

УДК 531.768

М. Г. Черняк, В. В. Рибак, В. А. Палюшок

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОЇ ТОЧНОСТІ КАЛІБРУВАННЯ ТРИВІСНОГО БЛОКА НАВІГАЦІЙНИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ НА ОДНОВІСНОМУ ПОВОРОТНОМУ СТЕНДІ

Вступ

Задача забезпечення заданої точності калібрування тривісного блока навігаційних акселерометрів (БА) є актуальною як для виробників акселерометрів при виконанні первинного (еталонного) калібрування, так і для користувачів БА при виконанні періодичного або позачергового його калібрування[1], [2], [3]. На даний час ця задача вирішується шляхом використання обладнання з надлишковою точністю, яке вимагає великих затрат на його закупівлю та обслуговування[4], [5], хоча в більшості випадків використання такого обладнання не є доцільним.

Це зумовлено недостатнім опрацюванням питання про вплив його інструментальних похибок на точність ідентифікації паспортних коефіцієнтів метрологічної моделі БА. Дослідження цього питання дозволить отримати вирази для розрахунку похибок ідентифікації коефіцієнтів метрологічної моделі(ММ) БА, та висунути вимоги до стендового обладнання, на якому проводиться його калібрування з заданою точністю. Однак в сучасній літературі дане питання висвітлене недостатньо.

Дана стаття є розвитком дослідження способу калібрування тривісного БА на одновісному поворотному стенді (ОПС), який описаний в статті [6]. В [6] отримані вирази для однозначної ідентифікації коефіцієнтів, найбільш часто використовуваної на практиці, лінійної метрологічної моделі БА. Як зазначено в [6], в даних виразах відсутня методична похибка ідентифікації коефіцієнтів цієї моделі, тобто вся похибка ідентифікації зумовлена інструментальною складовою, яка викликана неідеальністю стендового обладнання, на якому проводиться калібрування БА. Однак в [6] не висвітлене питання щодо точності ідентифікації коефіцієнтів метрологічної моделі БА.

Постановка задачі

Метою даної статті є розробка математичної моделі похибок калібрування БА на одновісному поворотному стенді та визначення вимог до стендового обладнання, виходячи з умови забезпечення заданої точності калібрування БА.

Математична модель інструментальних похибок калібрування БА на ОПС

Згідно з [6], джерелами інструментальних похибок є систематичні (такі, що повторюються в кожному тестовому положенні) кутові похибки початкового горизонтування площадки одновісного поворотного стенду α_1 та α_2 , кутова похибка переустановки БА на площадку ОПС α_3 , та випадкова кутова похибка завдання тестового кута повороту α_4 та випадкова похибка вимірювання вихідних сигналів БА ΔU_{II} . Надалі джерела похибок позначатимемо як ξ_s , де s – номер джерела.

Прийmemo, що похибка ідентифікації визначається за виразами

$$\begin{aligned}\delta_{ii} &= \left(K_{ii|\xi_s \neq 0} - K_{ii|\xi_s = 0} \right) K_{iin}^{-1}, \\ \delta_{ij} &= \left(K_{ij|\xi_s \neq 0} - K_{ij|\xi_s = 0} \right) K_{ijn}^{-1}, \\ \Delta a_{0i} &= \left(U_{0i|\xi_s \neq 0} - U_{0i|\xi_s = 0} \right) K_{iin}^{-1},\end{aligned}\quad (1)$$

де $K_{ii|\xi_s = 0}$, $K_{ii|\xi_s \neq 0}$, $K_{ij|\xi_s = 0}$, $K_{ij|\xi_s \neq 0}$, $U_{0i|\xi_s = 0}$, $U_{0i|\xi_s \neq 0}$ – відповідно коефіцієнти перетворення (КП), коефіцієнти перехресної чутливості (КПЧ) та зміщення нулів (ЗН), визначені за допомогою способу калібрування, розробленого в [6] у випадках, коли визначені вище джерела ξ_s інструментальної похибки дорівнюють нулю або ні; $i, j = x, y, z, i \neq j$ – позначення вимірювального відповідного каналу БА згідно з рисунками статті [6]; K_{iin} – номінальний КП; K_{ijn} – номінальний КПЧ.

