

УДК 629.735.054.07:531.383(045)

<sup>1</sup>В.П. Харченко, д.т.н., проф., <sup>2</sup>В.Б. Ларін, д.ф.м.н., проф.,  
<sup>3</sup>С.І. Ільницька, <sup>4</sup>О.В. Куценко**КАЛІБРУВАННЯ ДАТЧИКІВ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ ДЛЯ МАЛОГАБАРИТНОЇ ІНТЕГРОВАНОЇ НАВІГАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ**<sup>1,3,4</sup> Національний авіаційний університет, nauka@nau.edu.ua, svetlana-ilmnicka@yandex.ru<sup>2</sup> Інститут механіки ім. С.П. Тимошенко НАНУ

*Розглянуто методику калібрування датчиків кутової швидкості за допомогою поворотного стенду з використанням еталонних та вимірних значень куткових швидкостей. Запропоновано відповідну модель вимірювань датчиків. Наведено приклад тестового калібрування блоку датчиків кутової швидкості типу MEMS, що входять до складу інерціального вимірювального блоку.*

**Ключові слова:** калібрування, датчики кутової швидкості, зміщення нуля, похибка масштабного коефіцієнту, похибка неортогональності, MEMS, безплатформна інерціальна навігаційна система (БІНС)

**Вступ.** Із стрімким розвитком ринку безпілотних літальних апаратів (БПЛА) різних класів, зокрема малих БПЛА, актуальним стає питання розробки відповідних навігаційних систем, до яких крім стандартних вимог щодо точності та надійності висуваються ще додаткові вимоги у вигляді масо-габаритних характеристик та вартості.

Загальна тенденція розробки таких навігаційних систем полягає в об'єднанні різномірних джерел інформації у єдиний інформаційний комплекс. Одним із найбільш привабливих варіантів є інтеграція безплатформної інерціальної (БІНС), супутникової системи навігації, датчиків вимірювання магнітного поля Землі та висоти польоту. Причому зазвичай в такому варіанті використовуються одночастотні плати систем супутникової навігації та інерціальні, магнітні і барометричні датчики типу MEMS, оскільки вони відносно дешеві, малі, легкі, споживають мало електроенергії та забезпечують непогану короткотривалу точність. Можна сказати, що ядром такої інтегрованої навігаційної системи є БІНС, оскільки вона забезпечує неперервну інформацією про орієнтацію та положення об'єкту з високою частотою оновлення, вона може працювати за будь-яких погодних умов, не чутлива до завад. Проте, звичайно, у неї є свої недоліки. Оскільки БІНС побудована таким чином, що із вимірних куткових швидкостей та лінійних прискорень шляхом інтегрування отримується навігаційне рішення, то вона є вельми чутливою до систематичних похибок складових датчиків. Наприклад, зміщення нуля датчика кутової швидкості (ДКШ) спричиняє похибку при визначенні лінійної швидкості, що пропорційна до  $t^2$ , а координат –  $t^3$ . Тому процедура калібрування інерціальних датчиків, зокрема ДКШ, є вельми важливою для адекватного функціонування БІНС.

