

УДК 531.768

М. Г. Черняк, В. А. Палюшок

СПОСІБ КАЛІБРУВАННЯ ТРИВІСНОГО БЛОКА НАВІГАЦІЙНИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ НА ОДНОВІСНОМУ ПОВОРОТНОМУ СТЕНДІ

Вступ

Тривісний блок навігаційних акселерометрів (БА) в складі інерціальної навігаційної системи (ІНС) рухомого об'єкту здійснює перетворення проєкцій уявного лінійного прискорення об'єкту на свої вимірювальні осі (ВО) в вихідні електричні сигнали трьох акселерометрів (АК) встановлених в БА. Розрахунок числових значень цих проєкцій здійснюється в ІНС по метрологічній моделі (ММ) БА, числові значення індивідуальних коефіцієнтів якої попередньо визначаються з потрібною точністю та паспортизуються шляхом калібрування БА в лабораторних умовах на відповідному за точністю стендовому обладнанні[1].

Традиційно при первинному калібруванні БА, в якості задатчика його тестових кутових положень (ТП) відносно площини місцевого горизонту (ПГ) використовують прецизійні (похибка не більше 3...5 кут. сек. (3σ)) двовісні (ДПС), або тривісні (ТПС), поворотні стени, які мають дуже високу вартість і потребують практично ідеальних лабораторних умов використання, які є лише у виробників БА[2,3]. Це потребує значних затрат виробників на придбання відповідних стендів і суттєво обмежує можливості проведення повторних калібрувань БА в умовах його експлуатації.

В праці [4] розглянута можливість калібрування навігаційного БА на недорогому прецизійному одновісному поворотному стенді (ОПС), в якості якого була використана широко поширена в промисловості оптична подільна голівка (ОПГ), и зроблено висновок про те, що таке калібрування не можливо без суттєвого погіршення точності отриманої ММ БА в наслідок необхідності здійснювати високоточне переустановлення БА на площадці ОПС, яке приводить до виникнення суттєвих додаткових інструментальних похибок ідентифікації коефіцієнтів ММ БА.

Постановка задачі

Метою статі є розробка способу калібрування тривісного БА на одновісному поворотному стенді, та експериментальна перевірка якості калібрування БА за цим способом.

Тривісний БА та його метрологічна модель

Тривісний блок навігаційних акселерометрів, калібрування якого розглядається в статті, складається з основи 1 з базовими поверхнями А (основна) і Б (додаткова), та трьох одновісних навігаційних акселерометрів (АК) 2, 3, 4, встановлених на основу 1 БА, згідно рис. 1. Ретельний опис будови БА та особливостей розташування його ВО наведено в [5].

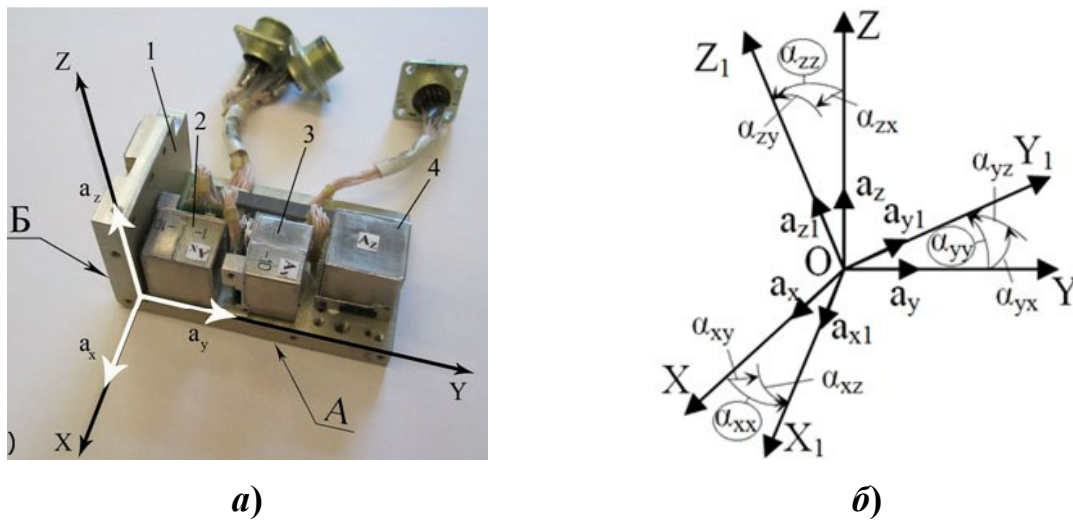


Рис. 1. Тривісний БА та орієнтація його ВО (осі $OXYZ$) відносно ВО акселерометрів (осі $OX_1Y_1Z_1$), встановлених в БА