Відповідно до визначеної вище класифікації джерел ξ_s , шукані похибки запишемо у вигляді

$$\begin{aligned}\delta_{ii} &= \gamma_{1ii}\alpha_1 + \gamma_{2ii}\alpha_2 + \gamma_{3ii}\alpha_3 \pm \sqrt{(\gamma_{4ii}\alpha_4)^2 + (\gamma_{5ii}\Delta U_{II})^2}, \\ \delta_{ij} &= \gamma_{1ij}\alpha_1 + \gamma_{2ij}\alpha_2 + \gamma_{3ij}\alpha_3 \pm \sqrt{(\gamma_{4ij}\alpha_4)^2 + (\gamma_{5ij}\Delta U_{II})^2}, \\ \Delta a_{0i} &= \gamma_{1Ui}\alpha_1 + \gamma_{2Ui}\alpha_2 + \gamma_{3Ui}\alpha_3 \pm \sqrt{(\gamma_{4Ui}\alpha_4)^2 + (\gamma_{5Ui}\Delta U_{II})^2}.\end{aligned}\quad (2)$$

де γ_{nii} , γ_{nij} , γ_{nUi} – вагові коефіцієнти відповідних джерел інструментальної похибки; $n = \overline{1..5}$ – відповідний індекс джерела похибки ідентифікації; $i, j = x, y, z, i \neq j$ – відповідний канал БА.

Знайдемо вирази для розрахунку цих вагових коефіцієнтів джерел похибки ідентифікації. Як приклад розглянемо знаходження виразів ваго-

Системи та процеси керування

вих коефіцієнтів, які входять до похибки, визначеної в (2), похибки ідентифікації δ_{yy} .

Для цього використаємо формулу (1) та наступний вираз з [6] для визначення коефіцієнта K_{yy}

$$K_{yy|\xi_m \neq 0} = \frac{1}{8g} \left[U_{2y1} + U_{2y9} - 2U_{2y5} + \sqrt{2}(U_{2y2} + U_{2y8} - U_{2y4} - U_{2y6}) \right], \quad (3)$$

де U_{myl} – вихідний сигнал БА ($m=1,2$ – номер установки БА на площадку

ОПС, $l=1..9$ – номер тестового положення (ТП), в яке встановлюється БА.

При наявності визначених вище джерел ξ_s , різниця ($K_{yy|\xi_s \neq 0} - K_{yy|\xi_s=0}$), яка входить до виразу (1), має вигляд

$$\left(K_{yy|\xi_s \neq 0} - K_{yy|\xi_s=0} \right) = K_{yx} \alpha_2 \pm \sqrt{\left(0.15 K_{yy} \alpha_4 \right)^2 + \left(\frac{0.3}{g} \Delta U_{II} \right)^2},$$

а похибка ідентифікації визначається, відповідно до (1), формулою

$$\delta_{yy} = \alpha_{xy} \alpha_2 \pm \sqrt{\left(0.15 \alpha_4 \right)^2 + \left(\frac{0.3}{K_{yy} g} \Delta U_{II} \right)^2} \quad (4)$$

Порівняння формул (2) та (4) дозволяє отримати формули для розрахунку шуканих вагових коефіцієнтів

$$\gamma_{2yy} = \alpha_{xy}, \quad \gamma_{4yy} = 0,15, \quad \gamma_{5yy} = 0,3(gK_{yy})^{-1}.$$

Аналогічно знаходяться формули для розрахунку інших вагових коефіцієнтів, які зведені в табл. 1. В табл. 1 другий індекс вагового коефіцієнту джерела похибки відповідає індексу відповідної похибки ідентифікованого коефіцієнта метрологічної моделі, наприклад для δ_{xx} , індекс n відповідає індексам xx .

