View metadata, citation and similar papers at core.ac.uk
brought to you by CORE
provided by Electronic Archive of Kyiv Polytechnic Institute

УДК 531.768

М. Г. Черняк, К. М. Черняк

МІКРОПРОЦЕСОРНА СИСТЕМА ВИМІРУ КУТІВ ОРІЄНТАЦІЇ ОБ'ЄКТУ НА ОСНОВІ МІКРОМЕХАНІЧНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

Вступ

Задача визначення положення об'єкту відносно площини місцевого горизонту (ПГ) є актуальною для багатьох технічних застосувань. На даний час для вирішення цієї задачі перспективними є недорогі мікропроцесорні системи виміру кутів орієнтації (СВК) на основі мікромеханічних акселерометрів (МА) [1, 2]. Як правило, такі системи здійснюють вимірювання одного або двох статичних кутів орієнтації об'єкту, на якому вони встановлені, відносно ПГ.

Загальний принцип побудови та окремі технічні рішення щодо практичної реалізації СВК на основі МА викладено в [1-4]. В [1, 3] найбільш ретельно описано структуру та прості алгоритми роботи СВК, в [2, 4] – питання вибору і програмування мікропроцесора та підключення до нього МА, в [3] наведені найбільш повні результати експериментальних досліджень окремої СВК. В цих публікаціях відсутніq аналіз точності застосованих в СВК алгоритмів та математичні моделі похибок СВК, не розглянуті методи та засоби калібрування і перевірки МА як первинних вимірювачів СВК з метою забезпечення її точності.

Постановка задачі

Метою статті є розробка структури, конструкції і алгоритму роботи СВК на основі найбільш розповсюдженого двовісного МА ADXL-203 кампанії Analog Device, методу та засобів калібрування її вимірювального блоку (ВБ) та математичної моделі її похибок. Також розглянуто результати випробувань СВК.

Будова та алгоритм роботи СВК

На рис. 1 наведено структурну схему розробленої СВК. Система забезпечує: вимірювання кутів орієнтації (тангажа θ та крену γ) об'єкта та їх перетворення в аналогові електричні сигнали U_x та U_y за допомогою ВБ; перетворення аналогових сигналів U_x та U_y в цифровий код N_x та N_y за допомогою вбудованого аналого-цифрового перетворювача (АЦП) мікроконтроллера (МК) SiLabs C8051F007; обробку цифрового коду в МК SiLabs C8051F007 з метою розрахунку кутів орієнтації об'єкта; видачу цифрового коду розрахованих кутів N_θ та N_γ споживачам вимірювальної

інформації через порт RS-485; калібрування ВБ та перевірку його працездатності за допомогою технологічного блоку випробувань (БВ).

