

В.М. ГАЛАЙ, канд. техн. наук, доц. ПолтНТУ

А.М. СІЛЬВЕСТРОВ, д-р техн. наук, проф. НТУУ “КПІ”

МОДИФІКОВАНИЙ КОРЕЛЯЦІЙНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ ВІБРАЦІЙ

Предложен нониусный алгоритм использования корреляционных методов для выявления и контроля, скрытых случайными шумами вибраций. Эффективность подхода подтверждена числовым моделированием.

The nonius algorithm of using correlation methods is proposed for detecting and monitoring of hidden by random noise vibrations of rotating bodies. Effectiveness of this approach is proved by multiple numerical simulations.

Постановка проблеми. Багато матеріальних об'єктів в процесі функціонування потребує своєчасного виявлення та контролю рівня і частоти вібрацій. Наприклад, вібрації часто виникають внаслідок поступового руйнування підшипників, в яких обертаються вали масивної конструкції, пробуксовки підшипникових механізмів, юзі коліс тощо [1]. Це можуть бути багатокоштовні і небезпечні у випадку руйнування механічні чи енергетичні апарати, флотацийні та будівельні машини, транспортні засоби [2]. Своєчасне виявлення вібрацій дозволяє запобігати виникненню аварій і зменшувати витрати на ремонт контрольованого об'єкта.

Аналіз літератури. Для контролю вібраційних коливань зазвичай використовують первинні перетворювачі, що безпосередньо вимірюють вібрації у відповідних елементах об'єкту [4-5]. Але це далеко не завжди зручно і дешево.

Мета статті. Розроблення нониусного інверсно-кореляційного методу, що при технічній реалізації дозволяє непрямим способом виявити та ідентифікувати параметри вібрацій за шумовими сигналами.

Нониусний інверсно-кореляційний метод контролю прихованих періодичностей. Інверсно-кореляційною є функція взаємокореляції процесу $y(t)$ з його дзеркальним відображенням $\bar{y}(t) = y(-t)$ [5]. Якщо для суміші

$$y(t) = x(t) + z(t), \quad (1)$$

де $x(t)$ – періодичний, а $z(t)$ – випадковий сигнали, знайти інверсно-кореляційну функцію $R_{y\bar{y}}(\tau)$, то, на відміну від автокореляційної функції $R_{yy}(\tau)$, за умови, що випадкова складова $z(t)$ має затухаючу зі збільшенням

зсуву τ кореляційну функцію $R_{zz}(\tau)$, при довжині T виборок, інверсно-кореляційна функція буде мати математичне сподівання $M\{R_{y\bar{y}}(\tau)\}$ таке ж, як і чистий сигнал $x(t)$:

$$M\{R_{y\bar{y}}(\tau)\} = M\{R_{x\bar{x}}(\tau)\} + M\{R_{z\bar{z}}(\tau)\} = M\{R_{x\bar{x}}(\tau)\}, \quad (2)$$

тому що $M\{R_{z\bar{z}}(\tau)\} = 0$.

Наприклад, якщо $R_{zz}(\tau) = \sigma_z^2 \cdot \exp(-\gamma|\tau|)$, $T \gg \tau$, $\gamma T \gg 1$, то

$$M\{R_{zz}(\tau, T)\} = \frac{\sigma_z^2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \exp(-\gamma|\tau|) dt = \frac{\sigma_z^2}{2T\gamma} [2 - \exp(-\gamma(T-\tau)) - \exp(-\gamma T)].$$

Якщо

$$x(t) = x_m \cos(\omega_c t + \phi), \quad (3)$$

де x_m – амплітуда вібрацій, $\omega_c = 2\pi f_c$, f_c – частота вібрацій, ϕ – початкова фаза, то $x(-t)$ має початкову фазу $\pi - \phi$, а

$$R_{y\bar{y}}(\tau) = R_{x\bar{x}}(\tau) = 0,5x_m^2 \cos(\omega_c \tau - 2\phi). \quad (4)$$

Тобто за $R_{y\bar{y}}(\tau)$ не важко визначити амплітуду x_m , частоту ω_c і початкову фазу ϕ_c сигналу вібрацій. Можна показати, що дисперсія $R_{y\bar{y}}(\tau)$ за умови, що $T \geq 10\tau$, співпадає з дисперсією $R_{x\bar{x}}(\tau)$.