Причому, одним із етапів калібрування є попередня оцінка параметрів похибок датчиків, перевірка їх паспортних даних, заявлених виробником, особливо, якщо мова йде про датчики типу MEMS. Просто іноді буває, що заявляються покращені характеристики одного датчика з цілої серії випуску, що не завжди означає те, що й у цілої серії будуть ті ж характеристики. Тому для отримання оптимальної точності від конкретного датчика важливо оцінити його паспортні характеристики та провести індивідуальне калібрування.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Міжнародною практикою є використання стандарту Інституту інженерів електротехніки і електроніки IEEE (англ. Institute of Electrical and Electronics Engineers) у якості джерела інформації про калібрувальні моделі ДКШ [1]. Проте там запропоновані занадто загальні та вельми складні моделі датчиків, які потребують уточнення для кожного конкретного випадку. У роботі [2] пропонується методика калібрування інерціального вимірювального блоку (ІВБ), що складається з 3-х оптоволоконних гіроскопічних датчиків та 3-х акселерометрів, за допомогою спеціального калібрувального стенду з трьома степенями свободи. Прикладним інженером з компанії Analog Device описана проста методика попереднього калібрування одноосового ДКШ [3], яка полягає у здійсненні декількох поворотів датчика вручну на заздалегідь відомі кути та чисельній інтеграції вимірювань датчика. Тут пропонується спочатку зробити статичні вимірювання та компенсувати похибку зміщення нуля, після чого знайти похибку масштабного коефіцієнту у вигляді співвідношення відомого значення кута повороту на обчислене з вимірювань ДКШ значення. Описана в роботі [3] методика доволі проста та не потребує дорогого обладнання, але і не забезпечує високої точності вимірювань. У роботі [4] запропонована модифікована процедура калібрування, в основі якої лежить стохастичне моделювання шумів, а також температурне калібрування датчиків. Нижче в даній роботі пропонується проміжний варіант між [2] і [3], оскільки методика калібрування не настільки проста, як це описано в [3], проте і не залучає такого дорогого обладнання та точних датчиків, як це описано в роботі [2].

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є перевірка паспортних даних та проведення попереднього грубого калібрування трьох ортогонально розміщених ДКШ типу MEMS, що є складовою

ІВБ, за допомогою не надто прецизійного поворотного стелу та мініатюрної курсовертикалі у якості еталону сигналу. Для цього спочатку обирається модель датчиків, проводиться ряд вимірювань та, за допомогою порівняння відповідних еталонних сигналів з виміряними, та регресивного аналізу визначаються значення похибок датчиків.

**Виклад основного матеріалу.** Зазвичай калібрування здійснюється за допомогою порівняння певних еталонних значень з вимірюваннями датчиків при наявності відповідної моделі датчиків. В залежності від складності моделі та кількості невідомих параметрів визначається постановка експериментальних вимірювань так, щоб кількість отриманих незалежних рівнянь була більшою за кількість невідомих параметрів похибок. За еталонні сигнали для ДКШ зазвичай обирається швидкість обертання Землі, або лише задана швидкість обертання поворотного стелу у тому випадку, коли датчики настільки «грубі», що не можуть «відчути» обертання Землі.

**Модель вимірювань ДКШ.** Для виконання процедури калібрування спочатку потрібно мати модель вимірювань датчика. В даному випадку пропонується взяти за основу модель вимірювань ДКШ з роботи [3], проте дещо спростити її та не враховувати похибку нелінійності, оскільки її внесок відносно невеликий у порівнянні з наявними шумами вимірювань обраних датчиків:

$$\begin{aligned} \omega_x^m &= (1 + s_{\omega x})(\omega_x + \alpha_{xz}\omega_y - \alpha_{xy}\omega_z + b_{\omega x}) + \eta_{\omega x}, \\ \omega_y^m &= (1 + s_{\omega y})(\omega_y + \alpha_{yx}\omega_z - \alpha_{yz}\omega_x + b_{\omega y}) + \eta_{\omega y}, \\ \omega_z^m &= (1 + s_{\omega z})(\omega_z + \alpha_{zy}\omega_x - \alpha_{zx}\omega_y + b_{\omega z}) + \eta_{\omega z}, \end{aligned}$$

де  $\omega^m = [\omega_x^m, \omega_y^m, \omega_z^m]^T$  - вимірний сигнал кутової швидкості,  $s_{\omega}$  - масштабний коефіцієнт ДКШ,  $\omega = [\omega_x, \omega_y, \omega_z]^T$  - еталонні значення кутової швидкості,  $\alpha_{ij}$  - похибка неортогональності осей чутливості,  $b_{\omega} = [b_{\omega x}, b_{\omega y}, b_{\omega z}]^T$  - зміщення нуля,  $\eta$  - випадкові похибки вимірювань.

