

УДК 531.7.08

DOI: <http://doi.org/10.20535/2219-3804212019197610>

Є. М. Горелов¹, начальник відділу, О. В. Збруцький², професор, д.т.н.,
С. Г. Щоголева³, провідний інженер-програміст,
Г. Є. Янкелевич⁴, начальник лабораторії, к.т.н.

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТОДІВ ПОШУКУ СЕНСОРА, ЩО ВІДМОВИВ, У НАДЛИШКОВИХ ВІМІРЮВЧАХ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ

En In control systems of launch vehicles, satellites, it is important to ensure the operability of the system in the presence of failures. In the units of angular velocity or acceleration sensors, redundancy can be used, that is, the installation of sensors in the amount of four to six, the sensitivity axis of any three of them are not coplanar. In addition to reliability improvement the redundant meters improve the accuracy characteristics of systems. To determine the failed sensors, special algorithms which influence the efficiency of the failed sensor search have been developed. The following search methods are considered: the method of the failed sensor determining by the minimum of average values of the residual modules; method for the failed sensor determining by the minimum of mean values of squared residuals method for the failed sensor determining by the minimum of the squares deviations average values of the angular velocity components; method for the failed determining sensor by the maximum modulus of the difference of the calculated and measured data. The probabilities of determining failures, false failures, and undetected failures are given. The methods of finding a failed sensor in the redundant angular velocity meters given in the article take into account the presence of errors in the transmittance of sensors.

Ru Рассматриваются избыточные измерители угловой скорости (ИУС), избыточность в которых позволяет обеспечить работоспособность системы при наличии одной или двух возможных неисправностей и повысить точность системы. Приведенные методы идентификации датчиков отказавших в процессе работы. Эти методы заключаются в сравнении значений с разных датчиков между собой или рассчитанных по информации с датчиков проекций угловой скорости; определяются датчики с наибольшим отклонением определенной информации от среднестатистического значения. Проанализированы наиболее эффективные методы поиска отказавшего датчика в избыточных ИУС. Существующие методы доработаны так, чтобы обеспечивать учет возможного отклонения масштабных коэффициентов датчиков угловой скорости. Определена оптимальная с точки зрения точности и эффективности диагностики ориентация осей чувствительности измерителей. Приведен метод с упрощением вычислений, чтобы уменьшить требования к вычислительному устройству. Приведены результаты математического моделирова-

¹ КП СПБ «Арсенал»

² КПИ ім. Ігоря Сікорського

³ КП СПБ «Арсенал»

⁴ КП СПБ «Арсенал»

ния работы рассмотренных методов при наличии отказавшего датчика и анализ результатов.

Вступ

Надлишкові вимірювачі кутової швидкості (ВКШ) використовуються у системах управління космічними апаратами (КА) і ракетами-носіями для підвищення ефективності та тактико-технічних характеристик цих апаратів. Надлишковість дозволяє забезпечити працездатність системи за наявності однієї або двох можливих несправностей та підвищити її точність. Для ідентифікації сенсорів, що відмовили в процесі роботи, використовуються ряд методів, які полягають у тому, що порівнюються вихідні значення різних сенсорів між собою або розрахованих за інформацією із сенсорів проєкцій кутової швидкості та визначаються сенсори, які дають найбільше відхилення визначеної інформації від середньостатистичного значення. Такі методи описуються у літературі [1-7], але у них не розглядається пошук відмови внаслідок недопустимої похибки коефіцієнта передачі сенсора. Аналізу цих методів та пошуку шляхів підвищення їх ефективності присвячена ця стаття.

Постановка задачі

Проаналізувати найбільш ефективні методи пошуку сенсорів, що відмовили, у надлишкових ВКШ. Доопрацювати існуючі методи таким чином, щоб забезпечити врахування можливого відхилення масштабних коефіцієнтів сенсорів кутової швидкості.

Визначення схеми орієнтації осей чутливості сенсорів

Створення надлишкових відмовостійких ВКШ потребує вирішення низки задач. Одна із перших – визначення орієнтації осей чутливості вимірювачів, оптимальної з точки зору точності та ефективності діагностики, що забезпечує мінімальні похибки перетворення результатів вимірів із вимірювальної системи координат, яка утворена осями чутливості цих сенсорів, до приладової системи координат.