Ноніусний метод використання інверсно-кореляційних функцій – це рекурентний процес:

$$R^{(n+1)}(\tau) = \begin{cases} \frac{1}{T+\tau} \int_0^{T+\tau} \bar{R}^{(n)}(t) \cdot \bar{R}^{(n)}(-t-\tau) dt, & -\frac{T}{2} \leq \tau \leq 0, \\ \frac{1}{T-\tau} \int_{\tau}^T \bar{R}^{(n)}(t) \cdot \bar{R}^{(n)}(-t-\tau) dt, & 0 < \tau < \frac{T}{2}, \end{cases} \quad (5)$$

де $\bar{R}^{(n)}(\tau)$ – центрована інверсно-кореляційна функція:

$$\bar{R}^{(n)}(\tau) = \frac{1}{2T_1+1} \int_{\tau-T_1}^{\tau+T_1} R^{(n)}(\tau) d\tau - \frac{1}{2T_2} \int_{\tau-T_2}^{\tau+T_2} R^{(n)}(\tau) d\tau. \quad (6)$$

Тут n – номер ітерації, T – інтервал часу t функції $y(t)$, τ – зсув часу t ; $2T_1$ – час усереднення $R^{(n)}(\tau)$ суттєво менший, а $2T_2$ – суттєво більший від можливого періоду шуканого сигналу $x(t)$; $R^{(n+1)}(\tau)$ – інверсно-кореляційна функція від центрованих $\bar{R}^{(n)}$ інверсно-кореляційних функцій, $R^{(1)}(t) = y(t)$.

Ноніусність рекурентного процесу (5) полягає в тому, що зі зростанням числа n ітерацій зростає співвідношення “корисний періодичний сигнал/кореляція від випадкового сигналу”. Як в ноніусних вимірювальних системах є канали грубого і точного виміру, так і в рекурентному процесі розрахунку кореляцій від кореляцій є результати першого, другого і подальшого наближення. Зі збільшенням номеру n ітерації перетворення (5), (6) суміші $y(t)$, а потім її кореляцій приводить до виникнення квазіперіодичних $\bar{R}^{(n)}(\tau)$, навіть якщо в $y(t)$ періодичність відсутня. Тому існує оптимальне число n перетворень (5), (6).

Критерій (6) середньоквадратичного наближення $\bar{R}^{(n)}(\tau)$ до синусоїди $x(t)$ менш ефективний внаслідок амплітудної модуляції, що виникає в рекурентному процесі (5), (6). Для кращого виявлення присутності періодичної складової $x(t)$ в суміші $y(k)$ використовуємо частотний критерій:

$$I(x) = \left[\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left(\frac{T_j}{T_c} - 1 \right)^2 \right]^{1/2}, \quad T_c = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m T_j, \quad (7)$$

де m – кількість інтервалів T_j знаконезмінності функції (6), T_c – середнє значення інтервалів T_j .

Структурну схему системи для дослідження наведено на рис 1.

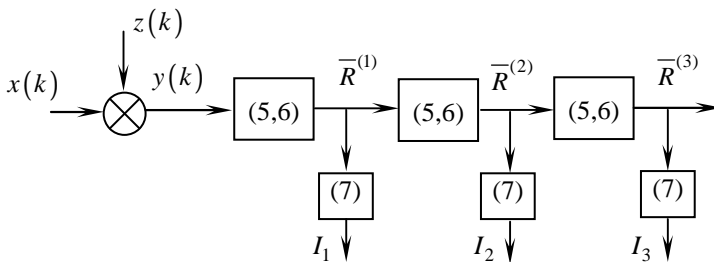


Рис.1. Схема трикрокового інверсно-кореляційного алгоритму

Тут $x(k) = X_m \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot \Delta t \cdot k + \phi_c\right)$, $z(k)$ – проінтегрований “білий шум”,

$k = \overline{1, N}$, $N = 1450$, $\Delta t = 0,006$ с, $\phi_c = 0$, $f_c = 3$ Гц; в формулі (6) $T_1 = 0,03$ с, $T_2 = 0,45$ с. Моделювання і розрахунки зроблено для різних співвідношень X_m/σ_z . Правило, що вирішує є $x(t)$ в суміші $y(t)$ чи немає, полягає в наступному:

- система визначає порогові значення критеріїв I_k , $k = 1, 2, 3$ з експерименту, де $x(t) = 0$;

- при обробці суміші $y(t)$ було прийнято рішення, що $x(t)$ існує, якщо хоч один з критеріїв I_1, I_2, I_3 має значення менше мінімального для експерименту без $x(t)$.

В табл. 1, як приклад, наведено значення I_k , $k = 1, 2, 3$ та середнє значення частоти $f_c = T_c^{-1}$ для десяти реалізацій проінтегрованого “білого шуму”:

Таблиця 1

| № | $I_1(z)$ | $I_2(z)$ | $I_3(z)$ | f_c |
|----|----------|----------|----------|-------|
| 1 | 49 | 24 | 9,9 | 2,86 |
| 2 | 33 | 22 | 19 | 2,17 |
| 3 | 44 | 11 | 2,1 | 3,07 |
| 4 | 45 | 21 | 8,8 | 2,38 |
| 5 | 51 | 26 | 23 | 2,85 |
| 6 | 46 | 25 | 5,6 | 2,64 |
| 7 | 24 | 6 | 1,1 | 2,37 |
| 8 | 58 | 18 | 5,0 | 2,19 |
| 9 | 50 | 24 | 10 | 2,26 |
| 10 | 35 | 14 | 5,8 | 2,67 |

Мінімальні значення $I_1 = 24$; $I_2 = 6$; $I_3 = 1,1$.

