

## УДК 629.7

М. Г. Скриповська, студентка, гр. ВА-81мп, к.т.н., доц. М. Г. Черняк, к.т.н.,  
доц. М. В. Добролюбова  
КПІ ім. Ігоря Сікорського

# МОДЕЛЬ ПОХИБОК ТА АЛГОРИТМИ ЇХ КОРЕКЦІЇ У МІКРОПРОЦЕСОРНІЙ СИСТЕМІ ВИМІРЮВАННЯ КУТІВ НАХИЛУ НЕРУХОМОГО ОБ'ЄКТУ

**Анотація.** В статті представлені матеріали щодо розробки моделі сумарної похибки та алгоритмів корекції похибок з використанням кусково-лінійної апроксимації, які застосовуються у створеній мікропроцесорній системі вимірювання кутів нахилу нерухомого об'єкта або в аналогічних системах з метою підвищення точності.

**Ключові слова:** кут нахилу, похибки, корекція, кусково-лінійна апроксимація.

## ВСТУП

В багатьох галузях техніки, промисловості, будівництва існує потреба у вимірюванні з високою точністю кутів нахилу об'єктів відносно площини місцевого горизонту. Такі об'єкти – платформи, радары, телескопи, будівельні крани, опори мостів, архітектурні споруди, транспортні магістралі тощо [1].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Мета статті – розробити модель сумарної похибки та алгоритми корекції похибок, застосовані при створенні мікропроцесорної системи вимірювання кутів нахилу нерухомого об'єкта від площини горизонту (МСВКН), яка має наступні характеристики: абсолютна похибка менше однієї кутової хвилини в діапазоні кутів  $\pm 10^\circ$  в робочому діапазоні температур  $-40 \dots +70^\circ\text{C}$  [2-4].

## ОСНОВНА ЧАСТИНА

Первинні перетворювачі МСВКН – два акселерометри (АК) зі взаємно перпендикулярними вимірювальними осями. Біля АК встановлені термодатчики. Аналогові вимірювальні перетворювачі (АВП) забезпечують роботу АЧВ. Мікроконтролер (МК) включає в себе два високоточні АЦП [5] та виконує компенсацію похибок вимірювання і розрахунок кутів. Вихідні сигнали видаються на персональний комп'ютер (ПК) по інтерфейсу RS-422.

На рисунку 1 наведена структурна модель каналів кутів тангажу та крену МСВКН із джерелами похибок. Канали мають аналогічні джерела похибок.

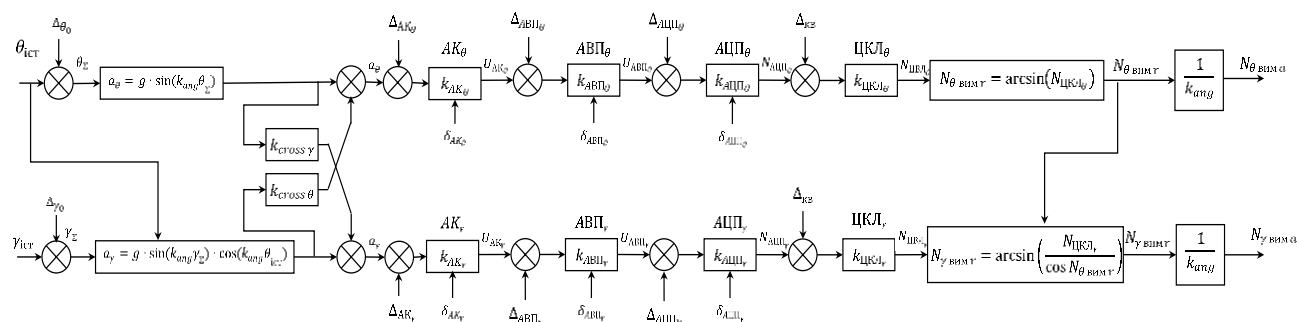


Рисунок 1. Структурна модель МСВКН із джерелами похибок

$\gamma_{ict}$ , [asec] – вимірюваний кут крену;  $\theta_{ict}$ , [asec] – вимірюваний кут