Надлишкові вимірювальні блоки містять від чотирьох до шести сенсорів кожного параметра, що вимірюється. У даному випадку було використано шість сенсорів, оскільки ВКШ складається із двох триосних гірблуків.

Відомі схеми орієнтації осей чутливості сенсорів по конусу та по додекаедру [5]. Під час орієнтації по конусу осі чутливості рівномірно розташовують по утворюючим конуса за половиною кута вершини осьового перетину, яка дорівнює $\arccos \sqrt{1/3} \approx 54,7356^\circ$. У разі орієнтації по додека-

едру осі чутливості сенсорів ортогональні непаралельним граням правильного багатогранника – додекаедра, кут між будь-якими двома осями дорівнює $\arccos \sqrt{(N-3)/3(N-1)} = \arccos \sqrt{1/5} \approx 63,4^\circ$, тобто осі орієнтовані у тривимірному просторі максимально рівномірно ($N=6$ – кількість вимірювальних осей).

Із конструктивних міркувань у вимірювачі, що складається із двох триосників, використана схема розташування осей чутливості сенсорів по конусу, але так, що ці триосники мають загальну вершину, а осі чутливості розташовані симетрично відносно площини, що проходить через цю вершину та перпендикулярна бісектрисі кута вершини триосників, та напружені у протилежних напрямках (рис. 1).

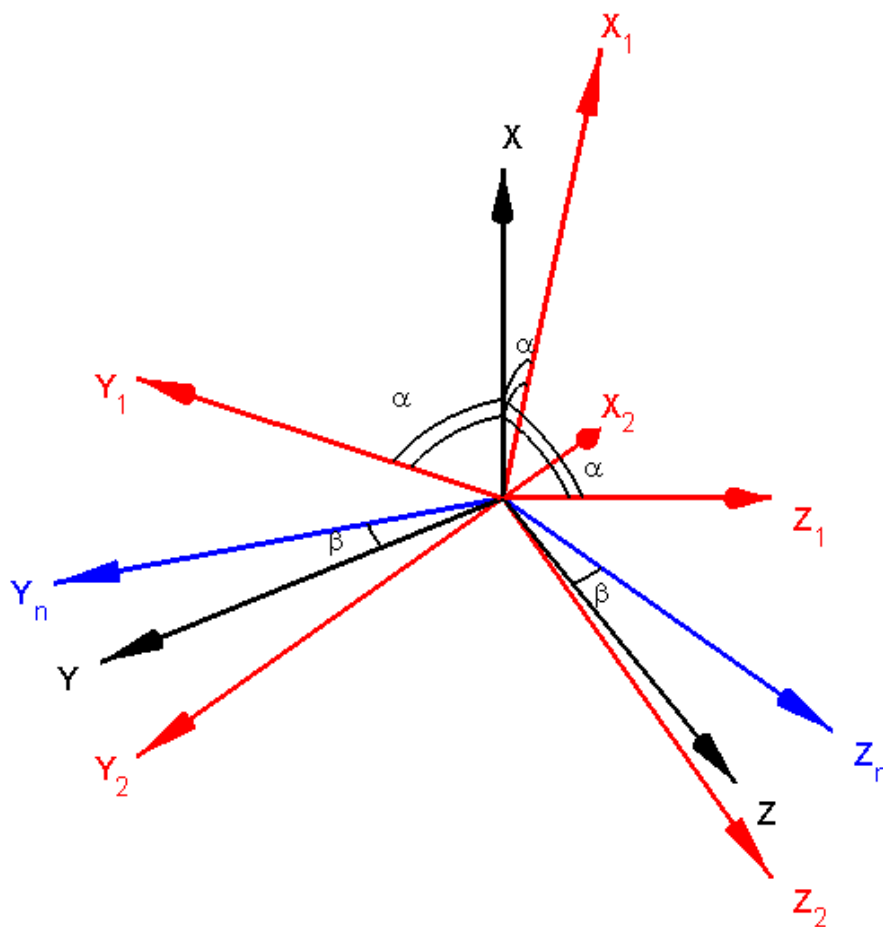


Рис. 1. Вимірювальна ($X_1 Y_1 Z_1 X_2 Y_2 Z_2$) та приладова (XYZ) системи координат, $\alpha = 54,7356^\circ$, $\beta = 15^\circ$

Матриця, що визначає орієнтацію осей чутливості сенсорів (вимірювальної системи координат) у приладовій системі координат (ПСК) має вигляд:

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

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

де $|Z| = |Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6|^T$ – дані із сенсорів, $|W| = |\omega_x, \omega_y, \omega_z|^T$ – вектор проєкцій кутової швидкості на осі приладовій системи координат.

