

Ю.О. Подчашинський, к.т.н., доц.
Житомирський державний технологічний університет

ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ОБЕРТОВОГО РУХУ НА ОСНОВІ АЛГОРИТМІЧНОЇ ОБРОБКИ ДВОВИМІРНИХ ВІДЕОЗОБРАЖЕНЬ

В статті запропоновано метод та пристрій для вимірювання параметрів обертОВОГО руху різноманітних тіл обертання. Основу даного методу вимірювань складає формування та алгоритмічна обробка двовимірної вимірювальної інформації (відеозображень тіл обертання). Розглянуто можливості підвищення точності вимірювань шляхом алгоритмічної обробки їх результатів.

Постановка проблеми в загальному вигляді та її зв'язок з важливими науковими і практичними задачами. Кугове положення, швидкість та прискорення характеризують роботу різноманітних елементів (тіл обертання) машин, двигунів, пристроїв та агрегатів. Вказані параметри обертОВОГО руху можуть бути використані для оцінки якості роботи машин та пристроїв, удосконалення їх конструкції [1, 2, 3]. Ці параметри також пов'язані з іншими механічними величинами (динамічні напруження, сили та крутні моменти, що діють на тіло обертання) [2]. Тому удосконалення приладів та методів вимірювання параметрів обертОВОГО руху є актуальним завданням.

Більшість існуючих методів вимірювань параметрів обертОВОГО руху вимагають наявності механічного зв'язку з об'єктом вимірювань [1, 3, 4]. Це не завжди можливо за умови проведення вимірювань, або створює небажаний вплив на об'єкт вимірювань. Також для сучасних технічних пристроїв важливим є підвищення точності вимірювань параметрів обертОВОГО руху, що неможливо без застосування алгоритмічної обробки результатів вимірювань на цифровій ЕОМ [5, 6, 7, 8].

Тому важливою проблемою при розробці засобів вимірювань параметрів обертОВОГО руху є створення безконтактних методів вимірювання, що включають алгоритмічні методи підвищення точності вимірювань. Пристрій для вимірювання кутового положення, швидкості та прискорення тіл обертання, що запропонований в даній статті, саме і відповідає вказаним вимогам.

Аналіз досліджень і публікацій, в яких започатковано вирішення даної проблеми і на які спирається автор. Методи вимірювань параметрів руху об'єктів можуть бути розділені на дві групи [3]:

– інерціальні методи, які вимірюють параметри руху в інерціальному просторі і в яких відсутній безпосередній контакт між об'єктом вимірювань та нерухомою системою відліку, при цьому вхідною величиною приладу є сила інерції, що сприймається корпусом чутливого елемента, який встановлено на об'єкті вимірювань і з яким зв'язана рухома система відліку;

– контактні методи, побудовані на взаємодії (механічній, оптичній, акустичній тощо) між об'єктом вимірювань і системою відліку, прийнятою за нерухому.

Відомо багато конструкцій приладів для вимірювання параметрів обертОВОГО руху на основі механічної взаємодії між об'єктом вимірювань і приладом з резистивними, ємнісними або електромагнітними перетворювачами. Це – різноманітні тахометри та вимірювачі кутових прискорень і кутового положення об'єкта вимірювань [1, 3, 4].

Недоліком цих методів є:

– необхідність забезпечення механічного зв'язку з об'єктом вимірювань;
– взаємний вплив засобу вимірювань і об'єкта вимірювань;
– ресстрація інтегральних значень параметрів руху, усереднених за деякий інтервал часу спостереження, та неможливість у більшості випадків вимірювань миттєвих значень параметрів.

Вимірювання параметрів кутових переміщень на основі оптичних методів забезпечується фотоелектричними перетворювачами [1, 9]. Перевагами цих методів є можливість безконтактних вимірювань, відсутність механічного навантаження на елементи приладу.

Наприклад сучасні оптоелектричні одношкальні перетворювачі "кут–код" характеризуються похибкою перетворення порядку (20...70)%, що відповідає 14–16 двійковим розрядам відліку. Таку точність отримують за допомогою кодової шкали діаметром близько 240 мм. Далі підвищувати точність за рахунок збільшення розрядності кодової шкали при збереженні прийнятих габаритних розмірів неможливо, оскільки:

– обмеженою є розподільча здатність оптичної системи (з огляду на зменшення ширини молодшого розряду кодової шкали);

– збільшується вплив помилок виготовлення кодової шкали;

– недостатнім є точне юстування джерела освітлення і фотоприймачів.

Теоретичні основи приладів для безконтактних вимірювань геометричних параметрів та переміщень об'єктів вимірювань розглянуті в [10, 11].

Відомі варіанти побудови приладів для вимірювання параметрів обертового руху з використанням оптичних методів та фотоелектричних перетворювачів типу ПЗС-матриці, але в них відсутні алгоритмічні методи підвищення точності результатів вимірювань [12, 13, 14, 15].