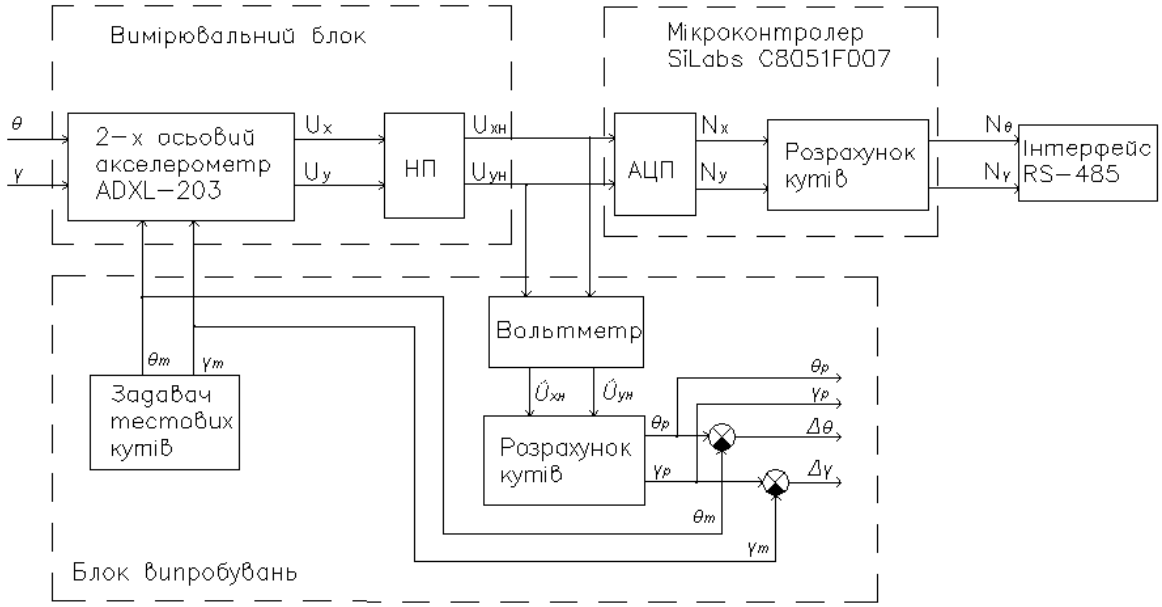

Рис. 1. Структурна схема СВК

До складу ВБ входять двовісний МА ADXL-203 і нормуючий перетворювач (НА). Конструкція ВБ показана на рис. 2, де позначено: 1 – основа; 2 – плата з МА 3 та НП, що нерухомо встановлена на основі; 4 – захисний кожух; 5 – стійки; П1…П6 – базові поверхні ВБ. Поверхня П1 використовується для встановлення ВБ на об’єкті (вісь Y ВБ при цьому спрямована вздовж поздовжньої осі об’єкту, а вимірювальні осі (ВВ) МА A_x та A_y – вздовж відповідних осей X і Y ВБ), інші поверхні – при його калібруванні.

Нормуючий перетворювач забезпечує узгодження діапазону вихідних сигналів МА ADXL-203 (0...5В) з діапазоном вхідних напруг АЦП МК SiLabs C8051F007 (0...3,3В).

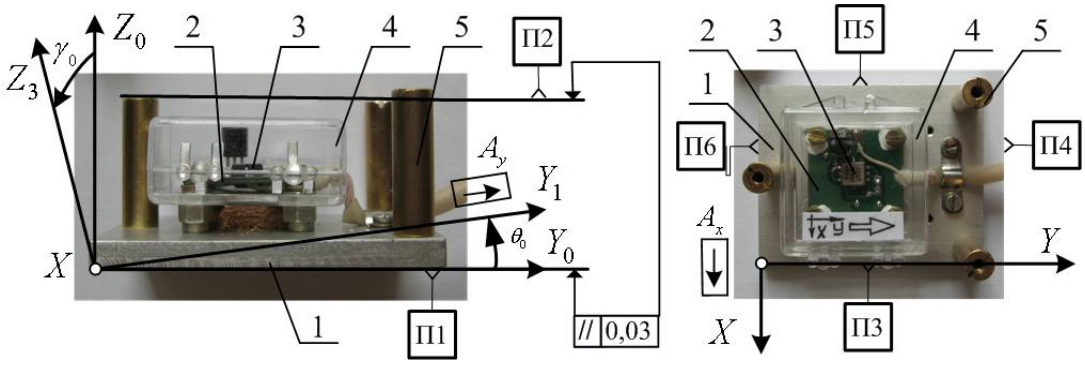

Рис. 2. Конструкція ВБ: а) головний вид; б) вид зверху

Технологічний БВ містить задавач тестових кутів орієнтації ВБ відносно ПГ, вольтметр для вимірювання вихідних сигналів ВБ та алгоритм розрахунку кутів орієнтації.

Для отримання алгоритму вимірювання кутів тангажа θ та крену γ нерухомого об'єкту розглянемо зображену на рис. 3 його орієнтацію (з встановленою на ньому СВК) відносно ПГ.

На рис. 3 зображено: $0X_0Y_0Z_0$ – горизонтальна система координат (СК), площина $0X_0Y_0$ – площина ПГ; $\vec{g} \perp 0X_0Y_0$ – вектор гравітаційного прискорення; $0X_3Y_1Z_3$ – СК, зв'язана з початковим положенням ВБ (в площині $0X_3Y_1$ розташовані ВВ A_x та A_y МА при $\theta = \gamma = 0$); θ_0 та γ_0 – початкові малі кути відхилення ВВ МА A_x та A_y ВБ від його базової поверхні П1 (наявність цих систематичних кутів θ_0 та γ_0 пов'язана з технологічними похибками виготовлення та збирання ВБ); $0XYZ$ - СК, зв'язана з поточним положенням ВБ при нахилах об'єкта на кути тангажа θ та крену γ від ПГ.

