

# АВТОМАТИКА ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВІМІРЮВАЛЬНА ТЕХНІКА

---

УДК 621.317

О. М. Васілевський, к. т. н.;

П. І. Кулаков, к. т. н.;

О. Г. Ігнатенко

## ВІБРОДІАГНОСТИЧНА СИСТЕМА ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ СТАНУ МЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВЗАЄМОЗВ'ЯЗАНИХ ЕЛЕКТРОМОТОРІВ

*Розроблено структурну схему вібродіагностичної системи та математичний апарат для вимірювання кутових швидкостей на основі вібраційних сигналів та контролю механічних параметрів взаємозв'язаних електромоторів.*

### Вступ та постановка задачі

На сьогоднішній день велику увагу приділяють підвищенню якості продукції, що в свою чергу потребує розвитку інформаційно-вимірювальних діагностичних систем. Розробка і дослідження вібродіагностичної системи для оцінювання стану механічних параметрів взаємозв'язаних електромоторів (ЕМ), яка дозволяє за допомогою вібросигналів отримати своєчасну та достовірну інформацію про частоти обертання ЕМ та несинхронність їх обертання є одним із компонентів стратегії підвищення ефективності промислових технологічних комплексів і зниження затрат на їх огляд в процесі експлуатації [1—3].

Комплексний підхід до одночасного вимірювання частот обертання і автоматичного контролю несинхронності обертання взаємозв'язаних ЕМ за допомогою вібросигналів раніше не використовувався. Тому розробка вібродіагностичної системи для оцінювання стану механічних параметрів ЕМ є актуальною науковою задачею.

### Аналіз стану досліджень та публікацій

На сьогоднішній день одночасний контроль несинхронності обертання і вібродіагностування двох взаємозв'язаних ЕМ з високою вірогідністю, ще недостатньо досліджені. Відомі окремо роботи з вібродіагностування роторних систем [1], з автоматичного контролю частот обертання ЕМ [2], які не дозволяють одночасно вимірювати частоту обертання декількох ЕМ, синхронізувати їх і контролювати при цьому вібропараметри механічних вузлів ЕМ. Тому *метою статті* є експериментальна перевірка основних математичних моделей, розроблених в роботах [3, 4], та дослідження зведеної похибки несинхронності обертання роторів взаємозв'язаних ЕМ за сигналами віброприскорення.

### Розв'язання задачі

Позитивні результати моделювання системи автоматичного контролю несинхронності обертання ЕМ [3], створеної на основі методу вимірювання частот обертання ЕМ за допомогою сигналів віброприскорення ЕМ [4], дозволяють розробити вібродіагностичну систему для оцінювання стану механічних параметрів взаємозв'язаних ЕМ та дослідити її роботу.

Найповнішу інформацію про стан ЕМ дозволяє отримати вимірювальна система, що складається із чотирьох вимірювальних каналів (ВК) вібрації, задавача частот (ЗЧ) обертання роторів ЕМ, частотних регуляторів (ЧР) та цифрового сигнального процесора (DSP), який обробляє вібросигнали (ВС), синхронізує частоти обертання роторів взаємозв'язаних ЕМ та дозволяє реалізувати контроль технічного

стану вузлів ЕМ на основі ВС. Також до складу вібродіагностичної системи входять послідовні інтерфейси, через які здійснюється автоматичне підстроювання (синхронізація) частот обертання роторів ЕМ (рис. 1).