Таким чином, питання розробки пристроїв для вимірювання параметрів обертового руху, що базуються на оптичних методах та алгоритмічній обробці результатів вимірювань, висвітлені недостатньо.

Метою проведених досліджень є розробка пристрою для вимірювання параметрів обертового руху різноманітних тіл обертання на основі двовимірних відеозображень та алгоритмічних методів підвищення точності результатів вимірювань.

Викладення основного матеріалу досліджень. Основною ідеєю в запропонованому пристрої для вимірювань кутового положення, швидкості та прискорення об'єктів досліджень є використання двовимірних відеозображень, що фіксують обертовий рух цього об'єкта. Індикатором кутових переміщень є мітка у вигляді відрізка прямої лінії, що нанесена на об'єкт або додаткову насадку, жорстко пов'язану з цим об'єктом. Послідовність відеозображень, що сформовані за допомогою цифрової відеокамери, містить вимірювальну інформацію про параметри обертового руху об'єктів досліджень. Важливою складовою частиною запропонованого методу вимірювань є використання алгоритмічної обробки (процедури лінійної апроксимації та оцінки параметрів) для підвищення точності результатів вимірювань параметрів обертового руху.

Відомі деякі рішення, що належать до вимірювань кутової швидкості та прискорення безконтактним оптико-електронним методом вимірювань.

Наприклад в авторському свідоцтві SU 1631437 [15] використовується мітка у вигляді відрізка прямої лінії, але принцип дії цього пристрою побудований на отриманні стробоскопічної картини в результаті обертання вала з нанесеною на його торець міткою. Такий принцип дії суттєво відрізняється від принципу дії запропонованого пристрою. Окрім того, в цьому авторському свідоцтві відсутній процесор цифрової обробки відеозображень, що виконує лінійну апроксимацію відеозображення мітки.

В патенті JP 63052066 [14] використовується обчислювальний пристрій, фотоприймальний пристрій (відеокамера) та насадка з міткою. Але ця мітка, на відміну від запропонованого пристрою, складається з двох точок, одна з яких розміщена в центрі насадки, а інша – на краю цієї насадки. В цьому патенті також не виконується процедура лінійної апроксимації відеозображення мітки в обчислювальному пристрої. Звертаємо увагу на те, що в даному випадку процедура лінійної апроксимації не може бути виконана в принципі, оскільки мітка має зовсім інший вигляд.

В патентах UA 55791 А, UA 56772 А [12, 13] використовується обчислювальний пристрій, спеціальний освітлювач, фотоприймальний пристрій та насадка. Але обчислювальний пристрій, на відміну від запропонованого пристрою не виконує процедуру лінійної апроксимації відеозображення мітки, оскільки насадка не містить ніякої мітки.

Розглянемо більш детально пристрої з останніх двох патентів. Пристрій [12] містить насадку, жорстко закріплену на тілі обертання, для якого вимірюється кутова швидкість, і обчислювальний пристрій.

Проте, на відміну від запропонованого пристрою, в цьому пристрої для освітлення насадки використовується спеціальний освітлювач (напівпровідниковий лазер). До складу пристрою також входять об'єкти та багатоелементний фотоприймальний пристрій, виконаний у вигляді лінійки світлочутливих елементів. У результаті пристрій для вимірювання кутової швидкості має складну структурну схему.

Насадка у пристрої [12] для вимірювання кутової швидкості виконана у вигляді Архімедової спіралі. Форма насадки описується складною функціональною залежністю, внаслідок чого виникають труднощі при точному виготовленні такої насадки і, відповідно, знижується точність вимірювань.

Пристрій [13] містить насадку, жорстко закріплену на тілі обертання, для якого вимірюється кутова швидкість, і обчислювальний пристрій. Проте, на відміну від запропонованого пристрою, у пристрої [13] для освітлення насадки використовується спеціальний освітлювач (лазер із заданим періодом випромінювання). До складу пристрою також входять об'єкти та багатоелементний фотоприймальний пристрій, виконаний у вигляді матриці світлочутливих елементів. В результаті пристрій-прототип має складну структурну схему.

Насадка у пристрої [13] виконана у вигляді правильного багатогранника, який відбиває імпульси лазерного випромінювання і має складну форму. Внаслідок цього виникають труднощі при точному виготовленні такої насадки і, відповідно, знижується точність вимірювань.

Сигнали від фотоприймального пристрою містять шуми. Наявність цих шумів обумовлена внутрішніми властивостями будь-якого фотоприймального пристрою, а також може бути обумовлена дією зовнішніх факторів, наприклад дією завад від працюючого двигуна, що досліджується. В результаті пристрої [12, 13] мають низьку точність вимірювань.

Таким чином, суттєвими недоліками пристроїв [12, 13] є складна структурна схема і низька точність вимірювань.

