвенист и др.]; пер. с англ.; под ред. М. Басвиль, А. Бен-

виста. – М.: Мир, 1989. – 278 с. 4. *Жовинский А.Н.* Инженерный экспресс-анализ случайных процес сов / А. Н. Жовинский, В. Н. Жовинский. – М.: Энергия, 1979. – 112 с. 5. *Левин Б.Р.* Теоретические основы статической радиотехники / Б. Р. Левин. – М.: Советское радио, 1975. – 392 с. 6. *Вентцель Е.С.* Теория вероятностей и ее инженерные приложения: [учебное пособие для ВТУЗ] / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М.: Высшая школа, 2000. – 480 с.

*Надійшла до редколегії 28.02.2014*

УДК 519.254

**Однопараметровий контроль стану динамічних промислових об'єктів за допомогою тестових статистик / Р. П. Мигущенко, О. Ю. Кропачек, М. П. Артьомов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – № 6 (1049). – С. 145 – 150. Бібліогр.: 6 назв. – ISSN 2222-0631.**

Рассмотрены вопросы оценки эффективности однопараметрового контроля функционального состояния вибрационных промышленных объектов во вибрации их узлов при помощи тестовых  $Q$ -статистик. При оценке получены и исследованы характеристики измерительного вибросигнала, обеспечивающего информационную составляющую для контроля; разработан и проанализирован методический базис для оценки состояния промышленных динамических объектов по их вибрационным характеристикам; разработаны и исследованы однопараметровые модели информационного вибросигнала.

**Ключевые слова:** вибрационные характеристики, тестовые статистики, динамические объекты, контроль состояния.

UDC 519.254

**One-parameter control of the functional state of dynamic industrial objects using Q-test statistics / R. P. Migushchenko, O. Y. Kropachek, M. P. Artemov // Bulletin of National Technical University «KhPI» Series: Mathematical modeling in engineering and technologies. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2014. – № 6 (1049). – pp. 145 – 150. Bibliog.: 6 titles. – ISSN 2222-0631.**

The question of evaluating the efficiency of one-parameter control of the functional state of industrial vibration objects by vibration level of their units using  $Q$ -test statistics is addressed. Characteristics of measuring vibration signal, which provides information component for monitoring, are received and investigated. A methodological basis for estimating industrial dynamic objects by their vibration characteristics is developed and analyzed. One-parameter models of information vibration signal are designed and tested.

**Key words:** vibration characteristics, Q-test statistics, dynamic objects, functional state control.

УДК 539.3

**А.Г. НИКОЛАЕВ**, д-р физ.-мат. наук, зав. каф. высшей математики  
НАКУ им. М.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков;

**Е.А. ТАНЧИК**, ассист., НАКУ им. М.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков

## **НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОРИСТОГО МАТЕРИАЛА В ОБЛАСТИ МЕЖДУ ЧЕТЫРЬМА СФЕРОИДАЛЬНЫМИ ПОРАМИ**

Исследуется напряженное состояние упругого пористого материала, в котором поры моделиру-

© А. Г. Николаев, Е. А. Танчик, 2014