В матричному вигляді вищенаведена систему рівнянь записуємо наступним чином:

$$\omega^m = A \cdot \omega + b + \eta, \text{ де } A = S_{\omega} A_{\alpha}; \quad b = S_{\omega} b_{\omega}; \quad S_{\omega} = \text{diag}\{1 + s_{\omega x}, 1 + s_{\omega y}, 1 + s_{\omega z}\} - \text{діагональна}$$

матриця похибок масштабного коефіцієнту;  $A_{\alpha} = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_{xz} & -\alpha_{xy} \\ \alpha_{yx} & 1 & -\alpha_{yz} \\ \alpha_{zy} & -\alpha_{zx} & 1 \end{bmatrix}$  - матриця похибок, пов'язана з

неортогональністю осей чутливості ДКШ.

Вектором невідомих параметрів є  $\bar{X} = [A_1 \ A_2 \ A_3 \ b_1 \ b_2 \ b_3]^T$ ,  $\dim[\bar{X}] = 12 \times 1$ , де  $A = [A_1; A_2; A_3]$ ,  $\dim[A_1] = \dim[A_2] = \dim[A_3] = 1 \times 3$ . Отже, є 12 невідомих параметрів: 9 для А, 3 для b. Для того, щоб знайти 12 невідомих параметрів, потрібно мати кількість незалежних рівнянь  $n_e \geq 12$ .

**Методика калібрування ДКШ.** Для набору необхідної кількості даних проводиться ряд вимірювань наступного характеру. По черзі відносно осей X та Y здійснюється нахили на обрані кути (табл.1) та здійснюється обертання навколо вертикальної осі близько 1-2 хвилин за та проти часової стрілки. Тобто всього отримуємо 7 положень стелу, у кожному з яких вимірюємо додатну та від'ємну кутову швидкість руху.

Таблиця 1

Схема експерименту

№	1	2	3	4	5	6	7
Fi1, rad	0	0	0	0	-Pi/4	Pi/4	-Pi/2
Fi2, rad	0	-Pi/4	Pi/4	-Pi/2	0	0	0
Еталонні [w <sub>x</sub> w <sub>y</sub> w <sub>z</sub> ] <sup>'</sup>	±w* [0 0 1] <sup>'</sup>	±w*k* [1 0 1] <sup>'</sup>	±w*k* [-1 0 1] <sup>'</sup>	±w* [-1 0 0] <sup>'</sup>	±w*k* [0 -1 1] <sup>'</sup>	±w*k* [0 1 1] <sup>'</sup>	±w* [0 1 0] <sup>'</sup>

Тут в таблиці Fi1, Fi2 – кути нахилу в радіанах відносно осей X та Y відповідно,  $k = \sqrt{2}/2$ , w – задана швидкість обертання стелу.

Після здійснення всіх вимірювань маємо 42 лінійно незалежних рівняння: кількість експериментів  $N = 7 \times 2 = 14$ ; кількість рівнянь  $N_e = 14 \times 3 = 42$ , які в матричному вигляді записуються наступним чином:

$$B_{\Sigma} = A_{\Sigma} \bar{X} + \eta, \tag{1}$$

де  $B_{\Sigma} = [\omega_1^m; \dots; \omega_{14}^m]$  та  $A_{\Sigma} = [\tilde{A}_1; \dots; \tilde{A}_{14}]$  - це вектор вимірювань та матриця еталонних сигналів відповідно, а  $\eta$  - шумова складова. Тут  $\omega_i^m$  являє собою виміряні кутові швидкості за трьома

осями, що отримані з  $i$ -го експерименту ( $i = 1:14$ ),  $\tilde{A}_i$ - матриця еталонних сигналів розміром  $[3 \times 12]$  для  $i$ -го експерименту ( $i = 1:14$ ). Матриця  $\tilde{A}_i$  має наступний вигляд:

$$\tilde{A}_i = \begin{bmatrix} \omega_i^T & 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & 1 & 0 & 0 \\ 0_{1 \times 3} & \omega_i^T & 0_{1 \times 3} & 0 & 1 & 0 \\ 0_{1 \times 3} & 0_{1 \times 3} & \omega_i^T & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

де  $\omega_i^T$  - еталонні значення кутових швидкостей за трьома осями для  $i$ -го експерименту,  $0_{1 \times 3}$  - нульовий вектор відповідного розміру.

