

3. Путем моделирования показано, что лучшие результаты ( $0,1^\circ$ ) достижимы при шаге поворота  $90^\circ$ .

4. Показано, что в этом случае легко определяется систематическая составляющая угловой скорости ухода ГС.

5. Для уменьшения влияния случайной составляющей угловой скорости ухода достаточно осреднения показаний в течение 10 с.

#### Литература

1. Гиромагнитный компас «Стриж». Руководство по технической эксплуатации.

2. Мелешко В.В. Инерциальные навигационные системы. Начальная выставка. - К.: Корнейчук, 1999. – 126 с.

Мелешко В.В., Корнійчук В.В., Скуднева О.В. <b>Самоорієнтуючийся вказівник курсу</b> Розглянуто схему й алгоритм роботи гіроскопа напрямку в режимі аналітичного гірокомпасування й калібрування відходів гіроскопа. Нахил вертикальної осі при цьому вимірюється за допомогою додаткового акселерометра. Показано, що при використанні такого алгоритму можна забезпечити визначення курсу протягом декількох годин з погрешністю не більше $0,5$ градуса.	Meleshko V.V., Kornejchuk V.V., Skudneva O.V. <b>Self-orientating course direction indicator</b> The circuit and algorithm of direction gyroscope work in a mode analytical gyrocompassing and drift calibrations of gyroscope are considered. The inclination of a vertical axis thus is measured with the help additional accelerometer. It is shown, that at use of such algorithm to provide definition of a true course in several hours with a margin error no more than $0,5$ degrees.
--	--

Надійшла до редакції  
23 травня 2008 року

УДК 531.383

## ВИПРОБУВАННЯ ТА КАЛІБРУВАННЯ МІКРОМЕХАНІЧНИХ АКСЕЛЕРОМЕТРІВ

*Аврутов В.В., Бондар П.М., Мелешко В.В. Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

*Розглянута методика механічних статичних випробувань та калібрування мікромеханічних акселерометрів, яка дозволяє визначити основні їх параметри з врахуванням похибок їх встановлення. Можна використовувати розглянуту методику для кліматичних та електромагнітних випробувань*

### **Вступ. Постановка задачі**

У відомій літературі, присвяченій випробуванням акселерометрів переважно розглянуті методики визначення індивідуальних статичних характеристик прецизійних навігаційних акселерометрів шляхом повної ідентифікації фізичної моделі їх похибок [1-5].

Останнім часом широке застосування знаходять мікромеханічні акселерометри, тому проблеми їх випробувань та калібрування стають все більш актуальними.

Калібрування мікроакселерометрів має деякі особливості, пов'язані з великим розбродом їх параметрів та відсутністю в них базових поверхонь для установки. Це потребує їх обов'язкової індивідуальної калібровки, в першу чергу визначення масштабних коефіцієнтів та коефіцієнтів перехресного зв'язку з урахуванням неточності монтажу у складі блоку чутливих елементів. Варіанти методики представлені в цій роботі.

### 1. Статичні випробування мікроакселерометрів методом тестових поворотів

Метою статичних випробувань є визначення наступних параметрів і характеристик мікро акселерометра, змонтованого в блоці чутливих елементів:

- масштабного коефіцієнта (коефіцієнта передачі);
- нульового сигналу (зміщення нуля);
- коефіцієнтів перехресного зв'язку.

Статичні випробування проводять у гравітаційному полі Землі з використанням оптичної ділильної головки (ОДГ).

Метод тестових поворотів складається з вимірювання вихідного сигналу об'єкта досліджень у двох положеннях, які відрізняються орієнтацією на  $180^\circ$ . Пояснимо, як методом тестових поворотів можна визначити такі основні параметри акселерометра, як нульовий сигнал, масштабний коефіцієнт і коефіцієнти перехресного зв'язку.

На рис.1 зображений мікроакселерометр зі зв'язаною системою координат  $Oxyz$ . Вісь чутливості мікроакселерометра – вісь  $Ox$ . Прискорення  $\vec{a}$  має проєкції  $a_x, a_y, a_z$  на осі  $Oxyz$ .

