

М. Г. Черняк<sup>1</sup>, к. т. н., доцент, Ю. Ю. Юр'єв<sup>2</sup>, виконуючій обов'язки директора-головного конструктора

## ВИЗНАЧЕННЯ ТА АЛГОРИТМІЧНА КОМПЕНСАЦІЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОХИБОК НАВІГАЦІЙНОГО ТРИВІСНОГО ЛІНІЙНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

**Ua** Розглянуто спосіб експериментального визначення в умовах виробництва температурних коефіцієнтів математичної моделі температурних похибок навігаційного тривісного лінійного акселерометра (АТ) за допомогою кантувача при однократному проходженні усіх калібрувальних температур. Для поліноміальної та кусково-лінійної моделей температурних похибок тривісного акселерометра отримано математичні моделі ідентифікації температурних коефіцієнтів цих похибок. Запропоновано шляхи алгоритмічної компенсації температурних похибок АТ у складі виробу за двома методами.

Експериментально підтверджено адекватність розробленого способу визначення температурних коефіцієнтів АТ. Показано, що алгоритмічна компенсація температурних похибок АТ обома методами дає приблизно однаковий результат – зменшення температурних похибок АТ у 3-4 рази. При необхідності збільшення точності цієї компенсації потрібно використовувати більш складні моделі температурних похибок АТ.

**En** The method of experimental determination in the production conditions of the temperature coefficients of the mathematical model of temperature errors of the navigation triaxial linear accelerometer (AT) with the help of a tilter during a single passage of all calibration temperatures is considered. For the polynomial and piecewise linear models of temperature errors of the triaxial accelerometer, mathematical models for identifying the temperature coefficients of these errors were obtained. Ways of algorithmic compensation of temperature errors of AT in the composition of the product using two methods are proposed.

Adequacy of the developed method of determining the temperature coefficients of AT has been experimentally confirmed. It is shown that the algorithmic compensation of temperature errors of AT by both methods gives approximately the same result - a reduction of temperature errors of AT by 3-4 times. If it is necessary to increase the accuracy of this compensation, it is necessary to use more complex models of temperature errors of AT.

### Вступ

Автономне інерціальне керування польотом потребує постійного високоточного вимірювання трьох проекцій уявного прискорення літального апарату (ЛА) на його будівельні осі. Ці вимірювання виконуються за до-

<sup>1</sup> КПІ ім. Ігоря Сікорського

<sup>2</sup> КП СП «Арсенал»

помогою навігаційного тривісного лінійного акселерометра (АТ) до складу якого входять три одновісних лінійних акселерометра (АК), вимірювальні осі яких колінеарні вимірювальним осям АТ. Значення шуканих проєкцій уявного прискорення ЛА розраховують за метрологічною моделлю АТ [1], яка описує їх залежність від вихідних електричних сигналів кожного акселерометра АТ. Індивідуальні коефіцієнти цієї метрологічної моделі ідентифікуються шляхом стендового калібрування АТ [1].

Вимірювання проєкцій уявного прискорення ЛА у польоті відбувається за умов температурних впливів на АТ. Це призводить до виникнення додаткових температурних похибок АТ, які значно знижують точність його результатів вимірювання. Температурні похибки АТ визначаються як різниці між результатами вимірювань в умовах температурного впливу та істинними значеннями шуканих проєкцій уявного прискорення. Джерелом виникнення температурних похибок АТ є дія на нього зовнішніх температурних впливів, у якості яких розглядається зміна поточної температури АТ відносно температури, за якої виконано його стендове калібрування [2, 3].

У літературі практично не розглянуто питання побудови математичних моделей температурних похибок АТ та експериментального визначення температурних коефіцієнтів цих моделей. Зараз для розрахунку і компенсації температурних похибок АТ використовуються лише результати експериментального визначення температурних коефіцієнтів окремих АК, які входять до складу АТ, отримані під час температурних випробувань на виробництві [3, 4]. Це суттєво обмежує точність алгоритмічної компенсації температурних похибок АТ, оскільки не враховуються перехресні зв'язки між ВО акселерометрів у складі АТ.

Між тим у літературі розглянуто питання калібрування АТ за нормальних умов, зокрема, на двовісному [5] та більш простому одновісному поворотних стендах [1]. У статті [1] встановлено, що точність калібрування АТ загалом залежить від якості його переустановлення на платформі стенду. Запропонований її авторами найбільш простий спосіб калібрування АТ може бути застосовано для визначення температурних коефіцієнтів (за умови розташування поворотної платформи стенду у термокамері). Однак при цьому обов'язково необхідно проводити вказане вище прецизійне переустановлення АТ безпосередньо у термокамері у разі достатньо великих (або низьких) температурах, що практично є дуже складним.

### **Постановка задачі**

Першою метою статті є розробка способу експериментального визначення в умовах виробництва температурних коефіцієнтів ММ температурних похибок АТ за допомогою спеціального пристрою – кантувача, який виключає переустановлення АТ за температури, та дозволяє визначи-

ти шукані коефіцієнти у разі однократному проходженні усіх калібрувальних температур. Друга мета – порівняння якості алгоритмічної компенсації температурних похибок АТ за розглянутими у статті двома типами їх математичних моделей із використанням визначених за запропонованим способом температурних коефіцієнтів цих моделей.

### Математичні моделі температурних похибок АТ

Будемо вважати, що визначення результатів вимірювань АТ здійснюється за його метрологічною моделлю, яка ретельно описана у статті [2]. Тому прийmemo, що вигляд тривісного АТ, орієнтація його вимірювальних осей відносно вимірювальних осей акселерометрів, встановлених у АТ, такі ж як і наведені на рис. 1 статті [1].

Розрахунок шуканих проєкцій уявного прискорення ЛА на вимірювальні осі АТ (результатів вимірювань АТ) здійснюється за його метрологічною моделлю [1]

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

де  $U_x, U_y, U_z$  – вихідні сигнали акселерометрів;

$a_x, a_y, a_z$  – вимірювані проєкції уявного прискорення на вимірювальні осі АТ;

$K_{ii} (i = x, y, z)$  – коефіцієнти перетворення (КП) АТ;

$K_{ij} (i, j = x, y, z, i \neq j)$  – коефіцієнти перехресної чутливості (КПЧ) АТ;

$U_{0x}, U_{0y}, U_{0z}$  – зміщення нулів (ЗН);

$N_{ii} (i = x, y, z)$  – обернені коефіцієнти перетворення;

$N_{ij} (i, j = x, y, z; i \neq j)$  – обернені коефіцієнти перехресної чутливості.

