

АВТОМАТИКА ТА ІНФОРМАЦІЙНО- ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

УДК 621.313

В. О. Поджаренко, д. т. н., проф.;

О. М. Васілевський;

В. Ю. Кучерук к. т. н., доц.

ОБРОБЛЕННЯ ВІБРОСИГНАЛІВ В ЦИФРОВИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЯХ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

Вступ

Як відомо, вібросигнал містить велику кількість інформації про стан електромеханічної системи (ЕМС), що працює. Для визначення частоти обертання ЕМС необхідно належним чином вилучити та ефективно обробити вібраційний сигнал. На сьогодні обробити вібросигнал з найвищою точністю та в реальному масштабі часу можна за допомогою цифрового сигнального процесора, використання якого не веде до збільшення пам'яті за умови збільшення кількості вибірок. Використання цифрових технологій не тільки заміняє для деяких завдань аналогові, але й відкриває додаткові можливості добути інформацію із вимірюваних сигналів, навіть тоді, коли звичайні методи оброблення вже повністю вичерпані. Прикладом цього є оброблення звукових та відео сигналів, інтерполяція стохастичних результатів, обчислення спектрів та визначення кореляції між вимірними вібросигналами.

Аналіз стану досліджень та публікацій

Використання вібраційного методу визначення частоти обертання ЕМС за допомогою акселерометрів, сигнали яких зміщуються в часі, шляхом утворення взаємно кореляційної функції (ВКФ) ще малодосліджене. Відомі роботи [1, 2], в яких вібросигнал був представлений в аналоговому вигляді. В такому ж вигляді для нього знаходилась і ВКФ. Зростання вимог до ефективності сучасного промислового виробництва обумовлює необхідність пошуку нових шляхів зниження затрат. Широке впровадження вібродіагностики ЕМС, яке супроводжується високим рівнем вібрації, пов'язані з частотою обертання ротора і кратними до неї гармонічними складовими. Тому частоту обертання доцільно визначати за допомогою вібраційних сигналів, шляхом утворення ВКФ, це дозволить знизити затрати, підвищити ефективність вібродіагностичних систем та позбутися додаткового сенсора кутової швидкості і модулятора, необхідних в класичному вимірюванні частоти обертання ЕМС.

Формування цілей статті

З огляду на вищевикладене, метою статті є розроблення математичних моделей окремих модулів та структурної схеми вимірювальних каналів, а також принципів оброблення вібросигналів в цифрових вимірювальних пристроях для визначення частоти обертання ЕМС на основі отриманих експериментальних даних напруги та часу.

Оброблення сигналів вібрації за допомогою цифрових вимірювальних пристроїв

Частоту обертання ЕМС, як правило, визначають за допомогою тахометра, фотоелектричного чи магнітного сенсора кутової швидкості та закріпленого на валу ротора модулятора, який інколи

дуже складно (чи зовсім неможливо) розмістити чи закріпити. В таких випадках визначати частоту обертання ЕМС можна за сигналами вібрації, які одержують за допомогою сенсорів вібрації (акселерометрів). Це дозволяє позбутися сенсора кутової швидкості та механічних елементів, які необхідні для вимірювання частоти обертання, знизити затрати та підвищити ефективність вібродіагностичних систем. Для цього сенсори вібрації повинні бути розміщені перпендикулярно один відносно другого [3]. На сьогодні можливе використання двокомпонентного акселерометра в якому вісь Y – перпендикулярна корпусу ЕМС та горизонтальній площині, а вісь X – перпендикулярна до осі Y (рис. 1).

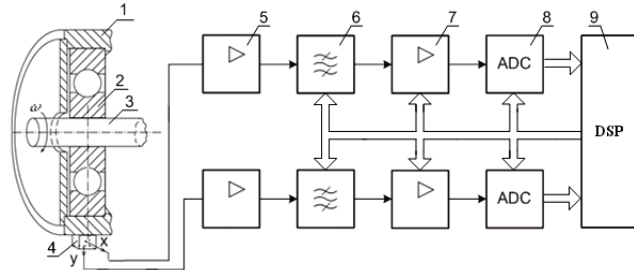


Рис. 1. Структурна схема вимірювальних каналів для визначення частоти обертання ЕМС за допомогою вібросигналів: 1 — корпус ЕМС; 2 — підшипник; 3 — вал; 4 — двокомпонентний сенсор-акселерометр; 5 — вхідний вимірювальний перетворювач; 6 — полосовий фільтр; 7 — масштабний перетворювач; 8 — аналого-цифровий перетворювач; 9 — цифровий сигнальний процесор (пристрій керування та оброблення виміряної інформації)