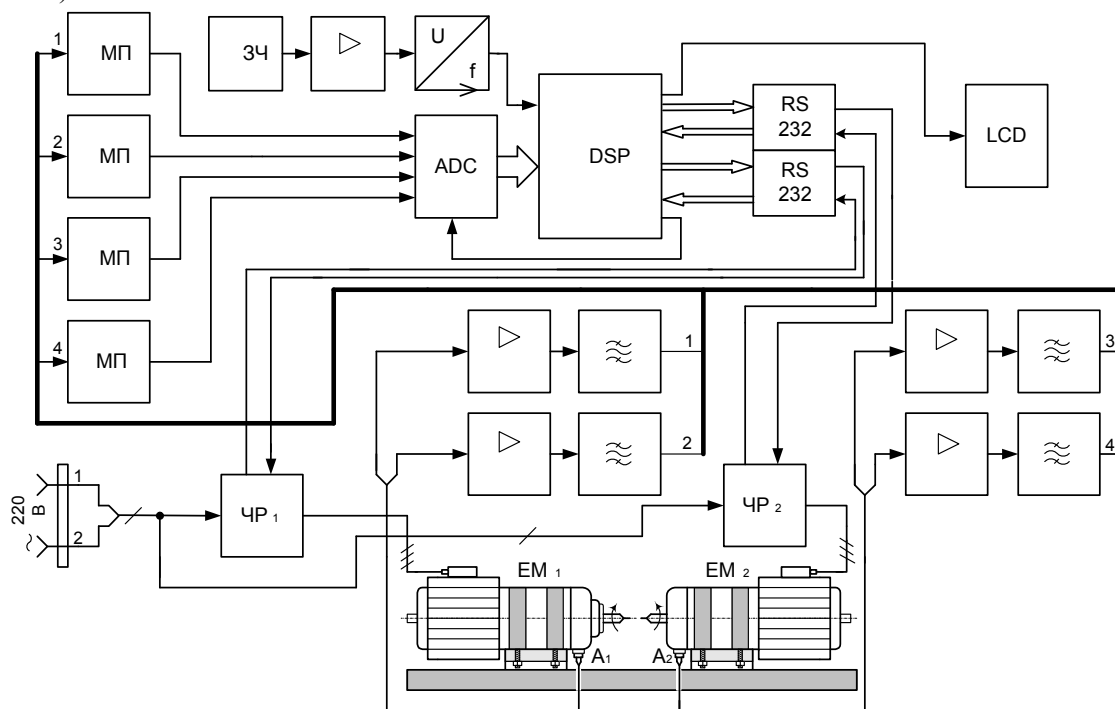


Рис. 1. Структурна схема вібродіагностичної системи для оцінювання стану механічних параметрів взаємопов'язаних ЕМ

Методи контролю технічного стану ЕМ та формування діагностичних ознак за сигналами віброприскорення, які реалізуються за допомогою розробленої вібродіагностичної системи, розглянуті в роботах [5, 6].

Розглянемо послідовність вимірювального перетворення запропонованої вібродіагностичної вимірювальної системи. За командою ЗЧ через підсилювач, перетворювач напруги в частоту  $U/f$ , DSP та ЧР запускаються ЕМ, і регулюється їх частота обертання. Далі, за допомогою високоточних акселерометрів  $A_1$  та  $A_2$ , що вимірюють вібро сигнали по двох осях, досліджуються віброприскорення кожного ЕМ, які потім підсилюються попередніми підсилювачами заряду, і виділяється інформативна смуга частот, за допомогою смугових фільтрів. Далі ВС масштабуються у відповідності із вибраним АЦП (ADC) за допомогою масштабних перетворювачів (МП), після чого АЦП перетворює ВС у цифрові коди, які обробляються в сигнальному процесорі. Частотний діапазон віброприскорень, що пропускають вимірювальні канали, знаходиться в межах від 5 до 500 Гц.

Для обчислення частот обертання ЕМ за допомогою концентрично розташованих п'єзоелектричних акселерометрів визначається взаємкореляційна функція (ВКФ) між виміряними вібропараметрами по осях абсцис і ординат ( $X(t)$  та  $Y(t + \tau)$ ). Якщо виміряні вібропараметри піддаються кореляції, то утвориться ВКФ  $R_{XY}(\tau)$ , яка відобразить ступінь кореляції між двома ВС в залежності від їхнього взаємного зсуву (часу затримки)  $\tau$  у часовій області [4]. Час, за якого досягається максимум ВКФ, буде відображати час затримки  $\tau$ , за допомогою якого обчислюється частота обертання ЕМ. ВКФ, яка використовується для обчислення частоти обертання ЕМ в DSP за ВС, записується у вигляді

$$R_{XY}(\tau) = \sum_{v=1}^n S_{X_v} S_{Y_v} \cos(\Psi_v - v2\pi f_0 \tau), \quad (1)$$

де  $S_X$  і  $S_Y$  — середньоквадратичні значення виміряних віброприскорень  $X(t)$  та  $Y(t)$ ;  $\Psi_v$  — фазовий зсув між  $v$ -ми гармоніками досліджуваних сигналів,  $\frac{\pi}{2}$ ;  $v$  — номер досліджуваної гармоніки;  $f_0$  — частота дискретизації досліджуваного сигналу;  $\tau$  — час затримки між ВС  $X(t)$  та  $Y(t)$ , який потрібно обчислити.

