
СЕНСОРИ ФІЗИЧНИХ ВЕЛИЧИН

PHYSICAL SENSORS

УДК 531.768

ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОМЕХАНІЧНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ НАХИЛУ ОБ'ЄКТА

М. Г. Черняк

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
03056, Київ, пр. Перемоги, 37, корп. 28, тел. (044) 406–83–17, E-mail: chernyak_dk@ukr.net

ЗАСТОСУВАННЯ МІКРОМЕХАНІЧНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ НАХИЛУ ОБ'ЄКТА

М. Г. Черняк

Анотація. Представлено результати розробки мікропроцесорного датчика кутів нахилу об'єкта на основі мікромеханічного акселерометра ADXL-203. Розглянуто конструкцію, алгоритм роботи, метод калібрування, математичну модель похибок та результати випробувань датчику.

Ключові слова: вимірювання кутів, мікромеханічний акселерометр, калібрування, алгоритм, модель похибок

APPLICATION OF MICROMECHANICAL ACCELEROMETER FOR OBJECT INCLINATION ANGLES MEASUREMENT

M. G. Chernyak

Abstract. Results of developing a microprocessor sensor for object inclination angles measurement based on micromechanical accelerometer ADXL-203 are presented. Design, algorithm of operation, calibration method, mathematical model of errors and test results were considered for this sensors.

Key words: object orientation; the measurement of angles; micromechanical accelerometer; calibration; algorithm; model of errors

ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВ НАКЛОНА ОБЪЕКТА

Н. Г. Черняк

Аннотация. Представлены результаты разработки микропроцессорного датчика углов наклона объекта на основе микромеханического акселерометра ADXL-203. Рассмотрены конструкция, алгоритм работы, метод калибровки, математическая модель погрешностей и результаты испытаний датчика.

Ключевые слова: измерение углов, микромеханический акселерометр, калибровка, алгоритм, модель погрешностей

Вступ

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

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

Постановка задачі

Метою статті є розробка структури, конструкції і алгоритму роботи ДК на основі найбільш розповсюдженого двохосьового МА ADXL-203 компанії Analog Device, методу та засобів калібрування його вимірювального блоку (ВБ),

та математичної моделі його похибок. Також розглянуто результати випробувань ДК.

Будова та алгоритм роботи ДК

На рис. 1 наведено структурну схему розробленого ДК. Датчик забезпечує: вимірювання кутів орієнтації (тангажу 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) мікроконтролера (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).

До складу ВБ входять двохосьовий 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'єкта, а вимірювальні вісі (ВВ) МА A_x та A_y — вздовж відповідних осей X і Y ВБ), інші поверхні — при його калібруванні.