За структурної надлишковості будь-які три строки матриці H лінійно незалежні і будь-яка трійка сенсорів може бути використана, як ненадлишковий вимірювач вектора для повного вирішення задач орієнтації та навігації.

Критерієм оптимальності орієнтації вимірювальних осей є мінімум суми дисперсій похибок оцінки вимірюваного вектора в ортогональній приладовій системі координат, який дорівнює сліду коваріаційної матриці похибок. Нормована коваріаційна матриця похибок обчислюється як $(H^T H)^{-1}$. За відсутності несправностей отримана матриця є діагональною, власні числа дорівнюють 0,5, число обумовленості дорівнює одиниці, слід дорівнює 1,5.

Серед існуючих методів визначення сенсора, що відмовив, найбільш ефективними є наступні:

- метод визначення сенсора, що відмовив, по мінімуму середніх значень модулів нев'язок;
- метод визначення сенсора, що відмовив, по мінімуму середніх значень квадратів нев'язок;
- метод визначення сенсора, що відмовив, по мінімуму середніх значень відхилення квадратів складових кутової швидкості.

Метод визначення сенсора, що відмовив, по мінімуму середніх значень модулів нев'язок

Ідентифікація сенсора, що відмовив, за цим методом реалізується шляхом пошуку мінімального з середніх значень модулів нев'язок та порівняння його із допуском, що залежить від вимірюваної кутової швидкості, яка використовується для обчислення нев'язки.

Розділ 3. Керування

Для обчислення модулів нев'язок із набору даних із шести сенсорів почергово відкидаємо по одному значенню. Поєднання із n сенсорів по m обчислюється за формулою

$$C_n^m = \frac{n!}{(n-m)!m!}. \quad (3)$$

За формулою (3) одержимо шість комбінацій по п'ять значень $C_6^5 = 6$.

Знаходимо шість середніх значень нев'язок $\delta Z_{i/5}$ за формулою:

$$\delta Z_{i/5} = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^6 |\delta Z_{i,j/4}|}{5}, \quad (4)$$

де i – номер сенсора, дані з якого почергово виключаються ($i = 1, 2, \dots, 6$); j – сенсор, по осі чутливості якого визначається нев'язка ($j = 1, 2, \dots, 6, j \neq i$).

Нев'язки – це різниця виміряного показання j -го сенсору Z_{i6} і його розрахованого значення $Z_{i,jp}$, обчислюється за формулою:

$$\delta Z_{i,j/4} = Z_{i6} - Z_{i,jp}. \quad (5)$$

Розраховане значення даних із j -го сенсора за виключеного i -го:

$$Z_{i,jp} = \begin{vmatrix} h_{j1} & h_{j2} & h_{j3} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} G_{i,j/4} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} Z_{i,j/4} \end{vmatrix}, \quad (6)$$

де $\begin{vmatrix} Z_{i,j/4} \end{vmatrix}$ – вектор-стовбець даних із чотирьох сенсорів; $\begin{vmatrix} G_{(i,j/4)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} H_{4-6}^T \cdot H_{4-6} \end{vmatrix}^{-1} H_{4-6}^T$, H_{4-6} – матриця (розмірність 4×3), одержана відкиданням i та j строк матриці $H_{6 \times 3}$ (1.1); $\begin{vmatrix} h_{j1} & h_{j2} & h_{j3} \end{vmatrix}$ – строчка матриці $H_{6 \times 3}$, що відповідає сенсору j . Кількість матриць $\begin{vmatrix} G_{i,j/4} \end{vmatrix}$ дорівнює кількості комбінацій (3) із шести сенсорів по чотири, що не повторюються $C_6^4 = 15$.