Дванадцять коефіцієнтів  $K_{ii} (i = x, y, z)$ ,  $K_{ij} (i, j = x, y, z, i \neq j)$ ,  $U_{0i} (i = x, y, z)$  цієї моделі є індивідуальними метрологічними коефіцієнтами (паспортними константами) АТ, числові значення яких визначаються шляхом стендового калібрування АТ.

Якщо під час експлуатації температура, за якої здійснюється вимірювання за допомогою АТ, відрізняється від температури, за якої виконано його калібрування, то, зазвичай, змінюються числові значення цих дванадцяти коефіцієнтів, що і є джерелом виникнення температурних похибок АТ.

Під математичною моделлю температурних похибок АТ будемо розуміти математичні формули для їх розрахунку в залежності від зміни тем-

ператури застосування АТ відносно температури його первинного стендового калібрування.

Для отримання цих формул спочатку знайдемо, шляхом диференціювання виразів (1), абсолютні інструментальної похибки результатів вимірювання БА  $\Delta a_i$  у залежності від можливих похибок (малих змін)  $\Delta K_{ij}$  елементів матриці  $K_{ij}$  і похибок  $\Delta U_{0i}$  вектору-стовбця  $U_{0i}$

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

Вирази (2) є загальними виразами для визначення систематичних похибок результатів вимірювань АТ, джерелом яких є зміна (за будь-яких причин) його паспортних констант. У нашому випадку джерелом цієї зміни є вплив зміни температури зовнішнього середовища

$$\Delta T = T_{nom} - T_0,$$

де  $T_{nom}, ^\circ C$  – поточна температура зовнішнього середовища, за якої здійснюється вимірювання за допомогою АТ;  $T_0, ^\circ C$  – температура зовнішнього середовища, за якої було визначено паспортні константи АТ. У подальшому температуру  $T_0, ^\circ C$  будемо називати температурою «нормальних умов» (НУ) використання АТ.

Для отриманих шуканих формул для температурних похибок АТ прийемо два можливих виду залежностей цих паспортних констант від зміни температури  $\Delta T$ :

#### 1. Поліноміальний вид

$$\Delta U_{0i} = \alpha_{1i} \Delta T + \alpha_{2i} \Delta T^2 + \alpha_{3i} \Delta T^3 + \dots + \alpha_{ki} \Delta T^k = \sum_{n=1}^k \alpha_{ni} \Delta T^n,$$

$$\Delta K_{ii} = K_{ii} (\beta_{1ii} \Delta T + \beta_{2ii} \Delta T^2 + \beta_{3ii} \Delta T^3 + \dots + \beta_{kii} \Delta T^k) = K_{ii} \sum_{n=1}^k \beta_{nii} \Delta T^n, \quad (3)$$

$$\Delta K_{ij} = K_{ij} (\gamma_{1ij} \Delta T + \gamma_{2ij} \Delta T^2 + \gamma_{3ij} \Delta T^3 + \dots + \gamma_{kij} \Delta T^k) = K_{ij} \sum_{n=1}^k \gamma_{nij} \Delta T^n,$$

де  $k = 1..K$  – порядок поліному;  $n = 1..k$ ;

$\alpha_{1i}, \alpha_{2i}, \alpha_{3i}, \beta_{1ii}, \beta_{2ii}, \beta_{3ii}, \gamma_{1ij}, \gamma_{2ij}, \gamma_{3ij}$  – відповідні лінійні, квадратичні, кубічні температурні коефіцієнти зміщень нулів, коефіцієнтів перетворення, коефіцієнтів перехресної чутливості АТ;

2. Кусково-лінійний вид

$$\Delta U_{0il} = \alpha_{il} \Delta T, \Delta K_{iil} = K_{ii_{\text{кал}}} \beta_{iil} \Delta T, \Delta K_{ijl} = K_{ij_{\text{кал}}} \gamma_{ijl} \Delta T, \quad (4)$$

де  $m = 1..M$  – кількість температурних інтервалів у діапазоні температур;  $l = 1..m$ ;  $\alpha_{il}$ ,  $\beta_{iil}$ ,  $\gamma_{ijl}$  – відповідні лінійні температурні коефіцієнти  $\Delta T$  для кожного інтервалу температур;

$\Delta U_{0il}$ ,  $\Delta K_{iil}$ ,  $\Delta K_{ijl}$  – відповідні зміни ЗН, КП, КПЧ для цих інтервалів.

Для отримання поліноміальної та кусково-лінійної моделей ТП підставимо вирази (3) та (4) у формули (2). Після виконання перетворень загальна (будь-якого порядку) поліноміальна модель температурних похибок АТ має вигляд

$$\Delta a_{iT} = \sum_{n=1}^k \left( -\frac{(\hat{U}_i - U_{0i})}{K_{ii}} \beta_{nii} - \sum_{j \neq i} \frac{(\hat{U}_j - U_{0j})}{K_{ii} K_{jj}} K_{ij} \gamma_{nij} - \frac{\alpha_{ni}}{K_{ii}} + \sum_{j \neq i} \frac{K_{ij} \alpha_{nj}}{K_{ii} K_{jj}} \right) \Delta T^n. \quad (5)$$

Аналогічно кусково-лінійна модель температурних похибок визначається за формулами

$$\begin{aligned} \Delta a_{iT} = & \left( -\frac{(\hat{U}_i - U_{0i_{\text{кал}}})}{K_{ii_{\text{кал}}}} \beta_{iil} - \sum_{j \neq i} \frac{(\hat{U}_j - U_{0j_{\text{кал}}})}{K_{ii_{\text{кал}}} K_{jj_{\text{кал}}}} K_{ij_{\text{кал}}} \gamma_{ijl} - \right. \\ & \left. - \frac{\alpha_{il}}{K_{ii_{\text{кал}}}} + \sum_{j \neq i} \frac{K_{ij_{\text{кал}}} \alpha_{jl}}{K_{ii_{\text{кал}}} K_{jj_{\text{кал}}}} \right) \Delta T, \end{aligned} \quad (6)$$

де  $K_{ii_{\text{кал}}}$ ,  $K_{jj_{\text{кал}}}$ ,  $K_{ij_{\text{кал}}}$ ,  $U_{0i_{\text{кал}}}$ ,  $U_{0j_{\text{кал}}}$  – калібровочні паспортні константи АТ, що були визначені за  $T = T_0$ .