В основу проведених досліджень було поставлене завдання удосконалення пристрою для вимірювання кутового положення, швидкості та прискорення об'єктів вимірювань, щоб забезпечити спрощення структурної схеми пристрою і підвищити точність вимірювань. Поставлене завдання вирішується шляхом того, що насадка виконана у формі кола, площина якого перпендикулярна осі обертання тіла обертання, причому на поверхню насадки нанесена мітка у вигляді відрізка прямої лінії, а як обчислювальний пристрій використаний процесор цифрової обробки відеозображень, що виконує лінійну апроксимацію відеозображення мітки. Також використовується пристрій формування цифрових відеозображень (цифрова відеокамера), вхід якого оптично пов'язаний з насадкою, а його вихід підключено до входу процесора цифрової обробки відеозображень.

Спрощення схеми пристрою для вимірювання кутового положення, швидкості та прискорення забезпечується за рахунок використання природного або штучного освітлення приміщення для освітлення насадки; використання стандартного пристрою формування цифрових відеозображень (цифрової відеокамери) для отримання відеозображення насадки і мітки.

Підвищення точності вимірювань забезпечується за рахунок використання як обчислювального пристрою процесора цифрової обробки відеозображень або цифрової ЕОМ, що виконує лінійну апроксимацію відеозображення мітки, наприклад за методом найменших квадратів. Така апроксимація призводить до зменшення впливу похибок дискретності відеозображення та шумів, наявних у вихідному сигналі пристрою формування цифрових відеозображень, на результат вимірювань. Це відбувається завдяки властивостям процедури лінійної апроксимації за методом найменших квадратів [17, 18].

Підвищення точності вимірювань також забезпечується за рахунок більш простої форми насадки у пристрої-винаході, отже можливості більш точного її виготовлення, і як наслідок зменшення відповідної складової частини похибки вимірювань.

Запропонований пристрій [16] для вимірювань параметрів обертового руху (рис. 1) містить насадку 1 на валу 2, що обертається, пристрій 3 формування цифрових відеозображень, а також обчислювальний пристрій 4 (цифрову електронну обчислювальну машину). Насадка 1 має форму кола і жорстко закріплена на валу 2. На насадці 1 нанесена радіальна лінія 5, яскравість якої значно відрізняється від яскравості фону. Насадка 1 і пристрій 3 формування цифрових відеозображень оптично пов'язані між собою. Вихід пристрою 3 формування цифрових відеозображень підключений до входу обчислювального пристрою 4.

Запропонований пристрій працює наступним чином. Оптичне зображення насадки 1 за допомогою пристрою 3 формування цифрових відеозображень перетворюється в цифрове відеозображення. Таке перетворення відбувається у фіксовані моменти часу, і в результаті отримуємо послідовність цифрових відеозображень, які відстають одне від одного на певний фіксований інтервал часу τ . В результаті обертання валу 2 радіальна лінія 5 на насадці протягом часу $k\tau$ змінює кут нахилу від α_i до α_{i-k} відносно нерухомої системи координат. Величина зміни куту нахилу $\Delta\alpha = \alpha_i - \alpha_{i-k}$ пропорційна кутовій швидкості обертання валу 2. Поточні значення кута нахилу визначаються в результаті обробки в обчислювальному пристрої 4 (цифровій електронній обчислювальній машині) послідовності цифрових відеозображень, яка складається з окремих цифрових відеозображень (кадрів).

Процедура визначення кутів нахилу (кутового положення тіла обертання) виконується таким чином. Радіальна лінія 5 на кожному цифровому відеозображенні описується рівнянням $y = a_{1i}x + a_{0i}$, де a_{1i} і a_{0i} – коефіцієнти, що характеризують поточне розташування радіальної лінії 5 відносно нерухомої системи координат.

Кут нахилу радіальної лінії 5 (кутове положення тіла обертання) $a_i = \arctg(a_{1i})$. Для визначення коефіцієнта a_{1i} виконується процедура лінійної апроксимації за методом найменших квадратів. Початкові дані для процедури лінійної апроксимації – це координати точок цифрового відеозображення, що належать радіальній лінії 5. Зрозуміло, що координати окремих точок радіальної лінії 5 містять похибки, пов'язані з шумами і викривленнями, що мають місце на сформованому цифровому відеозображенні. Але лінійна апроксимація за методом найменших квадратів через свої властивості суттєво зменшує ці похибки, що призводить до підвищення точності вимірювань.