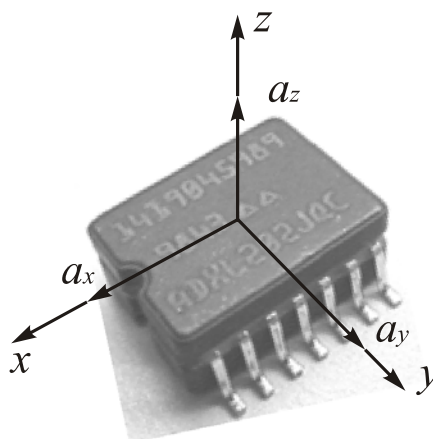


Рис. 1. Осі мікроакселерометра

Вихідний сигнал мікроакселерометра (напругу, В) можна представити у формі

$$u = u_0 + k_x a_x + k_y a_y + k_z a_z + k_{xy} a_x a_y + u_n, \quad (1)$$

де  $u_0$  – нульовий сигнал;  $a_x, a_y, a_z$  – проекції прискорення  $\vec{a}$ ;  $k_x$  – масштабний коефіцієнт;  $k_y, k_z$  – коефіцієнти перехресного зв'язку;  $k_{xy}$  – коефіцієнт віброма-  
ятникової похибки;  $u_n$  – шумова складова (випадковий процес типу «білий шум»).

Визначення нульового сигналу та масштабного коефіцієнта

Встановимо на ОДГ акселерометр так, щоб його вісь чутливості ( $Ox$ ) спів-  
пала с напрямком  $\vec{g}$  – прискоренням вільного падіння (рис.2 позиція 1).

Тоді  $a_x = -g, a_y = a_z = 0$ . Підставимо дані значення у вираз (1). Для  $i$ -тої  
реалізації маємо:

$$u_{i\downarrow} = u_{0i} + k_{xi} g + u_{ni}. \quad (2)$$

Повернемо акселерометр на  $180^\circ$  навкруг осі  $Oz$  так, щоб вісь чутливості  
була спрямована протилежно напрямку  $\vec{g}$  (рис.2 позиція 2).

Тоді  $a_x = -g, a_y = a_z = 0$ . Підставимо дані значення у вираз(1):

$$u_{i\uparrow} = u_{0i} - k_{xi} g + u_{ni} .. \quad (3)$$

Оскільки математичне сподівання білого шуму дорівнює нулю, то середнє  
значення сигналів (2) і (3) визначає нульовий сигнал без шумової складової:

$$u_0 = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (u_{i\downarrow} + u_{i\uparrow}), \quad (4)$$

де  $n$  – число реалізацій.

Якщо відняти сигнали (2) и (3), отримаємо значення масштабного коефіціє-  
нта:

$$k_x = \frac{1}{2ng} \sum_{i=1}^n (u_{i\downarrow} - u_{i\uparrow}). \quad (5)$$

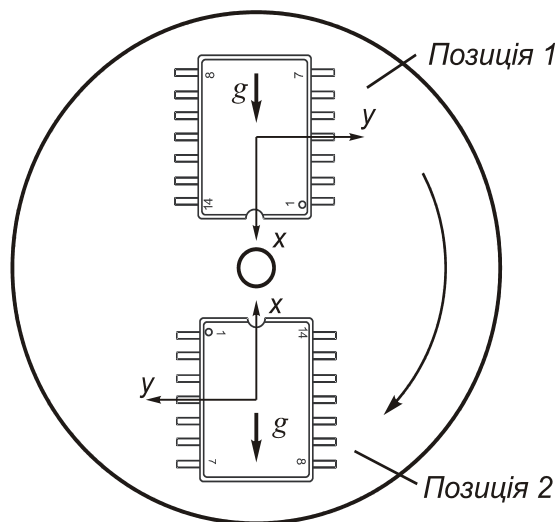


Рис. 2. Варіанти розташування акселерометра

Вплив похибки із-за відхилення осі чутливості від вертикалі можна мінімізувати, знаходячи такі положення акселерометра  $\uparrow$  та  $\downarrow$ , при яких вихідний сигнал досягає мінімального та максимального значень.