Загальні вирази (6) та (7) можуть бути спрощені (для більш зручного їх практичного використання). Для цього знехтуємо другою та четвертою складовими цих рівнянь, які мають більший порядок малості ніж перша та третя складові. Це можливо оскільки величини коефіцієнтів перехресної чутливості суттєво (на 2 порядки) менше ніж величини коефіцієнтів перетворення для сучасних АТ. У результаті отримаємо спрощені моделі температурних похибок АТ:

1. Поліноміальну

$$\Delta a_{iT} = \sum_{n=1}^k \left( -\frac{(\hat{U}_i - U_{0i})}{K_{ii}} \beta_{nii} - \frac{\alpha_{ni}}{K_{ii}} \right) \Delta T^n; \quad (7)$$

2. Кусково-лінійну

$$\Delta a_{iT} = \left( -\frac{(\hat{U}_i - U_{0i_{\text{кал}}})}{K_{ii_{\text{кал}}}} \beta_{iil} - \frac{\alpha_{il}}{K_{ii_{\text{кал}}}} \right) \Delta T. \quad (8)$$

Вирази (5), ..., (8) дозволяють розрахувати числові значення температурних похибок АТ, якщо відомі його паспортні константи, числове значення зміни температури  $\Delta T$ , визначене за показами термодатчика АТ, та відповідні індивідуальні температурні коефіцієнти зміщень нулів, коефіцієнтів перетворення, коефіцієнтів перехресної чутливості АТ, які поки що є невідомими і визначаються експериментально за запропонованим нижче способом.

### **Спосіб експериментального визначення температурних коефіцієнтів математичних моделей температурних похибок АТ**

Згідно запропонованого у статті [1] способу калібрування за допомогою одновісного поворотного стенду задаються вісім тестових положень (ТП) ТП1, ..., ТП8 акселерометра тривісного відносно площини місцевого горизонту. При цьому обов'язковим є встановлення АТ у дві установки на площадку стенду. Автори статті [1] стверджують про те, що це переустановка АТ є основним джерелом похибок його калібрування за цим способом, а також воно принципово неможливо у разі великих додатних або від'ємних температурах.

Для уникнення цієї проблеми будемо використовувати для задання тестових положень АТ спеціальний пристрій – кантувач, який виконує таку ж саму функцію як одновісний поворотний стенд. Кантувач, зображений на рис.1, має сім базових установочних поверхонь П1÷П7. Такий кантувач дозволяє задати лише шість тестових положень (ТП1, ..., ТП6) АТ відносно площини горизонту (ПГ) (рис. 2), тому математична модель калібрування АТ, яка запропонована у статті [1], має бути допрацьована до моделі із шістьма ТП.

Згідно рис. 2. та способу калібрування АТ, запропонованому у статті [1], у кожному ТП відомі проекції вектору  $\vec{g}$  на його вимірювальні осі, а вихідні сигнали його акселерометрів у кожному ТП визначаються моделлю (1) (всього 18 виразів). Як приклад наведемо лише вирази для вихідних сигналів (9) АТ встановленого у ТП2 та ТП4.

$$\begin{cases} U_{x2} = -K_{xy}g + U_{0x} \\ U_{y2} = -K_{yy}g + U_{0y} \\ U_{z2} = -K_{zy}g + U_{0z} \end{cases}, \quad \begin{cases} U_{x4} = K_{xy}g + U_{0x} \\ U_{y4} = K_{yy}g + U_{0y} \\ U_{z4} = K_{zy}g + U_{0z} \end{cases}. \quad (9)$$

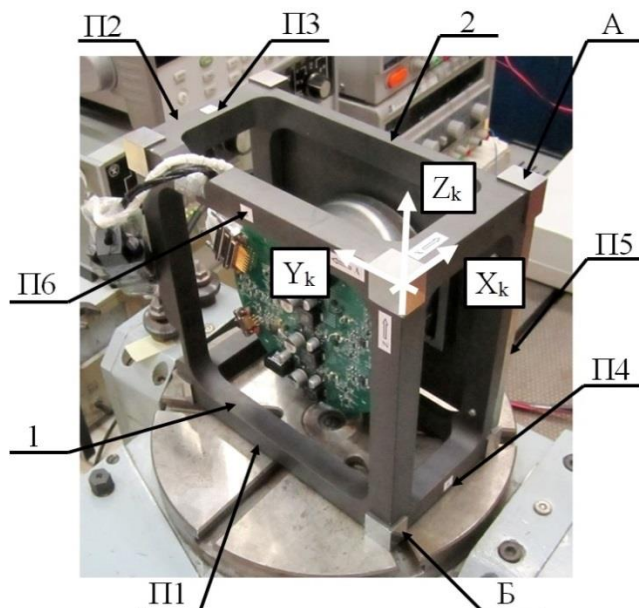


Рис. 1. АТ, встановлений у кантувач: 1 – кантувач, 2 – АТ,  $OX_kY_kZ_k$  - система координат зв'язана із кантувачем,  $OXYZ$  – система координат зв'язана із АТ, встановленим на внутрішню поверхню (П7)

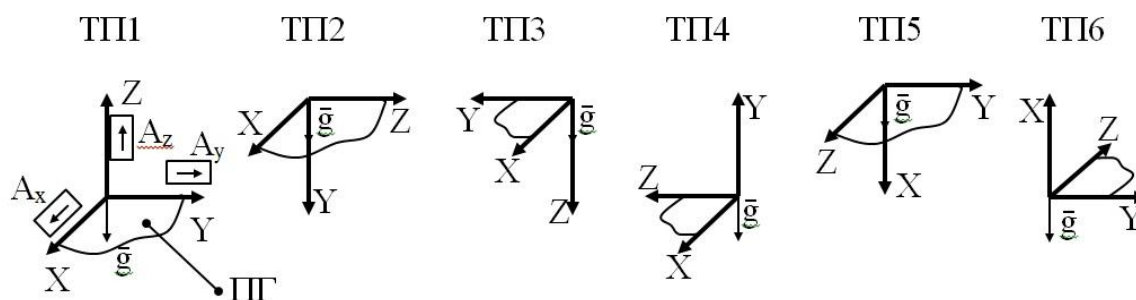


Рис. 2. Розташування вимірювальних осей АТ відносно ПГ у тестових положеннях ТП1, ..., ТП6