тангажу;  $k_{ang} = \frac{\pi}{180 \cdot 3600}$  – коефіцієнт перетворення (КП) величини кута з [asec] у [rad];  $\Delta_{\gamma_0}, \Delta_{\theta_0}, [\text{asec}]$  – абсолютні систематичні адитивні похибки (АП) початкових кутів відхилення вимірювальних осей  $AK_{\gamma}, AK_{\theta}$  від базової площини МСВКН;  $g, [m/c^2]$  – прискорення вільного падіння;  $k_{cross \gamma}, k_{cross \theta}, [1]$  – коефіцієнти перехресного зв'язку (КПЧ);  $\alpha_{\gamma}, \alpha_{\theta}, [m/c^2]$  – проекції прискорення на вісі чутливості  $AK_{\gamma}, AK_{\theta}$ ;  $\Delta_{AK_{\gamma}}, \Delta_{AK_{\theta}}, [m/c^2]$  – зміщення нуля (ЗН)  $AK_{\gamma}, AK_{\theta}$ ;  $k_{AK_{\gamma}}, k_{AK_{\theta}}, [B/g]$  – КП  $AK_{\gamma}, AK_{\theta}$ ;  $\delta_{AK_{\gamma}}, \delta_{AK_{\theta}}, [1]$  – відносні мультиплікативні похибки (МП) КП  $AK_{\gamma}, AK_{\theta}$ ;  $U_{AK_{\gamma}}, U_{AK_{\theta}}, [V]$  – вихідна напруга  $AK_{\gamma}, AK_{\theta}$ ;  $ABП_{\gamma}, ABП_{\theta}, [V]$  – АВП;  $\Delta_{ABП_{\gamma}}, \Delta_{ABП_{\theta}}, [V]$  – ЗН  $ABП_{\gamma}, ABП_{\theta}$ ;  $k_{ABП_{\gamma}}, k_{ABП_{\theta}}, [1]$  – КП  $ABП_{\gamma}, ABП_{\theta}$ ;  $\delta_{ABП_{\gamma}}, \delta_{ABП_{\theta}}, [1]$  – МП КП  $ABП_{\gamma}, ABП_{\theta}$ ;  $U_{ABП_{\gamma}}, U_{ABП_{\theta}}, [V]$  – вихідна напруга  $ABП_{\gamma}, ABП_{\theta}$ ;  $AЦП_{\gamma}, AЦП_{\theta}$  – АЦП;  $\Delta_{AЦП_{\gamma}}, \Delta_{AЦП_{\theta}}, [V]$  – ЗН  $AЦП_{\gamma}, AЦП_{\theta}$ ;  $k_{AЦП_{\gamma}}, k_{AЦП_{\theta}}, [1/V]$  – КП  $AЦП_{\gamma}, AЦП_{\theta}$ ;  $\delta_{AЦП_{\gamma}}, \delta_{AЦП_{\theta}}, [1]$  – МП КП  $AЦП_{\gamma}, AЦП_{\theta}$ ;  $N_{AЦП_{\gamma}}, N_{AЦП_{\theta}}, [1]$  – вихідний код  $AЦП_{\gamma}, AЦП_{\theta}$ ;  $\Delta_{\kappa\gamma}, \Delta_{\kappa\theta}, [1]$  – похибки квантування  $AЦП_{\gamma}, AЦП_{\theta}$ ;  $ЦКЛ_{\gamma}, ЦКЛ_{\theta}$  – цифрові коригувальні ланки;  $k_{ЦКЛ_{\gamma}}, k_{ЦКЛ_{\theta}}, [1]$  – КП  $ЦКЛ_{\gamma}, ЦКЛ_{\theta}$ ;  $N_{ЦКЛ_{\gamma}}, N_{ЦКЛ_{\theta}}, [1]$  – вихідні коди  $ЦКЛ_{\gamma}, ЦКЛ_{\theta}$ ;  $N_{\gamma \text{ вим } r}, N_{\theta \text{ вим } r}, [1]$  – коди, чисельно рівні виміряним кутам у [rad];  $N_{\gamma \text{ вим } \alpha}, N_{\theta \text{ вим } \alpha}, [1]$  – вихідні коди, чисельно рівні виміряним кутам у [asec].

За відсутності похибок  $k_{ЦКЛ_{\gamma}}, k_{ЦКЛ_{\theta}}$  мають бути обернено пропорційними добуткам прискорення на інші коефіцієнти відповідного каналу, тоді вихідний код чисельно дорівнюватиме істинному вимірюваному куту у [asec]. Рівняння вимірювання і за наявності похибок є подібними, що дозволяє розглянути узагальнений канал вимірювання з вхідним кутом  $\beta$ .

