

- городских маршрутов в условиях конкуренции на рынке автотранспортных услуг // Вестник. – Днепропетровск: ДИИТ. – 2008. – Вып. 25.
8. В.К. Доля, К.Є. Вакуленко Щодо формування тарифів на міському автотранспорті з урахуванням параметрів транспортного процесу // Научно-технический сборник. Коммунальное хозяйство городов. – Харьков: ХНАМГ. – 2008. – Вып. 84. – с. 316 – 322.
9. Инструкция по разработке экономических паспортов городских автобусных маршрутов. Материалы семинара «Организация и экономика городских пассажирских перевозок». – Одесса: Южноукраинский региональный учебный центр, 2000г.
10. Нартова Л.Г. Методы изображений и алгоритмы построения номограмм в экономике АП: Учеб. пособие – М.: МАИ, 1990.
11. Государственные Строительные Нормы Украины ДБН 360 - 92 ** Киев 2002 ДБН 360-92 ** является переизданием ДБН 360-92*с учетом изменений № 4 - № 10 с разрешения Госстроя Украины (письмо от 19.03.2002 г. № 1/52-170)

УДК 531.7:004.932

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ ОБЕРТОВОГО РУХУ НА ОСНОВІ АЛГОРИТМІЧНОЇ ОБРОБКИ ДВОВИМІРНОЇ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

В статті розглянуто можливість підвищення точності вимірювань параметрів оберткового руху різноманітних елементів технічних пристроїв (тіл обертання). Основою таких вимірювань є формування двовимірної вимірювальної інформації (відеозображень), що характеризує поточне кутове положення тіла обертання. Підвищення точності вимірювань базується на алгоритмічній обробці двовимірної вимірювальної інформації

Ю.О. Подчашинський

Кандидат технічних наук, доцент

Кафедра автоматики і управління в технічних системах

Житомирський державний технологічний університет
вул. Черняхівського, 103, м. Житомир, Україна, 10005

Контактний тел.: (0412) 37-84-82, 24-14-17

e-mail:ju-p@ztu.edu.ua

1. Вступ

Параметри оберткового руху, що вимірюються, характеризують роботу різноманітних елементів (тіл обертання) машин, двигунів, пристроїв та агрегатів. Ці параметри можуть бути використані для оцінки якості роботи машин та пристроїв, удосконалення їх конструкції [1,

2, 3]. До параметрів оберткового руху відносяться кутове положення, кутова швидкість та кутове прискорення об'єктів вимірювань (тіл обертання). Ці параметри також пов'язані з іншими механічними величинами (динамічні напруження, сили та крутні моменти, що діють на тіло обертання) [2]. Тому підвищення точності вимірювань параметрів оберткового руху є актуальною задачею.

Традиційним шляхом підвищення точності вимірювань параметрів руху є удосконалення конструкцій чутливих елементів та вимірювальних приладів в цілому [1, 2, 4]. В сучасних вимірювальних пристроях, що базуються на використанні цифрових ЕОМ, важливим також є застосування алгоритмічної обробки результатів вимірювань з метою підвищення їх точності [5, 6, 7, 8].

Використання двовимірної вимірювальної інформації (наприклад, в формі цифрових відеозображень об'єктів вимірювань) є логічним розвитком існуючих оптичних та фотоелектричних методів вимірювань параметрів руху. Вимірювання параметрів кутових переміщень на основі оптичних методів забезпечується фотоелектричними перетворювачами [1]. 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...100)”, що відповідає 14–16 двійковим розрядам відліку. Таку точність отримують за допомогою кодової шкали діаметром порядку 240 мм. Далі підвищувати точність за рахунок збільшення розрядності кодової шкали при збереженні прийнятних габаритних розмірів неможливо, так як:

- обмеженою є розподільча здатність оптичної системи (з огляду на зменшення ширини молодшого розряду кодової шкали);
- збільшується вплив помилок виготовлення кодової шкали;
- недостатньою є точність юстування джерела освітлення і фотоприймачів.

Теоретичні основи приладів для безконтактних вимірювань геометричних параметрів та переміщень об'єктів вимірювань розглянуті в [9, 10].

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 [11, 12, 13, 14].