В ході експериментальних досліджень віброприскорень головного ЕМ<sub>1</sub> і допоміжного ЕМ<sub>2</sub> за допомогою розробленої структурної схеми (див. рис. 1) отримано ВС головного ЕМ по осях *Y* та *X* (рис. 2) і допоміжного ЕМ по тих самих осях (рис. 3) на заданій за допомогою ЧР частоті обертання 72 Гц.

А отримані із цих ВС (див. рис. 2 і 3) ВКФ, які визначались відповідно до рівняння (1), показані на рис. 4.

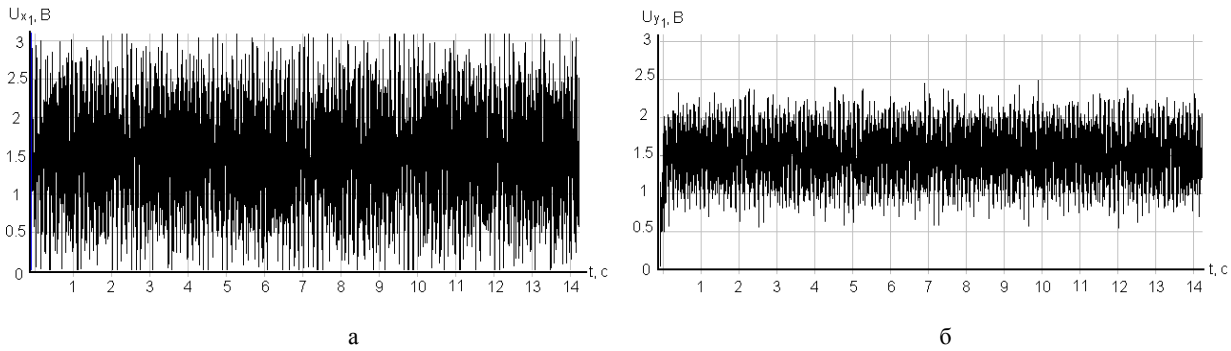


Рис. 2. Характеристики ВС головного ЕМ<sub>1</sub>: а — по осі *Y*, б — по осі *X*

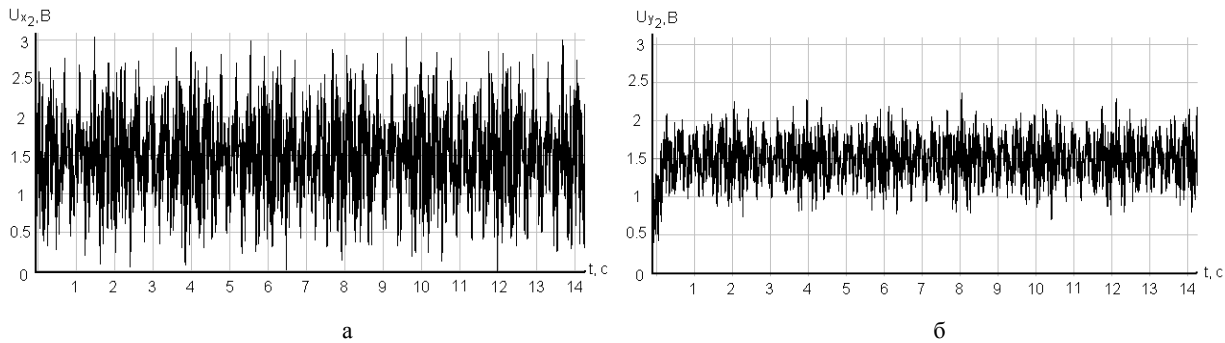


Рис. 3. Характеристики ВС допоміжного ЕМ<sub>2</sub>: а — по осі *Y*, б — по осі *X*