Розглянувши відповідні лінійні комбінації всіх вісімнадцяти виразів для вихідних сигналів АТ, за процедурою статті [1] отримуємо наступні формули для визначення усіх 12 коефіцієнтів його моделі (1):

$$\begin{aligned}
 \hat{K}_{xx} &= 0,5g^{-1}(U_{x6} - U_{x5}); & \hat{K}_{xy} &= 0,5g^{-1}(U_{x4} - U_{x2}); \\
 \hat{K}_{xz} &= 0,5g^{-1}(U_{x1} - U_{x3}); & \hat{K}_{yx} &= 0,5g^{-1}(U_{y6} - U_{y5}); \\
 \hat{K}_{yy} &= 0,5g^{-1}(U_{y4} - U_{y2}); & \hat{K}_{yz} &= 0,5g^{-1}(U_{y1} - U_{y3}); \\
 \hat{K}_{zx} &= 0,5g^{-1}(U_{z6} - U_{z5}); & \hat{K}_{zy} &= 0,5g^{-1}(U_{z4} - U_{z2}); \\
 \hat{K}_{zz} &= 0,5g^{-1}(U_{z1} - U_{z3}); & \hat{U}_{ox} &= 0,25(U_{x1} + U_{x2} + U_{x3} + U_{x4}); \\
 \hat{U}_{oy} &= 0,25(U_{y1} + U_{y3} + U_{y5} + U_{y6}); \\
 \hat{U}_{oz} &= 0,25(U_{z2} + U_{z4} + U_{z5} + U_{z6}),
 \end{aligned} \tag{10}$$

де  $U_{xi}$  ( $i = 1, \dots, 6$ ),  $U_{yi}$  ( $i = 1, \dots, 6$ ),  $U_{zi}$  ( $i = 1, \dots, 6$ ) – вихідні електричні сигнали акселерометрів АТ у шести його тестових положеннях (ТП1, ..., ТП6).

Визначення індивідуальних коефіцієнтів моделі (1) АТ за формулами (10) необхідно виконувати при кожній тестовій калібрувальній температурі. Кількість тестових температур визначається за кількістю піддіпазонів кусково-лінійної моделі його температурної похибки, або за порядком поліноміальної моделі цієї похибки.

Отримаємо формули для визначення шуканих температурних коефіцієнтів дванадцяти коефіцієнтів метрологічної моделі (1) АТ для найбільш розповсюдженої поліноміальної моделі третього порядку температурної похибки (7). Для цього сформуємо три системи рівнянь (для  $\Delta U_{0i}$ ,  $\Delta K_{ii}$ ,  $\Delta K_{ij}$  відповідно) за моделлю (3), у кожній із яких буде три рівняння відносно зміни температури  $\Delta T$  (відповідно до обраного третього порядку полінома). Розв'язок цих систем за методом Крамера [6] дозволяє отримати наступні формули для визначення температурних коефіцієнтів зміщень нулів, коефіцієнтів перетворення, коефіцієнтів перехресної чутливості метрологічної моделі (1) АТ

$$\begin{aligned} \alpha_{1i} &= \frac{\Delta_{1\alpha}}{\Delta}, & \alpha_{2i} &= \frac{\Delta_{2\alpha}}{\Delta}, & \alpha_{3i} &= \frac{\Delta_{3\alpha}}{\Delta}, \\ \beta_{1ii} &= \frac{\Delta_{1\beta}}{\Delta}, & \beta_{2ii} &= \frac{\Delta_{2\beta}}{\Delta}, & \beta_{3ii} &= \frac{\Delta_{3\beta}}{\Delta}, \\ \gamma_{1ij} &= \frac{\Delta_{1\gamma}}{\Delta}, & \gamma_{2ij} &= \frac{\Delta_{2\gamma}}{\Delta}, & \gamma_{3ij} &= \frac{\Delta_{3\gamma}}{\Delta}, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{де } \Delta = \begin{vmatrix} \Delta T_n & \Delta T_n^2 & \Delta T_n^3 \\ \Delta T_v & \Delta T_v^2 & \Delta T_v^3 \\ \Delta T_{cn} & \Delta T_{cn}^2 & \Delta T_{cn}^3 \end{vmatrix} \text{ – головний визначник систем;}$$

$$\Delta_{1\alpha} = \begin{vmatrix} (U_{0in} - U_{0ikal}) & \Delta T_n^2 & \Delta T_n^3 \\ (U_{0iv} - U_{0ikal}) & \Delta T_v^2 & \Delta T_v^3 \\ (U_{0icn} - U_{0ikal}) & \Delta T_{cn}^2 & \Delta T_{cn}^3 \end{vmatrix}, \quad \Delta_{2\alpha} = \begin{vmatrix} \Delta T_n & (U_{0in} - U_{0ikal}) & \Delta T_n^3 \\ \Delta T_v & (U_{0iv} - U_{0ikal}) & \Delta T_v^3 \\ \Delta T_{cn} & (U_{0icn} - U_{0ikal}) & \Delta T_{cn}^3 \end{vmatrix},$$

$$\Delta_{3\alpha} = \begin{vmatrix} \Delta T_n & \Delta T_n^2 & (U_{0in} - U_{0ikal}) \\ \Delta T_v & \Delta T_v^2 & (U_{0iv} - U_{0ikal}) \\ \Delta T_{cn} & \Delta T_{cn}^2 & (U_{0icn} - U_{0ikal}) \end{vmatrix}, \quad \Delta_{1\beta} = \begin{vmatrix} (K_{iin} - K_{iikal}) & \Delta T_n^2 & \Delta T_n^3 \\ (K_{iiv} - K_{iikal}) & \Delta T_v^2 & \Delta T_v^3 \\ (K_{iicn} - K_{iikal}) & \Delta T_{cn}^2 & \Delta T_{cn}^3 \end{vmatrix},$$