Метою проведених досліджень є підвищення точності вимірювань параметрів обертового руху різноманітних тіл обертання з використанням двовимірної вимірювальної інформації (відеозображень) та алгоритмічних методів обробки результатів вимірювань на цифровій ЕОМ.

2. Пристрій для вимірювань параметрів обертового руху на основі двовимірної вимірювальної інформації

Основною ідеєю в запропонованому пристрої [15] для вимірювань кутового положення, швидкості та прискорення об'єктів досліджень є використання двовимірних відеозображень, що фіксують обертовий рух цих об'єктів (рис. 1). 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. Важ-

ливою складовою частиною запропонованого методу вимірювань є використання алгоритмічної обробки (процедури лінійної апроксимації та оцінки параметрів) для підвищення точності результатів вимірювань параметрів обертового руху.

Оптичне зображення насадки за допомогою пристрою формування цифрових відеозображень перетворюється в цифрове відеозображення. Таке перетворення відбувається в фіксовані моменти часу і в результаті отримуємо послідовність цифрових відеозображень, які відстоять одне від одного на певний фіксований інтервал часу τ . В результаті обертання валу мітка на насадці протягом часу kt 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. Поточні значення кута нахилу визначаються в результаті обробки в обчислювальному пристрої (цифровій ЕОМ) відеопослідовності, яка складається з окремих цифрових відеозображень (кадрів).

Процедура визначення поточного кутового положення тіла обертання виконується наступним чином. Мітка на кожному цифровому відеозображенні описується рівнянням $y = a_i x + b_i$, де a_i і b_i – коефіцієнти, що характеризують поточне розташування мітки відносно нерухомої системи координат, $i = 1, \dots, N$, N – кількість кадрів у відеопослідовності. Кут нахилу мітки (кутове положення тіла обертання) $\alpha_i = \arctg(a_i)$.

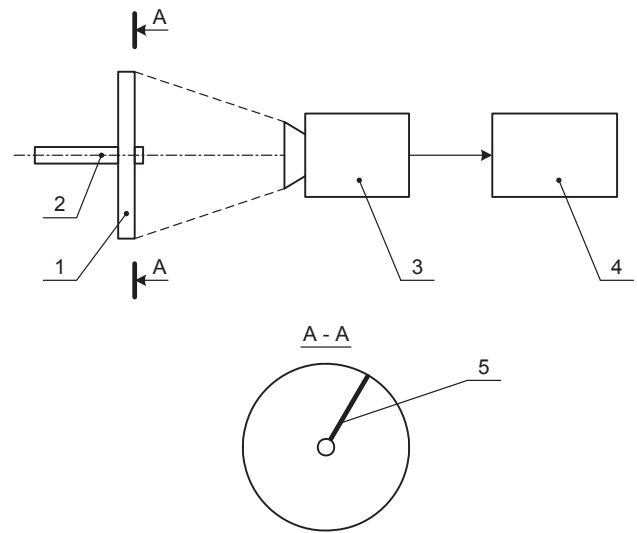


Рисунок 1. Пристрій для вимірювання параметрів обертового руху:
 1 – насадка; 2 – тіло обертання (вал); 3 – пристрій формування цифрових відеозображень (цифрова відеокамера); 4 – обчислювальний пристрій (цифрова ЕОМ); 5 – мітка у вигляді відрізка прямої лінії

Підвищення точності вимірювань забезпечується за рахунок лінійної апроксимації відеозображення мітки в обчислювальному пристрої, наприклад за методом найменших квадратів. Така апроксимація приводить до зменшення впливу похибок дискретності відеозображення та шумів, наявних у вихідному сигналі пристрою формування цифрових відеозображень, на результати вимірювань. Це відбувається завдяки властивостям процедури лінійної апроксимації.