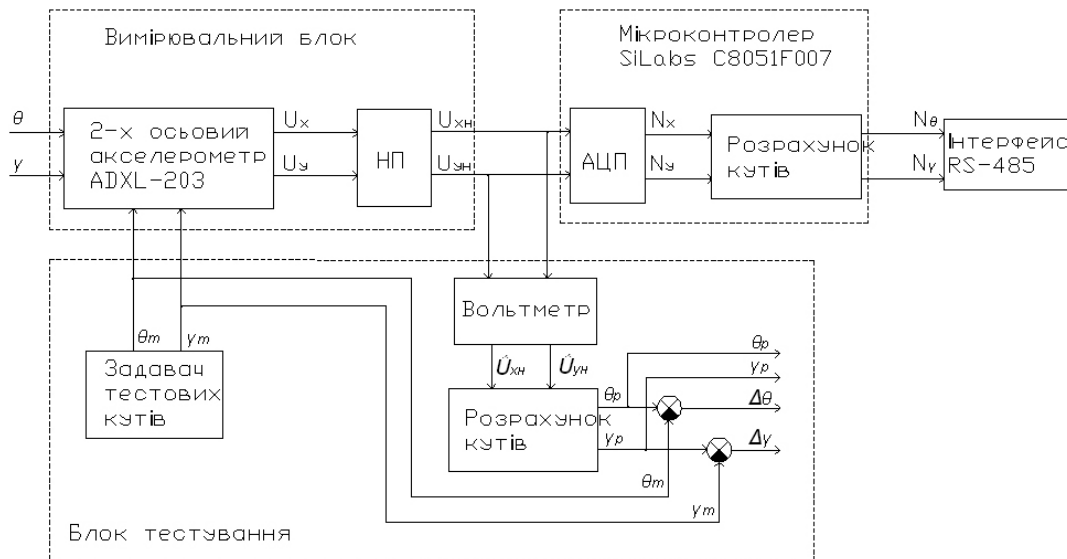


Рис. 1. Структурна схема датчика кутів нахилу

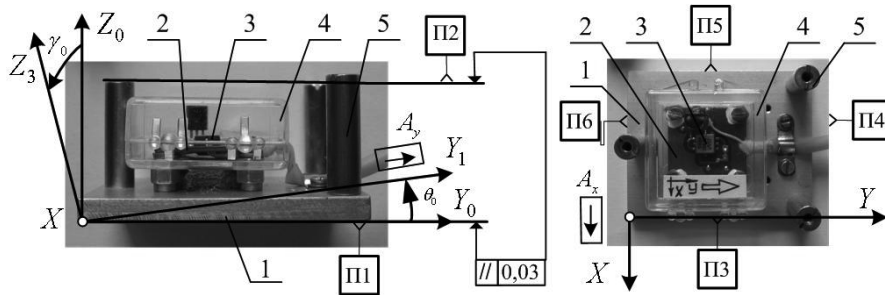


Рис. 2. Конструкція ВБ: а) головний вид; б) вид зверху

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

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 тангажу θ та крену γ нерухомого об'єкта розглянемо зображену на рис. 3 його орієнтацію (з встановленому на ньому ДК) 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 тангажу θ та крену γ від ПГ.

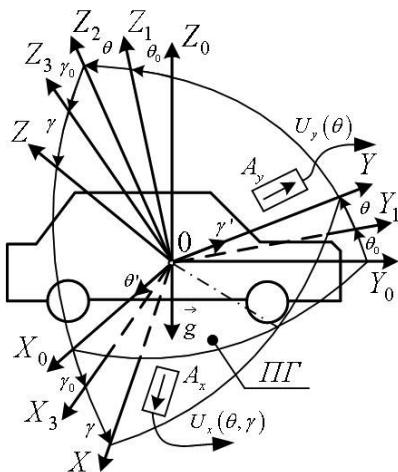


Рис. 3. Кути нахилу об'єкта

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

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

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

де U_{0x}, U_{0y} — систематичні значення зміщення нуля (ЗН) ВБ; K_x, K_y — систематичні значення коефіцієнтів перетворення (КП) ВБ; g_x, g_y, g — проекції вектора g на ВВ A_x та A_y МА; $[B \cdot g^{-1}]$.

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 нахилу, як непрямих вимірювань, за результатами прямих вимірювань вихідних сигналів ВБ U_x і U_y

$$\theta_m = \frac{180}{\pi} (\arcsin A - \theta_0),$$

$$\gamma_m = \frac{180}{\pi} (\arcsin B - \gamma_0), \text{ кут. град} \quad (3)$$

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

В мікроконтроллері ДК розрахунок кутів нахилу здійснюється за наближеними формулами, які одержуємо з (3) шляхом розкладу цих функцій в ряд Тейлора до п'ятого наближення включно

$$\theta_{np5} = \frac{180}{\pi} \left(A + \frac{1}{6} A^3 + \frac{3}{40} A^5 + \frac{5}{112} A^7 + \frac{35}{1152} A^9 - \theta_0 \right), \quad (5)$$

$$\gamma_{np5} = \frac{180}{\pi} \left(B + \frac{1}{6} B^3 + \frac{3}{40} B^5 + \frac{5}{112} B^7 + \frac{35}{1152} B^9 - \gamma_0 \right) \quad (6)$$

Формули (5) і (6) складають основу алгоритму виміру кутів нахилу об'єкта. При цьому, в МК спочатку розраховується величина кута тангажу 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 нахилу.