Метрологічна модель вихідних сигналів БА встановлює залежність вихідних електричних сигналів $\hat{U}_x, \hat{U}_y, \hat{U}_z$ БА від проекції $a_i (i = x, y, z)$ уявного прискорення на його ВО. В сучасних ІНС найчастіше використовується наступний вигляд ММ БА [5]

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_x \\ \hat{U}_y \\ \hat{U}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_{0x} \\ U_{0y} \\ U_{0z} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

За допомогою цієї моделі в ІНС розраховуються проекції уявного прискорення на ВО БА за матричним виразом:

$$\begin{bmatrix} \hat{a}_x \\ \hat{a}_y \\ \hat{a}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{U}_x - U_{0x} \\ \hat{U}_y - U_{0y} \\ \hat{U}_z - U_{0z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_{xx} & N_{xy} & N_{xz} \\ N_{yx} & N_{yy} & N_{yz} \\ N_{zx} & N_{zy} & N_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{U}_x - U_{0x} \\ \hat{U}_y - U_{0y} \\ \hat{U}_z - U_{0z} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Модель (1) містить 12 індивідуальних коефіцієнтів БА – три зміщення нуля (ЗН) $U_{0i} (i = x, y, z)$, три коефіцієнта перетворення (КП) $K_{ii} (i = x, y, z)$, та шість його коефіцієнтів перехресної чутливості (КПЧ) $K_{ij} (i, j = x, y, z, i \neq j)$, які пов'язані з зображеними на рис. 1, б малими кутами неортогональності $\alpha_{ij} (i, j = x, y, z)$ ВО БА і АК формулою $K_{ij} = (-1)^n K_{ii} \alpha_{ji}$, де $n=2$, якщо індекс j йде за індексом i в їх циклічній перестановці $x \rightarrow y \rightarrow z$, і $n=1$, якщо це не виконується.

Числові значення цих коефіцієнтів визначаються та паспортизуються шляхом калібрування БА.

Спосіб калібрування БА

Прийемо за основу викладений авторами в праці [6] спосіб калібрування одновісного навігаційного АК на прецизійному ОПС шляхом його тестових поворотів в гравітаційному полі Землі. На підставі рекомендацій цієї статті, за аналогією з АК в [6], виберемо восьми точковий тест калібрування з триразовим проходженням восьми тестових положень БА відносно ПГ, розташованого на площадці ОПС як показано на рис. 2. При цьому відповідні ТП БА визначаються кутом повороту валу ОПС $\varphi_{\ell+1} = \varphi_{\ell} + \Delta\varphi$ (де $\varphi_1 = \varphi_9 = 0$, $\Delta\varphi = 45^\circ$, $\ell = 1, 2, \dots, 9$ – номер тестового положення, що задається), який відраховується від горизонтального положення площадки ОПС.

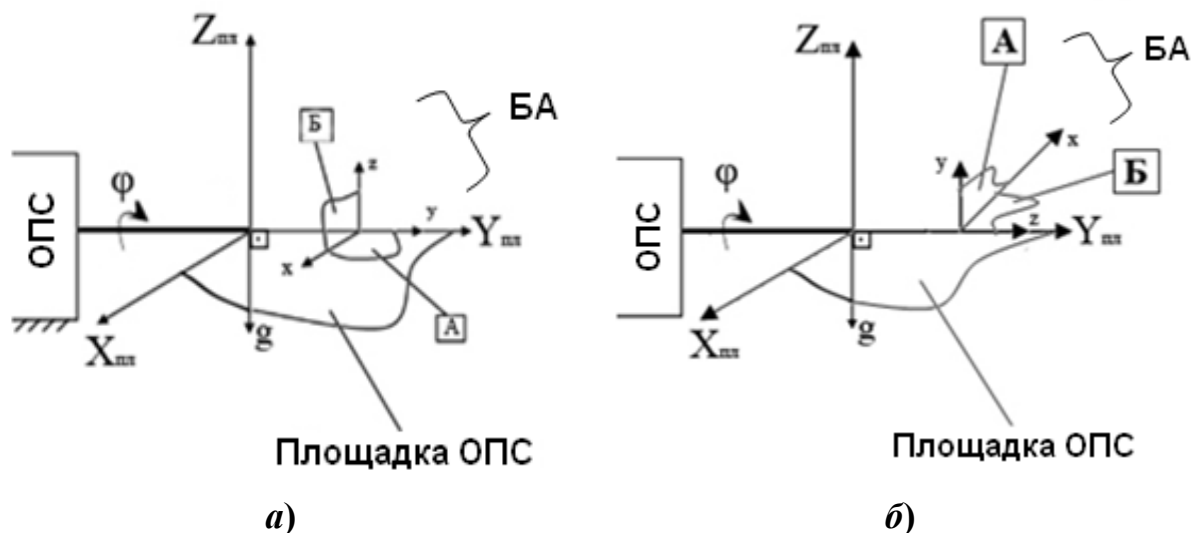


Рис. 2. Установка У1 (а) та установка У2 (б) БА на площадку ОПС: $OX_{пл}Y_{пл}Z_{пл}$ – СК, що зв'язана з площадкою ОПС, на яку встановлено БА; $OXYZ$ – СК, що зв'язана з ВО БА; \vec{g} – вектор сили тяжіння

