

УДК 531.7.08

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771402020249394>

Є. М. Горєлов<sup>1</sup>, начальник відділу, О. В. Збруцький<sup>2</sup>, д.т.н., професор,  
С. Г. Щоголєва<sup>3</sup>, аспірант

## ВЕРИФІКАЦІЯ МЕТОДУ ПОШУКУ НЕСПРАВНОГО СЕНСОРА В НАДЛИШКОВИХ ВІМІРЮВЧАХ

**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.

**Ru** Рассматривается достоверность методики определения отказавшего датчика в избыточном измерителе угловой скорости (ИУС) путем его экспериментальной проверки. Оптимизировано взаимное неортогональное расположение шести осей чувствительности датчиков для уменьшения инструментальных погрешностей каждого чувствительного элемента и обеспечения равенства их вклада. Обеспечивается приблизительно одинаковая чувствительность к уровню погрешности при отказе. В одно из шести полученных экспериментально сигналов датчиков водится погрешность, которая превышает заданную допустимую границу. Проверяется алгоритм поиска датчика, погрешность которого превышает заданную, и который по этой причине считается неисправным.

---

<sup>1</sup> КПСПБ «Арсенал»

<sup>2</sup> КПИ ім. Ігоря Сікорського

<sup>3</sup> КПИ 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], що входять до його 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 у ній методу ідентифікації несправного сенсора за наявності однієї несправності.

**Постановка задачі**

Метою статті є експериментальна перевірка методу пошуку сенсора, що відмовив [3], у надлишковому ВКШ та оцінка ймовірності правильного визначення сенсора, що відмовив.

**Основний зміст**

Розглянемо надлишковий вимірювальний блок, який містять шість сенсорів, розташованих по конусу [3] (рис. 1). У цьому випадку осі чутливості рівномірно розташовані по твірним конуса із кутом вершини

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

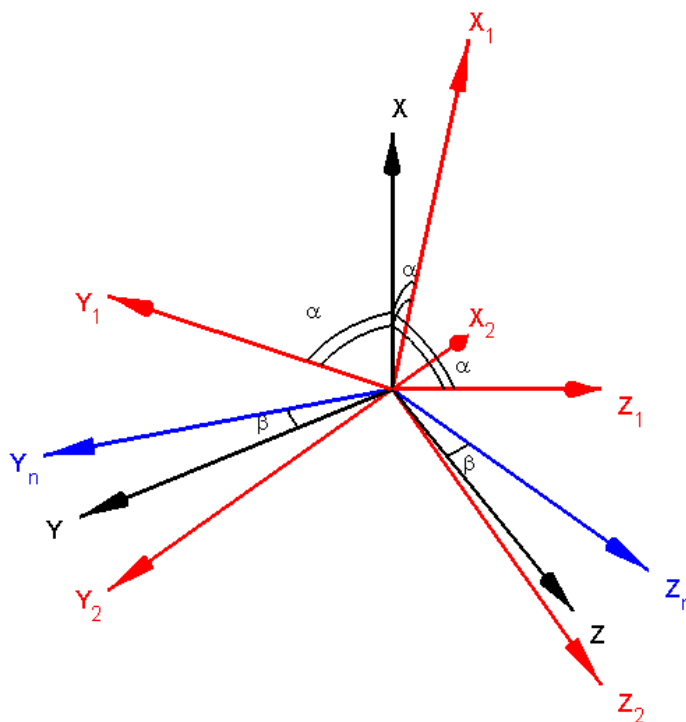


Рис. 1. Вимірювальна ( $X_1 Y_1 Z_1 X_2 Y_2 Z_2$ ) та приладова ( $XYZ$ ) системи координат (ПСК),  $\alpha=54,7356^\circ$ ,  $\beta=15^\circ$

### Експериментальні вимірювання

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

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

Вихідні сигнали сенсорів запишемо у вигляді

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

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 стану, на якому встановлений блок ВКШ) та його проєкції на

*Прилади та методи контролю*

осі зв'язаної системи координат. Розподіл похибок вихідних сигналів сенсорів при вимірюванні заданої кутової швидкості у 4753 замірах показаний на рис. 2.