3. Оцінка кута нахилу мітки на основі методів лінійної апроксимації

Для вирішення задачі оцінки кута нахилу мітки можливо використання різних методів [5, 7, 8]:

1. На основі координат двох точок $(x_{i1}, y_{i1}), (x_{i2}, y_{i2})$, що належать мітці. Кут нахилу мітки

$$\alpha_i = \arctg a_i = \arctg \frac{y_{i2} - y_{i1}}{x_{i2} - x_{i1}} \quad (1)$$

2. Лінійна апроксимація за методом найменших квадратів з мінімізацією

$$\sum_{\Omega} (y_{ij} - b_i - a_i x_{ij})^2 \rightarrow \min ,$$

де Ω – множина точок з координатами (x_{ij}, y_{ij}) , що відповідають результатам вимірювань координат точок мітки, як прямої лінії, на i -му відеозображенні,

$j = 1, \dots, L$ – кількість точок, що належать мітці та використовуються в процедурі лінійної апроксимації.

3. Лінійна апроксимація за методом найменших модулів з мінімізацією

$$\sum_{\Omega} |y_{ij} - b_i - a_i x_{ij}| \rightarrow \min .$$

4. Лінійна апроксимація на основі мінімаксного критерію

$$\max_{\Omega} |y_{ij} - b_i - a_i x_{ij}| \rightarrow \min .$$

5. Лінійна апроксимація на основі методів, що замінюють метод найменших квадратів у випадку невиконання умов застосування цього методу (робастні та конфлюентні методи побудови залежностей по експериментальним даним).

Розглянемо можливості застосування цих методів для вимірювання параметрів руху. Перший метод на основі координат двох точок є найбільш простим в плані виконання обчислень, але найменш точним і може застосовуватися лише для попередніх оцінок і порівняння з іншими методами.

Метод найменшим квадратів є найбільш відомим та апробованим методом побудови залежностей по експериментальним даним, однак вимагає виконання ряду умов по відношенню до цих даних [5, 8].

Метод найменших модулів [7] є менш відпрацьованим і більш складним у обчислювальному плані, ніж метод найменших квадратів. Його застосування доцільно у випадках, коли вимірювання недостатньо точні або виконуються під впливом великої кількості факторів, що заважають їх проведенню та викривляють результати вимірювань.

Робастні методи побудови залежностей по експериментальним даним застосовуються у випадку відхилення розподілу похибок вимірювань від нормального закону або у випадку присутності грубих похибок та промахів у результатах вимірювань [5]. Найпростіші робастні методи полягають в попередньому виключенні експериментальних даних, що далеко відхиляються від залежності, побудованій на основі методу найменших квадратів, і в наступній побудові залежності по даним, що залишилися. Конфлюентні методи обробки експериментальних даних та методи на основі дробово-раціональних оцінок замінюють метод найменших квадратів і не вимагають виконання умови про нормальний розподіл похибок вимірювань.

Методи на основі мінімаксного критерію [8] дозволяють визначити оптимальну функціональну за-

лежність у випадку обробки результатів прецизійних вимірювань, коли їх похибки не перевищують інструментальної похибки засобу вимірювань. Однак, ці методи є досить складними у обчислювальному плані. Вимірювання параметрів руху виконуються, як правило, у оперативному режимі, тому застосування досить складних обчислювальних методів є неприйнятним.

Тому далі будемо розглядати метод найменших квадратів та конфлюентні і дробово-раціональні методи, що замінюють метод найменших квадратів у випадку невиконання умов застосування цього методу.

Розглянемо теоретичну оцінку точності лінійної апроксимації мітки на основі методу найменших квадратів. У відповідності до [5] лінійна залежність подається у вигляді

$$y = b_i + a_i (x - x_{i\text{cp}}) ,$$

$$x_{i\text{cp}} = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L x_{ij} .$$

Оцінка коефіцієнта нахилу мітки

$$\hat{a}_i = \frac{\sum_{j=1}^L y_{ij}^* (x_{ij} - x_{i\text{cp}})}{\sum_{j=1}^L (x_{ij} - x_{i\text{cp}})^2} \quad (2)$$

є незміщеною з дисперсією

$$\sigma_{\hat{a}_i}^2 = \frac{\sigma_{y^*}^2}{\sum_{j=1}^L (x_{ij} - x_{i\text{cp}})^2} ,$$

де $\sigma_{y^*}^2$ – дисперсія похибки вимірювань координат y_{ij}^* мітки.