Визначення коефіцієнтів перехресного зв'язку  $k_y$  та  $k_z$ .

Встановимо акселерометр так, щоб його вісь  $Oy$  співпала з напрямком прискорення  $\vec{g}$  (рис.3, позиція 1).

Тоді  $a_x = a_z = 0; a_y = g$ . Підставимо ці значення у вираз (1):

$$u'_{i\downarrow} = u_{i0} + k_{y_i}g + u_{ni}. \quad (6)$$

Повернемо акселерометр на  $180^\circ$  навкруг осі  $Oz$  так, щоб його вісь  $Oy$  була спрямована в напрямку, протилежному  $\vec{g}$  (рис.3, позиція 2).

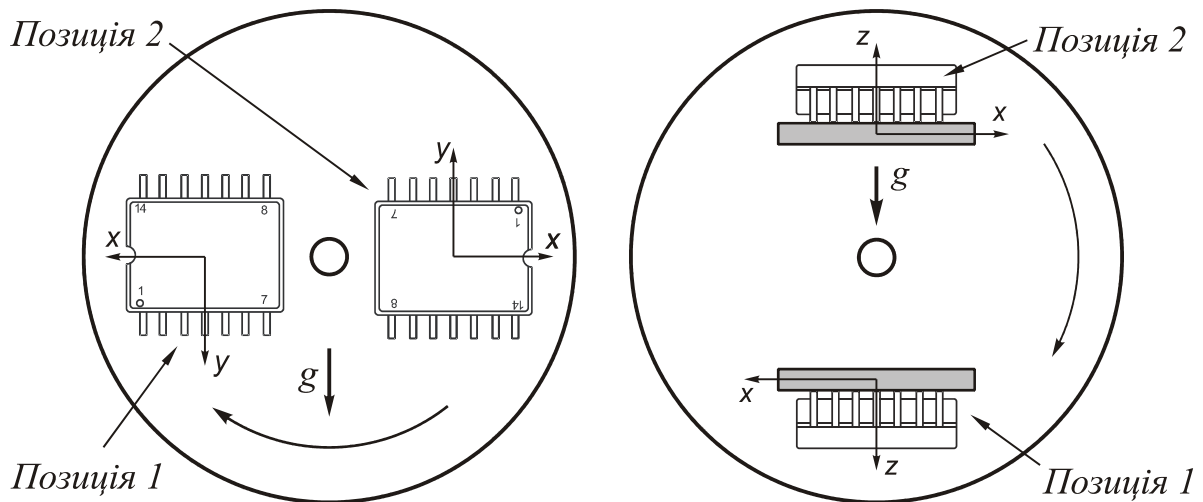


Рис. 3. До визначення коефіцієнта перехресного зв'язку  $k_y$

Рис. 4. До визначення коефіцієнта перехресного зв'язку  $k_z$

В даному випадку  $a_x = a_z = 0, a_y = -g$ . Згідно з формулою (1):

$$u'_{i\uparrow} = u_{i0} - k_{y_i}g + u_{ni}. \quad (7)$$

Віднімемо сигнали (6) і (7) і отримаємо значення коефіцієнта  $k_y$ :

$$k_y = \frac{1}{2ng} \sum_{i=1}^n (u'_{i\downarrow} - u'_{i\uparrow}). \quad (8)$$

Розташуємо акселерометр так, щоб його вісь  $Oz$  співпадала з направленням  $\vec{g}$  (рис.4, позиція 1).

В цьому випадку  $a_x = a_y = 0, a_z = g$ . Підставимо ці значення у вираз (1):

$$u''_{i\downarrow} = u_{i0} + k_{z_i}g + u_{ni}. \quad (9)$$

Повернемо акселерометр на  $180^\circ$  навколо осі  $Oy$  так, щоб його вісь  $Oz$  була спрямована протилежно напрямленню  $\vec{g}$  (рис.4, позиція 2).