Таблиця 1.

Вагові коефіцієнти джерел похибок

Похибка (2)	Вагові коефіцієнти джерел похибки(2)				
	γ_{1n}	γ_{2n}	γ_{3n}	γ_{4n}	γ_{5n}
$\delta_{xx}, 1$	0	$\frac{\alpha_{yx} - \alpha_{zx}}{2}$	$\frac{\alpha_{zx} - \alpha_{yx}}{2}$	0,1	$0,2(gK_{xx})^{-1}$
$\delta_{yy}, 1$	0	α_{xy}	0	0,15	$0,3(gK_{yy})^{-1}$
$\delta_{zz}, 1$	0	α_{xz}	0	0,15	$0,3(gK_{zz})^{-1}$
$\Delta a_{0x}, g$	$\frac{\alpha_{yx} + \alpha_{zx}}{2} g$	0	0	0,4g	$0,4K_{xx}^{-1}$

Похибка (2)	Вагові коефіцієнти джерел похибки(2)				
	γ_{1n}	γ_{2n}	γ_{3n}	γ_{4n}	γ_{5n}
$\Delta a_{0y}, g$	0,5g	0	0	0,2g	$0,2K_{yy}^{-1}$
$\Delta a_{0z}, g$	0,5g	0	0	0,2g	$0,2K_{zz}^{-1}$
$\delta_{xy}, 1$	0	$-\alpha_{yx}^{-1}$	0	$0,55\alpha_{yx}^{-1}$	$0,55(gK_{xy})^{-1}$
$\delta_{xz}, 1$	0	α_{zx}	0	$0,55\alpha_{zx}^{-1}$	$0,55(gK_{xz})^{-1}$
$\delta_{yx}, 1$	0	$0,5\alpha_{xy}^{-1}$	$-0,5\alpha_{xy}^{-1}$	$0,2\alpha_{xy}^{-1}$	$0,25(gK_{yx})^{-1}$
$\delta_{yz}, 1$	0	1	0	0,55	$0,55(gK_{yz})^{-1}$
$\delta_{zx}, 1$	0	$-0,5\alpha_{xz}^{-1}$	$0,5\alpha_{xz}^{-1}$	$0,2\alpha_{xz}^{-1}$	$0,25(gK_{zx})^{-1}$
$\delta_{zy}, 1$	0	-1	0	0,55	$0,55(gK_{zy})^{-1}$

Ці коефіцієнти впливу будемо використовувати для розрахунку за формулами (2) похибок ідентифікації відповідних коефіцієнтів метрологічної моделі БА, вважаючи відомими величини похибок позиціонування БА в ТП ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$), та похибку вимірювання його вихідного сигналу ΔU_{II} в цих положеннях.

Як приклад розрахуємо значення складових похибки ідентифікації (2) коефіцієнтів K_{xx}, K_{xy}, U_{0x} . Числові значення похибок $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ та ΔU_{II} для стенду, на якому проводився експеримент по визначенню коефіцієнтів ММ в статі [6],

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \pm 2 \cdot 10^{-5} [rad], \alpha_3 = \pm 4 \cdot 10^{-4} [rad], \alpha_4 = \pm 4 \cdot 10^{-5} [rad], \quad (5)$$

$$\Delta U_{II} = \pm 3 \cdot 10^{-4} [B]$$

Для спрощення розрахунків також приймемо, що визначені в статті [6] номінальний КП $K_{xni} = -2 [B/g]$, а максимальний кут неортогональності між вимірювальними осями БА і АК $\alpha_{xy \max} = \pm 2 \cdot 10^{-2} [rad]$.

Розраховані за формулою (2) складові шуканих похибок ідентифікованого коефіцієнта ММ представлені в табл. 2, де індекс n має такий самий сенс, як і в табл. 1.

Таблиця 2.