Вважаємо, що виключення найгіршого сенсора дасть мінімальне середнє значення модулів нев'язок, оскільки різниці модулів виміряного та розрахованого значення для найгіршого сенсора мають бути найбільшими. Тобто у разі обчислення середнього значення модулів нев'язок залишаються менші модулі різниць виміряного та розрахованого значень. Отже, визначаємо мінімальне із середніх значень модулів нев'язок:

$$\delta Z_{min} = \min(\delta Z_{i/5}). \quad (7)$$

Допуск знаходимо за формулою:

$$d = 3\sqrt{\sigma_{nc}^2 + \sigma_{\Delta k}^2 Z_{ip}^2}, \quad (8)$$

де σ_{nc} – середньоквадратичне значення нульового сигналу Z_{nc} ; $\sigma_{\Delta k}$ – середньоквадратичне значення похибки масштабного коефіцієнта сенсора.

Розраховане значення визначаємо за формулою:

$$Z_{ip} = |h_{j1} \quad h_{j2} \quad h_{j3}| |G_i| |Z_i|, \quad (9)$$

де i – номер сенсора, вихідні дані якого підраховуються для наступного порівняння; $|h_{j1} \quad h_{j2} \quad h_{j3}|$ – строчка матриці $H_{6 \times 3}$, що відповідає сенсору i ; $|G_i| = |H_{5_6}^T \cdot H_{5_6}|^{-1} H_{5_6}^T$, де H_{5_6} – матриця (розмірність 5×3), одержана відкиданням i -ої строки матриці $H_{6 \times 3}$ (1); $|Z_i|$ – вектор-стовбець даних з п'яти сенсорів (за виключенням i -го).

Далі проводимо порівняння модуля різниці виміряного показу сенсора, який вважаємо найгіршим Z_{ib} , та розрахованого значення Z_{ip} із знайденим допуском. Якщо виконується нерівність $|Z_{ib} - Z_{ip}| < d$, тобто найгірший сенсор i не виходить за допуск, вважаємо цей сенсор справним, в іншому випадку, коли найгірший сенсор виходить за допуск $|Z_{ib} - Z_{ip}| \geq d$, вважаємо його несправним.

Метод визначення сенсора, що відмовив, по мінімуму середніх значень квадратів нев'язок

Ідентифікація сенсора, що відмовив, за цим методом реалізується шляхом пошуку мінімального із середніх значень квадратів нев'язок та порівняння його із допуском, що залежить від вимірної кутової швидкості, яка використовується для обчислення нев'язки.

Для обчислення модулів нев'язок із набору даних із шести сенсорів почергово відкидаємо по одному значенню. Отримуємо шість комбінацій по п'ять значень ($C_6^5 = 6$). Знаходимо шість середніх значень нев'язок $\delta Z_{i/5}$ за формулою:

$$\delta Z_{i/5}^2 = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^6 (\delta Z_{i,j/4})^2}{5}, \quad (10)$$

Обчислення нев'язок проводяться як для методу пошуку сенсора, що відмовив, по мінімальному середньому значенню модулів нев'язок за формулами (4) та (5).

За цим методом вважається, що виключення найгіршого сенсора дасть мінімальне середнє значення квадратів нев'язок, оскільки різниці модулів виміряного та розрахованого значення для найгіршого сенсора

мають бути найбільшими. Визначаємо мінімальне із середніх значень квадратів нев'язок:

$$\delta Z_{\min}^2 = \min(\delta Z_{i/5}^2). \quad (11)$$

Допуск знаходимо як квадрат величини, знайденої за формулою (8). Розраховане значення визначаємо за формулою (9).

Далі проводимо порівняння квадрата різниці вимірюного показу сенсора, який вважаємо найгіршим Z_{ib} , та розрахованого значення Z_{ip} із знайденим допуском d^2 . Якщо виконується нерівність $(Z_{ib} - Z_{ip})^2 < d^2$, тобто найгірший сенсор i не виходить за допуск, вважаємо цей сенсор справним, в іншому випадку, коли найгірший сенсор виходить за допуск $(Z_{ib} - Z_{ip})^2 \geq d^2$, вважаємо його несправним.