Результуюча вібрація опори — це складний продукт перетворень інформаційного сигналу, що кількісно характеризується первинними діагностичними параметрами. Навантаження на опору ЕМС носить циклічний характер, а зміна первинних діагностичних параметрів — періодичне, що відображається на законі зміни параметрів результуючої вібрації опори.

Достовірне оцінювання параметрів вібраційних сигналів перетворюється в складну вимірювальну задачу, розв'язання якої пов'язане з рядом вимог до вимірювальних каналів для визначення частоти обертання ЕМС [4]. Найважливіші з них такі:

— ефективне виділення вібраційних сигнала

лів в інформаційній смузі частот;

— максимальне подавлення завад, які надходять у вимірювальні канали ззовні, разом з інформативною компонентою вібрації;

— мінімальне спотворення вторинних діагностичних параметрів під час перетворення вібросигналів у вимірювальних каналах;

— мінімальний рівень власних шумів вимірювальних каналів.

Вищеперераховані вимоги визначають структуру вимірювальних каналів, функції і параметри модулів, що входять в них. У загальному вигляді структурна схема вимірювальних каналів пристрою оброблення вібросигналів для визначення частоти обертання ЕМС показана на рис. 1.

Оцінка якості роботи каналів проводилась на основі аналізу перетворень вібросигналів модулями, що входять в нього, отриманні та аналізі експериментальних даних.

На відміну від розглянутого в попередній статті [3] теоретичного способу визначення частоти обертання ЕМС на практиці вібросигнал доцільно знімати з двокомпонентного сенсора вібрації, підсилювати за допомогою вхідного вимірювального перетворювача 5, виділяти інформативну смугу частот за допомогою полосового фільтру 6, який несе інформацію тільки про основну частоту обертання валу 3 ЕМС. Потім вібросигнал потрібно масштабувати у відповідності з вибраним аналого-цифровим перетворювачем (АЦП) 8 за допомогою масштабного перетворювача 7. Після цього аналогові сигнали $X(t)$ та, зміщений на $\pi/2$, $Y(t)$ перетворюються в квантовано-дискретизовані сигнали, які в однакові інтервали часу t_i , що залежать від частоти обертання підшипників ЕМС, мають відповідні значення напруги U_{x_i} , U_{y_i} . Виміряні значення часу та напруги надходять до сигнального процесора 9, який запам'ятовує та обробляє ці значення в реальному масштабі часу.

Для вимірювання частоти обертання ЕМС за допомогою концентрично розташованих сенсорів вібрації використано такий алгоритм визначення ВКФ в цифровому сигнальному процесорі із затриманих в часі параметрів вібросигналів $X(t)$ та $Y(t+T)$. Якщо виміряні значення часу та напруги піддати кореляції, то утвориться ВКФ $R_{XY}(T)$, яка виражатиме ступінь кореляції між двома вібросигналами в залежності від їхнього взаємного зсуву (часу затримки) T у часовій області [5]. Час, при якому досягається перший максимум ВКФ, відображає час затримки T , за яким визначається частота обертання ЕМС. ВКФ для визначення частоти обертання ЕМС за виміряними параметрами запишемо у вигляді

$$R_{XY}(T) = \sum_{v=1}^n S_{X_v} S_{Y_v} \cos(\Psi_v - v\omega_0 T), \quad (1)$$

де S_X і S_Y — експериментальне середнє квадратичне значення вимірних параметрів напруги вібро-сигналів $X(t)$ та $Y(t)$; Ψ_ν — фазовий зсув між ν -ми гармоніками досліджуваних сигналів, $\frac{\pi}{2}$; ν — номер досліджуваної гармоніки; ω_0 — кругова частота досліджуваного сигналу; T — час затримки між вібросигналами $X(t)$ та $Y(t)$, який потрібно визначити; n — кількість вимірних параметрів (вибірка).