$$\Delta_{2\beta} = \begin{vmatrix} \Delta T_n & (K_{iin} - K_{iikal}) & \Delta T_n^3 \\ \Delta T_v & (K_{iiv} - K_{iikal}) & \Delta T_v^3 \\ \Delta T_{cn} & (K_{iicn} - K_{iikal}) & \Delta T_{cn}^3 \end{vmatrix}, \quad \Delta_{3\beta} = \begin{vmatrix} \Delta T_n & \Delta T_n^2 & (K_{iin} - K_{iikal}) \\ \Delta T_v & \Delta T_v^2 & (K_{iiv} - K_{iikal}) \\ \Delta T_{cn} & \Delta T_{cn}^2 & (K_{iicn} - K_{iikal}) \end{vmatrix},$$



$$\Delta_{1\gamma} = \begin{vmatrix} (K_{ij_n} - K_{ij_{кал}}) & \Delta T_n^2 & \Delta T_n^3 \\ (K_{ij_v} - K_{ij_{кал}}) & \Delta T_v^2 & \Delta T_v^3 \\ (K_{ij_{сн}} - K_{ij_{кал}}) & \Delta T_{сн}^2 & \Delta T_{сн}^3 \end{vmatrix}, \Delta_{2\gamma} = \begin{vmatrix} \Delta T_n & (K_{ij_n} - K_{ij_{кал}}) & \Delta T_n^3 \\ \Delta T_v & (K_{ij_v} - K_{ij_{кал}}) & \Delta T_v^3 \\ \Delta T_{сн} & (K_{ij_{сн}} - K_{ij_{кал}}) & \Delta T_{сн}^3 \end{vmatrix},$$

$$\Delta_{3\gamma} = \begin{vmatrix} \Delta T_n & \Delta T_n^2 & (K_{ij_n} - K_{ij_{кал}}) \\ \Delta T_v & \Delta T_v^2 & (K_{ij_v} - K_{ij_{кал}}) \\ \Delta T_{сн} & \Delta T_{сн}^2 & (K_{ij_{сн}} - K_{ij_{кал}}) \end{vmatrix} - \text{визначники цих систем, які сформо-}$$

вані із головного визначника шляхом відповідних заміни за алгоритмом методу Крамера.

Для визначення шуканих температурних коефіцієнтів  $\alpha_i, \beta_{ii}, \gamma_{ij}$  більш простої кусково-лінійної моделі температурних похибок  $\Delta T$  (з двома температурними піддіапазонами) використовуються більш прості формули:

$$\alpha_{in} = \frac{U_{0in} - U_{0i_{кал}}}{T_n - T_0}; \quad \beta_{iin} = \frac{K_{iin} - K_{ii_{кал}}}{K_{ii_{кал}}(T_n - T_0)}; \quad \gamma_{ijn} = \frac{K_{ijn} - K_{ij_{кал}}}{K_{ij_{кал}}(T_n - T_0)}$$

, у разі  $\Delta T \leq 0$ ;

$$\alpha_{iv} = \frac{U_{0iv} - U_{0i_{кал}}}{T_v - T_0}; \quad \beta_{iiv} = \frac{K_{iiv} - K_{ii_{кал}}}{K_{ii_{кал}}(T_v - T_0)}, \quad (12)$$

$$\gamma_{ijv} = \frac{K_{ijv} - K_{ij_{кал}}}{K_{ij_{кал}}(T_v - T_0)}, \text{ у разі } \Delta T \geq 0.$$

### Шляхи компенсації температурних похибок $\Delta T$

Отримані за способом, що пропонується, відповідні температурні коефіцієнти зміщень нулів, коефіцієнтів перетворення, коефіцієнтів перехресної чутливості моделі (1)  $\Delta T$  у подальшому використовуються для алгоритмічної компенсації в умовах експлуатації його температурних похибок. Ця компенсація може бути здійснена за такими двома методами [2]:

- за методом математичної корекції поточних значень паспортних констант моделі (1)  $\Delta T$  в залежності від поточної температури  $T_{ном}$ , при якій здійснюються вимірювання в експлуатації. При цьому коригуючими поправками є зміни коефіцієнтів зміщень нулів, коефіцієнтів перетворення, коефіцієнтів перехресної чутливості, що визначаються за формулами (3), або (4).
- за методом розрахунку для поточної температури  $T_{ном}$ , значень його систематичних абсолютних температурних похибок, та наступної корекції результатів вимірювань  $\Delta T$  шляхом введення коригуючих попра-

вок до цих результатів вимірювань визначених за формулами (5) або (6), тобто

$$\hat{a}_{ki} = \hat{a}_i - \Delta a_{iT},$$

де  $\hat{a}_{ki}$  – скоректоване значення результату вимірювання АТ із урахуванням зміни температури;

$\hat{a}_i$  – результат вимірювання АТ визначений за формулою (1) із використанням паспортних констант моделі (1), визначених під час  $T = T_0$ ;

$\Delta a_{iT}$  – числове значення абсолютної систематичної температурної похибки БА розрахованої за формулами (5), або (6).

### **Експериментальна перевірка якості визначення температурних коефіцієнтів АТ та порівняння якості алгоритмічної компенсації його температурних похибок**

Експериментальна перевірка якості визначення температурних коефіцієнтів АТ за розробленим способом виконується шляхом порівняння похибок вимірювання модуля прискорення сили тяжіння у разі перевірочних температур, за умовами, що порівнюються:

- похибки вимірювання модуля прискорення сили тяжіння з корекцією коефіцієнтів метрологічної моделі (1) АТ по формулам (3), або (4), та без корекції. Ця перевірка відповідає першому методу корекції температурних похибок АТ;
- похибки вимірювання модуля прискорення сили тяжіння із корекцією температурних похибок АТ за формулами (5) або (6) та без корекції. Ця перевірка відповідає другому методу корекції температурних похибок АТ.

При цьому похибки вимірювання модуля прискорення сили тяжіння  $\vec{g}$  визначаються шляхом описаним у статті [1] за формулою

$$\Delta g_m = g_{pm} - g_H \leq \Delta g_D, [g] \quad (13)$$

де  $g_{pm} = \sqrt{a_{xm}^2 + a_{ym}^2 + a_{zm}^2}$  – розраховане, за результатами вимірювань АТ, значення модуля вектору  $\vec{g}$  в перевірочному положенні ППm ( $m = \overline{1,6}$ );

$\Delta g_D$  – допустима похибка вимірювання модуля вектору  $\vec{g}$  за нормальної температури.