Метод визначення сенсора, що відмовив, по мінімуму середніх значень відхилень квадратів складових кутової швидкості

За даним методом ідентифікація сенсора, що відмовив, відбувається шляхом визначення середнього відхилення квадратів різності векторів кутової швидкості, визначеного по даним із п'яти сенсорів методом найменших квадратів і векторів кутової швидкості, визначених по сполученням даних із чотирьох сенсорів, що входять до кожної п'ятірки сенсорів. Потім проводиться порівняння середніх значень квадратів різності кутових швидкостей із допуском. Почергово виключаємо із розрахунків кожний сенсор. Позначимо виключений сенсор через i . По даним п'яти сенсорів із шести методом найменших квадратів визначається вектор кутової швидкості:

$$W_{i/5} = |\omega_x, \omega_y, \omega_z|^T = |G_{i,j/5}| Z_{i/5}, \quad (12)$$

де $Z_{i/5}$ – вектор-стовбець даних із п'яти сенсорів (за виключенням i -го); $|G_{i,j/5}| = |H_{5-6}^T \cdot H_{5-6}|^{-1} H_{5-6}^T$, де H_{5-6} – матриця (розмірність 5×3), що отримана відкиданням строки матриці $H_{6 \times 3}$. Отримаємо шість таких векторів ($C_6^5 = 6$).

Далі розраховуємо відхилення:

$$\delta W_{i,j} = W_{i/5} - W_{i/4}, \quad (13)$$

де $W_{i/5}$ – вектор значень кутових швидкостей, визначених методом найменших квадратів по показам п'яти сенсорів, $W_{i/4}$ – вектор значень кутових швидкостей, визначених методом найменших квадратів по показам чотирьох сенсорів, $|G_{i,j/4}| = |H_{4-6}^T \cdot H_{4-6}|^{-1} H_{4-6}^T$, ($i = 1, 2, \dots, 6$, $j = 1, 2, \dots, 6$, $j \neq i$),

де $H_{4 \times 6}$ – матриця (розмірність 4×3), отримана відкиданням i та j строк матриці $H_{6 \times 3}$.

Матриця $W_{i,j} = |\omega_x, \omega_y, \omega_z|^T (W_{i/4} = |\omega_x, \omega_y, \omega_z|^T)$, визначена по даним із чотирьох сенсорів $Z_{i,j} (Z_{i/4})$. Для формування кожної групи відхилень використовуються сполучення показів чотирьох сенсорів із п'яти $C_5^4 = 5$. Для прикладу, матриця різниць δW розмірністю 3×5 , розрахована по формулі (13) у разі відкиданні першого сенсора матиме вигляд:

$$\delta W_{1,j} \in [W_{23456} - W_{2345}, W_{23456} - W_{3456}, W_{23456} - W_{2346}, W_{23456} - W_{2356}, W_{23456} - W_{2456}].$$

Визначаємо середнє значення квадратів різниць (14) по осях:

$$\sigma_{ix/5}^2 = \frac{\sum_j^5 (\delta W_{i,jx})^2}{5}, \quad \sigma_{iy/5}^2 = \frac{\sum_j^5 (\delta W_{i,jy})^2}{5}, \quad \sigma_{iz/5}^2 = \frac{\sum_j^5 (\delta W_{i,jz})^2}{5}. \quad (14)$$

Знаходимо середнє арифметичне значення для всіх осей (тобто визначили середнє значення 15 різниць):

$$\sigma_{i/5}^2 = \frac{\sigma_{ix/5}^2 + \sigma_{iy/5}^2 + \sigma_{iz/5}^2}{3}. \quad (15)$$

За цим методом вважається, що виключення найгіршого сенсора дасть мінімальне середнє значення квадратів відхилень кутових швидкостей. Визначаємо мінімальне з середніх значень :

$$\sigma_{\min}^2 = \min(\sigma_{i/5}^2). \quad (16)$$

Допуск знаходимо за формулою (12) та проводимо порівняння як описано у пункті (3).

Спрощений метод пошуку сенсорів, що відмовили, для зменшення обчислювальних операцій у разі проведення розрахунків у мікропроцесорі

Із метою зниження вимог до обчислювального пристрою – мікропроцесора, який обробляє інформацію, що надходить із сенсорів, можливо використовувати метод зі спрощенням обчислень, тобто меншою кількістю обчислювальних операцій.