Встановлення, як показано на рис. 2, двох установок У1 і У2 БА на площадку ОПС необхідно для забезпечення спостережувальності (ідентифіцируемості) всіх 12 коефіцієнтів ММ БА, оскільки, якщо при калібруванні БА встановлено тільки в установку У1, то за результатами вимірювань його вихідних сигналів в вищезгаданих ТП неможливо визначити коефіцієнти K_{xy} , K_{yy} і K_{zy} ММ (1), а якщо БА встановлено тільки в установку У2, то не визначаються коефіцієнти K_{xz} , K_{yz} і K_{zz} .

Відповідно до моделі (1) БА, вихідні сигнали БА в заданих, згідно рис. 2, його ТП залежать від проекції вектора сили тяжіння \vec{g} на ВО БА. Для знаходження математичних виразів для розрахунку цих проекцій розглянемо зображену на рис. 3 орієнтацію ВО БА повернутого на кут Φ за допомогою ОПС відносно ПГ, а, відповідно, і відносно вектора \vec{g} , з урахуванням наступних малих складових кутової похибки встановлення БА в відповідне ТП – систематичних (що є однаковими в кожному ТП) похибок α_1 і α_2 початкового горизонтування площадки ОПС, похибки α_3 встановлення БА на площадку ОПС, та випадкової похибки α_4 завдання відповідного кута повороту Φ валу ОПС. Врахування цих похибок необхідно для отримання у подальшому математичної моделі інструментальних похибок калібрування БА за цим способом.

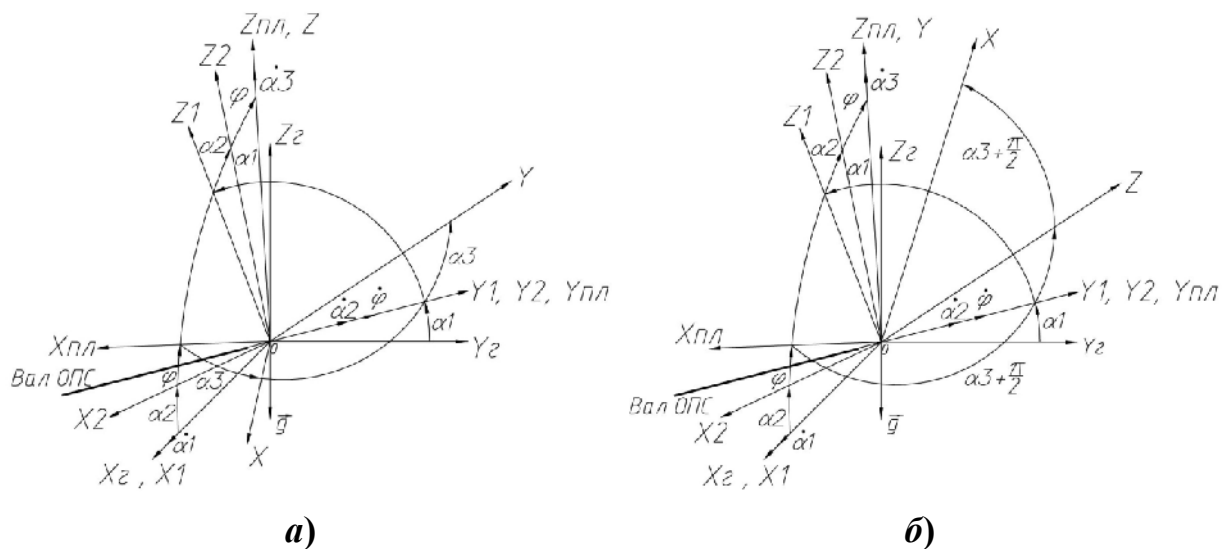


Рис. 3. Зв'язок між системами координат $OX_G Y_G Z_G$, що зв'язана з ПГ ($\vec{g} \perp OX_G Y_G$, $\vec{g} \parallel OZ_G$), й з ВО БА $OXYZ$ при знаходженні БА в установці У1 (а), та установці У2 (б)

Згідно рис. 3 шукані проекції вектора сили тяжіння на ВО БА при його знаходженні БА в установці У1 визначаються наведеним нижче матричним виразом (3), а при знаходженні БА в установці У2 – виразом (4)