Експериментальні дані часу та напруги з заданою в статичному режимі, за допомогою частотного регулятора, частотою обертання ЕМС 3140 об/хв, які отримано за допомогою показаної на рис. 1 структурної схеми, зображено в графічному вигляді на рис. 2. В нижній частині рис. 2 показано зміну в часі вхідного вібросигналу по осі X, а у верхній — по осі Y.

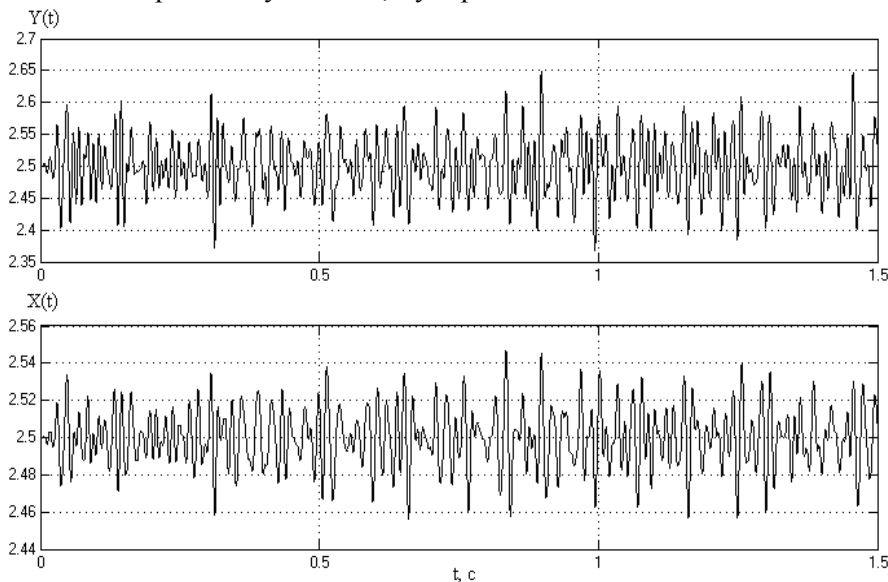


Рис. 2. Результати вимірювання параметрів вібросигналів з частотою обертання 3140 об/хв

Підставивши записані в пам'ять сигнального процесора 9 (рис. 1) значення напруги отримано такі середні арифметичні значення по осях X та Y:
 $\bar{U}_X = 2,5024$ В, $U_Y = 2,5004$ В.

Середньо-квадратичні значення вимірної напруги по осі X та Y також визначаються за допомогою сигнального процесора 9, і за експериментальними даними при частоті обертання 3140 об/хв дорівнюють
 $S_X = 2,5019$ В,
 $S_Y = 2,5017$ В.

Як видно із експериментальних даних (рис. 2), сигнали вібрації представлені дискретними вибірками $n = 1...750$ протягом часу спостереження $T_0 = 1,5$ с, з періодом дискретизації АЦП $T_d = 2$ мс в статичному режимі роботи. Кругову швидкість ω_0 досліджуваного сигналу визначимо через час спостереження $T_0 = n T_d$ та кут φ розташування сенсорів вібрації (кут між осями X та Y (рис. 1)) за формулою [6]

$$\omega_0 = \frac{\varphi}{T_0} \tag{2}$$

Для визначення часу затримки між двома вібросигналами, за вимірними дискретним сигналам необхідно створити ВКФ. Її одержимо з експериментальних даних, підставивши в рівняння (1) обчислені середньо-квадратичні значення вимірних напруг, фазовий зсув Ψ_ν між ν -ми гармоніками досліджуваних сигналів та кругові частоти, які визначаються за формулою (2). Виконавши перераховані вище дії отримано рівняння кореляційної функції вібраційних сигналів при частоті обертання ЕМС 3140 об/хв:

$$R_{XY}(T) = 0,42 \cdot 10^{-3} \sum_{\nu=1}^{750} \cos\left(\frac{\pi}{2} - \nu T \frac{\pi}{3}\right) \tag{3}$$

Характеристика ВКФ між двома зсунутими по фазі вібросигналами $X(t)$ та $Y(t + T)$, що отримана з експериментальних даних, за допомогою рівняння (3) зображена на рис. 3.