Метод полягає у знаходженні модулів різниці вимірних показів сенсорів та розрахованих значень. Припускаємо, що найгірший сенсор дасть максимальне відхилення модуля різниці вимірюваного та розрахованого значень. Необхідно знайти допуск та порівняти з ним максимальне відхилення.

Знаходимо модулі різниць вимірюваного Z_{ie} та розрахованого значень Z_{ip} :

$$\delta Z_i = |Z_{iv} - Z_{ip}|, \quad (17)$$

де i – номер сенсора, дані з якого беруться для розрахунку ($i = 1, 2, \dots, 6$).

Розраховане значення даних із i -го сенсора обчислюється за формулою:

$$Z_{ip} = |h_{i1} \ h_{i2} \ h_{i3}| |G_i| |Z_i|, \quad (18)$$

де $|Z_i|$ – вектор-стовбець даних із сенсорів крім i -го;

$|h_{i1} \ h_{i2} \ h_{i3}|$ – i -та строка матриці $H_{6 \times 3}$.

$$|G_i| = |H_i^T \cdot H_i|^{-1} H_i^T,$$

де H_i – матриця $H_{6 \times 3}$ без i -ої строки.

Визначаємо максимальний модуль відхилення виміряного та розрахованого значення:

$$\delta Z_{\max} = \max(\delta Z_i). \quad (19)$$

Допуск d знаходимо за формулою (8).

Проводимо перевірку на знаходження в допуску сенсора, який вважаємо найгіршим: якщо виконується нерівність $\delta Z_i < d$, тобто найгірший сенсор i не виходить за допуск, вважаємо цей сенсор справним, в іншому випадку, коли відхилення найгіршого сенсора виходить за допуск $\delta Z_i \geq d$, вважаємо його несправним.

Математичне моделювання

Метою моделювання є оцінювання ефективності наведених методів визначення сенсора, що відмовив. Оцінювання включає порівняння ефективності визначення відмов за допомогою середніх значень модулів нев'язок, середніх значень квадратів нев'язок, середніх значень квадратів відхилень складових вектора кутової швидкості та середніх значень модулів різниць розрахованого та виміряного значень.

Для імітації відмов при розрахунку величин, за якими визначаємо найгірший сенсор, використовуємо значення даних з сенсорів, що визначаються за формулою:

$$[-9\sigma_k; -3\sigma_k] \cup [3\sigma_k; 9\sigma_k] Z_{pd} = Z_{p/H} (1 + \Delta k) + z_{nc},$$

де $Z_{p/H}$ – розраховане значення даних із сенсорів за відсутності відхилень нульового сигналу та масштабного коефіцієнту, Δk – похибка масштабного коефіцієнта, яку задаємо (максимально допустиме значення за відсутності відмови $\Delta k = 3\sigma_k$), z_{nc} – похибка нульового сигналу, яку задаємо (максимально допустиме значення за відсутності відмови $z_{nc} = 3\sigma_{nc}$). Тут σ_k та

$\sigma_{\text{нс}}$ – середньоквадратичне значення похибок масштабного коефіцієнта та нульового сигналу відповідно.

Для оцінки описаних методик виявлення сенсора, що відмовив, були проведені математичні розрахунки для діапазонів відхилень масштабного коефіцієнта та нульового сигналу несправного сенсора $[-9\sigma_k; -3\sigma_k] \cup [3\sigma_k; 9\sigma_k]$ та $[-9\sigma_{\text{нс}}; -3\sigma_{\text{нс}}] \cup [3\sigma_{\text{нс}}; 9\sigma_{\text{нс}}]$ відповідно.

Випадковим чином задавалися кутові швидкості та відхилення параметрів сенсорів так, щоб один із шести сенсорів виявився несправним, тобто похибки по масштабному коефіцієнту та нульовому сигналу перевищували σ_k та $\sigma_{\text{нс}}$ відповідно більш ніж у три рази. Значення кутових швидкостей у кожному експерименті задавалися як вектор із трьох елементів – випадкових рівномірно розподілених величина у діапазоні від -2 до 2 град/с.