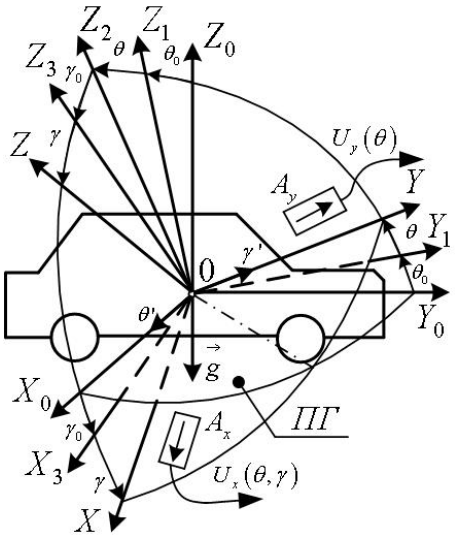

Рис. 3. Кути орієнтації об'єкту

Фактичні кути орієнтації θ_Σ і γ_Σ вимірювальних осей A_x та A_y МА ВБ, встановленого на об'єкті, відносно ПГ, та відповідні функцій перетворення (ФП) ВБ по каналах X (канал крену γ) та Y (канал тангажа θ), згідно ФП МА наведених в [5], визначаються виразами $\theta_\Sigma = \theta + \theta_0$, $\gamma_\Sigma = \gamma + \gamma_0$, рад,

$$U_x = U_{0x} + K_x g_x = U_{0x} - K_x g \cos\theta_\Sigma \sin\gamma_\Sigma, \qquad (1)$$

$$U_y = U_{0y} + K_y g_y = U_{0y} + K_y g \sin\theta_\Sigma, \qquad (2)$$

де U_{0x}, U_{0y}, В – систематичні значення зміщення нуля (ЗН) ВБ;

K_x, K_y, $B \cdot g^{-1}$ – систематичні значення коефіцієнтів перетворення (КП) ВБ;

g_x, g_y, g – проекції вектора g на ВВ A_x та A_y МА.

Числові значення індивідуальних коефіцієнтів ФП ВБ $U_{0x}, U_{0y}, K_x, K_y, \theta_0, \gamma_0$ визначаються шляхом його калібрування до встановлення на об’єкт і записуються в енергонезалежну пам'ять МК.

З рівнянь (1) і (2) отримуємо точні формули для розрахунку кутів орієнтації, як непрямих вимірювань, за результатами прямих вимірювань вихідних сигналів ВБ U_x і U_y

$$\theta_m = \frac{180}{\pi}(\arcsin A - \theta_0), \quad \gamma_m = \frac{180}{\pi}(\arcsin B - \gamma_0), \quad \text{[кут. град]}, \tag{3}$$

де

$$A = \frac{U_y - U_{0y}}{K_y g}, \quad B = \frac{-U_x + U_{0x}}{K_x g \cos(\theta + \theta_0)}. \tag{4}$$

В мікроконтролері СВК розрахунок кутів орієнтації здійснюється за наближеними формулами, які одержуємо з (3) шляхом розкладу цих функцій в ряд Тейлора до п’ятого наближення включно

$$\theta_{пр5} = \frac{180}{\pi}\left(A + \frac{1}{6}A^3 + \frac{3}{40}A^5 + \frac{5}{112}A^7 + \frac{35}{1152}A^9 - \theta_0\right), \tag{5}$$

$$\gamma_{пр5} = \frac{180}{\pi}\left(B + \frac{1}{6}B^3 + \frac{3}{40}B^5 + \frac{5}{112}B^7 + \frac{35}{1152}B^9 - \gamma_0\right). \tag{6}$$

Формули (5) і (6) складають основу алгоритму виміру кутів орієнтації об’єкту. При цьому в МК спочатку розраховується величина кута тангажа θ, а потім, використовуючи це значення, – величина кута крену γ. Порядок наближення в цих виразах, як буде пояснено далі, визначається допустимою величиною методичної похибки (МП) визначення кутів орієнтації.

Метод калібрування вимірювального блоку

Калібрування ВБ здійснюється з метою експериментального визначення числових значень індивідуальних коефіцієнтів U_{0x}, U_{0y}, K_x, K_y, θ_0, γ_0 його ФП за допомогою БВ. Необхідне для цього обладнання наведено на рис. 4, де позначено: 1 – основа, на яку встановлюється ВБ; 2 – механізм горизонтування основи 1; 3 - кутник; 4 - рівень (похибка ± 2 *кут.хв.*); 5 - цифровий вольтметр типу UT-70; 6 - джерело живлення; 7 – ВБ, що калібрується; 8 – кабель; Б1, Б2 – базові поверхні основи 1 та кутника 3.