Метод калібрування вимірювального блоку

Калібрування ВБ здійснюється з метою експериментального визначення числових значень індивідуальних коефіцієнтів $U_{0x}, U_{0y}, K_x, K_y, \theta_0, \gamma_0$ 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 $\pm 2 \text{ кут. хв.}$); 5 — цифровий вольтметр типу УТ-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 $\pm 2 \text{ кут. хв.}$) 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 $j=1, \dots, 6$ — 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 об'єм 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

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

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

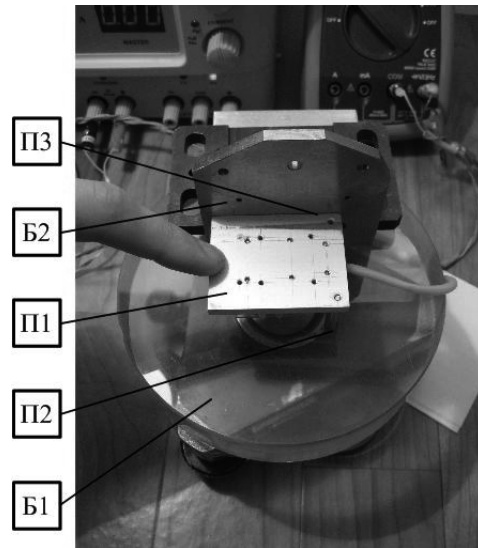


Рис. 5. ВБ в положенні ТП2

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

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

$$\hat{\theta}_0 = \arcsin\left(\frac{U_{1y} - U_{2y}}{2 \hat{K}_{y1} g}\right);$$

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

$$\hat{K}_x = 0,5(g \cos \hat{\gamma}_0)^{-1}(U_{5x} - U_{3x});$$

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

Послідовність розрахунку шуканих коефіцієнтів за цими формулами наступна. Спо-

чатку 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 значення КП K_x та K_y . Результати калібрування ВБ за розробленим методом представлено в таблиці 1.

Перевірка результатів калібрування ВБ здійснюється, згідно схеми рис. 1, шляхом вимірювання за допомогою ДК чотирьох тестових

кутів (двох кутів тангажу та двох кутів крену): $\theta_1 = \alpha = 41^\circ$; $\theta_2 = -\alpha = -41^\circ$; $\gamma_1 = \alpha = 41^\circ$; $\gamma_2 = -\alpha = -41^\circ$.

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 табл. 1 числових значень заданих тестових кутів $\theta_{1p}, \theta_{2p}, \gamma_{1p}, \gamma_{2p}$, та похибок їх вимірювання $\Delta\theta_1 = \theta_{1p} - \theta_1$, $\Delta\theta_2 = \theta_{2p} - \theta_2$, $\Delta\gamma_1 = \gamma_{1p} - \gamma_1$, $\Delta\gamma_2 = \gamma_{2p} - \gamma_2$.

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

Таблиця 1

Результати калібрування ВБ

Коефіцієнт ФП	U_{0x} , В	U_{0y} , В	K_x , В*г ⁻¹	K_y , В*г ⁻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

Таблиця 2

Результати перевірки калібрування ВБ

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

Математична модель похибок ДК

Вирішимо задачу забезпечення, при роботі ДК, наперед заданих допустимих його похибок вимірювання (ПВ) кутів тангажу $\Delta\theta_{\Sigma Д}$ та крену $\Delta\gamma_{\Sigma Д}$, які будемо вважати рівними $\Delta\theta_{\Sigma Д} = \Delta\gamma_{\Sigma Д} = \Delta_{Д}$.