Значення складових похибки ідентифікації коефіцієнтів ММ БА

Похибка(2)	Складові похибки ідентифікації(2)				
	$\gamma_{1n}\alpha_1$	$\gamma_{2n}\alpha_2$	$\gamma_{3n}\alpha_3$	$\gamma_{4n}\alpha_4$	$\gamma_{5n}\Delta U_{II}$
$\delta_{xx}, 1$	0	$\pm 1,5 \cdot 10^{-7}$	$\pm 6 \cdot 10^{-6}$	$\pm 4 \cdot 10^{-6}$	$\pm 3 \cdot 10^{-5}$

Системи та процеси керування

Похибка(2)	Складові похибки ідентифікації(2)				
	$\gamma_{1n}\alpha_1$	$\gamma_{2n}\alpha_2$	$\gamma_{3n}\alpha_3$	$\gamma_{4n}\alpha_4$	$\gamma_{5n}\Delta U_{II}$
$\Delta a_{0x}, g$	$\pm 5 \cdot 10^{-8}$	0	0	$\pm 1.6 \cdot 10^{-5}$	$\pm 6 \cdot 10^{-5}$
$\delta_{xy}, 1$	0	$\pm 1 \cdot 10^{-3}$	0	$\pm 1,1 \cdot 10^{-3}$	$\pm 4,1 \cdot 10^{-3}$

Як видно з табл. 2, випадкові складові похибок ідентифікації $\gamma_{5n}\Delta U_{II}$ для кожної похибки (2), є визначальними. Для зменшення їх впливу необхідно використовувати групові вимірювання вихідних сигналів в кількості не менше 50 разів, що дозволяє зменшити коефіцієнт впливу γ_{5n} в 7 разів, що робить їх сумірними з іншими складовими.

Оскільки нам відомі лише максимальні значення $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, але невідомий їх знак, то похибки ідентифікації (2) необхідно розраховувати як геометричні суми всіх їх складових, зазначених в таблиці 2. Розраховані таким чином значення похибок ідентифікації коефіцієнтів ММ БА, за умовою, що виконані визначені вище групові вимірювання, наведені в табл. 3.

Таблиця 3.

Значення похибки ідентифікації коефіцієнтів ММ БА

Похибка	δ_{xx}, ppm	δ_{yy}, ppm	δ_{zz}, ppm	$\Delta a_{0x}, mg$	$\Delta a_{0y}, mg$	$\Delta a_{0z}, mg$
Значення	9	9	9	0,01	0,01	0,01
δ_{xy}, ppm	δ_{xz}, ppm	δ_{yx}, ppm	δ_{yz}, ppm	δ_{zx}, ppm	δ_{zy}, ppm	
1600	1600	10500	590	10500	590	

З табл. 3 видно, що похибки визначення КПЧ K_{yx} та K_{zx} набагато більші, ніж похибки визначення інших КПЧ. Це викликано тим, що для цих КПЧ, в виразі (2), джерело похибки α_3 входить з ваговим коефіцієнтом γ_{3n} , відмінним від нуля (табл. 1), на відміну від інших КПЧ. Також, виходячи з виразів (5), джерело похибки α_3 є основною впливовою величиною, в умовах проведеного експерименту, описаного в статті[6].

Визначимо причини відмінності від нуля коефіцієнту впливу γ_{3n} , для цього розглянемо детальніше процедуру отримання виразу для δ_{yx} та δ_{zx} . Відповідно до [6] коефіцієнти K_{yx} та K_{zx} визначаються як середнє з двох установок БА на площадку ОПС, в кожній з яких виникає своя похибка визначення $\delta_{1yx}, \delta_{2yx}, \delta_{1zx}, \delta_{2zx}$ відповідних коефіцієнтів.

В табл. 4 приведенні вагові коефіцієнти цих похибок для обох установок БА на площадку ОПС.

Таблиця 4.