Із системи рівнянь (1) визначається безпосередньо вектор  $\bar{X}$ :

$$\bar{X} = (A_\Sigma^T A_\Sigma)^{-1} \cdot A_\Sigma^T \cdot B_\Sigma. \quad (2)$$

З вектору  $\bar{X}$  потрібно виділити  $S, A_\alpha, b_\omega$ , що робиться наступним чином:

$$S = \text{diag}\{X(1), X(5), X(9)\}; A = [X(1:3); X(4:6); X(7:9)], b_a = S^{-1} \cdot b; A_\alpha = S^{-1} \cdot A. \quad (3)$$

Для підвищення точності обрахунку вектору  $\bar{X}$  пропонується використовувати QR-факторизацію.

Матриця  $A_\Sigma$  може бути розкладена на дві матриці:  $A_\Sigma^{qr} = Q^T R$ , причому  $QQ^T = I$ , а  $R = \begin{bmatrix} R_0 \\ 0 \end{bmatrix}$ , де

$R_0$  є квадратною матрицею, тобто  $\text{size}(R_0) = n \times n$ .

Представимо добуток матриць  $Q \cdot B_\Sigma$  у вигляді двох векторів-стовпців:

$$Q \cdot B_\Sigma = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де  $\text{size}(z_1) = n \times 1$ . Тоді вектор невідомих параметрів обраховуємо наступним чином:  $\bar{X} = R_0^{-1} \cdot z_1$  (5)

Потрібно відмітити, що числа обумовленості отриманої за допомогою QR-факторизації матриці  $R_0$  та матриці сумарних вимірювань  $A_\Sigma$  пов'язані наступним співвідношенням:  $\text{cond}(R_0) = \sqrt{\text{cond}(A_\Sigma^T A_\Sigma)}$ . (6)

Порівнюючи рівняння для визначення вектору  $\bar{X}$  (2) і (5) та приймаючи до уваги (6), слід відмітити, що рівняння (5) підвищує точність визначення  $\bar{X}$ .

Опис експерименту та обробка результатів. Для проведення експерименту згідно описаної вище методики було використано установку для перевірки та тестування гіроскопічних приладів УПГ-48, мініатюрну курсовертикаль IG-500N фірми SBG Systems у якості еталону сигналу та ІВБ ADIS16362 фірми Analog Device, що включає в себе три ортогонально розташованих акселерометри і три ДКШ.

Блок ADIS16362 є функціонально завершеним ІВБ, який на виході видає 14-ти розрядні дані, що відповідають проєкціям кутової швидкості та лінійного прискорення за трьома осями. Обмін інформацією здійснюється через інтерфейс SPI. Технічні характеристики ДКШ у складі ADIS16362: діапазон вимірювань - ( $\pm 300, \pm 150, \pm 75$  °/с), початкове зміщення нуля - ( $\pm 3$  °/с), дрейф зміщення нуля (0.007%/с), невивага відносно корпусу ( $\pm 0.5$  °), смуга пропускання 3dB (330 Гц), Angular Random Walk ( $2$  °/год<sup>1/2</sup>), вихідний шум (0.8 °/с, rms), нелінійність ( $\pm 0.1$  % від повного діапазону), вплив лінійного прискорення на зміщення нуля (0.05 °/с/g).