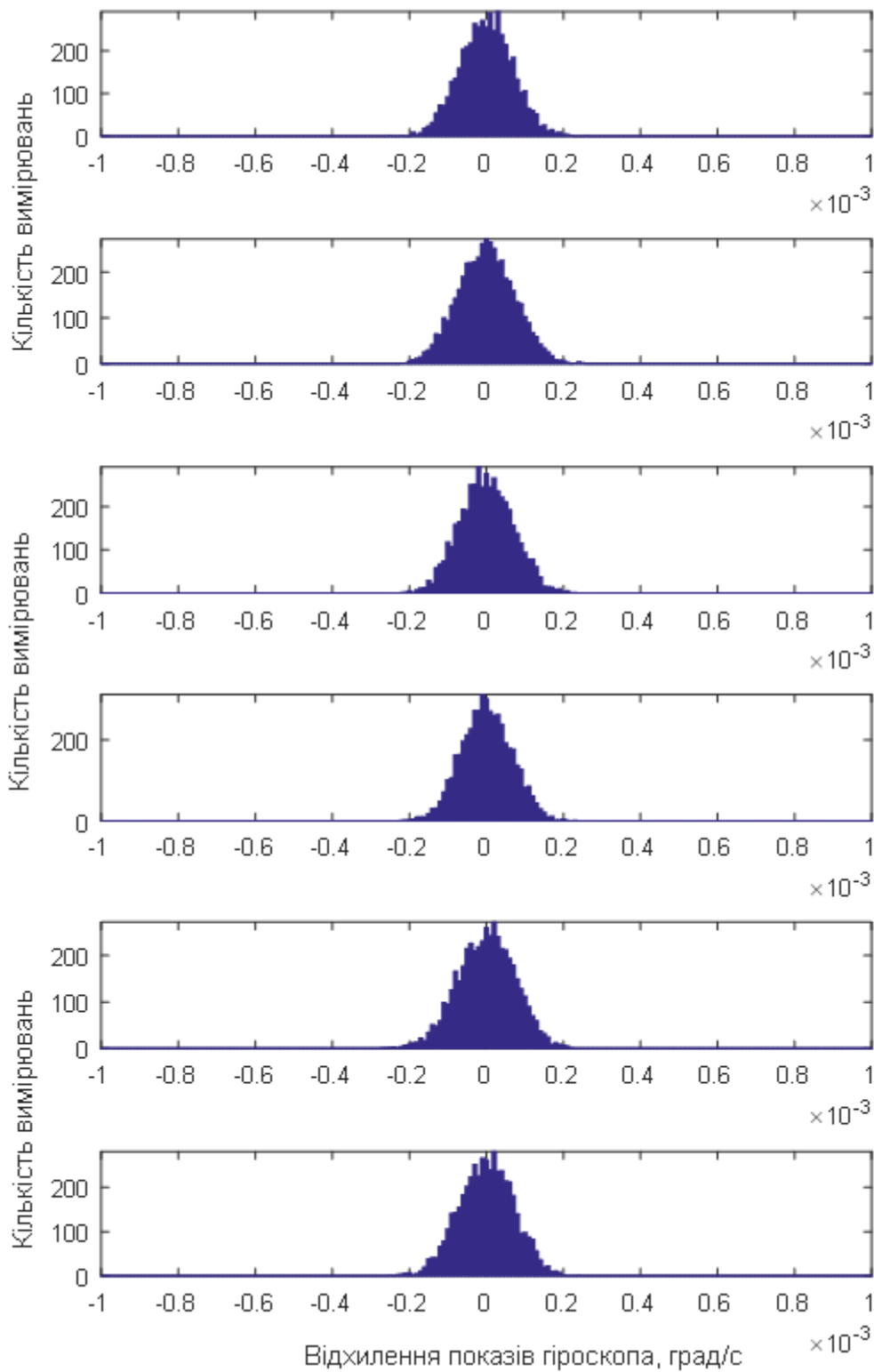


Рис. 2. Розподіл похибок вихідних сигналів сенсорів 1-6 під час вимірювання заданої кутової швидкості

Прийmemo на основі рис. 2, що розподіл похибок вихідних сигналів сенсорів відповідає нормальному закону.

### 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 буде

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

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

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

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

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

Таким чином бачимо із виразів (3) – (7), що 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

Відповідно [3] метод пошуку сенсора, що відмовив, полягає у знаходженні модулів різниці виміряних показів сенсорів та розрахованих значень. Найгірший сенсор дасть максимальне значення цього модуля. За заданими допустимими значеннями похибок сенсорів знаходиться допуск та порівнюється з максимальним відхиленням. Якщо найгірший сенсор не виходить за допуск, вважаємо цей сенсор справним, у іншому випадку вважаємо його несправним.

## Виявлення несправного сенсора

Додамо 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,  $\Delta k$  – похибка масштабного 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  $\sigma_k$  та  $\sigma_{нс}$  – середньоквадратичне значення похибок масштабного коефіцієнта та нульового сигналу відповідно. Максимальні значення похибок за формулою (4)  $\sigma_{нс} = \sigma_{Z_i} = 6,766 \cdot 10^{-5}$  град/с,  $\sigma_k = 10^{-5}$ .

Похибки для несправних сенсорів задаються наступним чином:

$$\Delta k = k_{\Delta k} \cdot \sigma_k, \quad z_{нс} = k_{z_{нс}} \cdot \sigma_{нс}, \quad (9)$$

де  $k_{\Delta k}$  та  $k_{z_{нс}}$  – коефіцієнти при відхиленні масштабного коефіцієнта та при відхиленні нульового сигналу відповідно.

У таблиці зведені ймовірності виявлення одного несправного сенсора при різних похибках несправного сенсора. Враховується, що знаки  $\Delta k$  та  $z_{нс}$  можуть бути однакові або різні. За різних знаках відбувається часткова компенсація похибок, тому несправний сенсор важче виявити.

## Таблиця

Ймовірність виявлення однієї несправності за різних значеннях похибок

Коефіцієнти $k_{\Delta k}$ та $k_{z_{нс}}$	Ймовірності знаходження несправного сенсора, %	
	за однакових знаках $\Delta k$ та $z_{нс}$	за різних знаках $\Delta k$ та $z_{нс}$
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 [3] 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 у 7,5 разів. За 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 ефективності 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., Лыццов 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., Лыццов 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. *Лихоліт М. І., Горелов Є. М., Щоголева С. Г., Янкелевич Г. Є.,* "Методи пошуку сенсора, що відмовив в бесплатформенному надлишковому векторному 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 [Электронный ресурс]. URL: <https://technology.snauka.ru/2016/03/9697> (дата звернення: 1.05.2021).