

УДК 629.052.7

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771452023285691>

М. Г. Черняк¹, к.т.н., доцент, Г. О. Тараш², бакалавр

КАЛІБРУВАННЯ ТРИВІСНОГО НАВІГАЦІЙНОГО БЛОКУ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ НА ОБЛАДНАННІ НИЗЬКОЇ ТОЧНОСТІ

Уа

Розглянуто спосіб калібрування тривісного блоку акселерометрів (БА), заснований на вимірюванні модуля вектору прискорення сили тяжіння. Спосіб забезпечує визначення дванадцяти паспортних коефіцієнтів лінійної метрологічної моделі нерухомого блоку акселерометрів в експлуатації за допомогою обладнання низької точності і дозволяє обчислювати значення прискорення з припустимою похибкою. Задачу вирішено шляхом формування системи лінійних неоднорідних алгебраїчних рівнянь відносно шуканих різ-

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

² КПІ ім. Ігоря Сікорського

ниць невідомих фактичних значень і попередньо визначених виробником паспортних значень коефіцієнтів метрологічної моделі блоку акселерометрів. Система формується шляхом встановлення БА у дев'ять тестових положень відносно вектору сили тяжіння. Розв'язок цієї системи з обмеженнями, які формуються у шести додаткових положеннях БА, дозволяє визначити фактичні значення метрологічних коефіцієнтів БА із використанням їх у подальшому в якості паспортних.

En

A method for calibrating a three-axis accelerometer unit of the navigation accuracy class is proposed. It is based on measuring the modulus of the gravity acceleration vector. The method provides the determination of twelve passport coefficients (including six separate values of non-orthogonality angles) of the linear metrological model of a stationary accelerometer unit under operating conditions. The developed method makes it possible to calculate the acceleration value with an acceptable error using non-precision equipment for calibration. The problem is solved by forming a system of linear nonhomogeneous algebraic equations for the desired differences of unknown actual (real) values and the passport values of an accelerometer unit's metrological model coefficients. The passport coefficients are considered to be determined during bench calibration at the manufacturer. The system of equations is formed by placing the accelerometer in at least nine calibration positions relative to the gravity vector. The solution of this system, with consideration of the limitations formed by the six additional calibration positions of the accelerometer unit, allows determining the actual values of the metrological coefficients of the accelerometer unit and using them as passport values. By reducing the reliance on expensive and complex calibration equipment, the developed method offers a cost-effective solution for maintaining the long-term accuracy and performance of the accelerometer unit over its operational lifetime. The versatility of this calibration approach enables its integration into existing manufacturing processes, ensuring consistent and reliable performance of accelerometer units across different batches, thereby enhancing the overall quality and reliability of navigation systems and related technologies.

Вступ

Для застосування блоку акселерометрів (БА) навігаційного класу точності є необхідним визначення його паспортних коефіцієнтів метрологічної моделі (ММ). Зараз у промисловості це здійснюється шляхом задавання тестових положень за допомогою високоточних одно- та двовісних поворотних стендів на підприємстві-виробнику. Дані стенди зазвичай мають великі габарити, суворі умови експлуатування і високу ціну [1].

Калібрування приладів виробником є відпрацьованою і документованою процедурою. Але коефіцієнти ММ БА змінюються із плином часу. Тому після тривалого зберігання БА точність визначення ним проєкцій уявного прискорення в експлуатації суттєво погіршується, через що під час перевірки працездатності БА може виявитись несправними або метрологічно неготовим.

Провести точне калібрування для визначення нових значень метрологічних параметрів, подібних до виконуваних виробником, під час екс-

плуатації неможливо через відсутність прецизійного обладнання для задання високоточних тестових положень. Це актуалізує проблему розробки способу високоточного калібрування на обладнанні низької точності, яке використовується експлуатантами.

У літературних джерелах описується спосіб визначення метрологічних параметрів БА шляхом вимірювання норми вектору сили тяжіння [2 - 6]. Для цього автори використовують як ітераційні, із використанням алгоритмів різного типу [2, 3, 6], так і неітераційні, із використанням складного математичного апарату [5] методи. У більшості робіт при цьому розглядається ММ, яка описується трьома коефіцієнтами зміщення нуля (ЗН), трьома коефіцієнтами перетворення (КП) і трьома комбінаціями кутів неортогональності (КН). Комбінації КН не можуть бути розділені, тому що вони відносяться до різних акселерометрів БА. Натомість у експлуатації застосовується ММ із шістьма КН, оскільки система координат, яка описується такою моделлю, не потребує фізичного суміщення однієї зі своєї осей із будівельною віссю об'єкта, на якому встановлюється БА. Тому проблема полягає у розділенні значень шести КН із отриманих у разі калібрування в експлуатації значень комбінацій КН.