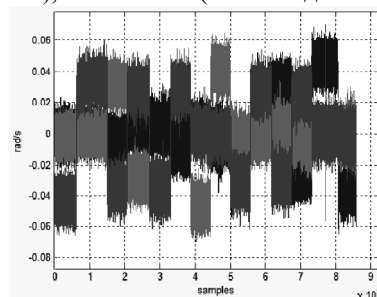


Рис. 1. Вимірювання ДКШ при заданій швидкості обертання 3 град/с

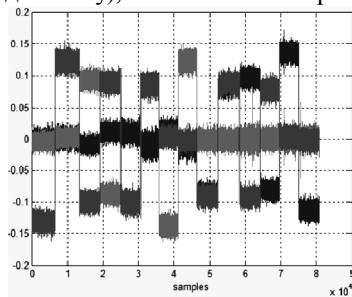


Рис. 2. Вимірювання ДКШ при заданій швидкості обертання 9 град/с

Для здійснення калібрування ДКШ згідно описаної вище методики було проведено ряд вимірювань на двох різних швидкостях на початку діапазону вимірювання ( $\pm 3, 9$  deg/s), після чого складено систему рівнянь (1), яка складалась із 84-ох (по 42 для кожної швидкості) лінійно незалежних рівнянь. Розраховували число обумовленості отриманої експериментальної матриці  $\text{cond}(A_\Sigma) = 20,93$ . Додатково для

оцінки адекватності вимірних даних було використано вектори з рівняння (4), з яких обраховано так звану «нев'язку» даних:  $\text{nev} = (\|z_2\| / \|z_1\|) \cdot 100\%$ , (7)

де  $\| \cdot \|$  - норма вектору. Зрозуміло, що в ідеалі це повинно бути 0 %, проте отримали 0.82 %. Це пояснюється деякими люфтами по осі обертання (рис. 1, 2) та певними погрішностями у виставці кутів, наприклад, не точно 45°, а 45.3°, оскільки установка УПГ-48 була, на жаль, не надто прецизійною.

Обробивши дані вимірювань згідно вищенаведених формул, отримали оцінки матриці неортогональності ДКШ, похибки масштабного коефіцієнту та зміщення нуля (табл. 2).

Таблиця 2

Швидкості обертання	Матриця неортогональності $A_\alpha$			Масштабний коефіцієнт S	Зміщення $b_\omega$
3 град/с, 9 град/с	1.0000	-0.0062	0.0160	1.0015	0.0006
	0.0063	1.0000	0.0118	1.0007	-0.0012
	-0.0171	-0.0071	1.0000	1.0003	-0.0003

Розглянемо тепер більш детально матрицю  $A$ , яку отримуємо безпосередньо з вектору  $\vec{X}$ , рівняння (3). Потрібно зазначити, що матриця  $A$  дуже близька до одиничної матриці  $I$ , тому доцільно представити її у наступному вигляді:  $A = I + \varepsilon B$ , де  $\varepsilon B$  в свою чергу може бути представлена у вигляді суми деяких симетричної та косиметричної матриці:

$$\varepsilon B = \varepsilon B_{sym} + \varepsilon B_{skew}, \quad \varepsilon B_{sym} = \left( \frac{\varepsilon B + \varepsilon B^T}{2} \right); \quad \varepsilon B_{skew} = \left( \frac{\varepsilon B - \varepsilon B^T}{2} \right)$$

Пам'ятаючи про малий порядок величин в матрицях  $\varepsilon B_{sym}$ ,  $\varepsilon B_{skew}$ , можна вважати справедливим наступне співвідношення (з точністю до  $\varepsilon^2$ ):  $I + \varepsilon B \approx (I + \varepsilon B_{sym})(I + \varepsilon B_{skew}) \approx (I + \varepsilon B_{skew})(I + \varepsilon B_{sym})$ . (8)

Перший добуток тут характеризує власне похибки неортогональності та масштабних коефіцієнтів, яку можна розглядати як оцінку матриці чутливості блоку ДКШ. Другий добуток тут характеризує похибку невиставки осей чутливості датчика відносно калібрувальної площини

$$(I + \varepsilon B_{sym}) = \begin{bmatrix} 1.0015 & 0.0001 & -0.0005 \\ 0.0010 & 1.0007 & 0.0023 \\ -0.0005 & 0.0023 & 1.0003 \end{bmatrix} \quad (I + \varepsilon B_{skew}) = \begin{bmatrix} 1.0000 & -0.0063 & 0.0165 \\ 0.0063 & 1.0000 & 0.0095 \\ -0.0165 & -0.0095 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