Наприклад, для АТ безплатформної інерціальної навігаційної системи ракети-носія типу «Циклон-4» температурні коефіцієнти моделі (1) АТ буде визначено якісно, якщо під час такої перевірки буде забезпечено за нормальної температури  $\Delta g_D \approx \pm 3 \cdot 10^{-4} g$ , а у діапазоні робочих температур –  $\Delta g_D \approx \pm 10 \cdot 10^{-4} g$ .

## Системи та процеси керування

Порівняння вказаних похибок було виконано у шести перевірочних положеннях (ПП1, ..., ПП6) кантувача із АТ, показаних на рис. 3. Як приклад, на рис. 4. показаний кантувач із АТ встановлений у ПП1.

У цих положеннях вольтметром вимірювались вихідні сигнали кожного акселерометра АТ із метою їх використання для розрахунку дванадцяти коефіцієнтів його метрологічної моделі (1) у разі перевірочних температур ( $T_0=+20^{\circ}\text{C}$ ,  $T_n=-40^{\circ}\text{C}$ ,  $T_b=+70^{\circ}\text{C}$ ), а також для розрахунку шуканих температурних коефіцієнтів і температурних похибок АТ, які порівнюють-ся.

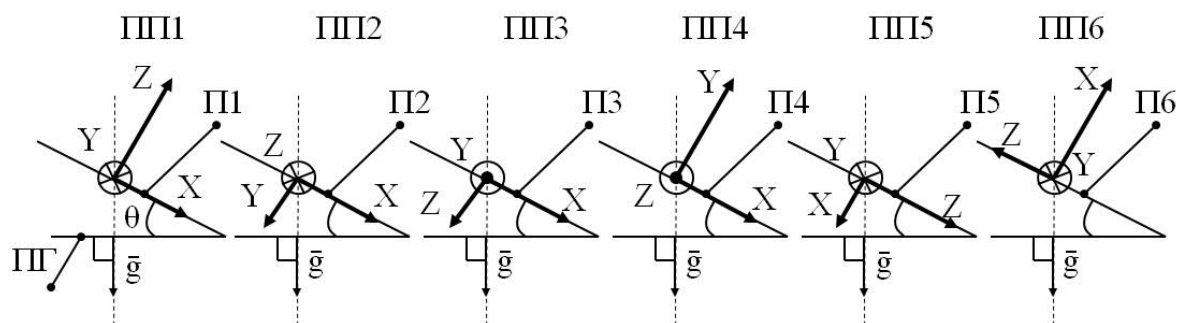


Рис. 3. Розташування вимірювальних осей АТ відносно ПГ у перевірочних положеннях ПП1, ..., ПП6 (значення кута  $\theta \approx 25^{\circ}$ )

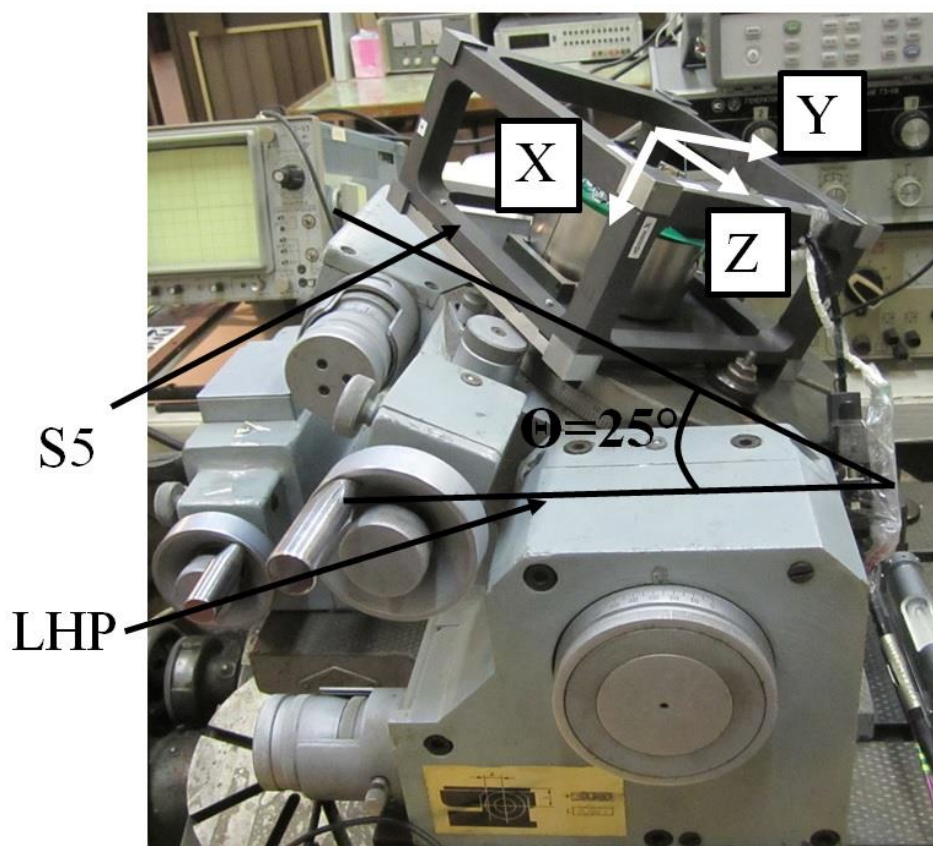


Рис. 4. Кантувач із АТ встановлений у положення ПП1

Результати розрахунку усіх 12 коефіцієнтів його моделі (1) АТ за формулами (10) при температурах калібрування представлені у табл. 1 та табл. 2. Порівняння числових значень коефіцієнтів показує, що вони залежать від температури калібрування.

Далі, маючи ці числові значення коефіцієнтів моделі (1) АТ, були розраховані за формулами (11) шукані температурні коефіцієнти моделей (5) і (6) температурних похибок АТ. Як приклад, їх значення для кусково-лінійної моделі (6) з двома піддіапазонами температур наведено у табл. 3.

Використовуючи ці отримані температурні коефіцієнти було відкориговане числові значення паспортних коефіцієнтів метрологічної моделі (1) АТ шляхом додавання поправок, визначених за формулами (3) і (4). Потім за формулами (5) і (6) було розраховано додаткові температурні похибки АТ.

Таблиця 1.