Постановка задачі

Метою роботи є розробка способу калібрування тривісного БА в експлуатації на обладнанні низької точності, який забезпечуватиме визначення всіх метрологічних коефіцієнтів, включно із шістьма відокремленими значеннями КН.

Метрологічні моделі

Метрологічні моделі БА із 12-ю коефіцієнтами визначаються матричними рівняннями [1,4]:

$$\begin{bmatrix} \hat{U}_x \\ \hat{U}_y \\ \hat{U}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_x & 0 & 0 \\ 0 & K_y & 0 \\ 0 & 0 & K_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & \alpha_{yx} & -\alpha_{zx} \\ -\alpha_{xy} & 1 & \alpha_{zy} \\ \alpha_{xz} & -\alpha_{yz} & 1 \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{bmatrix} a_{0x} \\ a_{0y} \\ a_{0z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \right) \quad (1)$$

де \hat{U}_x , \hat{U}_y та \hat{U}_z – вихідні сигнали АК, Вих;

K_x , K_y та K_z – КП АК, Вих/g;

α_{xy} , α_{xz} , α_{yx} , α_{yz} , α_{zx} та α_{zy} – КН АК, рад (рис. 1);

a_{0x} , a_{0y} та a_{0z} – ЗН вихідного сигналу АК, g;

a_x , a_y та a_z – вимірювані АК проекції прискорення, g.

СК, що описує ММ із 12-ма коефіцієнтами, представлена на рис. 1.

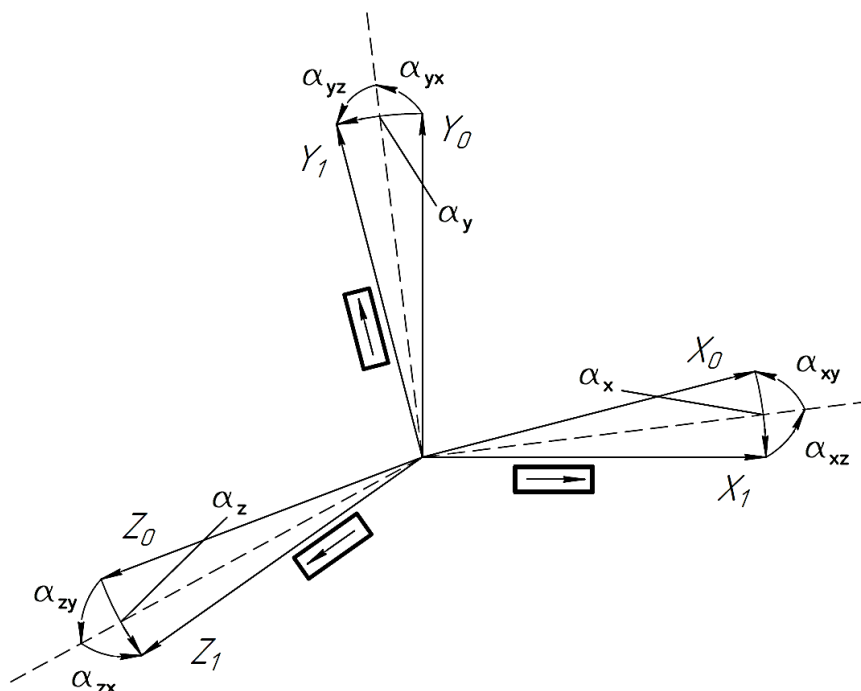


Рис. 1. $X_0Y_0Z_0$ – приладова ортогональна СК БА, пов'язана із його базовими поверхнями; $X_1Y_1Z_1$ – неортогональна СК, пов'язана із вимірювальними вісями АК

Використання БА у БНС проводиться за лінійною моделлю проекції уявного прискорення, яке вимірює БА за формулою [1]:

$$\begin{bmatrix} \hat{a}_x \\ \hat{a}_y \\ \hat{a}_z \end{bmatrix} = \left(\begin{bmatrix} K_x & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yx} & K_y & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_z \end{bmatrix} \right)^{-1} \left(\begin{bmatrix} \hat{U}_x \\ \hat{U}_y \\ \hat{U}_z \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} K_x a_{0x} \\ K_y a_{0y} \\ K_z a_{0z} \end{bmatrix} \right) \quad (2)$$

де \hat{a}_x , \hat{a}_y та \hat{a}_z – вимірювані БА проекції уявного прискорення, g ;

\hat{U}_x , \hat{U}_y та \hat{U}_z – виміряні вихідні сигнали АК, V_{ix} ,

K_{ij} ($i, j = x, y, z, i \neq j$), $[V_{ix}/g]$ – (КПЧ БА, які у першому наближенні визначаються за формулою:

$$K_{ij} = (-1)^n K_{ii} \alpha_{ji}; \quad (3)$$

У (3) $n = 2$, якщо індекс j йде за індексом i в їхній циклічній перестановці $x \rightarrow y \rightarrow z$, і $n = 1$, якщо це не виконується.