Прийmemo що, згідно зі схемою рис. 1 та виразами (3)...(6), сумарні ПВ (розрахунку) кутів нахилу 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 випад-

ковими (оскільки у складі ДК не передбачено структурної та алгоритмічної компенсації систематичних складових цих похибок), поставимо вимогу, щоб модулі складових цих 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

$$\Delta\theta_{\Sigma} = \sqrt{\Delta\theta_I^2 + \Delta\theta_M^2} \approx 1,8\Delta \leq \Delta\theta_{\Sigma Д},$$

$$\Delta\gamma_{\Sigma} = \sqrt{\Delta\gamma_I^2 + \Delta\gamma_M^2} \approx 1,8\Delta \leq \Delta\gamma_{\Sigma Д}. \quad (10)$$

З (10) поставимо вимоги до допустимих значень складових ПВ

$$|\Delta\theta_M| = |\Delta\gamma_M| \approx 0,56\Delta_{Д},$$

$$|\Delta\theta_I| = |\Delta\gamma_I| \approx 0,83\Delta_{Д}, \quad (11)$$

які необхідно забезпечити при розробці ДК.

Як приклад, у подальших розрахунках ПВ за розробленою математичною моделлю прийме-

мо, що ДК повинен забезпечити вимірювання кутів тангажу та крену в діапазоні $\pm 45^\circ$ з допустимою ПВ не більше $\pm 0,3^\circ$. За таких умов, на підставі (11), необхідно забезпечити наступні вимоги до допустимих значень складових ПВ

$$|\Delta\theta_M| = |\Delta\gamma_M| = 0,17^\circ, \quad |\Delta\theta_I| = |\Delta\gamma_I| = 0,25^\circ. \quad (12)$$

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

Модель методичних складових похибок ДК

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

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

де $\theta_{np5}, \gamma_{np5}, \theta_{npl}, \gamma_{npl}$ — розраховані за формулами (5) і (6) значення відповідних кутів у l -му наближенні. Наприклад, МП третього наближення розраховуються за формулами

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

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

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

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

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

Таблиця 3

Результати розрахунку МП виміру кутів $\theta = \gamma = 41^\circ$

	Наближення розрахунку МП		
	друге	третє	четверте
$\Delta\theta_M$, град	0,7	0,189	0,044
$\Delta\gamma_M$, при $\theta = 0^\circ$, град	0,587	0,148	0,033
$\Delta\gamma_M$, при $\theta = 5^\circ$, град	0,599	0,153	0,034
$\Delta\gamma_M$, при $\theta = 30^\circ$, град	1,284	0,436	0,119
$\Delta\gamma_M$, при $\theta = 40^\circ$, град	2,533	1,106	0,358

Модель інструментальних складових похибок ДК

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

$$\Delta\theta_I = \sqrt{\Delta\theta_U^2 + \Delta\theta_{U0}^2 + \Delta\theta_K^2 + \Delta\theta_\Pi^2},$$

$$\Delta\gamma_I = \sqrt{\Delta\gamma_U^2 + \Delta\gamma_{U0}^2 + \Delta\gamma_K^2 + \Delta\gamma_\Pi^2}, \quad (15)$$

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 ; $\Delta\theta_\Pi, \Delta\gamma_\Pi$ — складові,

викликані абсолютними похибками початкових кутів відхилення ВВ акселерометрів.

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

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

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

$$\Delta\theta_K \approx -\frac{180}{\pi} \sin\theta \delta_K, \quad \Delta\gamma_K \approx \frac{180}{\pi} \sin\gamma \delta_K,$$

$$\Delta\theta_\Pi \approx -\Delta\theta_0, \quad \Delta\gamma_\Pi \approx -\Delta\gamma_0. \quad (16)$$

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 тангажу при якому вимірюється кут крену. Відповідно, ці складові

ві ІП набувають максимальних значень при $|\theta_{\max}| = |\gamma_{\max}| = 45^\circ$.

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 $T_0 = +25 \pm 5^\circ\text{C}$, та в діапазоні робочих температур МА ADXL-203 $T_p = -40 \div +70^\circ\text{C}$. 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 δ_k , % — $\pm 0,2$ (при T_0), $\pm 0,5$ (при T_p) [5]; похибки початкових кутів $\Delta\theta_{II} = \Delta\gamma_{II} = \pm 0,05^\circ$ (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, град