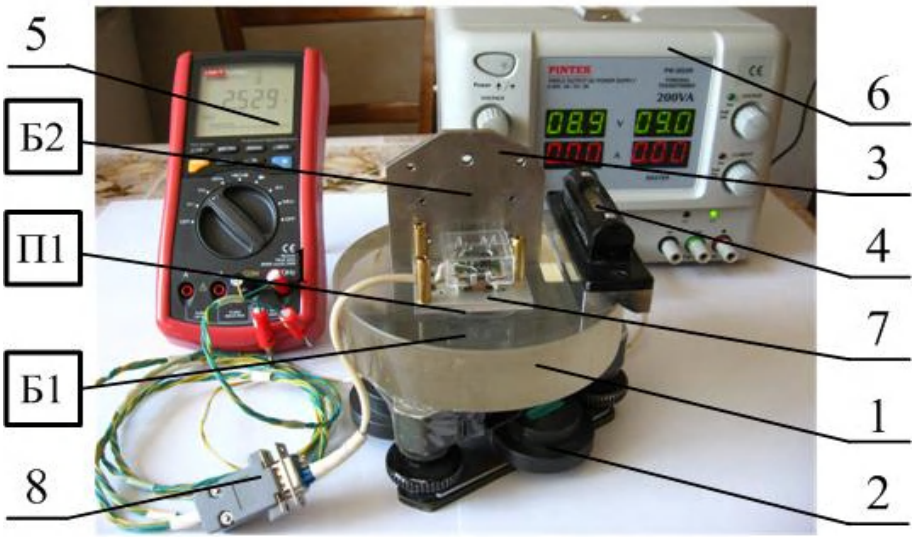

Рис. 4 Обладнання для калібрування ВБ

При калібруванні ВБ послідовно встановлюється на горизонтальну (похибка горизонтування $\pm 2 кут.хв.$) поверхню Б1 основи 1 та притискається до поверхні Б2 кутника 3 в наступні шість тестових положень (ТП1…ТП6): ТП1 – П1/П5 (це означає, що ВБ, згідно рис. 2, встановлюється поверхнею П1 і притискається поверхнею П5); ТП2 – П2/П3; ТП3 - П3/П1; ТП4 – П4/П1; ТП5 – П5/П1; ТП6 – П6/П1. В кожному ТП вольтметром 5 вимірюються вихідні сигнали ВБ U_{jx} і U_{jy}, де $j = 1,...6$ – номер ТП.

Попередньо, з метою отримання аналітичних виразів для розрахунку шуканих коефіцієнтів ФП ВБ, з формул (1) і (2), у відповідності до рис. 3, для кожного ТП запишемо вирази для вихідних сигналів ВБ, які через обмежений обсяг статті тут не наводяться.

Як приклад, на рис. 4 зображено встановлення ВБ в положення ТП1, а на рис. 5 – в положення ТП2. Вихідні сигнали ВБ в цих положеннях описуються формулами

$$U_{1x} = U_{0x} - K_x g \cos\theta_0 \sin\gamma_0,$$
$$U_{1y} = U_{0y} + K_y g \sin\theta_0,$$
$$U_{2x} = U_{0x} + K_x g \cos\theta_0 \sin\gamma_0,$$
$$U_{2y} = U_{0y} - K_y g \sin\theta_0.$$

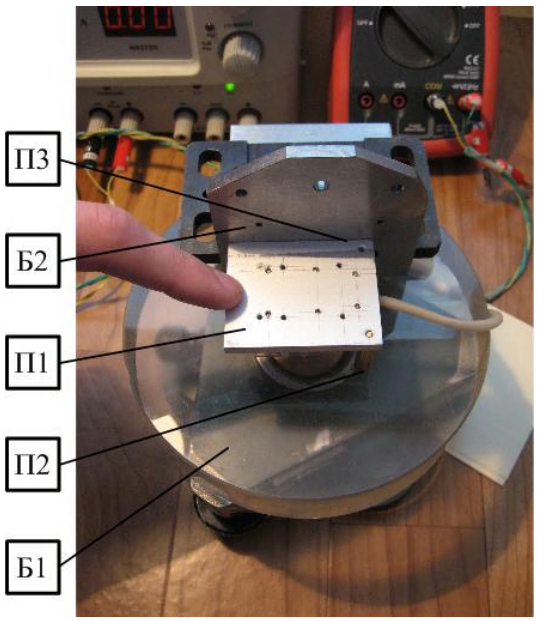

Рис. 5. ВБ в положенні ТП2

Розглянувши лінійні комбінації дванадцяти виразів для вихідних сигналів ВБ в ТП, отримаємо формули для оцінки, за результатами калібровки, шуканих коефіцієнтів ФП ВБ:

$$\hat{U}_{0x} = 0,5(U_{2x} + U_{1y}); \quad \hat{U}_{0y} = 0,5(U_{1y} + U_{2y}), \tag{7}$$

$$\hat{\theta}_0 = \arcsin\left(\frac{U_{1y} - U_{2y}}{2\hat{K}_{y1} g}\right); \quad \hat{\gamma}_0 = \arcsin\left(\frac{U_{2x} - U_{1x}}{2\hat{K}_{x1} g \cos\hat{\theta}_0}\right); \tag{8}$$

$$\hat{K}_x = 0,5(g\cos\hat{\gamma}_0)^{-1}(U_{5x} - U_{3x}); \quad \hat{K}_y = 0,5(g\cos\hat{\theta}_0)^{-1}(U_{6y} - U_{4y}). \tag{9}$$