Задача калібрування БА (стендового або в експлуатації) полягає у визначенні і паспортизації дванадцяти індивідуальних коефіцієнтів моделі (2) – ЗН a_{0i} , КП K_i і КПЧ K_{ij} .

Спосіб визначення метрологічних коефіцієнтів БА в експлуатації

Вважаємо, що БА до встановлення на об'єкт пройшов стендове калібрування на прецизійному обладнанні підприємства-виробника, за результатами якого паспортизуються його індивідуальні паспортні (нижній індекс "p") метрологічні коефіцієнти: $a_{0i(p)}$, $K_{i(p)}$ та $\alpha_{ij(p)}$ ($i, j = x, y, z; i \neq j$).

Прийнемо, що невідомі реальні (нижній індекс "r") коефіцієнти ММ пов'язані з відомими паспортними коефіцієнтами формулами:

$$a_{0x(r)} = a_{0x(p)} + \Delta_{0x}, \quad a_{0y(r)} = a_{0y(p)} + \Delta_{0y}, \quad a_{0z(r)} = a_{0z(p)} + \Delta_{0z} \quad (4)$$

$$K_{x(r)} = K_{x(p)}(1 + \Delta_{1x}), \quad K_{y(r)} = K_{y(p)}(1 + \Delta_{1y}), \quad K_{z(r)} = K_{z(p)}(1 + \Delta_{1z}) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \alpha_{xy(r)} &= \alpha_{xy(p)} + \Delta_{xy}, & \alpha_{xz(r)} &= \alpha_{xz(p)} + \Delta_{xz}, & \alpha_{yz(r)} &= \alpha_{yz(p)} + \Delta_{yz}, \\ \alpha_{yx(r)} &= \alpha_{yx(p)} + \Delta_{yx}, & \alpha_{zx(r)} &= \alpha_{zx(p)} + \Delta_{zx}, & \alpha_{zy(r)} &= \alpha_{zy(p)} + \Delta_{zy}, \end{aligned} \quad (6)$$

де Δ_{0i} , Δ_{1i} , Δ_{ij} ($i, j = x, y, z; i \neq j$) – невідомі прирости, які являють собою різниці між реальними і паспортними метрологічними коефіцієнтами.

Розв'яжемо систему рівнянь (2) відносно \hat{a}_x , \hat{a}_y , \hat{a}_z і, прирівнюючи до нуля величини вище другого порядку малості, отримаємо вирази для визначення квадратів вимірюваних БА проекцій уявного прискорення:

$$\begin{aligned} \hat{a}_x^2 &= \frac{1}{K_{x(r)}^2 K_{y(r)}^2 K_{z(r)}^2} \left(\hat{U}_x K_{y(r)} K_{z(r)} - \hat{U}_y K_{x(r)} K_{z(r)} \alpha_{yx(r)} + \right. \\ &\quad \left. + \hat{U}_z K_{x(r)} K_{y(r)} \alpha_{zx(r)} + K_{x(r)} K_{y(r)} K_{z(r)} \left(\alpha_{yx(r)} a_{0y(r)} - a_{0x(r)} - \alpha_{zx(r)} a_{0z(r)} \right) \right)^2; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \hat{a}_y^2 &= \frac{1}{K_{x(r)}^2 K_{y(r)}^2 K_{z(r)}^2} \left(\hat{U}_y K_{x(r)} K_{z(r)} + \hat{U}_x K_{y(r)} K_{z(r)} \alpha_{xy(r)} - \hat{U}_z K_{x(r)} K_{y(r)} \alpha_{zy(r)} + \right. \\ &\quad \left. + K_{x(r)} K_{y(r)} K_{z(r)} \left(\alpha_{zy(r)} a_{0z(r)} - a_{0y(r)} - \alpha_{xy(r)} a_{0x(r)} \right) \right)^2; \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \hat{a}_z^2 &= \frac{1}{K_{x(r)}^2 K_{y(r)}^2 K_{z(r)}^2} \left(\hat{U}_z K_{x(r)} K_{y(r)} + \hat{U}_y K_{x(r)} K_{z(r)} \alpha_{yz(r)} - \hat{U}_x K_{y(r)} K_{z(r)} \alpha_{xz(r)} + \right. \\ &\quad \left. + K_{x(r)} K_{y(r)} K_{z(r)} \left(\alpha_{xz(r)} a_{0x(r)} - a_{0z(r)} - \alpha_{yz(r)} a_{0y(r)} \right) \right)^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Для нерухомого відносно вектору сили тяжіння \vec{g} БА виконується умова [3, с. 4]:

$$\hat{a}_x^2 + \hat{a}_y^2 + \hat{a}_z^2 = \hat{g}_0^2, \quad (10)$$

де \hat{a}_x , \hat{a}_y , \hat{a}_z – виміряні БА проекції вектору сили тяжіння,

\hat{g}_0 – виміряний модуль вектору сили тяжіння.

Системи та процеси керування

Використовуючи отримані вирази квадратів проекцій (7)...(9), визначимо різницю A квадратів вимірюного \hat{g}_0^2 та істинного g_0^2 модулів вектору прискорення сили тяжіння:

$$\begin{aligned}
 A = \hat{g}_0^2 - g_0^2 = & \hat{a}_x^2 + \hat{a}_y^2 + \hat{a}_z^2 - \left(\frac{\hat{U}_x}{K_{x(p)}} - a_{0x(p)} \right)^2 - \left(\frac{\hat{U}_y}{K_{y(p)}} - a_{0y(p)} \right)^2 - \\
 & - \left(\frac{\hat{U}_z}{K_{z(p)}} - a_{0z(p)} \right)^2 = B_1 \cdot \Delta_{0x} + B_2 \cdot \Delta_{0y} + B_3 \cdot \Delta_{0z} + B_4 \cdot \Delta_{1x} + B_5 \cdot \Delta_{1y} \\
 & + B_6 \cdot \Delta_{1z} + B_7 \cdot \underbrace{(-\Delta_{xy} + \Delta_{yx})}_{\Delta_1} + B_8 \cdot \underbrace{(-\Delta_{xz} - \Delta_{zx})}_{\Delta_2} + B_9 \cdot \underbrace{(\Delta_{yz} - \Delta_{zy})}_{\Delta_3}, [g_0^2]
 \end{aligned} \tag{11}$$

Будемо вважати (11) калібрувальним рівнянням способу. Його коефіцієнти визначаються формулами:

$$\begin{aligned}
 \Delta_1 = & -\Delta_{xy} + \Delta_{yx}, \quad \Delta_2 = -\Delta_{xz} - \Delta_{zx}, \quad \Delta_3 = \Delta_{yz} - \Delta_{zy}; \\
 B_1 = & -2 \left(\frac{\hat{U}_x}{K_{x(p)}} - a_{0x(p)} \right); \quad B_2 = -2 \left(\frac{\hat{U}_y}{K_{y(p)}} - a_{0y(p)} \right); \\
 B_3 = & -2 \left(\frac{\hat{U}_z}{K_{z(p)}} - a_{0z(p)} \right); \\
 B_4 = & -2 \frac{\hat{U}_x}{K_{x(p)}} \left(\frac{\hat{U}_x}{K_{x(p)}} - a_{0x(p)} \right); \quad B_5 = -2 \frac{\hat{U}_y}{K_{y(p)}} \left(\frac{\hat{U}_y}{K_{y(p)}} - a_{0y(p)} \right); \\
 B_6 = & -2 \frac{\hat{U}_z}{K_{z(p)}} \left(\frac{\hat{U}_z}{K_{z(p)}} - a_{0z(p)} \right); \\
 B_7 = & -2 \left(\frac{\hat{U}_x}{K_{x(p)}} \frac{\hat{U}_z}{K_{z(p)}} - \frac{\hat{U}_x}{K_{x(p)}} a_{0z(p)} - \frac{\hat{U}_z}{K_{z(p)}} a_{0x(p)} + a_{0x(p)} a_{0z(p)} \right); \\
 B_8 = & -2 \left(\frac{\hat{U}_y}{K_{y(p)}} \frac{\hat{U}_z}{K_{z(p)}} - \frac{\hat{U}_y}{K_{y(p)}} a_{0z(p)} - \frac{\hat{U}_z}{K_{z(p)}} a_{0y(p)} + a_{0y(p)} a_{0z(p)} \right); \\
 B_9 = & -2 \left(\frac{\hat{U}_x}{K_{x(p)}} \frac{\hat{U}_y}{K_{y(p)}} - \frac{\hat{U}_x}{K_{x(p)}} a_{0y(p)} - \frac{\hat{U}_y}{K_{y(p)}} a_{0x(p)} + a_{0x(p)} a_{0y(p)} \right).
 \end{aligned} \tag{12}$$