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\varphi - \alpha_\Sigma \sin\varphi & \alpha_3 - \alpha_1 \sin\varphi & \sin\varphi + \alpha_\Sigma \cos\varphi \\ -\alpha_3 \cos\varphi & 1 & \alpha_1 - \alpha_3 \sin\varphi \\ -\sin\varphi - \alpha_\Sigma \cos\varphi & -\alpha_1 \cos\varphi & \cos\varphi - \alpha_\Sigma \sin\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos\varphi + \alpha_\Sigma \sin\varphi & \alpha_1 \sin\varphi - \alpha_3 & -\sin\varphi - \alpha_\Sigma \cos\varphi \\ -\sin\varphi - \alpha_\Sigma \cos\varphi & -\alpha_1 \cos\varphi & \cos\varphi - \alpha_\Sigma \sin\varphi \\ -\alpha_3 \cos\varphi & 1 & \alpha_1 - \alpha_3 \sin\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Підстановка розрахованих за формулами (3) і (4) проєкцій вектора \vec{g} на ВО БА, встановленого у відповідне ТП, у метрологічну модель (1) дозволяє отримати вирази для вихідних сигналів БА U_{mii} (де $m=1,2$ – номер установці БА відповідно до рис. 2, $i=x,y,z$ – признак АК встановленого в БА, $l = \overline{1..9}$ – номер ТП) в цьому ТП. Ці вирази достатньо чисельні (54 вирази) та великі, тому, як приклад, наведемо лише формули для вихідних сигналів БА в тестових положеннях ТП3 і ТП7 установці У1:

$$\begin{cases} U_{1x3} = K_{xx}g + K_{xy}g(\alpha_1 - \alpha_3) - K_{xz}\alpha_\Sigma g + U_{0x} \pm \overset{\circ}{\Delta}U_{II} \\ U_{1y3} = K_{yx}g + K_{yy}g(\alpha_1 - \alpha_3) - K_{yz}\alpha_\Sigma g + U_{0y} \pm \overset{\circ}{\Delta}U_{II} \\ U_{1z3} = K_{zx}g + K_{zy}g(\alpha_1 - \alpha_3) - K_{zz}\alpha_\Sigma g + U_{0z} \pm \overset{\circ}{\Delta}U_{II} \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} U_{1x7} = -K_{xx}g + K_{xy}g(\alpha_1 + \alpha_3) + K_{xz}\alpha_\Sigma g + U_{0x} \pm \overset{\circ}{\Delta}U_{II} \\ U_{1y7} = -K_{yx}g + K_{yy}g(\alpha_1 + \alpha_3) + K_{yz}\alpha_\Sigma g + U_{0y} \pm \overset{\circ}{\Delta}U_{II} \\ U_{1z7} = -K_{zx}g + K_{zy}g(\alpha_1 + \alpha_3) + K_{zz}\alpha_\Sigma g + U_{0z} \pm \overset{\circ}{\Delta}U_{II} \end{cases}, \quad (6)$$

де $\alpha_\Sigma = \alpha_2 \pm \alpha_4$; $\overset{\circ}{\Delta}U_{II}$ – випадкова похибка вимірювання вихідних сигналів БА.

Розглянувши відповідні лінійні комбінації всіх отриманих вище виразів для вихідних сигналів БА (наприклад, різницю $U_{1x3} - U_{1x7}$ для визначення КП K_{1xx} в установці У1 БА) і прийняв рівними нулю всі введені раніше складові похибки встановлення БА у відповідне ТП ($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$) і похибку вимірювання його вихідних сигналів $\overset{\circ}{\Delta}U_{II}$ отримуємо формули для визначення коефіцієнтів моделі (1) БА в

установках У1 й У2 (в цих формулах перший індекс при відповідних коефіцієнтах моделі (1) визначає номер установці БА на площадку ОПС відповідно до рис. 2.).

