

УДК 531.7.08

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771442022284635>Є. М. Горєлов¹, зав. відділом; С. Г. Щоголева², аспірант

СИНТЕЗ ВЕРИФІКАЦІЯ МЕТОДУ ПОШУКУ НЕСПРАВНОГО СЕНСОРА В НАДЛИШКОВИХ ВІМІРЮВАЧАХ

Ua Розглядається достовірність методики визначення сенсора, що відмовив, в надлишковому вимірювачі кутової швидкості (ВКШ) шляхом його експериментальної перевірки. Оптимізовано взаємне неортогональне розташування шести осей чутливості сенсорів для зменшення інструментальних похибок кожного чутливого елемента та забезпечення рівності їх внеску. Забезпечується приблизно однакова чутливість до рівня похибки сенсорів при відмові. В одне з шести отриманих експериментально сигналів сенсорів вводиться похибка, що перевищує заданий допустимий поріг. Перевіряється алгоритм пошуку сенсора, похибка якого перевищує задану, і який по цій причині вважається несправним.

En The reliability of the method for determining a failed sensor in a redundant angular velocity meter (AVM) by means of its experimental verification is considered. The mutual non-orthogonal arrangement of six axes of sensor sensitivity has been optimized to reduce the instrumental errors of each sensitive element and ensure the equality of their contribution. Provides approximately the same sensitivity to the level of error in case of failure. One of the six experimentally obtained sensor signals contains an error that exceeds the specified permissible limit. The algorithm for searching for a sensor is checked, the error of which exceeds the specified one, and which, for this reason, is considered faulty.

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

² КПІ ім. Ігоря Сікорського

Вступ

У системах управління космічними апаратами та ракетами-носіями для підвищення точності [1 – 2] та надійності [3 – 9] використовуються надлишкові вимірювачі кутової швидкості (ВКШ). Створення надлишкових відмовостійких ВКШ передбачає неортогональну орієнтацію осей чутливості сенсорів [3], які входять до їх складу. Існують модулі інерційних сенсорів, осі чутливості яких виставлені неортогонально, що полегшує задачу. За наявності одного або двох несправних сенсорів надлишковість дозволяє забезпечити працездатність системи [4]. У літературі [4 – 8] описується ряд методів для ідентифікації несправностей. Ці методи полягають у порівнянні вихідних значень різних сенсорів між собою або розрахованих за інформацією із сенсорів проєкцій кутової швидкості, визначаються сенсори, які дають найбільше відхилення визначеної інформації від середньостатистичного значення. У даній статті розглядається пошук відмови внаслідок недопустимої похибки коефіцієнта передачі сенсора. Перевіряються експериментально теоретичні викладки статті [3] та ефективність описаного методу ідентифікації несправного сенсора за наявності однієї несправності.

Постановка задачі

Перевірити експериментально метод пошуку сенсора, що відмовив, у надлишковому ВКШ. Визначити відсоток виявлених несправностей під час багаторазового повторення експерименту.

Основний зміст

Розглядається надлишковий вимірювальний блок, який містять шість сенсорів, розташованих по конусу [3] (рис.1). В цьому випадку осі чутливості рівномірно розташовані по твірним конуса з кутом при вершині

$$2 \arccos \sqrt{\frac{1}{3}} \approx 2 \cdot 54,7356^\circ.$$

Експериментальні вимірювання

Матриця напрямних косинусів осей чутливості сенсорів (рис. 1) має вигляд

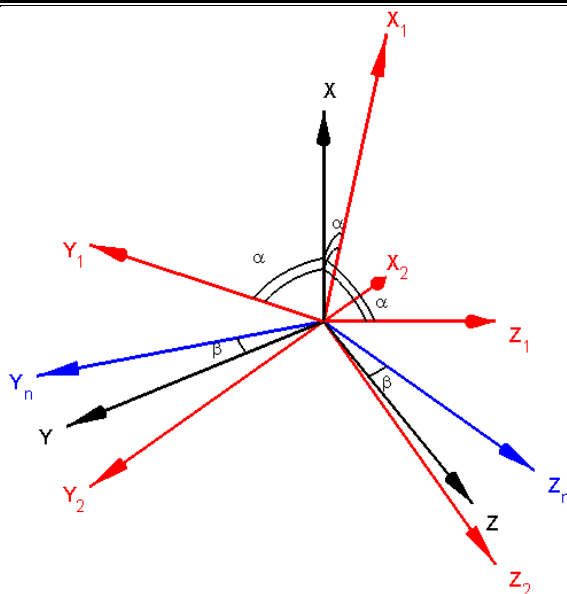


Рис. 1. Вимірювальна $(X_1 Y_1 Z_1 X_2 Y_2 Z_2)$ та приладова (XYZ) системи координат (ПСК), $\alpha=54,7356^0$, $\beta=15^0$