Для розв'язку калібрувального рівняння відносно невідомих приростів Δ_{0i} , Δ_{1i} , Δ_{ij} ($i, j = x, y, z; i \neq j$) необхідно мати значення коефіцієнтів

$B_{1\dots 9}$ (12), які визначаються результатами вимірювання вихідних сигналів БА у мінімум дев'яти калібрувальних положеннях. Маючи ці результати вимірювань, сформуємо систему калібрувальних рівнянь виду

$$\begin{aligned} B_{(9 \times N)} \vec{x}_{(9 \times 1)} &= B_{(9 \times N)} \left[\Delta_{0x}; \Delta_{0y}; \Delta_{0z}; \Delta_{1x}; \Delta_{1y}; \Delta_{1z}; \Delta_1; \Delta_2; \Delta_3 \right]_{(9 \times 1)}^T = \\ &= \vec{A}_{(N \times 1)}, \left[g_0^2 \right], \end{aligned} \quad (13)$$

де $B_{(9 \times N)}$ – матриця коефіцієнтів, обчислених після задання N довільних калібрувальних положень;

$N \geq 9$ – кількість довільних калібрувальних положень;

$\vec{x}_{(9 \times 1)}$ – вектор-стовпчик шуканих приростів як розв'язків системи;

$\vec{A}_{(N \times 1)}$ – вектор-стовпчик різниць квадратів вимірюного \hat{g}_0^2 та істинного g_0^2 модулів вектору прискорення сили тяжіння, визначених у (11), в кожному калібрувальному положенні.

Розв'яжемо систему рівнянь (13) відносно приростів (4)...(6), використовуючи метод найменших квадратів (МНК). Відомо, що точність розв'язку за допомогою МНК суттєво збільшується у випадку наявності надмірної кількості результатів вимірювань [2, 3], що вимагає збільшення кількості калібрувальних положень:

$$\begin{aligned} \vec{x}_{(9 \times 1)} &= \left[\hat{\Delta}_{0x}; \hat{\Delta}_{0y}; \hat{\Delta}_{0z}; \hat{\Delta}_{1x}; \hat{\Delta}_{1y}; \hat{\Delta}_{1z}; \hat{\Delta}_1; \hat{\Delta}_2; \hat{\Delta}_3 \right]_{(9 \times 1)}^T = \\ &= \left(B_{(9 \times N)}^T B_{(9 \times N)} \right)^{-1} \cdot \left(B_{(9 \times N)}^T \vec{A}_{(N \times 1)} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

Далі шукані реальні коефіцієнти ЗН і КП визначаються за формулами (4)...(5).

Відповідно до (11) і (12), розв'язки $\hat{\Delta}_1$, $\hat{\Delta}_2$, $\hat{\Delta}_3$ визначають прирости до комбінацій, а не відокремлених значень КН. Розділити прирости для кожного КН неможливо через рівність коефіцієнтів $B_{7\dots 9}$ для знаходження приростів Δ_{xy} і Δ_{yx} , Δ_{xz} і Δ_{zx} , Δ_{yz} і Δ_{zy} й сингулярності системи рівнянь (13). Тому проблема визначення відокремлених значень КН залишається. Для її вирішення пропонується встановити БА у шість додаткових калібрувальних положень, які передбачають високоточний розворот на 180° відносно кожної із вимірювальних осей БА (рис. 2).