$$\begin{aligned}
 K_{1xx} &= \frac{1}{2(1+\sqrt{2})g} [U_{1x3} - U_{1x7} + U_{1x2} + U_{1x4} - U_{1x6} - U_{1x8}], \\
 U_{10x} &= \frac{1}{4}(U_{1x1} + U_{1x9} + 2U_{1x5}), \\
 K_{1yx} &= \frac{1}{2g}(U_{1y3} - U_{1y7}), \quad U_{10z} = \frac{1}{2}(U_{1z3} + U_{1z7}), \\
 K_{1xz} &= \frac{1}{4g}(U_{1x1} + U_{1x9} - 2U_{1x5}), \\
 K_{1zx} &= \frac{1}{2g}(U_{1z3} - U_{1z7}), \quad K_{1yz} = \frac{1}{4g}(U_{1y1} + U_{1y9} - 2U_{1y5}), \\
 U_{10y} &= \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 U_{1yi}, \\
 K_{1zz} &= \frac{1}{8g} [U_{1z1} + U_{1z9} - 2U_{1z5} + \sqrt{2}(U_{1z2} + U_{1z8} - U_{1z4} - U_{1z6})], \\
 K_{2xx} &= \frac{-1}{2(1+\sqrt{2})g} [U_{2x3} - U_{2x7} + U_{2x2} + U_{2x4} - U_{2x6} - U_{2x8}], \\
 U_{20z} &= \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 U_{2zi}, \quad K_{2xy} = \frac{1}{4g}(U_{2x1} + U_{2x9} - 2U_{2x5}), \\
 K_{2zy} &= \frac{1}{4g}(U_{2z1} + U_{2z9} - 2U_{2z5}), \\
 K_{2yy} &= \frac{1}{8g} [U_{2y1} + U_{2y9} - 2U_{2y5} + \sqrt{2}(U_{2y2} + U_{2y8} - U_{2y4} - U_{2y6})], \\
 U_{20x} &= \frac{1}{4}(U_{2x1} + U_{2x9} + 2U_{2x5}), \quad U_{20y} = \frac{1}{2}(U_{2y3} + U_{2y7}), \\
 K_{2zx} &= \frac{1}{2g}(U_{2z7} - U_{2z3}); \quad K_{2yx} = \frac{1}{2g}(U_{2y7} - U_{2y3}).
 \end{aligned} \tag{7}$$

Із (7) запишемо наступні остаточні вирази для розрахунку коефіцієнтів моделі (1) БА за результатами вимірювань його вихідних сигналів у всіх ТП, які у подальшому будемо вважати математичною моделлю визначення цих коефіцієнтів при калібруванні БА за розробленим способом

$$\begin{aligned}
 K_{xx} &= 0,5(K_{1xx} + K_{2xx}), \quad K_{xy} = K_{2xy}, \quad U_{0x} = 0,5(U_{10x} + U_{20x}), \\
 K_{zy} &= K_{2zy}; \quad K_{yx} = 0,5(K_{1yx} + K_{2yx}), \quad K_{zx} = 0,5(K_{1zx} + K_{2zx}),
 \end{aligned} \tag{8}$$

$$U_{0z} = 0,5(U_{10z} + U_{20z}), \quad U_{0y} = 0,5(U_{10y} + U_{20y}), \quad K_{zz} = K_{1zz},$$

$$K_{yy} = K_{2yy}, \quad K_{yz} = K_{1yz}, \quad K_{xz} = K_{1xz}.$$

Формули (8) отримані аналітично без ніяких наближень, тому при їх використанні буде відсутня методична похибка визначення коефіцієнтів моделі (1) БА. Джерелами інструментальної похибки визначення відповідних коефіцієнтів моделі (1) за цими формулами будуть зазначені вище похибки $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ та ΔU_{II} стендового обладнання, яке використовується для калібрування БА. Математична модель цієї інструментальної похибки може бути отримана на підставі виразів (5 ... 8).

Експериментальна перевірка якості калібрування БА за розробленим способом

Експериментальну перевірку якості калібрування БА на ОПС за розробленим способом виконано шляхом порівняння розрахованого за моделлю (2) БА (який попередньо відкалібрована за розробленим способом та встановлено на нерухомій основі у довільне положення відносно ПГ) модуля вектора сили тяжіння

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

і істинного значення g_i цього модуля в місці калібрування БА. Різницю між цими значеннями Δg , яка визначається інструментальними похибками ідентифікації коефіцієнтів моделі (1) БА при його калібруванні, прийнято вважати комплексним критерієм якості калібрування БА [2, 5].

Якщо ця різниця буде задовольняти вимогу

$$\Delta g = g_p - g_i \leq \Delta g_{\delta}, \quad (10)$$

де Δg_{δ} – допустима за умовами забезпечення заданої точності калібрування БА похибка розрахунку модуля \vec{g} за моделлю (2) по вихідним сигналам БА, то будемо вважати, що критерій якості калібрування БА виконаним, а розроблений спосіб калібрування БА таким, що забезпечує задану точність його калібрування. Щодо числових значень величини похибки Δg_{δ} навігаційних БА, то наприклад, для БА безплатформної ІНС ракети-носія типу "Циклон-4" ця величина приблизно складає $(3\sigma) \Delta g_{\delta} \approx \pm 3 \cdot 10^{-4} g$.

Стендове обладнання, необхідне для калібрування БА за розробленим способом показано на рис. 4.