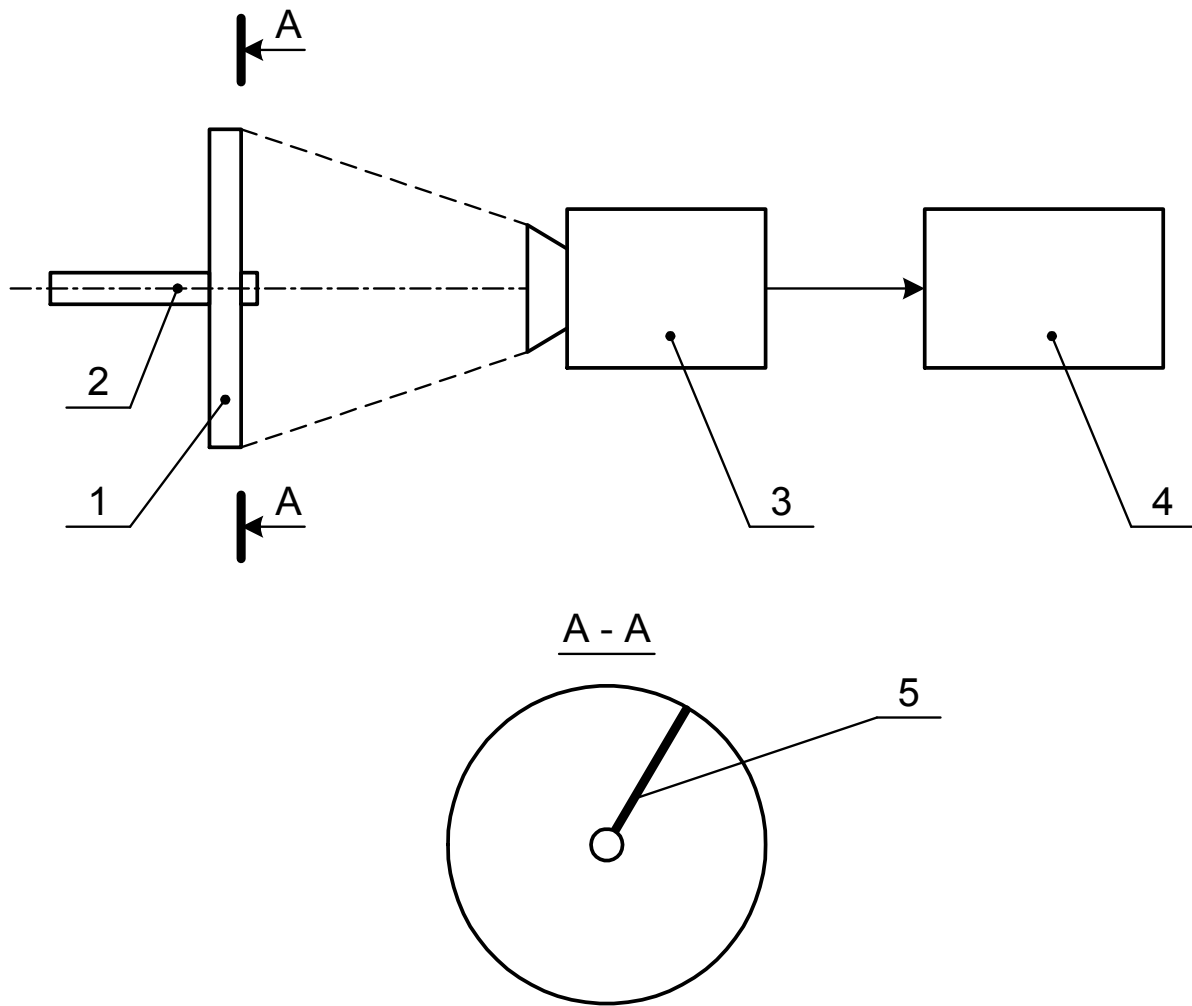


Рис. 1. Пристрій для вимірювання параметрів обертового руху

Для визначення поточного кутового положення тіла обертання на основі методу найменших квадратів [8, 18] обчислюється оцінка коефіцієнта \mathcal{K}_{1i} для i -го кадру відеопослідовності:

$$\mathcal{K}_{1i} = \frac{\sum_{j=1}^L y_{ij} \cdot x_{ij} - \sum_{j=1}^L y_{ij} \cdot \sum_{j=1}^L x_{ij}}{\sum_{j=1}^L x_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^L x_{ij} \right)^2},$$

де L – кількість точок, що належать лінії 5 та використовуються в процедурі лінійної апроксимації; (x_{ij}, y_{ij}) – координати j -ї точки лінії 5 на i -му кадрі відеопослідовності, $j = 1, \dots, L$.

Дисперсія оцінки коефіцієнтів \mathcal{K}_{1i} :

$$\sigma_{\mathcal{K}_{1i}}^2 = \frac{1}{\sum_{j=1}^L x_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^L x_{ij} \right)^2} \cdot \frac{\sigma_y^2}{L},$$

де σ_y^2 – дисперсія вимірювань координати y точок лінії 5.

Результат визначення поточного кутового положення:

$$\mathcal{K}_i = \arctg(\mathcal{K}_{1i}), \quad \sigma_{\mathcal{K}_i}^2 = \frac{\sigma_{\mathcal{K}_{1i}}^2}{1 + \mathcal{K}_{1i}^2},$$

$$\mathcal{K}_{1i \text{ дог}} = \mathcal{K}_{1i} \pm z(L - M_a, P_{\text{дог}}) \cdot \sigma_{\mathcal{K}_{1i}}$$

де $\mathcal{E}_{i \text{ дов}}$ – оцінка коефіцієнта \mathcal{E}_i на основі довірчого інтервалу;

$z(L - M_a, P_{\text{дов}})$ – квантіль розподілу Стюдента з $L - M_a$ ступенями свободи;

$M_a = 1$ для лінійної апроксимації;

$P_{\text{дов}}$ – довірна ймовірність знаходження оцінки у вказаних межах.