Можна сказати, що матриця  $(I + \varepsilon B_{skew})$  є матрицею повороту, що пов'язує тригранник осей чутливості датчиків та тригранник калібрувальної площини. Для оцінки величини поворотів відносно відповідних осей, зважаючи на те, що величини поворотів малі, для запису даної матриці можна використовувати наступну форму [6]:

$$(I + \varepsilon B_{skew}) \cong \begin{bmatrix} 1 & \mu_3 & -\mu_2 \\ -\mu_3 & 1 & \mu_1 \\ \mu_2 & -\mu_1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$  – малі кути повороту тригранника Охуз осей чутливості датчиків по осям  $x, y, z$ , відповідно.

Цікаво було б подивитись також, наскільки стаціонарними є досліджувані похибки, їх залежність від зміни температури тощо. Проте без спеціального обладнання є можливим дослідження лише похибок зміщення нуля ДКШ. Тому проведемо наступне додаткове дослідження. Як відомо, похибка зміщення нуля додає фіксовані похибки до вихідних вимірювань датчика. Це виглядає так, ніби ДКШ обертається в той час як він знаходиться в нерухомому положенні. Результатом є постійне накопичення похибки визначення кута, яка отримується в результаті множення похибки зміщення нуля ДКШ та часу [3]:

$$\varphi_{BIAS} = \int_0^{t1} b_\omega dt = b_\omega \cdot t1. \quad (10)$$

Доволі простим способом оцінювання похибок зміщення нуля ДКШ є усереднення виходів з датчиків в той час, коли прилад знаходиться в нерухомому стані.

При визначенні довжини вектору усереднення для отримання максимальної точності можна використовувати графік варіації Аллана (з англ. Allan Variance plot), який встановлює співвідношення між оцінкою зміщення нуля та часом інтегрування (усереднення) [3]. Багато виробників інерціальних датчиків приводять такі графіки в технічних специфікаціях датчиків, зокрема для блоку ДКШ у складі ADIS16362 маємо таку характеристику (рис. 3), з якої бачимо, що оптимальним (в сенсі отримання найменшої похибки визначення зміщення нуля) є час інтегрування від 100 до 200 с.

Прийнявши цю інформацію до уваги, дослідимо тепер наскільки стабільними в часі є похибки усереднюємо кутові швидкості. Результати дослідження приведено на рис.4. Тут  $b_\omega = [b_x, b_y, b_z]$  – зміщення нуля ДКШ в %/с за осями  $x, y, z$  (суцільна лінія з кружками, штрихова з квадратами, штрих-

пунктирна з трикутниками) відповідно. З рис. 4 бачимо, що похибки зміщення нуля ДКШ є такими, що повільно змінюються в часі, причому доволі незначним чином на встановлених режимах (інтервал часу від 5 до 15 год). Відзначимо схожість порядку даних, представлених на рис. 4 та в табл. 2, проте відмітимо деякі розбіжності, які можуть бути зумовлені нестационарністю зміщення нуля ДКШ,