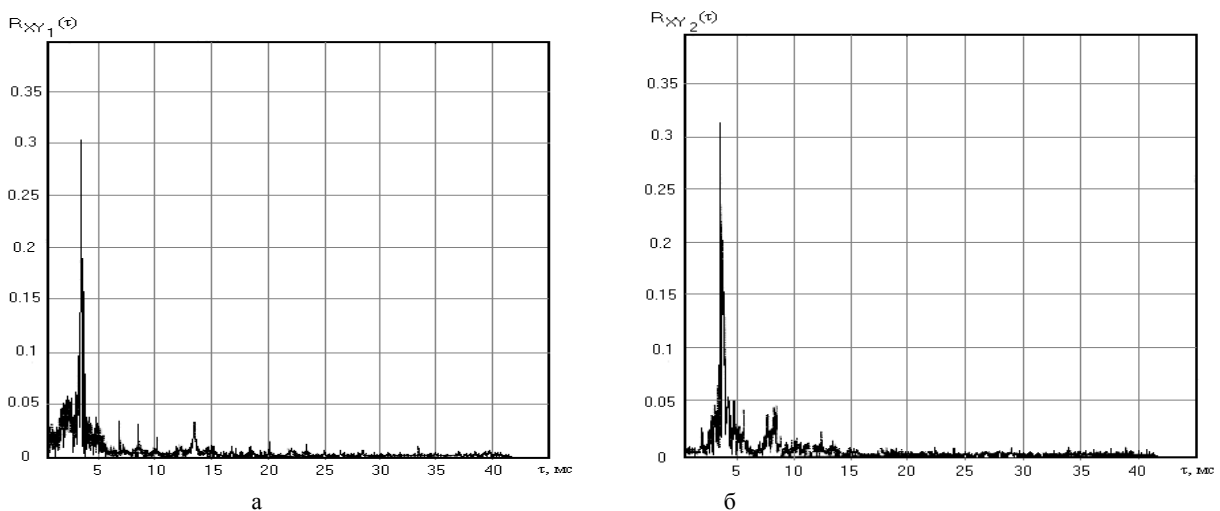


Рис. 4. Експериментальні характеристики отриманих ВКФ:  
а — головного ЕМ, б — допоміжного ЕМ на частоті 72 Гц

Максимум утвореної ВКФ рівний часові затримки  $\tau$ . Розраховується цей час в DSP за допомогою інтегралу від нормованої ВКФ  $R_{XY}(\tau)$ :

$$\tau = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} \frac{R_{XY}(\tau)}{S_X S_Y} d\tau. \quad (2)$$

Підставивши утворену ВКФ з рівняння (1) у формулу (2), отримаємо експериментальне значення

часу затримки, яке для головного ЕМ (див. рис. 4а) дорівнює  $\tau = 3,497$  мс, а для допоміжного ЕМ –  $\tau = 3,481$  мс (див. рис. 4б). Враховуючи відомий кут розташування п'єзоелектричних акселерометрів ( $\pi/2$ ), кутова швидкість ЕМ визначається так:

$$\omega_0 \approx \frac{\pi}{2\tau} \tag{3}$$

Таким чином, підставивши обчислені значення часів затримок у рівняння (3), отримуємо такі експериментальні дані:  $\omega_1 = \pi/(2 \cdot 0,003497) \approx 449$  рад/с, що відповідає частоті обертання головного ЕМ 71,5 Гц, а  $\omega_2 = \pi/(2 \cdot 0,003481) \approx 451$  рад/с — відповідає частоті обертання допоміжного ЕМ 71,8 Гц. Несинхронність обертання ЕМ при цьому не перевищує 2 рад/с (19 об/хв), а відносна похибка несинхронності обертання ЕМ складає  $\delta_{\text{но}} = \Delta\omega \cdot 100 \% / \omega_1 = 2 \cdot 100 \% / 449 \approx 0,45 \%$ .