Послідовність розрахунку шуканих коефіцієнтів за цими формулами наступна. Спочатку розраховують в першому наближенні (при невідомих малих θ_0 і γ_0) коефіцієнти перетворення з виразів $\hat{K}_{x1} = 0,5g^{-1}(U_{5x} - U_{3x})$, $\hat{K}_{y1} = 0,5g^{-1}(U_{6y} - U_{4y})$, потім за формулами (7) і (8) розраховують коефіцієнти $U_{0y}, \theta_0, U_{0x}, \gamma_0$, після чого, за формулами (9) уточнюють КП K_x та K_y. Результати калібрування ВБ за розробленим методом представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати калібрування ВБ

Коефіці-єнт ФП	U_{0x}, В	U_{0y},В	K_x, В*g^{-1}	K_y, В*g^{-1}	θ_0, рад	θ_0, град	γ_0, рад	γ_0, град
Значення	2,5095	2,5810	1,0232	1,0256	0,0107	0,62	-0,0171	-0,98

Перевірка результатів калібрування ВБ здійснюється, згідно схеми рис. 1, шляхом вимірювання за допомогою СВК чотирьох тестових кутів (двох кутів тангажа та двох кутів крену): $\theta_1 = \alpha = 41°$; $\theta_2 = -\alpha = -41°$; $\gamma_1 = \alpha = 41°$; $\gamma_2 = -\alpha = -41°$.

В таблиці 2 для цих тестових кутів наведено результати вимірювань вихідних сигналів ВБ U_x та U_y, результати розрахунку за формулами (1) і (2) та даними таблиці 1 числових значень заданих тестових кутів θ_{1p}, θ_{2p}, γ_{1p}, γ_{2p}, та похибок їх вимірювання $\Delta\theta_1 = \theta_{1p} - \theta_1$, $\Delta\theta_2 = \theta_{2p} + \theta_2$, $\Delta\gamma_1 = \gamma_{1p} - \gamma_1$, $\Delta\gamma_2 = \gamma_{2p} + \gamma_2$.

Таблиця 2

Результати перевірки калібрування ВБ

Тестовий кут	Результат вимірювання та розрахунку		
	U_x, U_y, В	θ_p, γ_p	$\Delta\theta, \Delta\gamma$
$\theta_1 = 41°$	$U_y = 3{,}262$	$\theta_{1p} = 40{,}99°$	$\Delta\theta_1 = -0{,}01°$
$\theta_2 = -41°$	$U_y = 1{,}916$	$\theta_{2p} = -41{,}04°$	$\Delta\theta_2 = -0{,}04°$
$\gamma_1 = 41°$	$U_x = 1{,}852$	$\gamma_{1p} = 40{,}97°$	$\Delta\gamma_1 = -0{,}03°$
$\gamma_2 = -41°$	$U_x = 3{,}195$	$\gamma_{2p} = -41{,}09°$	$\Delta\gamma_2 = -0{,}09°$

Представлені в таблиці 2 результати підтверджують високу точність калібрування ВБ за розробленим методом.

Математична модель похибок СВК

Вирішимо задачу забезпечення при роботі СВК наперед заданих допускних її похибок вимірювання (ПВ) кутів тангажа $\Delta\theta_{\Sigma Д}$ та крену $\Delta\gamma_{\Sigma Д}$, які будемо вважати рівними $\Delta\theta_{\Sigma Д} = \Delta\gamma_{\Sigma Д} = \Delta_Д$.

Приймемо, що, згідно зі схемою рис. 1 та виразами (3)...(6), сумарні ПВ (розрахунку) кутів орієнтації об'єкта $\Delta\theta_\Sigma$ та $\Delta\gamma_\Sigma$ за місцем їх виникнення мають дві складові – методичні похибки алгоритму (МП) $\Delta\theta_M$ та $\Delta\gamma_M$, які виникають при заміні в мікропроцесорній програмі точних розрахункових виразів (3) наближеними виразами (5) і (6), та інструментальні похибки (ІП) $\Delta\theta_I$ та $\Delta\gamma_I$, які виникають при змінах $\Delta U_{0x}, \Delta U_{0y}, \Delta K_x, \Delta K_y, \Delta\theta_0, \Delta\gamma_0$ індивідуальних коефіцієнтів ВБ, що входять до виразів (3)..(6), та при наявності похибок вимірювання вихідних сигналів ВБ $\Delta U_x, \Delta U_y$.