До складу цього обладнання входять: фундамент 1 з добовими коливаннями основи не більше 1 ... 2 кут. сек, розв'язаний від будівлі 2, в якому проводяться дослідження; ОПС 3 – оптична ділильна головка ОДГ-

10 (ОДГ), що забезпечує похибку завдання кута повороту валу 4 $\alpha_4 = \pm 10$ кут. сек; рівень бульбашковий (на рис. 4. не показано), який забезпечує початкове горизонтування площадки ОДГ похибками $\alpha_1 = \alpha_2 = \pm 5$ кут. сек; кутник 10 за допомогою якого БА встановлюється на площадку ОДГ відповідно до рис. 2 з похибкою приблизно $\alpha_3 = \pm 90$ кут. сек; термокамера 5 типу ТВТ-2, що забезпечує похибку завдання температури у всьому діапазоні робочих температур БА $\pm 0,5^\circ\text{C}$ (необхідна для визначення температурної залежності коефіцієнтів моделі (1) БА; прецизійний багатоканальний вольтметр 7 типу Agilent 34401A, клас точності вольтметра 0,003% від піддіапазону вимірювання $\pm 10\text{В}$.

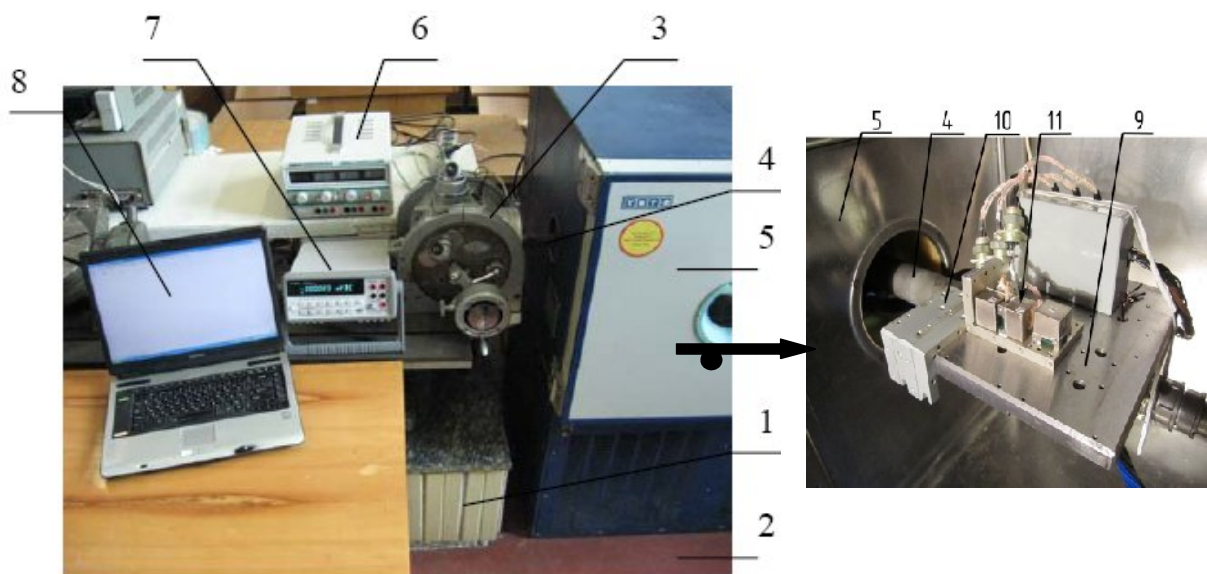


Рис. 4. Стенд для калібрування БА:

- 1 – фундамент; 2 – будівля, 3 – ОДГ; 4 – вал ОДГ;
- 5 – термокамера; 6 – джерело живлення; 7 – вольтметр;
- 8 – комп'ютер; 9 – площадка ОДГ;
- 10 – кутник для встановлення БА на площадку ОДГ;
- 11 – БА, що калібрується, встановлений на площадці 9 згідно рис. 2. а

В результаті калібрування БА зображеного на рис. 1 за розробленим способом отримані наступні коефіцієнти його моделі (1):

$$\begin{aligned}
 K_{xx} &= -2,177087 \text{ В/г}; & K_{yy} &= -2,139892 \text{ В/г}; & K_{zz} &= -2,144367 \text{ В/г}; \\
 K_{xy} &= -0,018243 \text{ В/г}; & K_{xz} &= 0,025027 \text{ В/г}; & K_{yx} &= 0,026542 \text{ В/г}; \\
 K_{yz} &= 0,032755 \text{ В/г}; & K_{zx} &= 0,006754 \text{ В/г}; & K_{zy} &= 0,006026 \text{ В/г}; \\
 U_{0x} &= 0,071469 \text{ В}; & U_{0y} &= -0,196485 \text{ В}; & U_{0z} &= -0,411789 \text{ В}.
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

Комплексна експериментальна перевірка якості калібрування БА за розробленим способом була виконана шляхом визначення за

формулою (10) похибки Δg при умові, що величина g_p розраховувалась за формулою (9), складові якої попередньо визначалися за моделлю (2) з використанням наведених в виразах (11) коефіцієнтів моделі (1) БА. Для цього БА було встановлено площадку ОДГ, як показано на рис. 5, після чого за допомогою ОДГ були задані чотириперевірочних положення (ПП) відносно ПГ шляхом повороту площадки навколо осі Y_G на кут $\theta_{j+1} = \theta_j + \Delta\theta$ (тут $\theta_1 = 45^\circ$, $\Delta\theta = 90^\circ$, $j = \overline{1,4}$ – номер перевірного положення БА).