$$H_{6 \times 3} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{\sqrt{3}+1}{2\sqrt{3}} & -\frac{\sqrt{3}-1}{2\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{\sqrt{3}-1}{2\sqrt{3}} & \frac{\sqrt{3}+1}{2\sqrt{3}} \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{\sqrt{3}+1}{2\sqrt{3}} & -\frac{\sqrt{3}-1}{2\sqrt{3}} \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{\sqrt{3}-1}{2\sqrt{3}} & \frac{\sqrt{3}+1}{2\sqrt{3}} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Вихідні сигнали сенсорів

$$|Z| = |H_{6 \times 3}| |W|, \quad (2)$$

де $|Z| = |Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6|^T$ – дані, отримані із сенсорів надлишкового ВКШ, $|W| = |\omega_x, \omega_y, \omega_z|^T$ – вектор переносної кутової швидкості (кутової швидкості стенду, на якому встановлений блок ВКШ) та його проекції на осі зв'язаної системи координат. Розподіл похибок вихідних сигналів сенсорів у разі вимірюванні заданої кутової швидкості у 4753 замірах показаний на рис. 2.

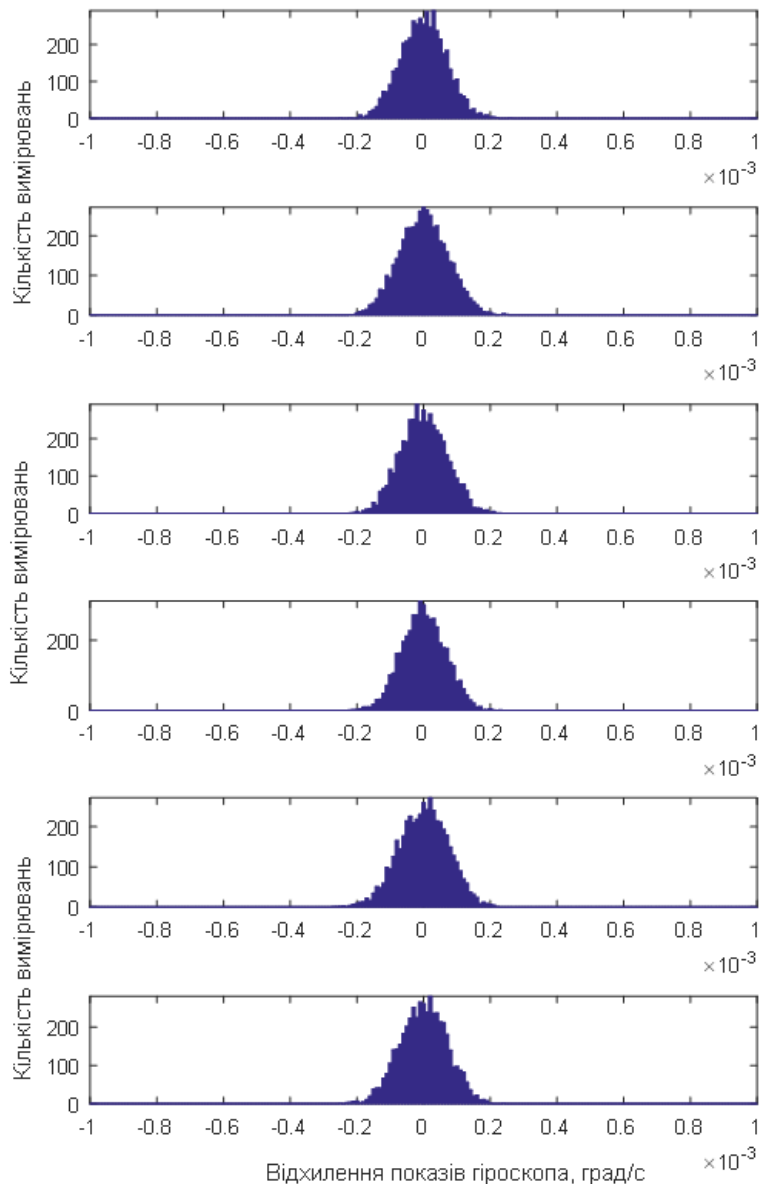


Рис. 2. Розподіл похибок вихідних сигналів сенсорів 1–6 у разі вимірювання заданої кутової швидкості

Бачимо із рис. 2, що закон розподілу похибок вихідних сигналів сенсорів є нормальним законом розподілу.