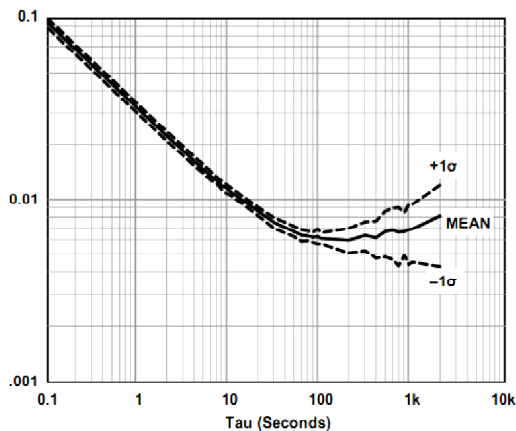


Рис. 3 Графік Allan Variance для датчиків кутової швидкості

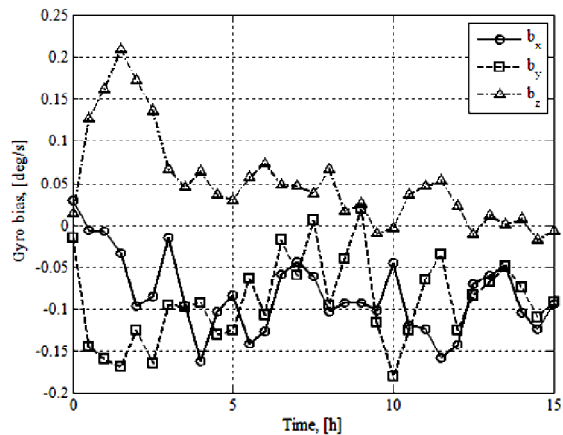


Рис.4 Дрейф зміщення нуля ДКШ в часі

температурними дрейфами тощо, що видно з рис. 4.

В результаті даного спостереження можна зробити припущення, що визначивши похибки зміщення нуля, можна деяких час досить ефективно їх компенсувати без застосування додаткових засобів (як, наприклад, розширення вектору стану фільтра Калмана для оцінки зміщення нуля ДКШ тощо), оскільки видно, що встановившись на певному значенні, вони тривалий час потім тримаються в його межах.

**Висновки.** Описана в роботі методика калібрування на поворотному стенді була апробована на даних при двох різних швидкостях обертання. Для оцінки сумісності отриманої системи рівнянь було розраховано число обумовленості сумарної експериментальної матриці та розраховано відсоток нев'язки даних, отримані значення були в допустимих нормах. Також додатково було досліджено визначення похибки зміщення нуля ДКШ з використанням статичних вимірювань на великому інтервалі часу. Порядок визначених похибок за двома методиками співпадав, і відповідав паспортним даним датчиків [5]. Проте слід зазначити, що дані експерименти були проведені швидше для попередньої «грубої» оцінки похибок датчиків. Для того, щоб можна було говорити про більш точні результати і можливість подальшої компенсації цих похибок в алгоритмах обробки, необхідно повторити експеримент на більш точному калібрувальному стенді, наприклад на одному із трьох- чи двох-осьових стендів [7].

Для більш точної оцінки внеску калібрування датчиків у покращення обрахунку навігаційного рішення інтегрованою навігаційною системою потрібно здійснити одночасне калібрування усіх складових ІВБ, а також магнітометра та висотоміра, після чого провести ряд експериментів з наявністю певної еталонної траєкторії, що є темою подальших досліджень.

#### Список літературних джерел

1. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Single-Degree-of-Freedom Rate-Integrating Gyros IEEE. Std 517™-1974(R2005) / American National Standards Institute, IEEE Standards Board, Gyro and Accelerometer Panel of the IEEE Aerospace Electronics System Society. – 2005. - 79 p.
2. Lee S-J. Determination of Error Parameters of Strapdown INS Sensor Unit Using the 3-axis Motion Table / Lee S-J., Tunik A.A., Kim J-Ch. // Proceeding of the KSAS Spring Annual Meeting '99 / Korea. - 1999. – P. 485-488.
3. Mark Looneys A simple calibration for MEMS gyroscopes. Analog Devices Електронний ресурс // <http://www.edn-europe.com>.
4. Priyanka Aggarwal, Zainab Syed, Dr. Xiaoji Niu, Dr. Naser El-Sheimy, Canada. Cost-effective Testing and Calibration of Low Cost MEMS Sensors for Integrated Positioning, Navigation and Mapping Systems
5. Технічні характеристики інерціального вимірювального блоку ADIS 16362. Електронний ресурс // <http://www.analog.com>.
6. Larin V.B. Attitude-Determination Problems for a Rigid Body // Int. Appl. Mech. – 2001.– 37, N7. – P. 870 – 898.
7. Сайти виробників калібрувальних поворотних стендів. Електронний ресурс // [<http://www.acutronic.com/>; <http://www.ixmotion.com/>; <http://www.actidyn.com/>]