Вагові коефіцієнти джерел похибок для кожної установки БА на площадку ОПС при ідентифікації КПЧ K_{yx} та K_{zx}

Похибка(2)	Вагові коефіцієнти джерел похибки(2)				
	γ_{1n}	γ_{2n}	γ_{3n}	γ_{4n}	γ_{5n}
$\delta_{1yx}, 1$	0	1	$-\alpha_{xy}^{-1}$	0,4	$0,4(gK_{yx})^{-1}$
$\delta_{2yx}, 1$	0	α_{xy}^{-1}	1	$0,4\alpha_{xy}^{-1}$	$0,4(gK_{yx})^{-1}$
$\delta_{1zx}, 1$	0	$-\alpha_{xz}^{-1}$	-1	$0,4\alpha_{xz}^{-1}$	$0,4(gK_{zx})^{-1}$
$\delta_{2zx}, 1$	0	1	α_{xz}^{-1}	0,4	$0,4(gK_{zx})^{-1}$

З метою пошуку шляхів зменшення похибки ідентифікації δ_{yx} та δ_{zx} , оцінимо числові значення похибок таблиці 4, використовуючи вираз (2):

$$\delta_{1yx} = 20000 \text{ ppm}, \quad \delta_{2yx} = 1400 \text{ ppm}, \quad (6)$$

$$\delta_{1zx} = 1400 \text{ ppm}, \quad \delta_{2zx} = 20000 \text{ ppm}.$$

Аналіз значень (6) показує, що $\delta_{2yx} \ll \delta_{1yx}$, та $\delta_{1zx} \ll \delta_{2zx}$. Виходячи з цього, значне зменшення шуканих похибок ідентифікації δ_{yx} та δ_{zx} може бути досягнуте при визначенні КПЧ K_{yx} та K_{zx} шляхом використання вихідних сигналів лише з однієї установки БА на площадку ОПС, яка відповідно до (6) забезпечує найменшу похибку

$$K_{yx} = K_{2yx}, \quad K_{zx} = K_{1zx}. \quad (7)$$

При використанні формул (7) для розрахунку відповідних КПЧ, вагові коефіцієнти джерел похибок для δ_{yx} та δ_{zx} (рядки 9 та 11 табл. 1), приймають значення, які наведені в таблиці 4 (рядки 2 та 3) для δ_{2yx} , δ_{1zx} .

Вимоги до стендового обладнання, які забезпечують задану точність калібрування БА

Визначимо вимоги до точності стендового обладнання, які забезпечують задану точність калібрування БА.

Згідно статті [6], калібрування вважається виконаним, якщо похибка розрахунку модуля вектора сили тяжіння Δg не перевищує допустиму Δg_δ , числове значення якої, наприклад, для БА безплатформної ІНС ракетиносія типу "Циклон-4" приблизно складає $(3\sigma) \Delta g_\delta \approx \pm 3 \cdot 10^{-4} g$.

В першому наближенні похибка розрахунку модуля вектора сили тяжіння визначається виразом $\Delta g = 0.5(g_p^2 - g_i^2)g_i^{-1}$ (де g_p – розрахований

модуль вектора сили тяжіння, який визначається за моделлю, наведеною в статті [6], g_i – істинне значення цього модуля в місці калібрування БА), а критерій забезпечення заданої точності калібрування має вигляд

$$\Delta g = \frac{g_p^2 - g_i^2}{2g_i} \leq \Delta g_\delta. \quad (8)$$

Отримаємо залежність похибки розрахунку Δg від похибок розрахунку проекцій вектора сили тяжіння на вимірювальні осі БА, які також розраховуються за моделлю [6]. Для цього підставимо в (8) вираз для g_p , який має вигляд

$$g_p = g_i + \Delta g = \sqrt{(a_x + \Delta a_x)^2 + (a_y + \Delta a_y)^2 + (a_z + \Delta a_z)^2}, \quad (9)$$