Виміряні частоти обертання ЕМ постійно порівнюються в DSP, і якщо несинхронність обертання ЕМ перевищує 20 об/хв, то на виході DSP формується цифровий код для збільшення (чи зменшення) частоти обертання допоміжного ЕМ<sub>2</sub> на ту величину, на яку вона відхиляється від частоти обертання головного ЕМ<sub>1</sub>. Потім сформований бінарний код передається через послідовний інтерфейс RS 232 на входи керування частотного регулятора (ЧР<sub>2</sub>). Відразу ж після появи такого сигналу ЧР<sub>2</sub> підстроюється під частоту обертання головного ЕМ<sub>1</sub> і, таким чином, автоматично контролює несинхронність обертання ЕМ. Цей цикл повторюється завжди, коли систему увімкнено. У випадку перевищення несинхронності обертання ЕМ більше, ніж на 5 секунд, DSP формує сигнал тривоги, в результаті чого на рідінокристалічному дисплеї (LCD) виводиться несправність (несинхронність обертання перевищує допустиму межу). Якщо вона не зникає, то це свідчить про те, що ЕМ мають несправність (дефекти). Несправності ЕМ визначаються за методами формування діагностичних ознак, що розроблені в [5], і виводяться на LCD дисплей.

Результати проведених трьох груп незалежних експериментальних досліджень зміни несинхронності обертання ЕМ в залежності від заданих частот обертання показані на рис. 5.

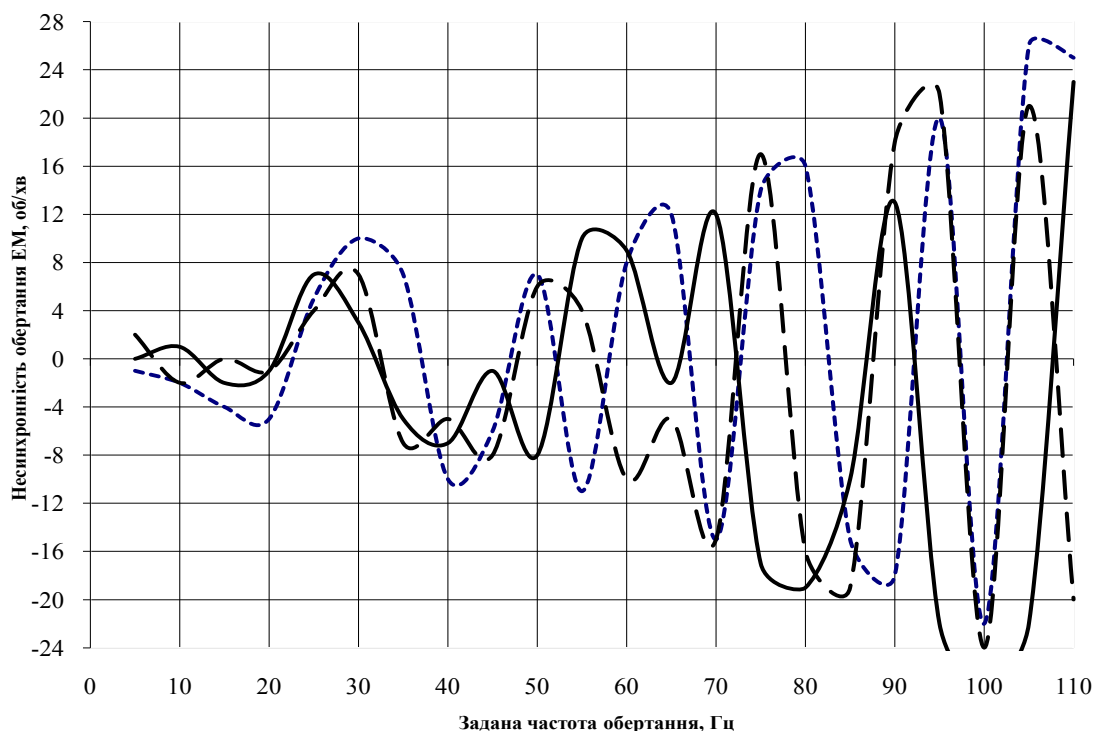


Рис. 5. Експериментальні дослідження зміни несинхронності обертання роторів ЕМ на різних частотах обертання

Дослідження несинхронності обертання ЕМ за вимірними вібропараметрами, шляхом утворення ВКФ між двома ВС, показаними на рис. 5, свідчать про те, що несинхронність обертання ЕМ у діапазоні роботи від 10 до 80 Гц змінюється хаотично (випадковим чином), причому, на нижніх частотах вона має менше значення, а на максимальних частотах — з'являється тенденція до її

збільшення, але загалом можна вважати, що несинхронність обертання роторів ЕМ змінюється несуттєво.