Тепер  $a_x = a_y = 0, a_z = -g$ . Підставимо ці значення у вираз (1):

$$u_{i\uparrow}'' = u_{i0} - k_{zi}g + u_{ni}. \quad (10)$$

Віднявши сигнали (9) и (10), отримаємо значення коефіцієнта  $k_z$ :

$$k_z = \frac{1}{2ng} \sum_{i=1}^n (u_{i\downarrow}'' - u_{i\uparrow}''). \quad (11)$$

## 2. Калібрування одновісного акселерометра з врахуванням похибки його встановлення

Розглянемо визначення параметрів одновісного акселерометра з урахуванням похибки встановлення осі чутливості. На рис.5 показана схема розташування акселерометра з урахуванням його довільної орієнтації відносно площини горизонту.

Тут  $\alpha$  – кут нахилу осі  $Ox$  над площиною горизонту,  $\alpha_0$  – стала похибка встановлення осі чутливості відносно площини горизонту.

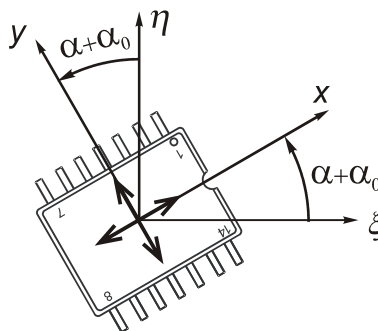


Рис. 5. Похибка встановлення

Знайдемо проекції прискорення  $\vec{a}$ . З урахуванням того, що  $\vec{g} \perp Oz$  отримаємо

$$\begin{aligned} a_x &= g \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha + \alpha_0\right) = -g \sin(\alpha + \alpha_0); \\ a_y &= g \cos(\pi + \alpha + \alpha_0) = -g \cos(\alpha + \alpha_0); \\ a_z &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Підставимо отримані значення в формулу (1):

$$\begin{aligned} u &= u_0 + g(k_y \sin \alpha_0 - k_x \cos \alpha_0) \sin \alpha - g(k_x \sin \alpha_0 + k_y \cos \alpha_0) \cos \alpha + \\ &+ k_{xy} \frac{g^2}{2} \cos 2\alpha_0 \sin 2\alpha + k_{xy} \frac{g^2}{2} \sin 2\alpha_0 \cos 2\alpha + u_n. \end{aligned} \quad (13)$$

Представимо одержаний вираз у вигляді розкладу в ряд Фур'є:

$$u = C_0 + C_1 \sin \alpha + C_2 \cos \alpha + C_3 \sin 2\alpha + C_4 \cos 2\alpha. \quad (14)$$

З урахуванням формули (13) коефіцієнти Фур'є будуть

$$\begin{aligned} C_0 &= u_0 + u_n; & C_1 &= g(k_y \sin \alpha_0 - k_x \cos \alpha_0); \\ C_2 &= -g(k_x \sin \alpha_0 + k_y \cos \alpha_0); \\ C_3 &= k_{xy} \frac{g^2}{2} \cos 2\alpha_0; & C_4 &= k_{xy} \frac{g^2}{2} \sin 2\alpha_0. \end{aligned} \quad (15)$$

Щоб знайти значення коефіцієнтів Фур'є, необхідно зробити вимірювання  $u_j$  для різних значень кута повороту  $\alpha_j$  ( $j = \overline{1, m}$ ). В результаті одержимо такі рівняння

$$\begin{aligned} u_1 &= C_0 + C_1 \sin \alpha_1 + C_2 \cos \alpha_1 + C_3 \sin 2\alpha_1 + C_4 \cos 2\alpha_1, \\ u_2 &= C_0 + C_1 \sin \alpha_2 + C_2 \cos \alpha_2 + C_3 \sin 2\alpha_2 + C_4 \cos 2\alpha_2, \\ &\dots \\ u_j &= C_0 + C_1 \sin \alpha_j + C_2 \cos \alpha_j + C_3 \sin 2\alpha_j + C_4 \cos 2\alpha_j, \\ &\dots \\ u_m &= C_0 + C_1 \sin \alpha_m + C_2 \cos \alpha_m + C_3 \sin 2\alpha_m + C_4 \cos 2\alpha_m, \end{aligned}$$