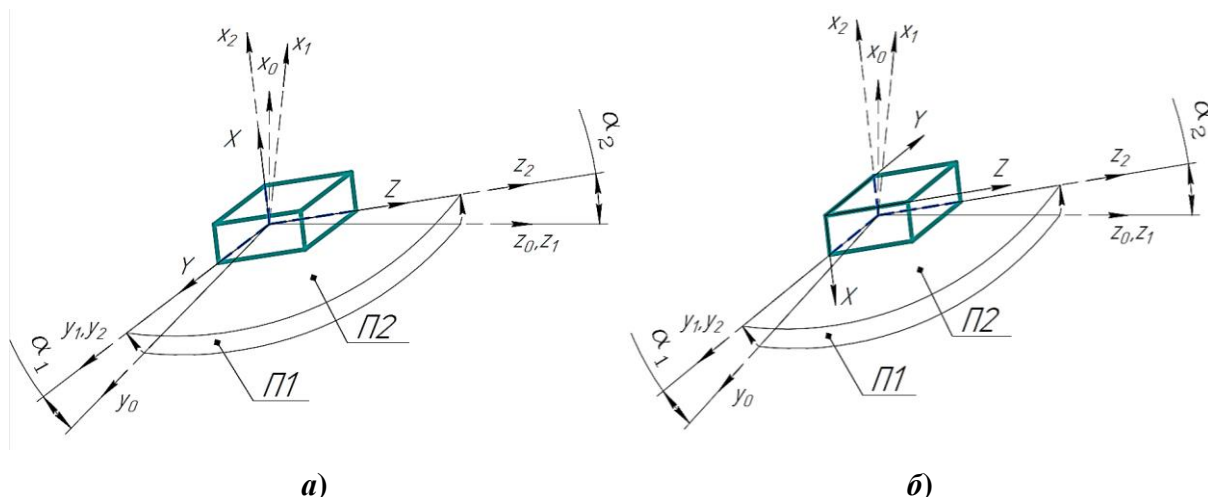


Рис. 2. Додаткові положення БА

БА встановлюється на площину П2, яка у загальному випадку має кутові відхилення $\alpha_1, \alpha_2 \in 1 \dots 3^\circ$ відносно площини горизонту П1. Вихідні сигнали АК визначатимуться виразами (для положення 1 – індекс (1), для положення 2 – індекс (2)):

$$\begin{cases} U_{x1} = K_x (a_{0x} - q \cdot \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + \alpha_{yx} q \cdot \sin \alpha_1 + \alpha_{zx} q \cdot \sin \alpha_2 \cos \alpha_1) \\ U_{y1} = K_y (a_{0y} + \alpha_{xy} q \cdot \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + q \cdot \sin \alpha_1 - \alpha_{zy} q \cdot \sin \alpha_2 \cos \alpha_1) \\ U_{z1} = K_z (a_{0z} - \alpha_{xz} q \cdot \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 - \alpha_{yz} q \cdot \sin \alpha_1 - q \cdot \sin \alpha_2 \cos \alpha_1) \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} U_{x2} = K_x (a_{0x} + q \cdot \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 - \alpha_{yx} q \cdot \sin \alpha_1 - \alpha_{zx} q \cdot \sin \alpha_2 \cos \alpha_1) \\ U_{y2} = K_y (a_{0y} - \alpha_{xy} q \cdot \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 - q \cdot \sin \alpha_1 + \alpha_{zy} q \cdot \sin \alpha_2 \cos \alpha_1) \\ U_{z2} = K_z (a_{0z} + \alpha_{xz} q \cdot \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 + \alpha_{yz} q \cdot \sin \alpha_1 + q \cdot \sin \alpha_2 \cos \alpha_1) \end{cases} \quad (16)$$

Виокремлюючи, для прикладу, із других рівнянь вихідних сигналів добутки $K_y \alpha_{xy}$ і додаючи їх, отримуємо вирази для обчислення КПЧ і відповідного КН:

$$\begin{aligned} K_y \alpha_{xy} = & \frac{1}{q \cdot \underbrace{\cos \alpha_1 \cos \alpha_2}_{\approx 1}} \cdot \left(U_{y1} - \cancel{K_y a_{0y}} - \underbrace{K_y q \cdot \sin \alpha_1}_{\approx 0} + \underbrace{K_y \alpha_{zy} q \cdot \sin \alpha_2 \cos \alpha_1}_{\approx 0} + \right. \\ & \left. + \cancel{K_y a_{0y}} - U_{y2} - \underbrace{K_y q \cdot \sin \alpha_1}_{\approx 0} + \underbrace{K_y \alpha_{zy} q \cdot \sin \alpha_2 \cos \alpha_1}_{\approx 0} \right). \end{aligned} \quad (17)$$

Положення 3 і 4 задаються шляхом спрямування вертикально вгору і вниз осі OY БА, а положення 5 і 6 – осі OZ . Результуючі формули для визначення КН мають вигляд:

$$\hat{\alpha}_{xy} = -\frac{K_{yx}}{K_{y(r)}} = \frac{\hat{U}_{y2} - \hat{U}_{y1}}{2gK_{y(r)}}, [\text{рад}] \quad (18) \quad \hat{\alpha}_{xz} = \frac{K_{zx}}{K_{z(r)}} = \frac{\hat{U}_{z2} - \hat{U}_{z1}}{2gK_{z(r)}}, [\text{рад}] \quad (19)$$