Номера сенсора, що відмовляв, у кожному експерименті обиралися випадковим чином з рівномірним розподіленням серед цілих чисел від 1 до 6. Тобто несправним міг виявитись за рівною ймовірністю один із шести сенсорів.

Відхилення справних сенсорів задавалися як нормальна розподілені випадкові величини із математичним сподіванням $\mu = 0$ та середньоквадратичним відхиленням σ_k для масштабного коефіцієнта та $\sigma_{\text{нс}}$ для зміщення нульового сигналу. Якщо згенероване відхилення виходило за межі діапазону $[-3\sigma_k; 3\sigma_k]$ для масштабного коефіцієнта та $[-3\sigma_{\text{нс}}; 3\sigma_{\text{нс}}]$ для нульового сигналу, тоді цьому відхиленню присвоювалося граничне значення, тобто $\text{sign}(X_{\text{н1}}) \cdot 3\sigma_k$ и $\text{sign}(X_{\text{н2}}) \cdot 3\sigma_{\text{нс}}$ відповідно для відхилення масштабного коефіцієнта та нульового сигналу. Тут $X_{\text{н1}}$ та $X_{\text{н2}}$ – згенеровані нормально розподілені випадкові величини, які вийшли за діапазон $\pm 3\sigma$.

Відхилення для несправних сенсорів визначаємо по формулам

$$\Delta k = \text{sign}(X_{\text{p1}}) \cdot \left((D - 3) \cdot |X_{\text{p1}}| + 3 \right) \cdot \sigma_k,$$

$$z_{\text{нс}} = \text{sign}(X_{\text{p2}}) \cdot \left((D - 3) \cdot |X_{\text{p2}}| + 3 \right) \cdot \sigma_{\text{нс}},$$

де D – межа області значень параметрів несправних сенсорів (тобто значення відхилень масштабного коефіцієнта Δk та нульового сигналу $z_{\text{нс}}$ знаходяться у межах $[-D; -3]$ або $[3; D]$ помножених на відповідні середньоквадратичні значення похибок $D = 9$); X_{p1} та X_{p2} – рівномірно розподілені на інтервалі $[-1; 1]$ випадкові величини.

Знаходимо модулі різниць розрахованих значень показів сенсорів за відсутності відхилень нульового сигналу та масштабного коефіцієнту $Z_{\text{p/H}}$ та розрахованих значень показів сенсорів після введення відхилень Z_{pd} :

$$\Delta Z = |Z_{pd} - Z_{p/H}|. \quad (2)$$

З отриманого масиву ΔZ видаляємо значення, розраховані за показами несправного сенсора n . Для п'яти модулів різниць, визначених за показами сенсора, відхилення показів яких задані у межах допустимого діапазону (справних) $\Delta Z_{i \neq n}$, визначаємо математичне сподівання M_c та середньоквадратичне відхилення σ_c .

Таким чином генеруємо 1000 наборів значень векторів кутової швидкості та відхилень показів сенсорів, які задовольняють умові:

$$M_c - 3\sigma_c < \Delta Z_n < M_c + 3\sigma_c,$$

де ΔZ_n модуль різниці розрахованого значення показу несправного сенсора за відсутності відхилень нульового сигналу та масштабного коефіцієнту та розрахованого значення показу несправного сенсора після введення відхилень.

На рис 2, рис 3 показані розподілення відхилень параметрів Δk та $z_{нс}$ із сенсорів і відхилення даних сенсорів із заданими відхиленнями параметрів від розрахованих значень.