Дисперсія $\sigma_{y^*}^2$ може бути розрахована теоретично для даного методу вимірювань і технічних засобів вимірювань, що використовуються, або оцінена на основі експериментальних даних:

$$\sigma_{y^*}^2 = \frac{1}{L-1} \sum_{j=1}^L (y_{ij}^* - \hat{y}_{ij})^2 ,$$

де $\hat{y}_{ij} = b_i + a_i (x_{ij} - x_{i\text{cp}})$ – розрахункове значення координати y_{ij} в точці з координатою x_{ij} .

Довірчий інтервал похибки оцінки \hat{a}_i

$$\Delta_{\text{а дов}} = \frac{t_p \sigma_{y^*}}{\sqrt{\sum_{j=1}^L (x_{ij} - x_{i\text{cp}})^2}} ,$$

де t_p – коефіцієнт Стьюдента з числом ступенів свободи $L-1$ (похибка має нормальний розподіл як результат сумісної дії похибок вимірювань координат L точок).

Результат визначення поточного кутового положення

$$\hat{\alpha}_i = \arctg(\hat{a}_i) , \quad \sigma_{\hat{\alpha}_i}^2 = \frac{\sigma_{\hat{a}_i}^2}{1 + \hat{a}_i^2} . \quad (3)$$

З математичної точки зору застосування методу найменших квадратів вимагає виконання ряду умов [5, 16]:

1. Значення аргументу лінійної функції (координати x_{ij}) відомі точно.

2. Результати вимірювань значень функції (координати y_{ij}) містять тільки випадкові похибки, що незалежні, мають нульове математичне сподівання і дисперсію $\sigma_{y^*}^2$.

3. Похибки вимірювань y_{ij}^* мають нормальний розподіл.

В даному методі вимірювань параметрів руху перша умова не виконується, так як координати x_{ij} вимірюються на відеозображенні з похибкою, що має дисперсію $\sigma_{x^*}^2$. Похибки вимірювань координат y_{ij}^* складаються з похибок вимірювань координат y_{ij1}, y_{ij2} двох контурних точок мітки з координатою x_{ij} (на реальному відеозображенні мітка – це не лінія, а смуга певної ширини). Ці похибки містять рівномірно розподілену похибку дискретності відеозображення і нормально розподілений шум електронних схем пристрою формування відеозображень. Тому друга умова виконується, третя – виконується наближено.

У випадку невиконання першої умови оцінка коефіцієнта \hat{a}_i містить додаткові похибки і не є незміщеною. Тому необхідно переходити до конфлюєнтних методів побудови залежностей, що враховують наявність похибки в x_{ij} . Такі методи забезпечують оцінки \hat{a}_i , що сходяться к a_i із збільшенням числа точок L вимірювань координат.

У даному випадку будемо вважати, що відомі Результати вимірювань координат x_{ij}^* і y_{ij}^* , а відношення дисперсій $\lambda_\sigma = \sigma_{y^*}^2 / \sigma_{x^*}^2 = 1$, так як ці вимірювання виконуються для одного відеозображення однаковими методами. Тоді [5]

$$\hat{a}_{ci} = \lambda_c \pm \sqrt{\lambda_c^2 + \lambda_\sigma}, \tag{4}$$

де

$$\lambda_c = \frac{\Sigma_y - \lambda_\sigma \Sigma_x}{2 \Sigma_{xy}}, \quad \Sigma_y = \sum_{j=1}^L (y_{ij}^* - y_{icp}^*)^2, \quad \Sigma_x = \sum_{j=1}^L (x_{ij}^* - x_{icp}^*)^2,$$

$$\Sigma_{xy} = \sum_{j=1}^L (x_{ij}^* - x_{icp}^*) (y_{ij}^* - y_{icp}^*), \quad x_{icp}^* = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L x_{ij}^*, \quad y_{icp}^* = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L y_{ij}^*$$

а знак в формулі (4) визначається з урахуванням квадранта розташування мітки на координатній площині xOy .