Вважаючи, що методичні та інструментальні складові ПВ є некорельованими та випадковими (оскільки у складі СВК не передбачено структурної та алгоритмічної компенсації систематичних складових цих похибок), поставимо вимогу, щоб ці складові ПВ співвідносилися між собою таким чином $|\Delta\theta_I| \approx 1{,}5|\Delta\theta_M| = 1{,}5\Delta$, $|\Delta\gamma_I| \approx 1{,}5|\Delta\gamma_M| = 1{,}5\Delta$.

Тоді справедливі наступні вирази для сумарної ПВ

$$\Delta\theta_{\Sigma}=\sqrt{\Delta\theta_I^2+\Delta\theta_M^2}\approx 1{,}8\Delta\le\Delta\theta_{\Sigma Д},\quad \Delta\gamma_{\Sigma}=\sqrt{\Delta\gamma_I^2+\Delta\gamma_M^2}\approx 1{,}8\Delta\le\Delta\gamma_{\Sigma Д},\qquad (10)$$

З (9) поставимо вимоги до допускних значень складових ПВ

$$\left|\Delta\theta_M\right|=\left|\Delta\gamma_M\right|\approx 0{,}56\Delta_Д,\quad \left|\Delta\theta_I\right|=\left|\Delta\gamma_I\right|\approx 0{,}83\Delta_Д,\qquad (11)$$

які необхідно забезпечити при розробці СВК.

Як приклад, у подальших розрахунках ПВ за розробленою математичною моделлю приймемо, що СВК повинна забезпечити вимірювання кутів тангажа та крену в діапазоні $\pm 45°$ з допускною ПВ не більше $\pm 0{,}3°$. За таких умов, на підставі (11), необхідно забезпечити наступні вимоги до допустимих значень складових ПВ

$$\left|\Delta\theta_M\right|=\left|\Delta\gamma_M\right|=0{,}17°,\quad \left|\Delta\theta_I\right|=\left|\Delta\gamma_I\right|=0{,}25°.\qquad (11)$$

Отримуємо моделі методичних та інструментальних складових ПВ СВК, на підставі яких забезпечимо виконання вимог (12).

Модель методичних складових похибок СВК

Визначимо МП алгоритму l-го наближення розрахунку кутів тангажа та крену виразами

$$\Delta\theta_{Ml}=\theta_{np5}-\theta_{npl},\quad \Delta\gamma_{Ml}=\gamma_{np5}-\gamma_{npl},\quad l=\overline{2,4},\qquad (13)$$

де θ_{np5}, γ_{np5}, θ_{npl}, γ_{npl} – розраховані за формулами (5) і (6) значення відповідних кутів у п’ятому та l-му наближенні. Наприклад, МП третього наближення розраховуються за формулами

$$\Delta\theta_{M3}=\frac{180}{\pi}\left(\frac{5}{112}A^7+\frac{35}{1152}A^9\right),\quad \Delta\gamma_{M3}=\frac{180}{\pi}\left(\frac{5}{112}B^7+\frac{35}{1152}B^9\right).\qquad (14)$$

З (4) слідує, що МП мають найбільші значення при вимірюванні великих кутів тангажа та крену, оскільки в цьому випадку величини різниць $\left(U_y-U_{0y}\right)$ та $\left(-U_x+U_{0x}\right)$ є найбільшими.

В таблиці 3 наведено числові значення МП виміру кутів $\theta=\gamma=41°$, які розраховані за виразами (13) на підставі отриманих результатів калібрування СВК (таблиця 1) і експериментальних даних, наведених в таблиці 2.

Таблиця 3

Результати розрахунку МП виміру кутів $\theta=\gamma=41°$

	Наближення розрахунку МП		
	друге	третє	четверте
$\Delta\theta_M$, град	0,7	0,189	0,044
$\Delta\gamma_M$, при $\theta=0°$, град	0,587	0,148	0,033
$\Delta\gamma_M$, при $\theta=5°$, град	0,599	0,153	0,034

$\Delta\gamma_M$, при $\theta = 30°$, град	1,284	0,436	0,119
$\Delta\gamma_M$, при $\theta = 40°$, град	2,533	1,106	0,358

Аналіз представлених у таблиці 3 результатів показує, що використання для розрахунку кутів орієнтації алгоритму четвертого наближення забезпечує необхідний допустимий рівень МП (12) при вимірюванні в діапазоні $\pm 45°$ кута тангажа та кута крену при наявності кута тангажа не більше $\pm 30°$.