або в матричній формі

$$\boxed{\mathbf{U} = \mathbf{A}\mathbf{C}} \quad (16)$$

$$\text{де } \mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ u_m \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \alpha_1 & \cos \alpha_1 & \sin 2\alpha_1 & \cos 2\alpha_1 \\ 1 & \sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 & \sin 2\alpha_2 & \cos 2\alpha_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & \sin \alpha_m & \cos \alpha_m & \sin 2\alpha_m & \cos 2\alpha_m \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix}$$

Розв'язок рівняння (16) шукаємо у вигляді

$$\mathbf{C} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{U} \quad (17)$$

Тепер, знаючи коефіцієнти Фур'є  $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4$ , використаємо вираз (15) для знаходження шуканих параметрів акселерометра:

$$\begin{aligned} u_0 &= C_0; & \alpha_0 &= \frac{1}{2} \arctg \frac{C_4}{C_3}; & k_{xy} &= \frac{2}{g^2} \sqrt{C_3^2 + C_4^2}; \\ k_x &= -\frac{1}{g} (C_1 \cos \alpha_0 + C_2 \sin \alpha_0); & k_y &= \frac{1}{g} (C_1 \sin \alpha_0 - C_2 \cos \alpha_0). \end{aligned} \quad (18)$$

Експериментальні дані для п'яти реалізацій ( $i = \overline{1, 5}$ ) по 80 виміри ( $j = \overline{1, 80}$ ), при зміні  $\alpha_j$  через  $5^\circ$  в проміжках кута повороту  $400^\circ$ , (розмірності матриць  $[\mathbf{U}] = 80 \times 1$ ,  $[\mathbf{A}] = 80 \times 5$ ,  $[\mathbf{C}] = 5 \times 1$ ), одержані для мікроакселерометра DXL203EB, зображені на рис. 6.

Обчислюючи по формулам (18), отримаємо

$$u_0=2,50 \text{ В} , \alpha_0=0,1121 \text{ град} , k_x=1,0 \text{ В/ g} ; k_y=0,0098 \text{ В/ g} ; k_{xy}=0,0010 \text{ В/ g}^2 .$$

### Висновки

Запропонована методика статичних випробувань та калібрування дозволяє визначити основні параметри мікромеханічних акселерометрів – масштабний коефіцієнт, нульовий сигнал, коефіцієнти перехресного зв'язку та визначити похибку їх встановлення в блоці чутливих елементів.