В табл. 2, як приклад, подано ті ж дані, але вже для суміші $y(k)$ різних значень “шум/сигнал” (ш/с):

Таблиця 2

| № | ш/с | $Y_1(z)$ | $Y_2(z)$ | $Y_3(z)$ | f_c |
|---|-----|----------|----------|----------|-------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 10 | 35 | 12 | 0,4 | 3,00 |
| 2 | 11 | 21 | 21 | 20 | 2,57 |
| 3 | 18 | 13 | 1,3 | 0,1 | 2,99 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----|----|----|-----|-----|------|
| 4 | 8 | 10 | 0,9 | 0,1 | 300 |
| 5 | 12 | 19 | 1,1 | 0,2 | 3,00 |
| 6 | 13 | 31 | 3,3 | 0,5 | 3,00 |
| 7 | 21 | 20 | 2,1 | 0,4 | 2,99 |
| 8 | 15 | 24 | 1,7 | 0,1 | 2,99 |
| 9 | 23 | 35 | 3,0 | 0,5 | 3,00 |
| 10 | 17 | 33 | 2,5 | 0,3 | 3,00 |

Згідно з алгоритмом прийняття рішення про існування періодичних коливань в дев'яти з десяти реалізацій (окрім другої) було виявлено сигнал $x(t)$. Відсоток розпізнавання по I_1 складає лише 70%, по I_2 – 80%, тоді як по I_3 – 90%. На рис. 2, *a* наведено частотний спектр шуму $z(t)$, на рис.2, *б* – суміші $y(t)$ для співвідношення “шум/сигнал” 2; На рис. 3 – фрагмент реалізації суміші $y(t)$, на рис. 4, 5, 6, *a*, *б* інверсні кореляційні функції від шуму (*a*) та $y(t)$ – (*б*), першої, другої та третьої кореляції відповідно.

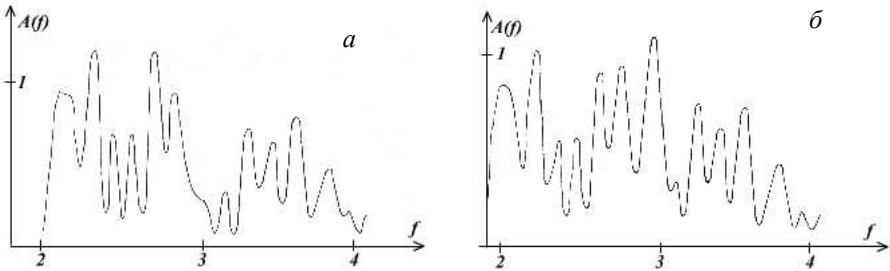


Рис. 2. Спектри шуму (*a*) і суміші (*б*)

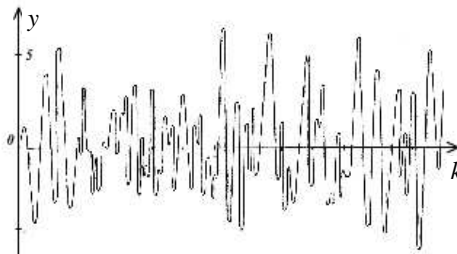


Рис. 3. Фрагмент реалізації суміші $y(t)$

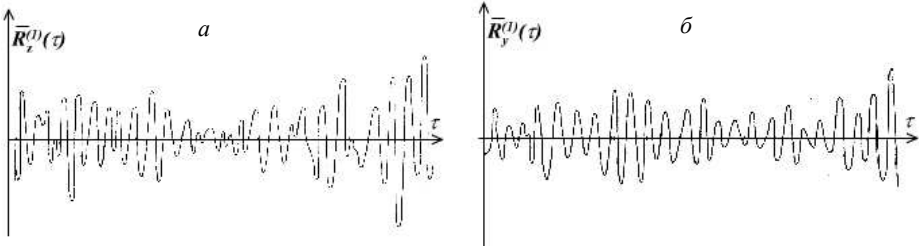


Рис. 4. Перша інверсна кореляція від шуму (а) і суміші (б)