Модель інструментальних складових похибок СВК

Загальні формули для розрахунку ІП отримаємо застосувавши відомий диференційний метод розрахунку похибок вимірювальних пристроїв до виразів (5) і (6) вважаючи, що джерела ІП є некорельованими та випадковими

$$\Delta\theta_I = \sqrt{\Delta\theta_U^2 + \Delta\theta_{U0}^2 + \Delta\theta_K^2 + \Delta\theta_П^2}, \quad \Delta\gamma_I = \sqrt{\Delta\gamma_U^2 + \Delta\gamma_{U0}^2 + \Delta\gamma_K^2 + \Delta\gamma_П^2}, \quad (15)$$

де $\Delta\theta_U$, $\Delta\gamma_U$ – складові ІП, викликані похибками вимірювання вихідних сигналів ВБ ΔU; $\Delta\theta_{U0}$, $\Delta\gamma_{U0}$ – складові , викликані абсолютними адитивними похибками (АП) ЗН ВБ ΔU_0; $\Delta\theta_K$, $\Delta\gamma_K$ – складові , викликані відносними похибками КП ВБ δ_K; $\Delta\theta_П$, $\Delta\gamma_П$ – складові, викликані абсолютними похибками початкових кутів відхилення ВВ акселерометрів.

Складові ІП, що входять до (15), у першому наближенні можуть бути визначені за спрощеними виразами:

$$\Delta\theta_U \approx \frac{180}{\pi K_y g}\Delta U, \quad \Delta\gamma_U \approx -\frac{180}{\pi K_x g\cos\theta}\Delta U, \quad \Delta\theta_{U0} \approx -\frac{180}{\pi K_y g}\Delta U_0,$$

$$\Delta\gamma_{U0} \approx \frac{180}{\pi K_x g\cos\theta}\Delta U_0, \quad \Delta\theta_K \approx -\frac{180}{\pi}\sin\theta\delta_K, \quad \Delta\gamma_K \approx \frac{180}{\pi}\sin\gamma\delta_K,$$

$$\Delta\theta_П \approx -\Delta\theta_0, \quad \Delta\gamma_П \approx -\Delta\gamma_0. \quad (16)$$

Слід зауважити, що складові ІП $\Delta\theta_K$ і $\Delta\gamma_K$ є мультиплікативними, а складові $\Delta\gamma_U$ і $\Delta\gamma_{U0}$ залежать від величини кута тангажа, при якому вимірюється кут крену. Відповідно ці складові ІП набувають максимальних значень при $|\theta_{\max}| = |\gamma_{\max}| = 45°$.

В таблицях 4, 5 представлено результати розрахунку за формулами (15) і (16) максимальних значень ІП $\Delta\theta_I$, $\Delta\gamma_I$ та їх складових при нормальній температурі $T_0 = +25 \pm 5°C$ та в діапазоні робочих температур МА ADXL-203 $T_P = -40 \div +70°C$. Розрахунки виконано при наступних числових значеннях джерел ІП: нестабільність ЗН МА ΔU_0, мВ – ± 2 (при T_0), ± 10 (при T_P); похибка КП МА $\delta_к$, % – $\pm 0{,}2$ (при T_0), $\pm 0{,}5$ (при T_P) [5]; похибки початкових кутів $\Delta\theta_П = \Delta\gamma_П = \pm 0{,}05°$ (похибки їх паспортизації); похибка

вимірювання вихідної напруги ВБ мультиметром UT-70D, або АЦП МК SiLabs C8051F007 $\Delta U = \pm 2$ мВ [4].

Таблиця 4

Результати розрахунку ІП $\Delta\theta_I$ та її складових

Температура	Складові ІП $\Delta\theta_I$, град					$\Delta\theta_I$, град
	$\Delta\theta_U$	$\Delta\theta_{U0}$	$\Delta\theta_П$	$\Delta\theta_K$		
				$\theta = 0°$	$\theta = 45°$	
T_0	±0,15	±0,15	±0,05	0	±0,08	±0,22
T_P		±0,75			±0,20	±0,79

Таблиця 5

Результати розрахунку ІП $\Delta\gamma_I$ та її складових

Температура	Складові ІП $\Delta\gamma_I$, град							$\Delta\gamma_I$, град
	$\Delta\gamma_U$		$\Delta\gamma_{U0}$		$\Delta\gamma_П$	$\Delta\gamma_K$		
	$\theta = 0°$	$\theta = 30°$	$\theta = 0°$	$\theta = 30°$		$\gamma = 0°$	$\gamma = 45°$	
T_0	±0,15	±0,17	±0,15	±0,17	±0,05	0	±0,08	±0,25
T_P			±0,75	±0,87			±0,20	±0,91

Отримані результати розрахунку ІП задовольняють вимогам (12) при нормальних температурних умовах виконання вимірювань. При цьому найбільш суттєвими її складовими є АП $\Delta\theta_U$, $\Delta\gamma_U$, $\Delta\theta_{U0}$, $\Delta\gamma_{U0}$.