Оскільки дисперсія похибки вимірювань кутового положення обернено пропорційна кількості вимірювань L координат точок лінії 5, то при $L \geq 100$ (цілком реальне значення для сучасних цифрових відеокamer) можна забезпечити суттєве зменшення похибки вимірювань кутового положення тіла обертання. Використовуючи в ході лінійної апроксимації обчислення подвійної точності з плаваючою комою, можна суттєво зменшити обчислювальні похибки. Таким чином забезпечується висока точність вимірювань кутового положення тіла обертання, не гірша, ніж 14 розрядів двійкового коду.

Результат вимірювань кутової швидкості обчислюється за формулою:

$$\omega_i = \frac{d\alpha_i}{dt} = \frac{\alpha_i - \alpha_{i-k}}{k \cdot \tau} \quad \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}} \right], \quad (1)$$

де α_i та α_{i-k} – результат вимірювань кутового положення лінії 5 для i -го та $(i-k)$ -го кадрів відеопослідовності відповідно; τ – інтервал часу між двома сусідніми кадрами.

Результат вимірювань кутового прискорення обчислюється за формулою:

$$\frac{d^2\alpha_i}{dt^2} = \frac{d\alpha_i}{dt} - \frac{d\alpha_{i-k}}{dt} = \frac{\alpha_i - 2\alpha_{i-k} + \alpha_{i-2k}}{(k \cdot \tau)^2} \quad \left[\frac{\text{рад}}{\text{с}^2} \right]. \quad (2)$$

Результат вимірювань швидкості обертання обчислюється за формулою:

$$n_i = \frac{30 \cdot \omega_i}{\pi} \quad \left[\frac{\text{обертів}}{\text{хвилину}} \right]. \quad (3)$$

З метою перевірки працездатності пристрою для вимірювань параметрів обертового руху було створено його діючий макет. У макеті використовувалися насадка 1 діаметром 240 мм з фоном білого кольору і радіальною лінією 5 чорного кольору товщиною 5 мм, пристрій 3 формування цифрових відеозображень (цифрова відеокamera) Sony DCR-TRV940 і обчислювальний пристрій 4 (цифрова електронна обчислювальна машина) Pentium 4 – 1,7 ГГц. Вал 2 і насадка 1 оберталися за допомогою електричного двигуна і редуктора. Діапазон вимірюваних кутових швидкостей складав (6,28...78,50) рад/с, тобто (60...750) обертів/хвилину. Частота кадрів у цифровій відеокamerі складала 25 кадрів/с, тобто $T = 0,04$ с. Розмір цифрового відеозображення дорівнював 768x576 дискретних точок.

Обчислення кута нахилу радіальної лінії 5 на кожному відеозображенні виконувалося на основі процедури лінійної апроксимації за методом найменших квадратів на основі координат 180 дискретних точок, що утворюють вісь радіальної лінії 5, яка має товщину 5 мм. Для цього в кожному рядку або стовпці відеозображення (залежно від поточного кутового положення лінії) визначалися координати точок, що належать лівому і правому (або верхньому та нижньому) контуру лінії 5, а потім визначалися координати середньої точки (по товщині лінії 5).

Величина зміни кута $\Delta\alpha$ нахилу радіальної лінії 5 між двома сусідніми цифровими відеозображеннями складала від 14° до 179° залежно від швидкості обертання вала з насадкою. Максимальна похибка визначення кута нахилу радіальної лінії 5 складала $0,01^\circ$. Значення цієї похибки було обчислено з урахуванням використання процедури лінійної апроксимації за методом найменших квадратів [18, с. 116]. Максимальна похибка визначення кутової швидкості складала $0,06$ рад/с або $1,4\%$. Для підвищення точності вимірювань необхідно використовувати більш досконалий пристрій 3 формування цифрових відеозображень.

За допомогою даного пристрою можливо вимірювання і більш низьких кутових швидкостей. Для цього потрібно збільшити інтервал часу $k\tau$ між моментами формування двох цифрових відеозображень, що використовуються для визначення кутів нахилу радіальної лінії α_i та α_{i-k} . Для вимірювання більш високих кутових швидкостей необхідно використовувати спеціалізовану цифрову відеокamera з підвищеною частотою кадрів (декілька тисяч кадрів за секунду).

Розглянемо можливості підвищення точності вимірювань параметрів обертового руху на основі алгоритмічної обробки результатів поточного вимірювання кутового положення тіл обертання.

На i -му інтервалі спостереження за тілом обертання за допомогою запропонованого пристрою вимірюється поточне кутове положення:

$$\mathcal{E}_i = \alpha_i + \xi_i,$$

де α_i – справжнє кутове положення тіла обертання,

ξ_i – похибка вимірювань кутового положення.