де a_j – істинні проекції вектора сили тяжіння на вимірювальні осі БА; Δa_j похибки розрахунку проекцій вектора сили тяжіння, викликані неточною ідентифікацією коефіцієнтів ММ БА; $j = x, y, z$ – індекс відповідного каналу БА. Приймаючи, що всі складові виразу (9) некорельовані, мають приблизно однакові величини, а максимальний вклад кожної складової буде, коли $a_j = g_i$, критерій (8) запишемо у вигляді

$$\Delta g = \Delta a_j \sqrt{3} \leq \Delta g_\delta. \quad (10)$$

Зв'яжемо похибки Δa_j , які входять до виразу (10), з похибками ідентифікації коефіцієнтів ММ БА, які визначені в (2). Для цього запишемо вираз для розрахунку проекцій вектора сили тяжіння на вимірювальні осі БА a_j за спрощеною моделлю, поклавши значення КПЧ рівними нулю, наведений в статті [6]. Тоді вираз для a_j має вигляд

$$a_j = K_{ii}^{-1}(U_i - U_{0i}), \quad (11)$$

а вираз для похибок Δa_j отримаємо шляхом диференціювання цього виразу як складної функції по всім її параметрам. За результатом диференціювання отримаємо вираз

$$\Delta a_j = -\frac{\Delta K_{ii}}{K_{ii}^2}(U_i - U_{0i}) - \frac{1}{K_{ii}} \Delta U_{0i} + \frac{1}{K_{ii}} \Delta U_{II}, \quad (12)$$

де $i, j = x, y, z$ – індекс відповідних каналів БА; ΔK_{ii} – різниця між паспортизованими коефіцієнтами та дійсними значеннями цих коефіцієнтів.

Для отримання залежності похибок розрахунку проекції вектора сили тяжіння Δa_j , з похибками ідентифікації коефіцієнтів ММ БА, які визначені в (2), підставимо в (12) вирази (1) та (11), отримаємо вираз

$$\Delta a_j = -\delta_{ii} a_{ji} - \Delta a_{0i} + K_{ii}^{-1} \overset{\circ}{\Delta} U_{II},$$

а оскільки δ_{ii} , Δa_{0i} , $\overset{\circ}{\Delta} U_{II}$ – є величинами випадковими, то значення похибок розрахунку Δa_j буде максимальне коли $a_j = g_i$, тоді цей вираз набуває остаточного вигляду

$$\Delta a_j = \sqrt{(\delta_{ii} g_i)^2 + (\Delta a_{0i})^2 + \left(K_{ii}^{-1} \overset{\circ}{\Delta} U_{II} \right)^2}. \quad (13)$$

Вираз (13) дозволяє визначити похибки розрахунку проекцій вектора сили тяжіння в залежності від похибок ідентифікації коефіцієнтів ММ БА та відомою похибкою вимірювання вихідних сигналів БА.

З критерію (10) видно, що калібрування вважатиметься виконаним, якщо похибки розрахунку проекцій вектора сили тяжіння Δa_j , які визначенні виразом (13), не будуть перевищувати значення $\frac{\Delta g_{\delta}}{\sqrt{3}}$.

Визначимо вимоги до точності ідентифікації коефіцієнтів перетворення та зміщення нулів ММ БА, а також вимогу до точності вимірювання вихідних сигналів БА, при виконанні яких виконується критерій (10). Для цього підставимо вираз (13) в (10), прийнявши, що всі його складові некорельовані й мають приблизно однакові величини, отримаємо

$$\Delta a_{0i} \leq \frac{\Delta g_{\delta}}{3}, \quad \delta_{ii} \leq \frac{\Delta g_{\delta}}{3g_i}, \quad \overset{\circ}{\Delta} U_{II} \leq \frac{\Delta g_{\delta} K_{ii}}{3}. \quad (14)$$

На підставі (14) безпосередньо визначимо вимоги до стендового обладнання, при виконанні яких забезпечується задана точність калібрування БА. Для цього підставимо вирази (2) та дані, наведені в табл. 1, з урахуванням уточнень щодо КПЧ K_{yx} та K_{zx} в (14) для кожного КП та ЗН, і отримаємо співвідношення, на основі яких будуть визначатися вимоги до точностних характеристик стендового обладнання.