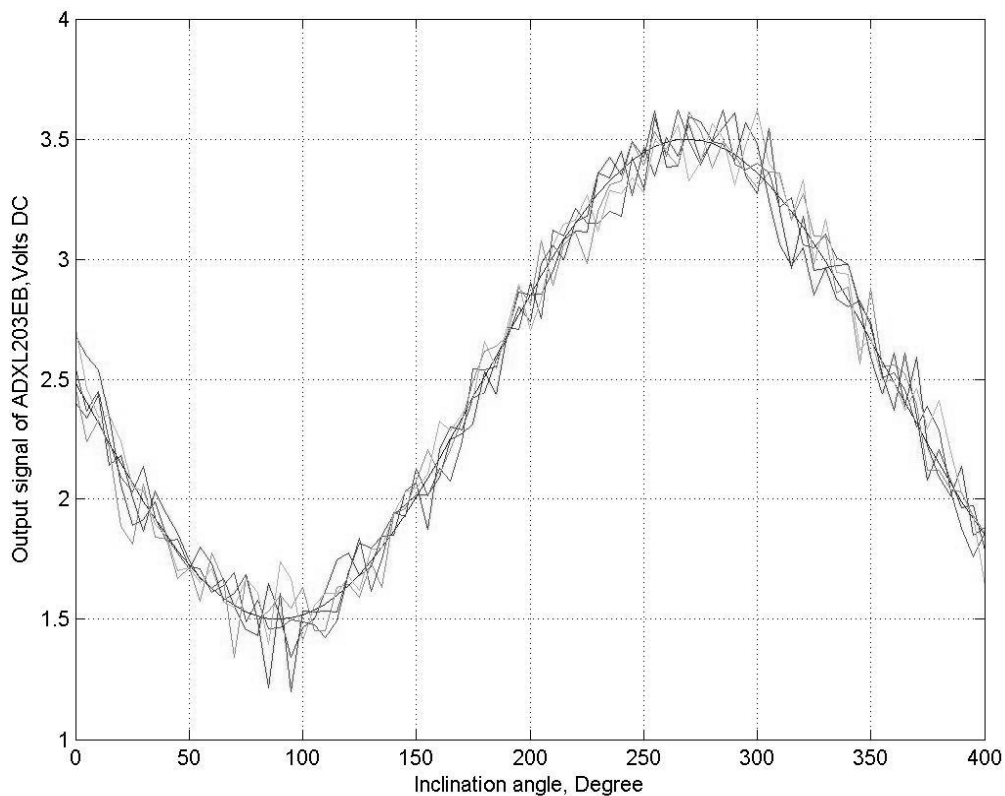


Рис.6. Реалізації експерименту

Проведення кліматичних та електромагнітних випробувань за своєю методикою дуже схожі або повторюють статичні випробування методом тестових поворотів і відрізняються лише використанням спеціального обладнання.

В подальшому планується розглянути методику калібрування мікро механічних осциляторних гіроскопів, які входять в склад блоку чутливих елементів малогабаритних навігаційних систем.

Автори висловлюють щире подяку пану Бобу Сулофу ( Mr. Bob Sulouff, vice-president of Analog Device Inc.) за підтримку в роботі та зичать йому міцного здоров'я.

**Література**

1. Синельников А.Е. Низкочастотные линейные акселерометры. Методы и средства поверки и градуировки. - М., 1979. – 176 с.
2. Titterton D., Weston J., Strapdown Inertial Navigation Technology -2<sup>nd</sup> Edition, Institution of Electrical Engineers, UK, 2004 - 558 p.
3. Иващенко С.В. , Черняк Н.Г. Методы и средства испытаний навигационных компенсационных линейных акселерометров. // V Международная НТК «Гиротехнологии, навигация, управление движением и конструирование авиационно-космической техники. Сборник докладов. – Киев, 2003. – Частина 1. – С. 239-244.
4. Коновалов С.Ф., Новосёлов Г.М., Полюнков А.В., Трунов А.А., Юрасов В. В. Методы и устройства для испытания триад акселерометров // 5 Санкт-Петербургская межд. конф. по интегрированным навигационным системам. – Санкт-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 1998. – С. 197-203.
5. Аникеев В.С., Атаманов Н.А., Полюнковский Е.Ф. Методика калибровки акселерометров // 21 научно-технич. конф. памяти Н.И. Острякова. – Санкт-Петербург: ЦНИИ «Электроприбор», 1998.

Аврутов В.В., Бондарь П.М., Мелешко В.В.

**Испытания и калибровка микромеханических акселерометров**

Рассмотрена методика механических статических испытаний и калибровки микромеханических акселерометров, которая позволяет определять основные их параметры с учетом погрешности их установки. Можно использовать рассмотренную методику для климатических и электромагнитных испытаний.

Avrutov V.V., Bondar P.M., Meleshko V.V.

**Testing and calibration of micromechanical accelerometers**

The mechanical and static testing and calibration method of micromechanical accelerometers are viewed. Using this method it is possible to determine almost all parameters of the device. It is possible to use the viewed method for thermal and electromagnetic sensitivity tests.

*Надійшло до редакції  
24 вересня 2008 року*