Кожен інтервал спостереження відповідає певному кадру в сформованій відеопослідовності. тобто $i = 1, 2, \dots, N$ на інтервалі спостереження $T_c = N\tau$, де τ – інтервал часу між двома сусідніми кадрами.

Також будемо вважати, що обертовий рух об'єкта вимірювань описується детермінованим процесом:

$$\alpha_i = \sum_{k=1}^M \Psi_{ik} \beta_k, \tag{4}$$

або в матричній формі запису:

$$\mathbf{b} = \mathbf{Ш}\mathbf{v},$$

де $\mathbf{Ш} = \|\Psi_{ik}\|$ – деякі відомі функції часу.

За результатами вимірювань α_i необхідно отримати оцінки кутової швидкості й кутового прискорення обертового руху, а також уточнену оцінку кутового положення тіла обертання. Для уточненої оцінки кутового положення α_i^* існують рішення подібної задачі, що базуються на використанні оцінок максимальної правдоподібності. Наприклад в [6] наведено оцінку:

$$\mathbf{b}^* = \mathbf{Ш} \mathbf{v} = \mathbf{Ш}\mathbf{B}^{-1}\mathbf{A}, \tag{5}$$

де

$$\mathbf{B} = \mathbf{Ш}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{Ш}, \quad \mathbf{A} = \mathbf{Ш}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{b}, \tag{6}$$

$\mathbf{R} = \|\mathbf{R}_{ij}\|$ – кореляційна матриця похибок вимірювань величини α_i , а послідовність ξ_i має нормальний розподіл з нульовим середнім значенням.

Розв'язок цієї задачі в такій постановці дозволяє отримати уточнені оцінки кутового положення тіла обертання для обраної моделі обертового руху (4). Але зазвичай також потрібно визначити поточні кутові швидкість і прискорення для відліків часу $i\tau$ на інтервалі спостереження, що розглядається.

Для отримання оцінок кутової швидкості й прискорення формулу (4) потрібно представити у вигляді:

$$\alpha_i = \beta_1 + \beta_2 t_i + \beta_3 t_i^2 / 2 + \dots, \tag{7}$$

де $\beta_1 = \alpha_0$, $\beta_2 = \omega_0 = \frac{d\alpha_0}{dt}$, $\beta_3 = \frac{d^2\alpha_0}{dt^2}$ – відповідно початкові кутові положення, швидкість та прискорення тіла обертання,

$$\Psi_{ik} = \frac{(i\tau)^{k-1}}{(k-1)!} \text{ – поліноміальна функція, що залежить від дискретних відліків часу } i\tau \text{ на інтервалі}$$

спостереження $T_c = N\tau$. В даному випадку $\Psi_{i1} = 1$, $\Psi_{i2} = t_i = i\tau$, $\Psi_{i3} = t_i^2 / 2 = (i\tau)^2 / 2, \dots$

Таким чином, обчисленню підлягає вектор:

$$\mathbf{v}^* = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{A} \tag{8}$$

з використанням формул (6). Цей вектор містить оцінки початкових значень кутового положення, швидкості та прискорення тіла обертання. Оцінки поточних значень кутового положення, швидкості та прискорення на основі формули (7) будуть дорівнювати:

$$\begin{aligned} \alpha_i^* &= \beta_1^* + \beta_2^*(i\tau) + \beta_3^*(i\tau)^2 / 2 + \dots, \\ \omega_i^* &= \frac{d\alpha_i^*}{dt} = \beta_2^* + \beta_3^*(i\tau) + \dots \\ \frac{d^2\alpha_i^*}{dt^2} &= \beta_3^* + \beta_4^*(i\tau) + \dots \end{aligned} \tag{9}$$

На відміну від формул (1)–(3), такий підхід дозволяє отримати миттєві поточні значення кутової швидкості та прискорення і уникнути операцій чисельного диференціювання. Ці операції є небажаними, оскільки суттєво знижують точність результату при наявності шумів та похибок у відліках α_i .

Якщо використовувати поліном 2-го степеня ($M = 3$), то це означає, що у прийнятій моделі кутових переміщень кутове прискорення є постійним, а кутова швидкість змінюється за лінійним законом. Якщо використовувати поліном 3-го степеня ($M = 4$), то це означає, що кутове прискорення змінюється за лінійним законом, а кутова швидкість – за квадратичним законом.

Підвищення степеня полінома збільшує обсяг обчислень при отриманні оцінок параметрів кутових переміщень, але дозволяє більш точно визначити ці параметри. Вибір степеня полінома повинен виконуватися з урахуванням вимог і фізичної суті конкретної задачі, що розв'язується за допомогою даного методу вимірювань.

Похибки вимірювань ξ_i поточного кутового положення тіла обертання є некорельованим випадковим процесом з розподілом Стюдента (при великих N він наближається до нормального розподілу). Ці похибки є результатом підсумовування великої кількості похибок елементарних

вимірювань координат точок, що належать лінії 5 в пристрої, що реалізує запропонований метод вимірювань. У цих похибках переважає шум дискретності відеозображення та тепловий шум електронних схем відеокамери, які є некорельованими випадковими процесами. Тому

$$R_{ij} = \begin{cases} \sigma_{\alpha}^2, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases},$$

де σ_{α}^2 – дисперсія похибки визначення поточного кутового положення тіла обертання.