Як приклад, отримаємо вимоги до стендового обладнання, виходячи з вимог до точності ідентифікації КП K_{yy} (14) яка, на підставі вищесказаного, має вигляд

$$\delta_{yy} = \sqrt{(\alpha_{xy} \alpha_2)^2 + (0,15 \alpha_4)^2 + \left(\frac{0,3}{K_{yy} g_i} \overset{\circ}{\Delta} U_{II} \right)^2} \leq \frac{\Delta g_{\delta}}{3g_i}. \quad (15)$$

Прийнявши, що всі складові виразу (15) мають приблизно однакові величини і не залежать один від одного,

$$\alpha_{xy} \alpha_2 \approx 0,15 \alpha_4 \approx \frac{0,3}{K_{yy} g_i} \Delta U_{II} \approx \Delta_{ек}, \quad (16)$$

представимо (15) у вигляді

$$\delta_{yy} = \Delta_{ек} \sqrt{3} \leq \frac{\Delta g_{\delta}}{3 g_i}. \quad (17)$$

З (16) і (17) отримаємо наступні вимоги до стендового обладнання, при виконанні яких похибка ідентифікації δ_{yy} , яка визначається за виразом (1), не буде перевищувати допустимої, заданої в ТЗ, за умови виконання калібрування БА способом, який описаний в статті [6]:

$$\alpha_2 \leq \frac{\Delta g_{\delta}}{5,2 \alpha_{xy} g_i}, \quad \alpha_4 \leq \frac{\Delta g_{\delta}}{0,8 g_i}, \quad \Delta U_{II} \leq \frac{\Delta g_{\delta} K_{yy}}{1,6}. \quad (18)$$

По подібності з K_{yy} , для решти КП та ЗН визначаються свої вимоги до стендового обладнання. Вибравши поміж всіх визначених вимог найжорсткіші, отримаємо остаточні вирази

$$\alpha_1 \leq \frac{\Delta g_{\delta}}{2,6 g_i}, \quad \alpha_2 \leq \frac{\Delta g_{\delta}}{5,2 \alpha_{ij} g_i}, \quad \alpha_3 \leq \frac{\Delta g_{\delta}}{\alpha_{ij} g_i}, \quad \alpha_4 \leq \frac{\Delta g_{\delta}}{0,8 g_i}, \quad \Delta U_{II} \leq \frac{\Delta g_{\delta} K_{iін}}{3}, \quad (19)$$

які будемо вважати загальними вимогами до стендового обладнання, виконання яких забезпечує задану точність калібрування БА, за умови ідентифікації коефіцієнтів його ММ способом, який описаний в [6].

Експериментальна перевірка відповідності існуючого обладнання заданим точностним вимогам

В статті [6] виконаний експеримент по ідентифікації коефіцієнтів ММ БА, в якому критерієм якості калібрування БА була різниця між розрахованим модулем вектора сили тяжіння та істинним значенням цього модуля в місці, в якому проводилось калібрування БА. Згідно з [6], ця різниця не повинна була перевищувати допустиме значення, яке, наприклад, для БА безплатформної ІНС ракети носія типу “Циклон-4” є

$$\Delta g_{\delta} \approx \pm 3 \cdot 10^{-4} g. \quad (20)$$

Стендове обладнання, а саме його точностні характеристики, для виконання цього експерименту були підібрані на підставі існуючого у експериментаторів досвіду, без конкретних метрологічних вимог до нього.

Перевіримо, чи відповідає при цьому калібруванні БА використане обладнання точностним вимогам, які визначені на підставі (19), наведеним в табл. 5. Для цього порівнюємо максимальні значення похибок стендового обладнання α_1 , α_2 , α_3 , α_4 та ΔU_{II} (наведені в табл. 5), яке було викорис-

тано для цього калібрування БА з визначеними точностними вимогами до цього обладнання.

Таблиця 5.