$$\hat{\alpha}_{yx} = \frac{K_{xy}}{K_{x(r)}} = \frac{\hat{U}_{x4} - \hat{U}_{x3}}{2gK_{x(r)}}, [\text{рад}] \quad (20) \quad \hat{\alpha}_{yz} = -\frac{K_{zy}}{K_{z(r)}} = \frac{\hat{U}_{z4} - \hat{U}_{z3}}{2gK_{z(r)}}, [\text{рад}] \quad (21)$$

$$\hat{\alpha}_{zx} = -\frac{K_{xz}}{K_{x(r)}} = \frac{\hat{U}_{x6} - \hat{U}_{x5}}{2gK_{x(r)}}, [\text{рад}] \quad (22) \quad \hat{\alpha}_{zy} = \frac{K_{yz}}{K_{y(r)}} = \frac{\hat{U}_{y6} - \hat{U}_{y5}}{2gK_{y(r)}}, [\text{рад}] \quad (23)$$

де $K_{i(r)}$ – визначені у результаті розв’язку калібрувального рівняння значення КП, $i = x, y, z$.

За формулами (18)...(23) будемо розраховувати реальні значення КН. Їх визначення дозволяє здійснити перевірку якості попереднього визначення приростів (розв’язків системи (14)) і відповідних значень ЗН і КП за формулами:

$$\begin{aligned} (-\hat{\alpha}_{xy} + \hat{\alpha}_{yx}) - \hat{\Delta}_1 &\leq [\alpha_D], & (-\hat{\alpha}_{xz} - \hat{\alpha}_{zx}) - \hat{\Delta}_2 &\leq [\alpha_D], \\ (\hat{\alpha}_{yz} - \hat{\alpha}_{zy}) - \hat{\Delta}_3 &\leq [\alpha_D], \end{aligned} \quad (24)$$

де $\alpha_D = 5 \cdot 10^{-5} \text{ рад}$ – допустиме значення;

$\hat{\Delta}_1, \hat{\Delta}_2, \hat{\Delta}_3$ – значення приростів комбінацій кутів; $\hat{\alpha}_{ji}, i, j = x, y, z$ – визначені значення КН.

Якщо умови (24) виконуються, то вважаємо значення ЗН і КП визначеними правильно. Якщо не виконуються – проводимо наступну ітерацію розрахунків, приймаючи у формулах (4)...(6) у якості відомих паспортних визначені за першою ітерацією коефіцієнти ММ.

Експериментальні дослідження працездатності способу

Для остаточно отриманих значень реальних метрологічних коефіцієнтів БА $a_{0i(r)}, K_{i(r)}, \alpha_{ij(r)}$ ($i, j = x, y, z; i \neq j$) виконується перевірка якості виконання калібрування за комплексним параметром точності, який являє собою похибку Δg розрахунку (вимірювання) за вихідними сигналами БА величини модуля вектору прискорення сили тяжіння \vec{g} . При довільній орієнтації нерухомого БА відносно ПГ ця похибка не повинна перевищувати допустимого для БА значення Δg_D . Дана комплексна похибка калібрування визначається за формулою [1]:

$$\Delta g = g_p - g_l \leq \Delta g_D; \quad (25)$$

$$g_p = \sqrt{\hat{a}_x^2 + \hat{a}_y^2 + \hat{a}_z^2}, \quad (26)$$

де g_p – розраховане значення модуля прискорення сили тяжіння,

g_I – істинне значення модуля прискорення сили тяжіння,

$\hat{a}_i, i = x, y, z$ – проекції прискорення сили тяжіння на ВО БА.

Експериментальна перевірка працездатності способу виконана на БА, до складу якого входили три акселерометри навігаційного класу точності. Перевірка полягала у порівнянні похибки визначення модуля вектору прискорення сили тяжіння за прийнятим на підприємстві-виробнику способом стендового калібрування (який вважається ідеальним) (рис. 3, пунктирний графік), з аналогічною похибкою, визначеною шляхом калібрування БА за запропонованим способом (рис. 3, суцільний графік).