У цьому випадку на основі формул (8) і (6) за методикою [6] можна отримати оцінки параметрів обертального руху об'єктів вимірювань для $M=3$:

$$\alpha_0^* = \beta_1^* = \frac{2,25}{N} \sum_{i=-N/2}^{N/2} \mathcal{E}_i - \frac{15}{N^3} \sum_{i=-N/2}^{N/2} i^2 \mathcal{E}_i,$$

$$\omega_0^* = \frac{d\alpha_0^*}{dt} = \beta_2^* = \frac{12}{N^3 \tau} \sum_{i=-N/2}^{N/2} i \mathcal{E}_i,$$

$$\frac{d^2 \alpha_0^*}{dt^2} = \beta_3^* = -\frac{30}{N^3 \tau^2} \sum_{i=-N/2}^{N/2} \mathcal{E}_i + \frac{360}{N^5 \tau^2} \sum_{i=-N/2}^{N/2} i^2 \mathcal{E}_i.$$

Звідси оцінки поточних значень параметрів обертального руху об'єктів вимірювань для $M=3$ з урахуванням формули (9), дорівнюють:

$$\alpha_i^* = \beta_1^* + \beta_2^*(i\tau) + \beta_3^*(i\tau)^2 / 2 =$$

$$= \left[\frac{2,25}{N} - \frac{15i^2}{N^3} \right] \sum_{i=-N/2}^{N/2} \mathcal{E}_i + \frac{12i}{N^3} \sum_{i=-N/2}^{N/2} i \mathcal{E}_i + \left[\frac{180i^2}{N^5} - \frac{15}{N^3} \right] \sum_{i=-N/2}^{N/2} i^2 \mathcal{E}_i,$$

$$\omega_i^* = \frac{d\alpha_i^*}{dt} = \beta_2^* + \beta_3^*(i\tau) = -\frac{30i}{N^3 \tau} \sum_{i=-N/2}^{N/2} \mathcal{E}_i + \frac{12}{N^3 \tau} \sum_{i=-N/2}^{N/2} i \mathcal{E}_i + \frac{360i}{N^5 \tau} \sum_{i=-N/2}^{N/2} i^2 \mathcal{E}_i, \tag{10}$$

$$\frac{d^2 \alpha_i^*}{dt^2} = \beta_3^* = -\frac{30}{N^3 \tau^2} \sum_{i=-N/2}^{N/2} \mathcal{E}_i + \frac{360}{N^5 \tau^2} \sum_{i=-N/2}^{N/2} i^2 \mathcal{E}_i.$$

У формулах (10) оцінка параметрів виконується для середини інтервалу спостереження, тому вважається, що $i = -N/2, \dots, 0, \dots, N/2$ за умови, що N є досить велике непарне число вимірювань кутового положення тіла обертання.

Дисперсія оцінок поточних значень кутової швидкості та прискорення згідно з [6]

$$D \left[\frac{d\alpha_i^*}{dt} \right] = \frac{12}{N} \cdot \frac{\sigma_{\alpha}^2}{T_c} = \frac{12\sigma_{\alpha}^2}{N^3 \tau^2}, \quad D \left[\frac{d^2 \alpha_i^*}{dt^2} \right] = \frac{720}{N} \cdot \frac{\sigma_{\alpha}^2}{T_c^2} = \frac{720\sigma_{\alpha}^2}{N^5 \tau^4}$$

обернено пропорційно залежить від часу спостереження, міжкадрового інтервалу та кількості вимірювань кутового положення на інтервалі спостереження. Тому при великій кількості кадрів у відеопослідовності, отриманій з високою частотою кадрів, можна забезпечити суттєве підвищення точності вимірювань параметрів обертального руху об'єктів вимірювань порівняно з формулами (1)–(3).

Висновки. Розроблено метод та пристрій для вимірювання параметрів обертального руху різноманітних тіл обертання. Основу даного методу вимірювань складає формування та алгоритмічна обробка двовимірної вимірювальної інформації (відеозображень тіл обертання). Розглянуто можливості підвищення точності вимірювань шляхом алгоритмічної обробки їх результатів. Точність вимірювань є подібною або перевищує точність інших пристроїв для вимірювання параметрів обертального руху. Окрім того, забезпечуються такі переваги: можливість безконтактних вимірювань, відсутність механічного навантаження на елементи приладу, а також спрощення структурної схеми пристрою.

При великій кількості кадрів у відеопослідовності, отриманій з високою частотою кадрів, можна забезпечити суттєве підвищення точності вимірювань параметрів обертального руху об'єктів вимірювань.