Розрахунок характеристик експериментальних даних

Розраховуємо статистичні характеристики похибок сенсорів за результатами випробувань. Математичне сподівання вихідних сигналів знайдемо за формулою

$$M(Z_1) = \sum_{i=1}^N Z_{1i}, \quad (3)$$

де $N = 4753$ – кількість замірів.

Отримаємо $M(Z_1) = 0,578$

Середньоквадратичне відхилення

$$\sigma_{Z_1} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (M(Z_1) - Z_{1i})^2}, \quad \sigma_{Z_1} = 6,766 \cdot 10^{-5}. \quad (4)$$

Ймовірності того, що випадкова величина (вихідний сигнал) попаде в певний інтервал, оцінимо відповідно

$$P(-\sigma < Z_1 < \sigma) = \Phi\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) = 0,683; \quad (5)$$

$$(-2\sigma < Z_1 < 2\sigma) = \Phi(\sqrt{2}) = 0,954; \quad (6)$$

$$(-3\sigma < Z_1 < 3\sigma) = \Phi\left(\frac{3}{\sqrt{2}}\right) = 0,997. \quad (7)$$

Ймовірність того, що абсолютне значення похибки вихідного сигналу сенсора буде менше потрібного середньоквадратичного відхилення, дорівнює 99,7 %. Отже із 4753 замірів за межі інтервалу $(-3\sigma; 3\sigma)$ може вийти не більше за $(100 - 99,7)/100 \cdot 4753 = 14$ показів, що підтверджується на практиці.

Опис метода пошуку сенсорів, що відмовили

У статті [3] викладена суть метода пошуку сенсора, що відмовив, у надлишковому ВКШ. Метод полягає у знаходженні модулів різниці вимірних показів сенсорів та розрахованих значень. Найгірший сенсор дасть максимальне відхилення модуля різниці вимірюваного та розрахованого значень. За заданими допустимими значеннями похибок сенсорів знаходиться допуск та порівнюється з максимальним відхиленням. Якщо найгірший сенсор не виходить за допуск, вважаємо цей сенсор справним, в іншому випадку вважаємо його несправним.

Несправний сенсор

Додаємо шумову складову до одного з сенсорів. Нехай це буде перший за номером сенсор з показами Z_1 .

$$Z_{ш1} = Z_{c1} (1 + \Delta k) + z_{нс}, \quad (8)$$

де Z_{c1} – середнє значення даних з першого сенсора, Δk – похибка масштабовного коефіцієнта, яку розраховуємо (максимально допустиме значення за відсутності відмови $\Delta k = 3\sigma_k$), $z_{нс}$ – похибка нульового сигналу, яку задаємо (максимально допустиме значення за відсутності відмови $z_{нс} = 3\sigma_{нс}$).

Тут σ_k та σ_{nc} – середньоквадратичне значення похибок масштабного коефіцієнта та нульового сигналу відповідно. Максимальні значення похибок за формулою (4) $\sigma_{nc} = \sigma_{z_i} = 6,766 \cdot 10^{-5}$ град/с, $\sigma_k = 10^{-5}$.

Похибки для несправних сенсорів задаються наступним чином:

$$\begin{aligned} \Delta k &= k_{\Delta k} \cdot \sigma_k, \\ z_{nc} &= k_{z_{nc}} \cdot \sigma_{nc}, \end{aligned} \quad (9)$$

де $k_{\Delta k}$ та $k_{z_{nc}}$ – коефіцієнти у разі відхилення масштабного коефіцієнта та нульового сигналу відповідно.

У табл. 1 зведені ймовірності виявлення одного несправного сенсора при різних похибках несправного сенсора. Враховується, що знаки Δk та z_{nc} можуть бути однакові або різні. За різних знаках відбувається часткова компенсація похибок, тому несправний сенсор важче виявити.