МП на виході ЦКЛ до алгоритмів корекції при  $20^{\circ}C$  [6]:

$$\delta_{N_{ЦКЛ}} = \pm(|\delta_{AK}| + |\delta_{ABП}| + |\delta_{AЦП}|) = \pm 0.23\% \quad (1)$$

АП на виході ЦКЛ до алгоритмів корекції при  $20^{\circ}C$  [6]:

$$\begin{aligned} \gamma_{N_{ЦКЛ}} &= \\ &= \pm \left( \frac{k_{ang} |\Delta_{\beta_0}|}{x_N} + \frac{|\Delta_{\alpha_{cross}}|}{x_N g} + \frac{|\Delta_{AK}|}{x_N g} + \frac{|\Delta_{ABП}|}{x_N g k_{AK}} + \frac{|\Delta_{AЦП}|}{x_N g k_{AK} k_{ABП}} + \frac{|\Delta_{\kappa\beta}|}{x_N g k_{AK} k_{ABП} k_{AЦП}} \right) = \\ &= \pm 0.07. \end{aligned} \quad (2)$$

де  $\Delta_{\alpha \text{ cross}}$  – АП, викликана наявністю перехресного зв'язку.

Сумарна АП на виході ЦКЛ до алгоритмів корекції при  $20^\circ \text{C}$  (основна) [7]:

$$\Delta_{\Sigma N_{\text{ЦКЛ}}} = \delta_{N_{\text{ЦКЛ}}} \cdot \sin(k_{\text{ang}} \beta_{\text{icm}}) + \Delta_{N_{\text{ЦКЛ}}} = 0.05 \quad (3)$$

Корекція здійснюється ЦКЛ, її константи визначаються за однократного калібрування для екземпляру МСВКН. МСВКН встановлюється на платформу, закріплену на валу оптичної ділильної головки (ОДГ) всередині термокамери. Систему тестують при  $20^\circ \text{C}$ ,  $-35^\circ \text{C}$ ,  $-5^\circ \text{C}$ ,  $+60^\circ \text{C}$ , з точністю 5 асес задають кути крену в діапазоні кутів  $\pm 10^\circ$  при  $0^\circ$  по тангажу, потім – навпаки.

Під час калібрування на горизонтальній площині при  $20^\circ \text{C}$  для кожного каналу налаштовують такі коефіцієнти  $k_{\text{ЦКЛ}}$  та поправки  $C_{\text{ЦКЛ}}$ :

$$k_{\text{ЦКЛ}} = \frac{1}{g \cdot k_{\text{AK}} (1 + \delta_{\text{AK}}) k_{\text{ABП}} (1 + \delta_{\text{ABП}}) k_{\text{АЦП}} (1 + \delta_{\text{АЦП}})}, \quad (4)$$

$$C_{\text{ЦКЛ}} = - \left( k_{\text{ang}} \Delta_{\beta_0} + \frac{\Delta_{\text{AK}}}{g} + \frac{\Delta_{\text{ABП}}}{g k_{\text{AK}}} + \frac{\Delta_{\text{АЦП}}}{g k_{\text{AK}} k_{\text{ABП}}} \right). \quad (5)$$

Для компенсації похибки перехресного зв'язку у ЦКЛ додається складова:

$$C_{\text{ЦКЛ cross } \gamma} = -k_{\text{cross } \gamma} \cdot N_{\text{АЦП}_\theta}, \quad (6)$$

$$C_{\text{ЦКЛ cross } \theta} = -k_{\text{cross } \theta} \cdot N_{\text{АЦП}_\gamma}. \quad (7)$$

Якщо скомпенсувати основні систематичні АП кодів АЦП, то добуток  $N_{\text{АЦП}} \cdot k_{\text{ЦКЛ}}$  дорівнюватиме істинному (дійсному, заданому ОДГ) значенню сінуса вимірюваного кута, з похибкою, яка не перевищуватиме допустиме значення  $\Delta_{\Sigma N_{\text{ЦКЛ}}}$ . Тоді при  $20^\circ \text{C}$  вимірюваний кут можна знайти за формулами

$$\gamma = \arcsin \left( \left( N_{\text{АЦП}_\gamma} + C_{\text{ЦКЛ}_\gamma} + C_{\text{ЦКЛ}_\gamma \text{ cross } \theta} \right) \cdot k_{\text{ЦКЛ}_\gamma} \right), \quad (8)$$

$$\theta = \arcsin \left( \left( N_{\text{АЦП}_\theta} + C_{\text{ЦКЛ}_\theta} + C_{\text{ЦКЛ}_\theta \text{ cross } \gamma} \right) \cdot k_{\text{ЦКЛ}_\theta} \right). \quad (9)$$

У реальних умовах, через вплив додаткових температурних похибок, максимальна сумарна АП може перевищувати допустиму. Залежності від температури є нелінійними, тому застосовано кусково-лінійну апроксимацію.