Числові похибки стендового обладнання

	$\alpha_1 [рад]$	$\alpha_2 [рад]$	$\alpha_3 [рад]$	$\alpha_4 [рад]$	$\Delta U_{II} [В]$
Вимоги до обладнання	$\pm 1,5 \cdot 10^{-4}$	$\pm 3 \cdot 10^{-3}$	$\pm 15 \cdot 10^{-3}$	$\pm 4 \cdot 10^{-4}$	$\pm 2 \cdot 10^{-4}$
Похибки використаного обладнання	$\pm 2 \cdot 10^{-5}$	$\pm 2 \cdot 10^{-5}$	$\pm 4 \cdot 10^{-4}$	$\pm 4 \cdot 10^{-5}$	$\pm 3 \cdot 10^{-4}$

З порівняння наведених в табл. 5 значень видно, що всі точнісні характеристики стендового обладнання, на якому проводився експеримент по ідентифікації коефіцієнтів ММ БА в статі [6], задовольняють вимогам до нього, виходячи з чого можливо зробити висновок, що якість калібрування даного БА, яка визначена умовою (20), буде виконана. Цей висновок підтверджується результатами перевірки якості калібрування БА, наведеної в статті [6].

Висновки

Підтверджено, що при калібруванні БА за способом, який описано в статті [6], задана точність цього калібрування (попередньо задається формулою (8)) забезпечується лише при виконанні вимог до стендового обладнання, на якому здійснюється це калібрування, визначених нерівностями (19). При цьому розрахунок числових значень коефіцієнтів метрологічної моделі БА K_{yx} та K_{zx} необхідно здійснювати за уточненими формулами (7).

Дослідження математичної моделі похибок калібрування БА (2) показало, що в цій моделі найбільш впливовими джерелами інструментальних похибок є похибка перевстановлення БА на площадці ОПС α_3 та випадкова похибка вимірювання вихідних сигналів БА ΔU_{II} , числові значення яких в більшості випадків визначають величину відповідних похибок калібрування. Для зменшення цього впливу доцільно здійснювати групові вимірювання вихідних сигналів БА в його тестових положеннях (зменшує вплив ΔU_{II}) та виконувати перевстановлення БА на площадці ОПС з найбільш можливою точністю.

В подальшому, як розвиток дослідження, з метою усунення впливу джерела кутової похибки перевстановлення БА на площадку ОПС α_3 , доцільно розробити спосіб калібрування БА, який усуне вплив цього джерела

за рахунок виключення процедури перевстановлення БА на площадці ОПС.

Список використаної літератури

1. *Tuck K.* (2012) Offset Calibration of the MMA8451, 2, 3Q // Freescale Semiconductor. Document Number: AN4069 Rev.
2. *Шаврин В. В.* Калибровка микроэлектромеханических датчиков ускорений и угловых скоростей в бесплатформенных инерциальных навигационных системах/ В. В. Шаврин, А. С. Конаков, В. И. Тисленко // Доклады ТУСУРа. – 2012. - № 1 (25), часть 2 – С.265-269.
3. *Успенский В. Б.* Метод калибровки акселерометрического измерительного модуля/ В. Б. Успенский, М. В. Некрасова // Вісник НТУУ “КПІ”. Серія: "Приладобудування". – 2012. – № 44. – С. 15 – 23.
4. *Schubert F.* (2005) Calibration and Enhancement of Inertial Measurement Units // European Conference Aerospace Sciences (EUCASS). P. 24-28.
5. *Keeyoung C.* (2010) Calibration of Inertial Measurement Units Using Pendulum Motion/ C. Keeyoung, J. Se-ah, K. Yongho // Int’l J. of Aeronautical & Space Sci. - P.234–239.
6. *Черняк М. Г.* Спосіб калібрування тривісного блока навігаційних акселерометрів на одновісному поворотному стенді/ М. Г. Черняк, В. А. Палюшок // Механика гироскопических систем. – 2013. –№ 26. – С. 5 - 15.