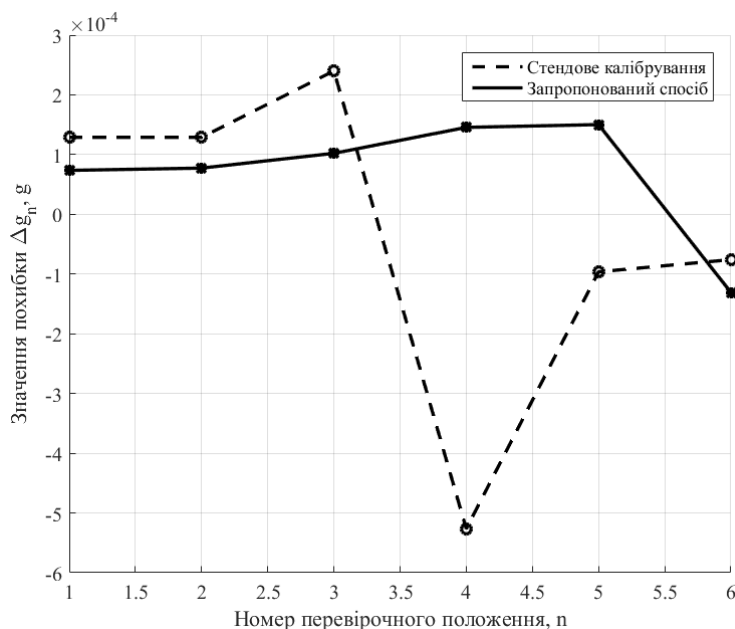


Рис. 3. Графік величин похибок Δg у перевірочних положеннях під час стендового калібрування (штрихова лінія) і за розробленим способом (суцільна лінія)

Аналіз результатів показує, що точність запропонованого способу не гірша за точність способу стендового калібрування (похибка не перевищує допустиме значення $\Delta g \approx 3 \cdot 10^{-4} g$), що дозволяє рекомендувати розроблений спосіб до застосування в експлуатації.

Висновки

Застосування запропонованих у статті шести додаткових калібрувальних положень дозволяє однозначно визначити у разі калібрування реальних значень всіх дванадцяти коефіцієнтів ММ на неprecизійному обладнанні за точністю, яка відповідає первинному – стендовому калібруванню

БА, завдяки чому даний спосіб може бути рекомендований для калібрування БА в експлуатації без обмежень до точності стендового обладнання.

Крім того, визначення реальних значень кутів неортогональності за результатами вимірювання вихідних сигналів у запропонованих шести додаткових положеннях дозволяє здійснити перевірку правильності визначення зміщень нуля і коефіцієнтів перетворення за запропонованим способом, а у випадку неправильності визначення – прийняти рішення про повторне калібрування. Це особливо важливо, оскільки зміщення нуля і коефіцієнти перетворення БА найбільш суттєво змінюються з часом, через що виникає необхідність повторних калібрувань БА в експлуатації.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на застосування розробленого способу для калібрування інерціально-вимірювального модулю, який має, у порівнянні із БА, додаткові три канали вимірювання проекцій кутової швидкості.

Список використаних джерел

1. Черняк М. Г. Спосіб калібрування тривісного блока навігаційних акселерометрів на одновісному поворотному стенді/ М. Г. Черняк, В. А. Палюшок // Механіка гіроскопічних систем. 2013. № 26. С. 5 - 15.
2. G. Panahandeh, I. Skog, and M. Jansson. Calibration of the Accelerometer Triad of an Inertial Measurement Unit, Maximum Likelihood Estimation and Cramer-Rao Bound // International conference on indoor positioning and indoor navigation (IPIN), Zurich, Switzerland. 15 – 17th of September, 2010. 6 p.
3. Mahmood ul Hassan. A Field Calibration Method for Low-Cost MEMS Accelerometer Based on the Generalized Nonlinear Least Square Method / Mahmood ul Hassan, Bao Qilian, Nassim Bessaad // Multiscale Science and Engineering. September 2020. 8 p. Доступ за посиланням: <https://doi.org/10.1007/s42493-020-00045-2>.
4. Аврутов В. В. Метод калібрування і корекції вихідних сигналів тривісного акселерометра / В. В. Аврутов, С. В. Головач, О. М. Сапегін, М. Ю. Хутко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». Приладобудування та інформаційно-вимірювальна техніка. 2016. Вип. 1. С. 92 – 98.
5. Черняк М. Г. Калібрування тривісного блоку навігаційних акселерометрів із використанням математичного апарату еліптичних функцій / М. Г. Черняк, В. О. Кривоноженков, Р. В. Чорноморець // Механіка гіроскопічних систем: науково-технічний збірник. 2019. Вип. 37. – С. 51 – 60.
6. Jie Yang. Improved Iterative Calibration for Triaxial Accelerometers Based on the Optimal Observation / Jie Yang, Wenqi Wu, Yuanxin Wu, Junxiang Lian // Sensors. – 2012. Vol. 12 (8157-8175). – 20 p. Доступ за посиланням: <https://doi.org/10.3390/s120608157>.