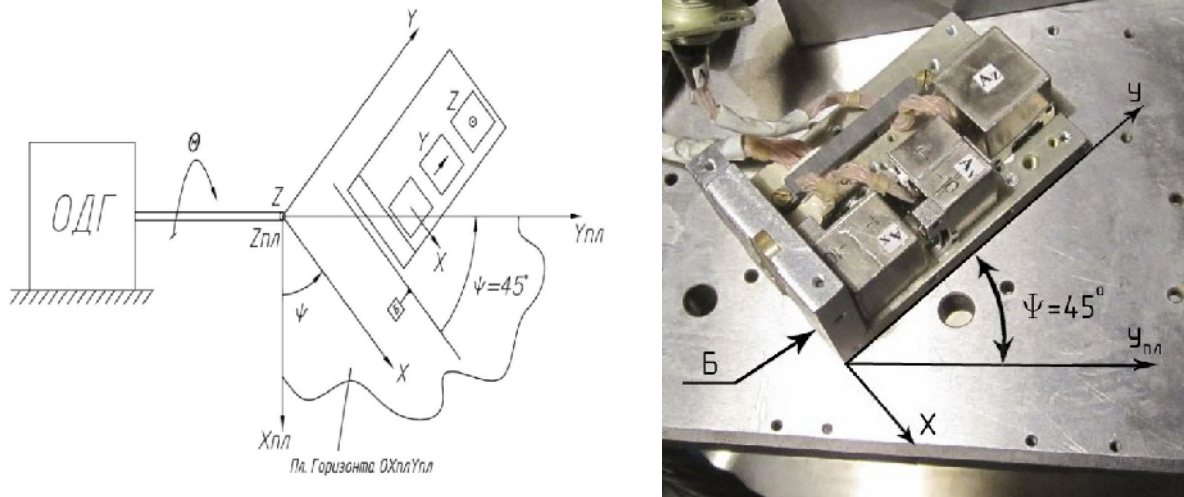


Рис. 5. Установка БА на площадку ОДГ для перевірки якості його калібрування: Ψ – кут відхилення осі $0Y$ БА від осі $0Y_{ПГ}$ площадки ОДГ

В цих положеннях вольтметром вимірювались вихідні сигнали БА з метою їх використання в моделі (2) для розрахунку величини g_p в перевірочних положеннях БА.

Результати розрахунку вищевказаної похибки Δg в ПП БА наведено на рис. 6.