Таблиця 1.

Ймовірність виявлення однієї несправності при різних значеннях похибок

Коефіцієнти $k_{\Delta k}$ та $k_{z_{nc}}$	Ймовірності знаходження несправного сенсора, %	
	За однакових знаках Δk та z_{nc}	За різних знаках Δk та z_{nc}
3,0	59	40
3,5	79	57
4,0	90	73
4,5	97	86
5,0	99	94
5,5	99,8	98,1
6,0	99,9	99,6
6,5	100	99,9
7,0	100	99,9
7,5	100	100

Результати експерименту

Результати експерименту показали, що ймовірність виявлення відмов за допомогою методу ідентифікації відмов за максимумом модулів різниць вимірних та розрахованих значень кутової швидкості стовідсоткова у разі перевищення у 7,5 разів похибок несправного сенсора.

Висновки

Ймовірності виявлення сенсора, що відмовив, за показами реальних сенсорів стовідсоткова при перевищенні похибок в 7,5 разів. При різних

знаках нульового сигналу та відхилення масштабного коефіцієнту відбувається взаємна компенсація похибок, що призводить до меншого відсотку виявлених несправностей у всіх поставлених експериментах (таблиця). Близькі до допускових констант похибки справних сенсорів, або похибки несправних сенсорів - одна з причин за якої результати діагностики стають недостовірними.

Список використаної літератури

1. *Wanliang Zhao, Xiangyu Sun, Yijie Rong, Jie Duan, Jiawei Chen, Lijun Song, Qinyi Pan.* Optimization on the Precision of the MEMS-Redundant IMU Based on Adhesive Joint Assembly // *Mathematical Problems in Engineering.* 2020. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.hindawi.com/journals/mpe/2020/8855141/> (дата звернення: 1.05.2021).
2. *Sushchenko O., Bezkorovainyi Y., Novytska N.* Theoretical and experimental assessments of accuracy of non-orthogonal MEMS sensor array // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 3/9 (93). 2018. P. 40-49.
3. *Горелов Є. М., Збруцький О. В., Щоголева С. Г., Янкелевич Г. Є.* Підвищення методів пошуку сенсора, що відмовив, в надлишкових вимірювачах кутової швидкості // *Інформаційні системи, механіка та керування.* 2019. № 21. с. 105-116.
4. *Водичева Л. В., Бельский Л. Н., Парышева Ю. В., Лысцов А. А.* Инерциальные измерительные блоки перспективных изделий ракетно-космической техники: обеспечение отказоустойчивости // *Вестник Самарского университета Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение.* 2018. Т. 17, № 1. С. 28-44.
5. *Водичева Л. В., Лысцов А. А., Парышева Ю. В.* Повышение отказоустойчивости избыточного бесплатформенного инерциального измерительного блока // *XXII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам,* 2016г. С. 113-116.
6. *Негри С., Лабар Э., Линьон К., Брунштейн Э., Салаён Э.* Новое поколение инерциальных навигационных систем на основе ВТГ для аппаратов, обеспечивающих запуск спутников // *Гироскопия и навигация.* 2016. Т. 24, № 1 (92). С. 49-59.
7. Патент RU 2573442 от 2014-07-28.Способ отбора достоверной информации и идентификации отказов акселерометров и датчиков угловой скорости при шести измерителях в каждом тракте в бесплатформенной инерциальной навигационной системе летательного аппарата. Дишель В. Д., Трунов Ю. В., Межирицкий Е. Л., Казаков С. В., Маслов А. А.
8. *Лихолит М. І., Горелов Є. М., Щоголева С. Г., Янкелевич Г. Є.* Методи пошуку сенсора, що відмовив в безплатформенному надлишковому ве-

кторному вимірювачі кінематичних параметрів руху, науково-технічна конференція "Проблеми розвитку глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху CNS/ATM", м. Київ, Україна, 21-23.11.2018, с. 77.

9. Паршин А. П., Немшилов Ю. А. Разработка измерительного блока системы ориентации БПЛА с неортогональным расположением чувствительных элементов // Современная техника и технологии. 2016. № 3 [Електронний ресурс]. URL: <https://technology.snauka.ru/2016/03/9697> (дата звернення: 1.05.2021).