Значення КП та ЗН моделі (1) АТ під час різних температур

Температура	КП, [В/g]		
	$K_{xx}$	$K_{yy}$	$K_{zz}$
$T=T_{H.y.}=+20^{\circ}C$	-0,55060863	-0,54854890	-0,54859224
$T=T_H=-40^{\circ}C$	-0,55074263	-0,54790681	-0,54832201
$T=T_B=+70^{\circ}C$	-0,55140269	-0,54933059	-0,54979681
Температура	ЗН, [В]		
	$U_{0x}$	$U_{0y}$	$U_{0z}$
$T=T_{H.y.}=+20^{\circ}C$	0,00449084	-0,00442299	-0,00347099
$T=T_H=-40^{\circ}C$	0,01181219	0,00057544	0,00041269
$T=T_B=+70^{\circ}C$	0,00359778	-0,00643609	-0,00223732

Таблиця 2.

Значення КПЧ моделі (1) АТ під час різних температур

Температура	КПЧ, [В/g]		
	$K_{xy}$	$K_{xz}$	$K_{yx}$
$T=T_{H.y.}=+20^{\circ}C$	-0,00051742	0,01639328	-0,01322881
$T=T_H=-40^{\circ}C$	-0,00038930	0,01602241	-0,01277214
$T=T_B=+70^{\circ}C$	-0,00042829	0,01652937	-0,01364519
Температура	КПЧ, [В/g]		
	$K_{yz}$	$K_{zx}$	$K_{zy}$
$T=T_{H.y.}=+20^{\circ}C$	-0,00066841	-0,01466957	-0,00035441
$T=T_H=-40^{\circ}C$	-0,00074432	-0,01433019	-0,00023161
$T=T_B=+70^{\circ}C$	-0,00068396	-0,01478830	-0,00027167

Таблиця 3.

Значення температурних коефіцієнтів моделі (1) АТ  
для кусково-лінійної моделі його температурних похибок

Температурний коефіцієнт моделі (1) АТ	Значення у діапазоні від $40^{\circ}\text{C}$ до $+20^{\circ}\text{C}$	Значення в діапазоні від $+20^{\circ}\text{C}$ до $+70^{\circ}\text{C}$
$\beta_{1xx}, [1/^{\circ}\text{C}]$	-0,00000406	0,00002884
$\beta_{1yy}, [1/^{\circ}\text{C}]$	0,00001951	0,00002850
$\beta_{1zz}, [1/^{\circ}\text{C}]$	0,00000821	0,00004391
$\alpha_{1x}, [\text{B}/^{\circ}\text{C}]$	-0,00012202	-0,00001786
$\alpha_{1y}, [\text{B}/^{\circ}\text{C}]$	-0,00008331	-0,00004026
$\alpha_{1z}, [\text{B}/^{\circ}\text{C}]$	-0,00006473	0,00002467
$\gamma_{1xy}, [1/^{\circ}\text{C}]$	0,00412678	-0,00344515
$\gamma_{1xz}, [1/^{\circ}\text{C}]$	0,00037706	0,00016603
$\gamma_{1yx}, [1/^{\circ}\text{C}]$	0,00057535	0,00062950
$\gamma_{1yz}, [1/^{\circ}\text{C}]$	-0,00189274	0,00046547
$\gamma_{1zx}, [1/^{\circ}\text{C}]$	0,00038558	0,00016187
$\gamma_{1zy}, [1/^{\circ}\text{C}]$	0,00577492	-0,00466918

Маючи результати цих розрахунків було виконано алгоритмічну компенсацію температурних похибок АТ за двома методами описаними вище (методом математичної корекції поточних значень паспортних коефіцієнтів метрологічної моделі (1) АТ у залежності від поточної температури, та методом введення поправок до результатів вимірювань АТ на величину його температурних похибок). Залишкові, після алгоритмічної компенсації, похибки результатів вимірювання АТ і є шуканими похибками для порівняння.

Результати перевірки якості вимірювання модуля вектору  $\vec{g}$  за умовою (13) представлені на рис. 5 та рис. 6. Пояснення до рисунків: лінія а) – перевірка за  $T = T_0 = +20^{\circ}\text{C}$  із коефіцієнтами моделі (1) визначеними за  $T = T_0 = +20^{\circ}\text{C}$  (похибка не перевищує  $\pm 0,12\text{mg}$ ); лінія б) – перевірка за  $T = -10^{\circ}\text{C}$  із коефіцієнтами моделі (1) визначеними за  $T = T_0 = +20^{\circ}\text{C}$  без алгоритмічної компенсації ТП (похибка досягає  $\pm 4\text{mg}$ ); лінія в) – перевірка за  $T = -10^{\circ}\text{C}$  із алгоритмічною компенсацією ТП за першим методом; лінія г) – перевірка за  $T = -10^{\circ}\text{C}$  із алгоритмічною компенсацією ТП за другим методом; лінія д) – перевірка за  $T = +45^{\circ}\text{C}$  із коефіцієнтами моделі (1) визначеними при  $T = T_0 = +20^{\circ}\text{C}$  без алгоритмічної компенсації ТП (похибка також досягає  $\pm 4\text{mg}$ ); лінія е) – перевірка за  $T = +45^{\circ}\text{C}$  із алгоритмічною компенсацією ТП за першим методом; лінія є) – перевірка за  $T = +45^{\circ}\text{C}$  із алгоритмічною компенсацією ТП за другим методом.