Оцінка \hat{a}_{ci} має зсув

$$\Delta_{\hat{a}_{ci} \text{ зсув}} = \frac{2\sigma_{y^*}^2 + \hat{a}_{ci}^2 \sigma_{x^*}^2}{\hat{a}_{ci} \Sigma_x}$$

і дисперсію

$$\sigma_{\hat{a}_{ci}}^2 = \frac{\sigma_{y^*}^2 + \hat{a}_{ci}^2 \sigma_{x^*}^2}{\Sigma_x}$$

Перевагою даного методу лінійної апроксимації у порівнянні з методом найменших квадратів також є те, що в результаті лінійної апроксимації отримуємо пряму ортогональної регресії. Для такої прямої мінімальна сума квадратів відстаней до точок (x_{ij}^*, y_{ij}^*) по нормалі, а не по вертикалі, як у випадку метода найменших квадратів. Такий підхід краще відповідає вимірювальній задачі, що розглядається, і забезпечує меншу похибку визначення кутів $\hat{\alpha}_i$.

Іншим варіантом лінійної апроксимації, що враховує наявність похибок вимірювань координат x_{ij}^* , є дробово-раціональні оцінки

$$\hat{a}_{pi} = \frac{\sum_{j=1}^L \omega_{bi} y_{ij}^*}{\sum_{j=1}^L \omega_{bi} x_{ij}^*},$$

де ω_{bi} – вагові коефіцієнти, $\sum_{j=1}^L \omega_{bi} = 0$.

Перевагою дробово-раціональних оцінок також є відсутність вимоги нормального закону розподілу похибок вимірювань координат x_{ij}^* і y_{ij}^* .

Для значень x_{ij}^* , що мають постійний крок $h_x = x_{ij} - x_{i(j-1)}$ (ця умова виконується для відеозображень мітки), найкращою є дробово-раціональна оцінка Хаузнера-Бреннана [5]:

$$\hat{a}_{pi} = \frac{\sum_{j=1}^L y_{ij}^* (L+1-2j)}{\sum_{j=1}^L x_{ij}^* (L+1-2j)}. \tag{5}$$

Оцінка \hat{a}_{pi} має зсув

$$\Delta_{\hat{a}_{pi} \text{ зсув}} = \frac{12\hat{a}_{pi} \sigma_{x^*}^2}{h_x^2 L (L^2 - 1)}$$

і дисперсію

$$\sigma_{\hat{a}_{pi}}^2 = \frac{12\sigma_0^2}{h_x^2 L (L^2 - 1)},$$

де $\sigma_0^2 = \sigma_{y^*}^2 + \hat{a}_{pi}^2 \sigma_{x^*}^2$ – приведена дисперсія похибок координат.

Так як дисперсія похибки вимірювань кутового положення обернено пропорційна L^3 , то при $L \geq 100$ (цілком реальне значення для сучасних цифрових відеокамер) можна забезпечити суттєво 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.

Найпростішим варіантом обчислень кутової швидкості та кутового прискорення об'єкта вимірювань є виконання операцій чисельного диференціювання за формулами:

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

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

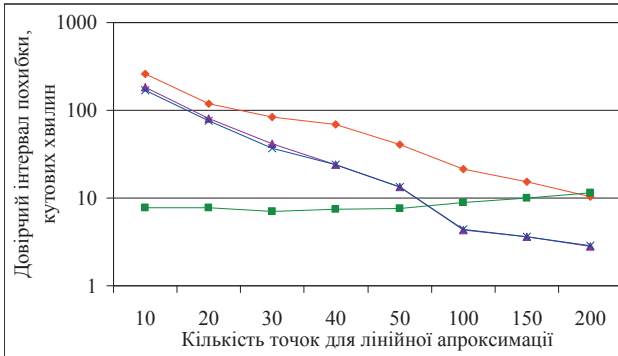
Результат вимірювань швидкості обертання може бути обчислений за формулою:

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

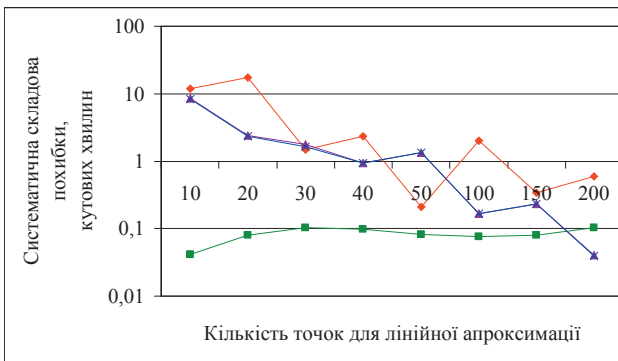
Операції чисельного диференціювання експериментальних даних, що містять похибки вимірювань, є небажаними і збільшують похибку оцінки параметрів обертального руху. Тому більш доцільно визначення цих параметрів виконувати на основі використання фільтра Калмана. Приклад використання цього фільтра для задач відеоспостереження об'єктів на основі послідовності відеозображень наведено в [17]. При цьому вектор стану об'єкта вимірювань складається із поточного кутового положення, кутової швидкості і кутового прискорення.