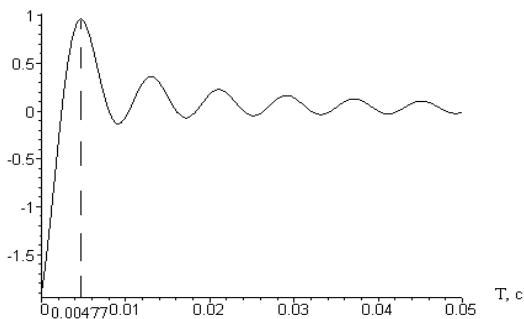


Рис. 3. Характеристика ВКФ досліджуваних сигналів

Згідно [3], перший максимум утвореної ВКФ буде рівним часові затримки T .

На рис. 3 це значення показане штриховою лінією, і розраховується цей час в цифровому сигнальному процесорі за допомогою інтегралу від нормованої ВКФ $R_{XY}(T)$ [6]

$$T = \frac{1}{n} \int_0^{\infty} \frac{R_{XY}(T)}{S_X S_Y} dT. \quad (4)$$

Підставивши утворену ВКФ з рівняння (3) у співвідношення (4), отримано числове значення часу затримки $T = 0,004775$ с. Якщо відомий кут між сенсорами вібрації та обчисленому часові затримки T , то частота обертання ЕМС N_0 визначається за формулою [3]

$$N_0 = \frac{60}{4T}. \quad (5)$$

Оскільки вібросигнали є аналоговими величинами, які обробляються в цифрових вимірювальних пристроях (рис. 1), то їм повинен відповідати цифровий код N_x . Оцінюючи ВКФ в статичному режимі роботи, еквівалентне число N_x практично незалежних відліків, які оброблені за час спостереження під час, визначається як відношення періоду спостереження T_0 до часу затримки T між двома вібросигналами [6]

$$N_x = \frac{T_0}{T} = \frac{T_d n}{T}. \quad (6)$$

Оскільки визначається частота обертання ЕМС N_0 , то в рівнянні перетворення (6) вхідною величиною повинна бути частота обертання, а вихідною — еквівалентний цифровий код. Для цього час затримки T виразимо через частоту обертання із співвідношення (5). Тоді рівняння перетворення вимірювальних каналів (6) для визначення частоти обертання ЕМС в статичному режимі за сигналами вібрації буде мати вигляд

$$N_x = \frac{4 T_d n}{60} N_0 = \frac{T_d n}{15} N_0. \quad (7)$$

В цифрових вимірювальних приладах за умови постійності абсолютної похибки по діапазону вимірювання межа допуску основної похибки нормується в вигляді [7]

$$\delta_k = \frac{\Delta}{X_n} \cdot 100\% = \frac{1}{N_x} \cdot 100\%. \quad (8)$$

З урахуванням рівняння перетворення (7), відносну похибку цифрового вимірювального пристрою для визначення частоти обертання ЕМС можна подати у вигляді

$$\delta_k = \frac{15}{T_d n N_0} \cdot 100\% = \frac{15}{T_0 N_0} \cdot 100\%. \quad (9)$$

Підставивши обчислений час затримки $T = 4,775$ мс в рівняння (5), отримаємо частоту обертання ЕМС, яка буде дорівнювати $N_0 = 3141,4$ об/хв.

Знаючи час дискретизації $T_d = 2$ (мс), вибірку $n = 750$ та визначену частоту обертання N_0 із ВКФ, отримаємо відносну похибку вимірюваної частоти обертання, яка з підстановкою перерахованих вище параметрів у рівняння (9) складає $\delta_k = 0,32\%$.

Графічне представлення рівняння перетворення вимірювальних каналів (6) подано на рис. 4а, з якого видно, що цифровий код N_x (вихідний сигнал) пропорційний часу вимірювання T_0 та частоті обертання ЕМС N_0 (вхідний сигнал).

Аналіз одержаного рівняння похибки цифрового вимірювального пристрою для визначення частоти обертання ЕМС (9) показує, що відносна похибка квантування обернено пропорційна вимірювальній величині N_0 та періоду спостереження T_0 , тобто, збільшення часу вимірювання або частоти обертання призводить до зменшення похибки вимірювання (рис. 4б).