Отримані результати є основою для підвищення точності засобів вимірювань механічних величин, що базуються на двовимірній вимірювальній інформації. Ці результати можуть бути застосовані при розробці автоматизованих засобів вимірювань та інформаційно-вимірювальних систем, які використовують алгоритмічні методи обробки відеозображень і вимірювальної інформації.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Шваб И.А., Селезнев А.В. Измерение угловых ускорений. – М.: Машиностроение, 1983. – 160 с.
2. Одинец С.С., Топилин Г.Е. Средства измерения крутящего момента. – М.: Машиностроение, 1977. – 160 с.

3. Поліщук Є.С., Дорожовець М.М., Стадник Б.І. та інші. Засоби та методи вимірювань неелектричних величин: Підручник / За ред. проф. Є.С. Поліщука. – Львів: Бескид Біт, 2008. – 618 с.
4. Рябыкин С.Л., Загавура Ф.Я. Средства измерения параметров движения: Учебное пособие для вузов. – К.: Вища школа, 1987. – 136 с.
5. Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
6. Фалькович С.Е., Хомяков Э.Н. Статистическая теория измерительных радиосистем. – М.: Радио и связь, 1981. – 288 с.
7. Мудров В.И., Кушко В.Л. Методы обработки измерений. – М.: Советское радио, 1976. – 192 с.
8. Яцук В.О., Малачівський П.С. Методи підвищення точності вимірювань: Підручник. – Львів: Бескид Біт, 2008. – 368 с.
9. Безвесільна О.М., Подчашинський Ю.О. Технологічні вимірювання та прилади. Перетворюючі пристрої приладів та комп'ютеризованих систем: Підручник. – Житомир: ЖДТУ, 2006. – 560 с.
10. Сарвин А.А. Системы бесконтактных измерений геометрических параметров. – Л.: Издательство Ленинградского университета, 1983. – 144 с.
11. Измерительные сканирующие приборы / Под ред. Б.С. Розова. – М.: Машиностроение, 1980. – 198 с.
12. Патент України на винахід № 56722А, G 01 P 3/36. Пристрій для вимірювання кутової швидкості та прискорення / В.В. Кухарчук, Й.Й. Білинський, М.Й. Білинська (Україна). – № 2002086941; Заявл. 23.08.02; Опубл. 15.05.03, Бюл. № 5. – 4 с.
13. Патент України на винахід № 55791А, G 01 P 3/36. Пристрій для вимірювання кутової швидкості / В.В. Кухарчук, М.Й. Білинська (Україна). – № 2002065111; Заявл. 20.06.02; Опубл. 15.04.03, Бюл. № 4. – 4 с.
14. Пат. 63-052066 Япония, МКИ G 01 P 3/36. Revolution indicator / Fujimoto Koichi (Япония). – № 61-196520; Заявл. 21.08.86; Опубл. 05.03.88. – 5 с.
15. Способ измерения скорости вращения вала: А.с. 1631437 СССР, МКИ G 01 P 3/40 / Г.А. Новиньков (СССР). – № 4650413/10; Заявл. 03.02.89; Опубл. 28.02.91, Бюл. № 8. – 4 с.
16. Пристрій для вимірювання кутової швидкості: Патент України на винахід 77514 С2 МПК (2006) G01P 3/36 / Ю.О. Подчашинський (Україна); Державний департамент інтелектуальної власності. – № 20041008814; Заявл. 28.10.04; Опубл. 15.12.06. Бюл. № 12. – 4 с.
17. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: Учебник для вузов. – М.: Высшая школа, 1999. – 576 с.
18. Метрологія та вимірювальна техніка: Підручник / За ред. проф. Є.С. Поліщука. – Львів: Бескид Біт, 2003. – 544 с.

ПОДЧАШИНСЬКИЙ Юрій Олександрович — кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики та управління в технічних системах Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- методи вимірювання механічних величин;
- цифрова обробка відеозображень.

Подано 25.100.2008

Подчашинський Ю.О. Вимірювання параметрів обертового руху на основі алгоритмічної обробки двовимірних відеозображень

Подчашинский Ю.А. Измерение параметров вращательного движения на основе алгоритмической обработки двумерных видеоизображений

Podchashinsky Yu.A. Measurement of parameters of rotation movings on the basis of two-dimension videoimages processing

УДК 531.7:004.932

Измерение параметров вращательного движения на основе алгоритмической обработки двумерных видеоизображений / Ю.А. Подчашинский

В статье предложен метод и устройство для измерения параметров вращательного движения различных тел вращения. Основу данного метода измерений составляет формирование и алгоритмическая обработка двумерной измерительной информации (видеоизображений тел вращения). Рассмотрены возможности повышения точности измерений путем алгоритмической обработки их результатов.

УДК 531.7:004.932

Measurement of parameters of rotation movings on the basis of two-dimension videoimages processing / Yu.A. Podchashinsky

In article the method and device for measurement of parameters of rotation movings of various bodies of rotation is offered. The basis of the given method of measurements is made by formation and processing of the two-dimensional measuring information (videoimages of bodies of rotation). The opportunities of increase of accuracy of measurements are considered by algorithmic processing of results of measurements.