Як впливає із експериментальних досліджень (див. рис. 5), максимальна абсолютна несинхронність обертання в діапазоні роботи взаємопов'язаних ЕМ на частотах обертання від 10 до 80 Гц не перевищує 20 об/хв ( $\approx 2$  рад/с). Тому, можна вважати, що експериментальна зведена похибка несинхронності обертання ЕМ в робочому діапазоні вимірювань від 10 до 80 Гц складає:

$$\gamma_{зв} = (\Delta_{\max}/\omega_{\max})100 \% = (|-2|/450)100 \% = 0,45 \% . \quad (4)$$

Отже, проведений аналіз свідчить про те, що несинхронність обертання роторів ЕМ, як і ВС є періодично-нестационарною, тобто їх характеристики змінюються протягом періоду кочення, що пояснюється інерційними властивостями ЕМ.

### Висновки

1. Розроблено структурну схему вібродіагностичної системи для оцінювання стану механічних параметрів взаємозв'язаних ЕМ, головним елементом якої є сигнальний процесор, який дозволяє вимірювати і обробляти ВС в реальному масштабі часу.

2. За допомогою розробленої вібродіагностичної системи проведено експериментальні дослідження вібраційних процесів, що виникають в ЕМ, побудовано експериментальні ВКФ, на основі яких розраховано частоти обертання як головного, так і допоміжного ЕМ, та досліджено несинхронність обертання роторів ЕМ на різних частотах обертання.

3. В результаті проведених експериментів встановлено, що зведена похибка несинхронності обертання роторів взаємозв'язаних ЕМ за ВС не перевищує 0,45 % в діапазоні зміни частот обертання від 10 до 80 Гц.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Воронцов Александр Григорьевич. Элементы теории высокочастотной вибродиагностики роторных машин / А. Г. Воронцов. — Донецк : РИА ДонНТУ, 2002. — 137 с. — ISBN 966-7559-55-6.
2. Поджаренко В. О. Математичне моделювання системи керування асинхронними електродвигунами / В. О. Поджаренко, В. Ю. Кучерук, О. М. Васілевський // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Обчислювальна техніка та автоматизація». — 2003. — № 64. — С. 71—77.
3. Поджаренко В. О. Математичне моделювання системи адаптивного керування з синхронізацією частот обертання асинхронних двигунів / В. Поджаренко, В. Кучерук, О. Васілевський, В. Марущак // Вісник національного університету «Львівська політехніка». Серія : «Автоматика, вимірювання та керування». — 2003. — № 475. — С. 77—82.
4. Поджаренко В. О. Оброблення вібросигналів в цифрових вимірювальних пристроях для визначення частоти обертання електромеханічних систем / В. О. Поджаренко, О. М. Васілевський, В. Ю. Кучерук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 2004. — № 5. — С. 5—9.
5. Поджаренко В. О. Діагностика технічного стану електромеханічних систем за логарифмічним декрементом затування / В. О. Поджаренко, О. М. Васілевський // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Обчислювальна техніка та автоматизація». — 2005. — № 88. — С. 138—144.
6. Васілевський О. М. Інформаційно-вимірювальна система оцінювання віброметричних параметрів роторних систем / О. М. Васілевський, В. Ю. Кучерук, О. Г. Ігнатенко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія : «Обчислювальна техніка та автоматизація». — 2006. — № 107. — С. 154—158.

Рекомендована кафедрою метрології та промислової автоматики

Надійшла до редакції 29.01.10  
Рекомендована до друку 30.12.09

**Васілевський Олександр Миколайович** — доцент, **Кулаков Павло Ігорович** — доцент, **Ігнатенко Олександр Григорович** — старший викладач.

Кафедра метрології та промислової автоматики, Вінницький національний технічний університет