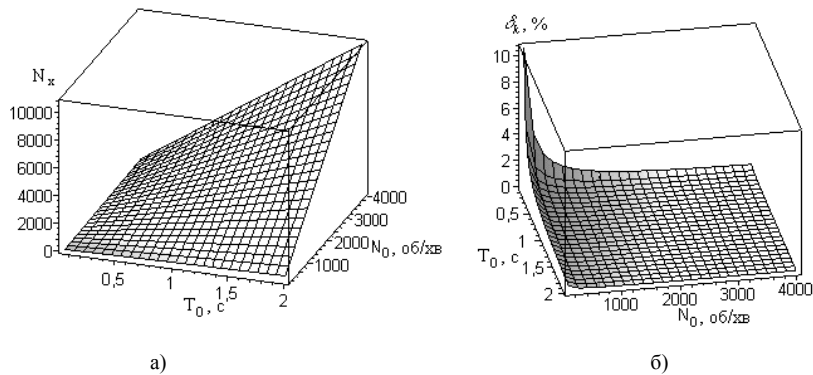


Рис. 4. Графіки залежностей рівняння перетворення вимірювальних каналів (а) та похибки вимірювання (б) від періоду спостереження T_0 і частоти обертання ЕМС N_0

Оскільки із збільшенням частоти обертання відносна похибка зменшується (рис. 4б), то на верхніх та середніх частотах обертання ЕМС, частота обертання N_0 буде визначатися із вищою точністю, а на нижніх — із меншою точністю.

Висновки

1. В результаті проведених теоретичних і експериментальних досліджень розроблено алгоритм оброблення сигналів вібрації в цифрових вимірювальних пристроях для визначення частоти обертання ЕМС. Розроблені математичні моделі окремих модулів схем дають змогу адекватно розраховувати значення частоти обертання, шляхом утворення ВКФ.

2. Проведено обробку результатів вимірювання сигналів вібрації на основі запропонованого кореляційного методу визначення частоти обертання ЕМС, в результаті чого отримані характеристики вібросигналів, їх ВКФ та відносної похибки квантування, з яких видно, що за часом досягнення першого максимуму можна визначати частоту обертання ЕМС з достатньо високою точністю.

3. Використання цифрового сигнального процесора для визначення частоти обертання за ВКФ дає можливість обробляти вібросигнал в реальному масштабі часу і не вимагає збільшення обсягу пам'яті у разі збільшення кількості вибірок чи часу спостереження, оскільки ці операції можна здійснити апаратно.

4. Подальше вдосконалення запропонованого методу полягає у детальному розгляді рівнянь перетворень вимірювальних каналів, дослідженні їх статичних та динамічних метрологічних характеристик.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Lagerschaden - fruherkennung mit der Kurtoses-Metode, Nojak // Elektronik. — 1981. — № 17. — P. 55—58.
2. Лобанов В. К. Применение статистических методов при назначении исходных дисбалансов роторов // Динамика гибких роторов: Сборник. — М.: Наука, 1972. — С. 74—77.
3. Поджаренко В. О., Васілевський О. М., Кучерук В. Ю., Ігнатенко О. Г. Визначення частоти обертання електромеханічних систем за допомогою вібраційних сигналів // Вимірювальна техніка та метрологія, Львів, Вип. 63. — 2004. — С. 161—167.
4. Шубов И. Г. Шум и вибрация электрических машин. — Л.: Энергоатомиздат, 1986. — 208 с.
5. Горлач А. А., Минц М. Я., Чинков В. Н. Цифровая обработка сигналов в измерительной технике. — К.: Техніка, 1985. — 151 с.
6. Жовинский В. Н., Арховский В. Ф. Корреляционные устройства. — М.: Энергия, 1985. — 248 с.
7. Paul Horowitz, Winfield Hill. The art of electronics. — New York–Port Chester–Melbourne–Sydney: Cambridge university press, 2000, Second Edition. — 704 p.

Рекомендована кафедрою метрології та промислової автоматики

Надійшла до редакції 11.05.04
Рекомендована до друку 11.06.04

Поджаренко Володимир Олександрович — завідувач кафедри; **Васілевський Олександр Миколайович** — інженер; **Кучерук Володимир Юрійович** — доцент.

Кафедра метрології та промислової автоматики, Вінницький національний технічний університет