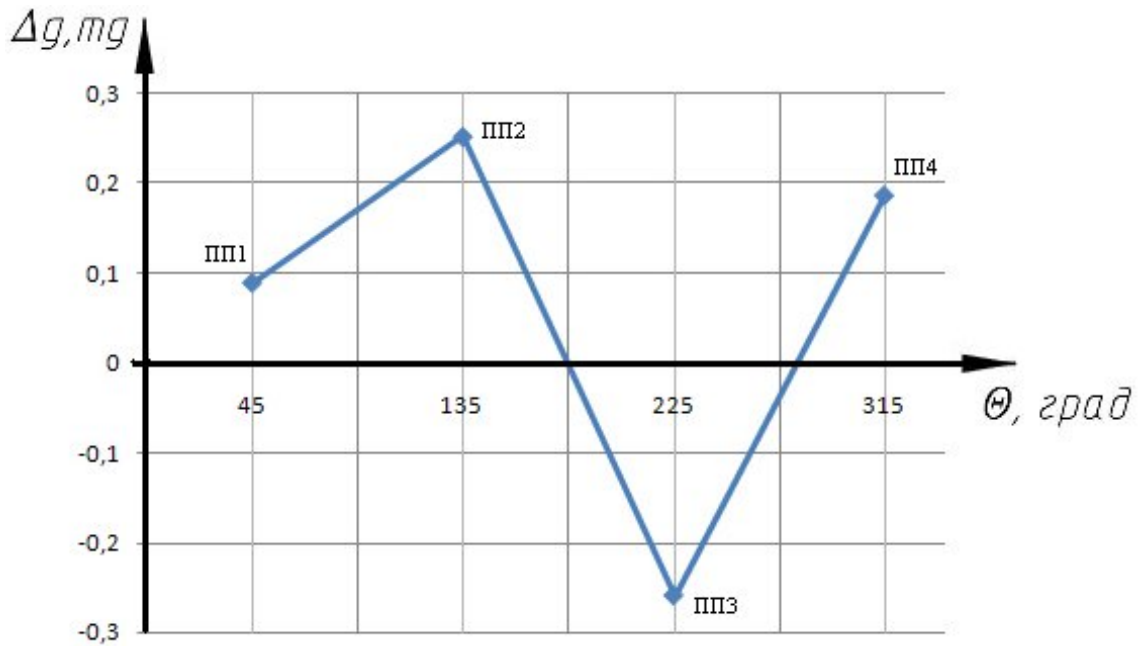


Рис. 6. Величина похибки Δg в перевірочних положеннях БА

Експериментальні результати показують, що похибка розрахунку модуля \vec{g} за моделлю (2) по вихідним сигналам БА, який попередньо відкалібровано за розробленим способом, не перевищує величини $\pm 3 \cdot 10^{-4} g$, що свідчить про високу якість такого калібрування БА і підтверджує можливість калібрування на ОПС за розробленим способом тривісних блоків навігаційних акселерометрів достатньо високої точності.

При цьому існуюча залежність модуля цієї похибки від номеру ПП, тобто від орієнтації БА відносно ПГ, на думку авторів викликана існуючими інструментальними похибками визначення коефіцієнтів моделі (1) БА джерелами яких, як зазначено вище, є відповідні похибки α_1 , α_2 , α_3 , α_4 та ΔU_{II} стендового обладнання, яке використано для калібрування БА.

Висновки

Підтверджено, що запропонований спосіб калібрування БА на ОПС забезпечує ідентифікацію за виразами (8) всіх коефіцієнтів лінійної ММ (1) навігаційного БА за умовою використання для цього прецизійного стендового обладнання з гарантованим запасом точності.

Перевірка якості калібрування БА за інтегральним критерієм (10) дозволяє зробити висновок тільки про гарантовану придатність БА до вимірювання прискорення $a \leq 1g$ з похибкою, яка задовольняє умові (10). При вимірюванні іншого за величиною прискорення ця результуюча похибка може бути суттєво більшою, оскільки є невідомими числові

значення інструментальних похибок ідентифікації кожного з коефіцієнтів моделі (1) БА, які, як зазначено вище, визначаються похибками α_1 , α_2 , α_3 , α_4 та ΔU_{II} стендового обладнання.

У подальшому, як розвиток дослідження, необхідно розробити математичну модель похибок ідентифікації всіх коефіцієнтів моделі (1) БА при його калібруванні за розробленим способом, яка дозволить розрахувати результуючу похибку вимірювання будь якого прискорення в діапазоні вимірювання БА, та висунути вимоги до стендового обладнання (до величин похибок α_1 , α_2 , α_3 , α_4 та ΔU_{II}) виходячи з умови забезпечення заданої величини результуючої похибки вимірювання будь якого прискорення в діапазоні вимірювання БА.

Список використаної літератури

1. *Lawrence A.* Modern Inertial Technology: Navigation, Guidance and Control – Springer-Verlag. New York.–2004. –P. 280.
2. *Тарановский Г.О.* Калибровка трехканального измерителя ускорений в составе инерциальной навигационной системы/ Г. О. Тарановский, Е. А. Яковлев//Материалы VIII конф. Молодых ученых «Навигация и управление движением» – Спб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2006. – С. 29-37.
3. *Won S. P., Golnaraghi F.* A triaxial accelerometer calibration using a mathematical model// IEEE transactions on instrumentation and measurement. – 2009. – 8 p.
4. *Вавилова Н. Б.* Калибровка бескарданных инерциальных навигационных систем при помощи грубых одностепенных стендов/ Н. Б. Вавилова, Н. А. Парусников, И. Ю. Сазонов // Современные проблемы математики и механики, Том I. – М.: МГУ, 2009. – С. 212-222.
5. *Chernyak N. G.* Calibration of navigation pendulous accelerometer by testing rotating method in terrestrial gravitational field/ *N. G. Chernyak O. M. Gryshchenko*// Інформ. системи, механіка та керування: наук.-техн. зб. – 2011. – Вип. 7.– С. 105–116.
6. *Черняк Н.Г.* Калибровка навигационного маятникового акселерометра методом тестовых поворотов в гравитационном поле Земли/ Н. Г. Черняк, Э.Хазинедарлу //Механіка гіроскопічних систем.– научн.-техн. збірник.- Київ, 2009.–Вип. 20.– С. 81–91.