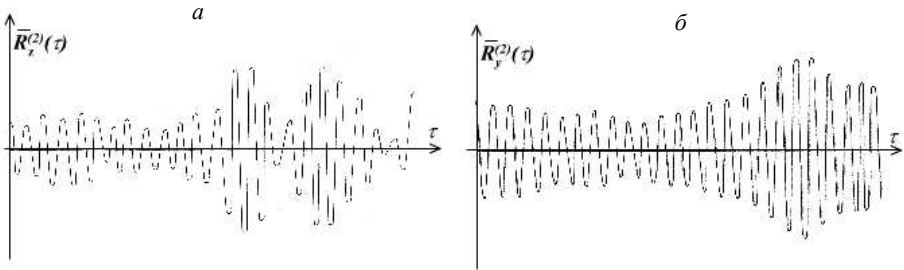


Рис. 5. Друга інверсна кореляція від шуму (а) і суміші (б)

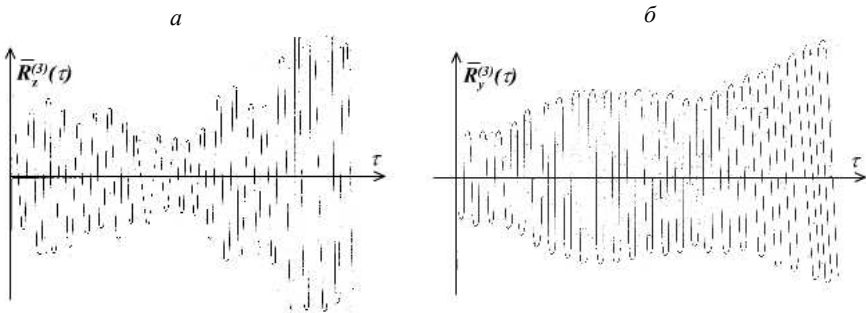


Рис. 6. Третя інверсна кореляція від шуму (а) і суміші (б)

Модифікований кореляційний алгоритм виявлення періодичності, прихованої випадковими перешкодами, співставлено з частотним пороговим методом. Ефективність методів визначена імовірністю P_c виявлення синусоїдного сигналу амплітуди A_c за умови заданої імовірності помилкового рішення. Як показує співставлення результатів (рис. 7),

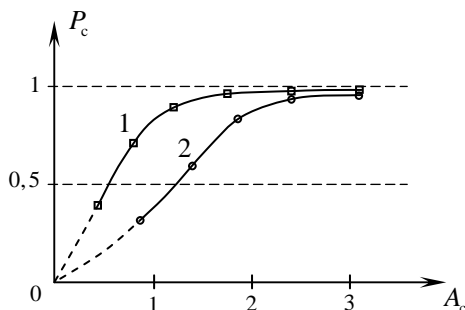


Рис. 7. Залежність від амплітуди A_c ймовірності виявлення періодичного сигналу модифікованим кореляційним (1) і частотним (2) методами

модифікований кореляційний алгоритм забезпечує більшу ймовірність виявлення прихованої періодичності порівняно з частотним, що є його суттєвою перевагою.

Висновки. Аналізуючи результати числового експерименту (табл. 1, 2) та відповідні їм графіки (рис. 2-7) можна зробити такі висновки:

- ноніусний інверсно-кореляційний метод може бути з успіхом використано, як альтернативу відомому частотно-пороговому чи звичайному кореляційному [6] у випадку, коли треба виявити присутність і визначити параметри прихованої випадковими шумами періодичності невідомої частоти;

- найбільш інформативним критерієм виявлення періодичного сигналу є розкид (7) півперіодів центрованих інверсних кореляцій (6) другого, третього рівня ноніусного алгоритму.

Список літератури: 1. Клепиков В.Б. К устранению "срывных" фракционных автоколебаний в электромеханических системах типовыми обратными связями / В.Б. Клепиков, Л.В. Асмолова // Тематичний випуск "Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика" науково-технічного журналу "ЕЛЕКТРОІНФОРМ" – Львів: ЕКОінформ, 2009. – С. 25-28. 2. Бураковский С.Г. Моделирование механической системы рудничного электровоза в режиме буксования / С.Г. Бураковский, А.А. Рафальский // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2008 – №30. 3. Винник А.В. Упругие колебания координат тягового электропривода троллейбуса / А.В. Винник, Н.А. Задорожний, В.В. Головченко // Тематичний випуск "Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика" науково-технічного журналу "ЕЛЕКТРОІНФОРМ" – Львів: ЕКОінформ, 2009. – С. 196-198. 4. Исаченко В.Х. Система контроля проводки наклонных скважин с автономным скважинным прибором / В.Х. Исаченко // Приборы и системы управления. – 1991. – №1. – С.29-30. 5. Виленкин С.Я. Статистическая обработка результатов исследования случайных функций / С.Я. Виленкин. – М.: Энергия, 1979. – 320с. 6. Волгин В.В. Оценка корреляционных функций в промышленных системах управления. / В.В. Волгин, Р.Н. Каримов. – М.: Энергия, 1978. – 79с.

Поступила в редакцію 01.04.2010