4. Експериментальні дослідження похибок вимірювань параметрів обертового руху

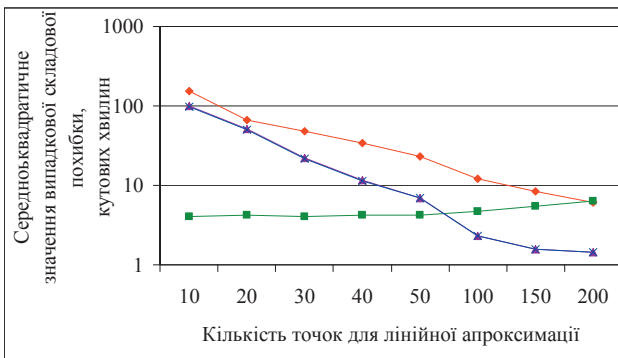
Для підтвердження ефективності запропонованого методу вимірювань параметрів обертового руху були виконані експериментальні дослідження. В ході цих досліджень вимірювалися поточні значення кутового положення мітки на основі різних методів лінійної апроксимації (рис. 2 і 3). Для вимірювання використовувалися тестові відеозображення та реальні відеозображення, отримані в діючому макеті пристрою [15].



а)



б)

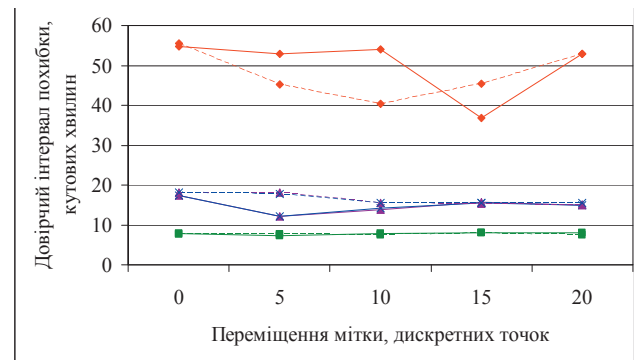


в)

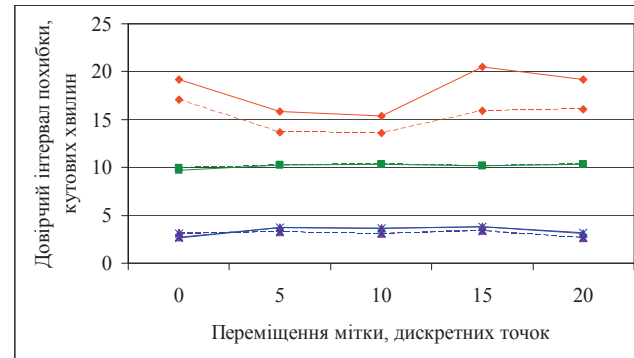
Рисунок 2. Похибки визначення кутового положення тіла обертання при використанні різної кількості точок для лінійної апроксимації мітки. Метод визначення кутового положення тіла обертання: \diamond – по 2 опорним точкам; \blacksquare – найменших квадратів; \blacktriangle – конфлюентний; \times – дробово-раціональний.

Загальні умови проведення вимірювань:

- кількість кадрів у відеопослідовності – 60, частота кадрів – 30 кадрів/с;
- розмір відеозображення 1024x1024 дискретні точки;
- використовується цифрова відеокамера з співвідношенням сигнал/шум 55 дБ та розмиттям контурів мітки 6 дискретних точок;
- здійснюється рівномірний рух тіла обертання проти стрілки годинника з швидкістю 343 градуси/с;
- відеозображення кола має яскравість 230 дискретних рівнів, мітки – 0 дискретних рівнів, поріг яскравості для сегментації – 115 дискретних рівнів;
- відновлення динамічних похибок на відеозображенні не використовується;
- довірна ймовірність 0,95.
- для обчислень використовувалися формули (1)–(5).