ЗН при будь-якій  $t^\circ$  всередині деякого інтервалу, при яких  $t_1^\circ < t^\circ < t_2^\circ$ , для будь-якого каналу визначається як:

$$C_{\text{ЦКЛ } t^\circ} = k_{\text{C ЦКЛ}} (t^\circ - t_1^\circ) + C_{\text{ЦКЛ } t_1^\circ}, \quad (10)$$

$$k_{\text{C ЦКЛ}} = \frac{C_{\text{ЦКЛ } t_2^\circ} - C_{\text{ЦКЛ } t_1^\circ}}{t_2^\circ - t_1^\circ}, \quad (11)$$

де

де  $C_{\text{ЦКЛ } t_2^\circ}$ ,  $C_{\text{ЦКЛ } t_1^\circ}$  – ЗН при температурах  $t_2^\circ$ ,  $t_1^\circ$ .

Величина МП коефіцієнтів  $k_{ЦКЛ\ t^\circ}$  при будь-якій  $t^\circ$  всередині деякого інтервалу температур, при яких  $t_1^\circ < t^\circ < t_2^\circ$ , для будь-якого каналу визначається:

$$\delta_{ЦКЛ\ t^\circ} = k_{\delta\ ЦКЛ} (t^\circ - t_1^\circ) + \delta_{ЦКЛ\ t_1^\circ}, \quad k_{\delta\ ЦКЛ} = \frac{\delta_{ЦКЛ\ t_2^\circ} - \delta_{ЦКЛ\ t_1^\circ}}{t_2^\circ - t_1^\circ} \quad (12)$$

де  $\delta_{ЦКЛ\ t_2^\circ}$ ,  $\delta_{ЦКЛ\ t_1^\circ}$  – константи, величини МП коефіцієнтів  $k_{ЦКЛ\ t^\circ}$  та  $k_{ЦКЛ\ t^\circ}$  при температурах  $t_2^\circ$ ,  $t_1^\circ$ .

Після застосування алгоритмів корекції експериментально перевірено, що в межах всього діапазону кутів та температур, АП не перевищує допустиму.

## ВИСНОВКИ

Надані основні результати, отримані при розробці моделі сумарної похибки та алгоритмів корекції похибок МСВКН. Застосування наведених алгоритмів дозволяє здійснювати вимірювання кутів нахилу з високою точністю – сумарна абсолютна похибка не більше однієї кутової мінути.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Інклінометр // Вікіпедія. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Інклінометр> – Дата доступу: 05.11.18 – Інклінометр.
2. Розробка пристрою вимірювання кутів крену та тангажу нахилу нерухомого об'єкту від площини місцевого горизонту / М.Г. Скрипковська // Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених у царині метрології «Technical Using of Measurement – 2018»: збірник тез доповідей учасників (ел.), 13-18 лютого 2018 р., м. Славське, 2018. – С. 37-38.
3. The device for measure the inclination angles of a motionless object relative to the local horizon plane / М. Skrypkovska // XI international students and young scientists conference «Intelligence. Integration. Reliability»: abstracts, 12 April 2018. – Kyiv/Warsawa, 2018. – С. 27-28.
4. Скрипковська, М. Г. Розробка мікропроцесорної системи вимірювання кутів нахилу нерухомого об'єкту від площини горизонту / М. Г. Скрипковська, М. Г. Черняк, М. В. Добролюбова // науково-технічний збірник «Механіка гіроскопічних систем». — 2018. Вип. 35. — С. 49-67.
5. Datasheet ADuCM360 Analog Devices // Analog Devices – Режим доступу: [http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADuCM360\\_361.pdf](http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADuCM360_361.pdf) – Дата доступу: 10.11.18 – ADuCM360/ADuCM361 (Rev. D).
6. Ціделко В.Д. Основи метрології та вимірювальної техніки: навч. посіб.: у 2 т. Т. 2 / В.Д. Ціделко, Н.А. Яремчук, С.А. Затока. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015 – 268 с.
7. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники / П.П. Орнатский. – Киев : Издательское объединение «Вища школа», 1976 – 432 с.

*Наук. керівник – к.т.н., доц. Добролюбова М.В.*