Температура	Складові ІП $\Delta\theta_I$, град					$\Delta\theta_I$, град
	$\Delta\theta_U$	$\Delta\theta_{U0}$	$\Delta\theta_{II}$	$\Delta\theta_K$		
				$\theta = 0^\circ$	$\theta = 45^\circ$	
T_0	$\pm 0,15$	$\pm 0,15$	$\pm 0,05$	0	$\pm 0,08$	$\pm 0,22$
T_p		$\pm 0,75$			$\pm 0,20$	$\pm 0,79$

Таблиця 5

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

Температура	Складові ІП $\Delta\gamma_I$, град						$\Delta\gamma_I$, град	
	$\Delta\gamma_U$		$\Delta\gamma_{U0}$		$\Delta\gamma_{II}$	$\Delta\gamma_K$		
	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 30^\circ$	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 30^\circ$		$\gamma = 0^\circ$		$\gamma = 45^\circ$
T_0	$\pm 0,15$	$\pm 0,17$	$\pm 0,15$	$\pm 0,17$	$\pm 0,05$	0	$\pm 0,08$	$\pm 0,25$
T_p			$\pm 0,75$	$\pm 0,87$			$\pm 0,20$	$\pm 0,91$

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 ДК в діапазоні робочих температур МА його 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 ДК

Випробування ДК виконані при нормальній температурі шляхом вимірювання заданих тестових кутів (ТК) в діапазоні $\pm 45^\circ$ (рис. 6). Для задання ТК використовувались стандартні кінцеві міри довжини 1 та горизонтальна поверхня 2.

В таблиці 6 наведено числові значення заданих ТК θ_3 і γ_3 (похибка задання ТК $\pm 0,1^\circ$), та похибки їх вимірювання СВК $\Delta\theta_B = \theta_B - \theta_3$ і $\Delta\gamma_B = \gamma_B - \gamma_3$, де θ_B , γ_B — результати вимірювання ТК.

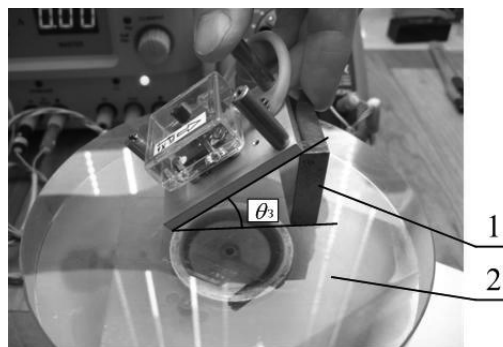


Рис. 6. Випробування ДК

Результати випробувань підтверджують достатньо високу точність вимірювання розробленого ДК та адекватність запропонованих в статті його алгоритму роботи, методу калібрування та математичної моделі похибок.

Висновки

Підтверджено, що запропоновані в статті структура і алгоритм роботи ДК на МА, а також метод калібрування його ВБ забезпечують високу точність вимірювання статичних кутів нахилу об'єкта.

Значення ТК та похибок їх вимірювання ДК, град

θ_z	-45,58	-24,01	-8,20	-0,58	0,58	8,20	24,01	45,58
$\Delta\theta_B$	-0,18	-0,15	-0,12	-0,03	-0,02	0,10	0,11	0,14
γ_z	-39,87	-22,65	-8,85	-0,74	0,74	8,85	22,65	39,87
$\Delta\gamma_B$	-0,14	-0,15	-0,09	0,05	0,01	0,12	0,12	0,09

Отримані аналітичні вирази (10)...(16) дозволяють вирішити як задачу аналізу похибок вимірювання ДК з відомими структурою, алгоритмом та функціональними елементами, так і задачу синтезу його 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 ДК в широкому діапазоні робочих температур шляхом алгоритмічної компенсації його температурних похибок.

Література

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. Бузыкканов С. Датчик наклона на основе твердотельного акселерометра // Современная электроника. — 2004, №4. — С. 42–45.
4. Ершов М. Применение микроконтроллеров Silicon Labs в интегрированных измерителях углов поворота и наклона // Схемотехника. — 2006, №5. — С. 50–52.
5. [http://www. Analog.com/iMEMS/products/ADXL203_top.html](http://www.Analog.com/iMEMS/products/ADXL203_top.html).