а)



б)

Рисунок 3. Похибки визначення кутового положення тіла обертання при наявності переміщень мітки в площині відеозображення протягом одного кадру внаслідок збурюючих впливів на об'єкт вимірювань: а) – при використанні 50 точок для лінійної апроксимації; б) – при використанні 150 точок для лінійної апроксимації; суцільна лінія – відеозображення від цифрової відеокамери без стиснення, штрихова лінія – з стисненням. Метод визначення кутового положення тіла обертання: \diamond – по 2 опорним точкам; \blacksquare – найменших квадратів; \blacktriangle – конфлюентний; \times – дробово-раціональний.

5. Висновки

За результатами проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Необхідною умовою підвищення точності вимірювань параметрів обертового руху є застосування методів алгоритмічної обробки двовимірної виміральної відеоінформації, в тому числі – методів лінійної апроксимації відеозображень мітки.

2. При малій кількості точок відеозображення мітки, для яких вимірюються координати (менше 100 точок), доцільно застосовувати метод найменших квадратів (див. рис. 2).

3. При великій кількості точок відеозображення мітки (100 та більше) доцільно застосовувати дробово-раціональний або конфлюентний методи лінійної апроксимації (див. рис. 2). Ці методи мають прийнятну для сучасних технічних засобів вимірювань обчислювальну складність та забезпечують суттєве зменшення похибки вимірювань параметрів обертового руху (до 4...5 разів у порівнянні з іншими методами за умови, що використовуються 150...200 точок для лінійної апроксимації).

4. Вказані методи лінійної апроксимації для реальних умов вимірювань (наявність завад, вібрацій об'єкту вимірювань тощо) демонструють стабільність точнісних характеристик (див. рис. 3). Наприклад, переміщення мітки у 20 дискретних точок відповідає випадковим переміщенням об'єкта вимірювань до 5 мм. При цьому похибки вимірювань параметрів обертового руху для дробово-раціонального методу та методу найменших квадратів практично не збільшуються.

5. Використання запропонованого методу вимірювань параметрів обертового руху дозволяє забезпечити точність вимірювань не гіршу, ніж існуючі методи (14 розрядів двійкового коду, довірчий інтервал похибки 2'). При цьому розширюються функціональні можливості засобу вимірювань в частині визначення миттєвих значень параметрів обертового руху, реєстрації та цифрової обробки результатів вимірювань. Також додатково забезпечується стабільність роботи засобу вимірювань та незмінність його точнісних характеристик в умовах наявності збурюючих впливів на об'єкт вимірювань.

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

Література

- Шваб И.А., Селезнев А.В. Измерение угловых ускорений. – М.: Машиностроение, 1983. – 160 с.
- Одинец С.С., Топилин Г.Е. Средства измерения крутящего момента. – М.: Машиностроение, 1977. – 160 с.
- 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.
- Рябыкин С.Л., Загавура Ф.Я. Средства измерения параметров движения: Учебное пособие для вузов. – К.: Вища школа, 1987. – 136 с.
- Грановский В.А., Сирая Т.Н. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
- Фалькович С.Е., Хомяков Э.Н. Статистическая теория измерительных радиосистем. – М.: Радио и связь, 1981. – 288 с.
- Мудров В.И., Кушко В.Л. Методы обработки измерений. – М.: Советское радио, 1976. – 192 с.
- Яцук В.О., Малачівський П.С. Методи підвищення точності вимірювань: Підручник. – Львів: Бескид Біт, 2008. – 368 с.
- Сарвин А.А. Системы бесконтактных измерений геометрических параметров. – Л.: Издательство Ленинградского университета, 1983. – 144 с.
- Измерительные сканирующие приборы / Под ред. Б.С. Розова. – М.: Машиностроение, 1980. – 198 с.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- Лоусон Ч., Хенсон Р. Численное решение задач метода наименьших квадратов. – М.: Наука, 1986. – 230 с.
- Форсайт Д., Понс Д. Компьютерное зрение. Современный подход. – М.: Техносфера, 2005. – 840 с.