При використанні СВК в діапазоні робочих температур МА її ІП можуть суттєво (в 3…4 рази) збільшитися, однак це збільшення є систематично залежним від температури і може бути алгоритмічно компенсовано в МК.

Результати випробувань СВК

Випробування СВК виконані при нормальній температурі шляхом вимірювання заданих тестових кутів (ТК) в діапазоні ±45° (рис. 6). Для задання ТК використовувались стандартні кінцеві міри довжини 1 та горизонтальна поверхня 2.

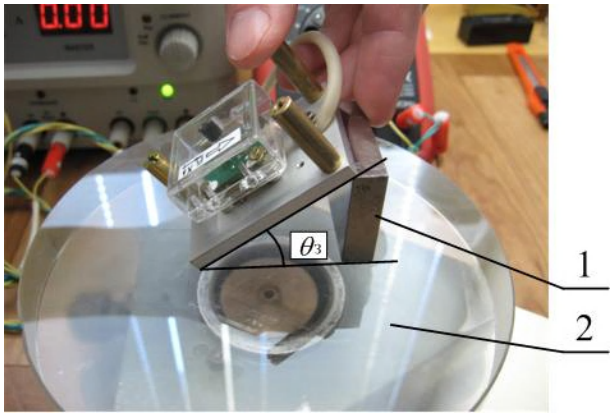

Рис. 6. Випробування СВК

В таблиці 6 наведено числові значення заданих ТК $\theta_З$ і $\gamma_З$ (похибка задання ТК $\pm 0{,}1°$), та похибки їх вимірювання СВК $\Delta\theta_В = \theta_В - \theta_З$ і $\Delta\gamma_В = \gamma_В - \gamma_З$, де $\theta_В$, $\gamma_В$ – результати вимірювання ТК.

Результати випробувань підтверджують достатньо високу точність вимірювання розробленої СВК та адекватність запропонованих в статті її алгоритму роботи, методу калібрування та математичної моделі похибок.

Таблиця 6

Значення ТК та похибок їх вимірювання СВК

$\theta_З$	-45,58	-24,01	-8,20	-0,58	0,58	8,20	24,01	45,58
$\Delta\theta_В$	-0,18	-0,15	-0,12	-0,03	-0,02	0,10	0,11	0,14
$\gamma_З$	-39,87	-22,65	-8,85	-0,74	0,74	8,85	22,65	39,87
$\Delta\gamma_В$	-0,14	-0,15	-0,09	0,05	0,01	0,12	0,12	0,09

Висновки

Підтверджено, що запропоновані в статті структура і алгоритм роботи СВК на МА, а також метод калібрування її ВБ забезпечують високу точність вимірювання статичних кутів орієнтації об’єкту.

Отримані аналітичні вирази (10)…(16) дозволяють вирішити як задачу аналізу похибок вимірювання СВК з відомими структурою, алгоритмом та функціональними елементами, так і задачу синтезу її точності, тобто, виходячи з допустимої сумарної ПВ кутів, здійснити вибір порядку алгоритму розрахунку кутів в МК, розрядності МК та типу МА.

Розроблений простий метод калібрування ВБ є універсальним і може бути рекомендований для ідентифікації параметрів лінійних ФП окремих двовісних акселерометрів та інших засобів вимірювання на їх основі.

В подальшому доцільно виконати дослідження по забезпеченню заданої точності вимірювання СВК в широкому діапазоні робочих температур шляхом алгоритмічної компенсації її температурних похибок.

Список використаної літератури

1. *Распопов В. Я., Малютин Д. М.* Малогабаритная система ориентации// Датчики и системы.- 2004, №8.- С. 2-5.
2. *Власенко А.* Инклинометр на базе микроконвертера ADuC845 и акселерометра ADXL103 фирмы Analog Devices// Мир электронных компонентов.- 2007, №1.- С. 24-29.
3. *Бузыканов С.* Датчик наклона на основе твердотельного акселерометра// Современная єлектроника.- 2004, №4.- С. 42-45.
4. *Ершов М.* Применение микроконтроллеров Silabs в интегрированных измерителях углов поворота и наклона// Схемотехника.- 2006, №5.- С. 50-52.
5. http: //www. Analog.com/iMEMS/products/ADXL203_top.html.