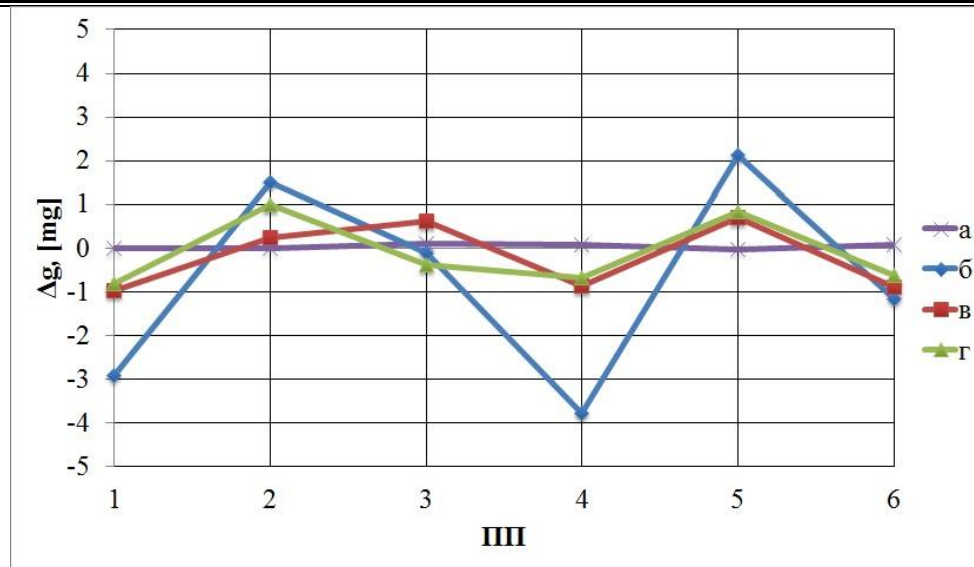


Рис. 5. Похибки вимірювання модуля прискорення сили тяжіння у перевірочних положеннях (ПП1, ..., ПП6) коли температура дорівнює  $-10^{\circ}\text{C}$

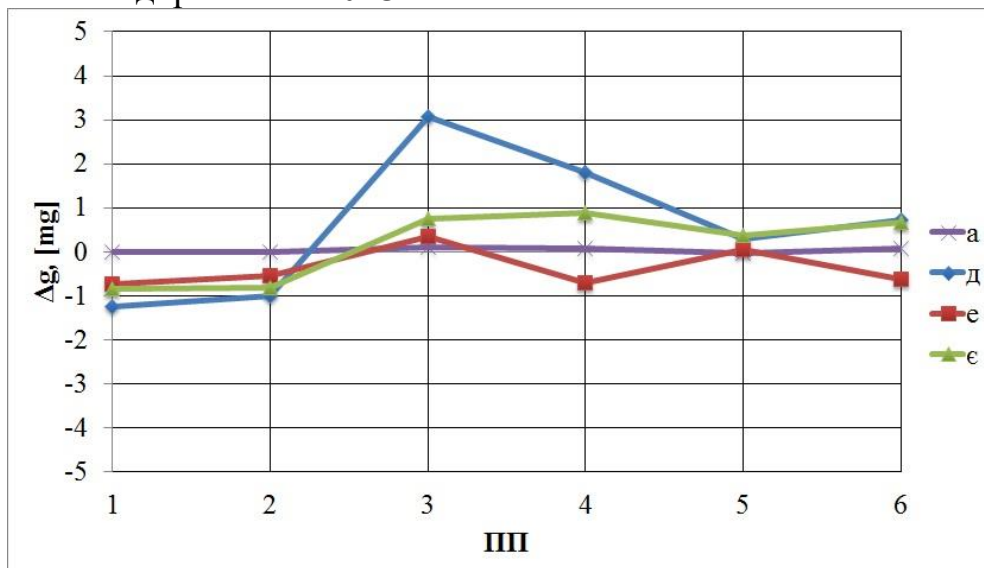


Рис. 6. Похибки вимірювання модуля прискорення сили тяжіння у перевірочних положеннях (ПП1, ..., ПП6) коли температура дорівнює  $+45^{\circ}\text{C}$

Експериментальні результати, які отримано, показують, що для найбільш простих моделей температурних похибок АТ (7) і (8) алгоритмічна компенсація цих похибок з використанням обох методів зменшують похибку вимірювання прискорення сили тяжіння у 3-4 рази. При цьому обидва методи забезпечують приблизно однакову точність. Однак після такої найбільш простої алгоритмічної компенсації температурні похибки АТ ще залишаються достатньо великими (приблизно у 4 рази перевищують допустимі).

Для їх подальшого зменшення ще у декілька разів, потрібно здійснювати їх алгоритмічну компенсацію за більш ускладненими моделями, тобто використовувати для розрахунку поточних температурних коефіціє-

нтів більше піддіапазонів кусочно-лінійної моделі (4), або використовувати більший порядок поліноміальної моделі (3).

### **Висновки**

Підтверджено, що запропонований спосіб експериментального визначення температурних коефіцієнтів моделі (1) АТ за допомогою кантувача забезпечує ідентифікацію, за виразами (11), усіх температурних коефіцієнтів моделей (5), або (6), без переустановлення АТ на стенді і при однократному проходженні усіх калібрувальних температур. Ця технологія є зручною для застосування в умовах виробництва.

Експериментальна перевірка якості визначення температурних коефіцієнтів АТ показує, що вони визначаються за спрощеними формулами вірно, а алгоритмічна компенсація його температурних похибок (за використанні простої кусково-лінійної моделі температурних похибок (8)) за двома методами запропонованими у статті дає приблизно однаковий результат – зменшення температурних похибок АТ у 3-4 рази, що свідчить про її достатньо високу ефективність.

При необхідності збільшення точності цієї компенсації потрібно використовувати більш складні моделі температурних похибок АТ (5), або (6).

### **Список використаної літератури**

1. *Черняк, М. Г.* Спосіб калібрування тривісного блока навігаційних акселерометрів на одновісному поворотному стенді/ М. Г. Черняк, В. А. Палюшок // Механика гироскопических систем. – 2013. – Вип. 26. – С. 5–15.
2. *Земельман, М. А.* Автоматична корекція похибок вимірювальних пристроїв/ М. А. Земельман - М.: Вид-во стандартів, 1972. –342 с.
3. *Калінін, М. А.* О компенсації температурного уходу коефіцієнта перетворення акселерометра АЛЕ-055/ М. А. Калінін // Датчики і системи. – 2004. – № 2. – С. 33–35.
4. *Головач, С. В.* Комплексна алгоритмічна компенсація температурного дрейфу вимірювального каналу тривісного акселерометра у складі БІНС/ С. В. Головач // Вісник НТУУ "КПІ". Серія "Приладобудування". – 2015. – Вип. 50(2). – С. 27–34.
5. *Успенський, В. Б., Некрасова, М. В.* Метод калібрування акселерометричного вимірювального модуля/ В. Б. Успенський, М. В. Некрасова // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Приладобудування - 2012. - Вип. 44(1). - С. 15 - 23.
6. *Гантмахер, Ф. Р.* Теория матриц/Ф. Р. Гантмахер – М.: Наука, 2 изд., 1967. — 576 с.