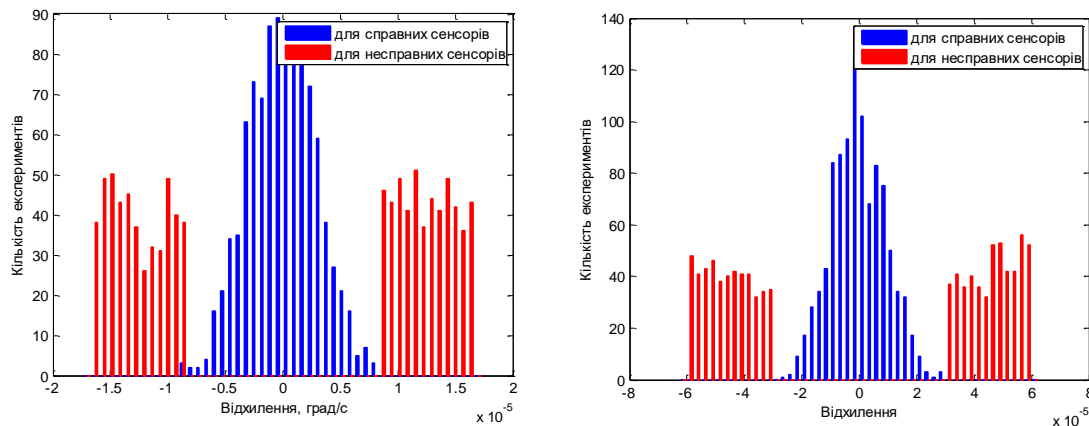


Рис. 2. Розподілення відхилень нульового сигналу (графік зліва) та масштабного коефіцієнта (графік справа)

Результати моделювання показали, що ймовірності виявлення відмов за допомогою методів ідентифікації відмов за мінімумом середніх значень модулів нев'язок, середніх значень квадратів нев'язок, за мінімумів середніх значень відхилень квадратів складових кутової швидкості, за максимумом модулів різниць виміряних та розрахованих значень кутової швидкості складають 80,3%, а невиявлених відмов –8%. Ймовірності помилково визначених відмов –7,3%. Наведені дані одержані в умовах змінних значень кутових швидкостей.

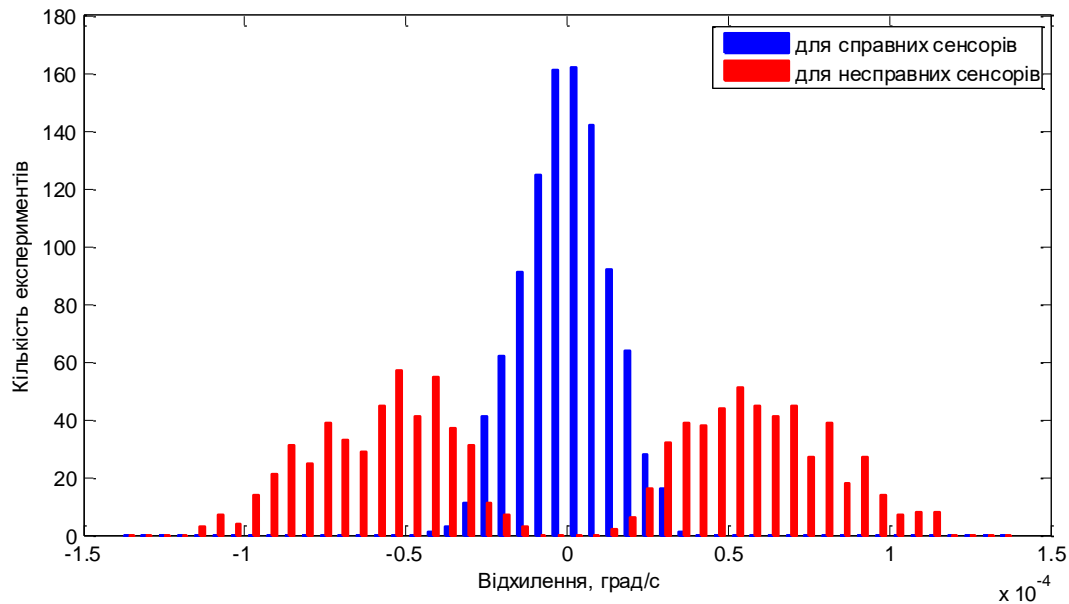


Рис. 3. Розподілення відхилень показів сенсорів із заданими похибками від розрахованих показів сенсорів

Метод ідентифікації відмов за максимумами модулів різниць виміряних та розрахованих значень кутової швидкості більш простий для реалізації за рахунок використання менш складного математичного апарату.

Висновки

Ймовірності виявлення сенсора, що відмовив, за допомогою методів ідентифікації відмов за мінімумом середніх значень модулів нев'язок, середніх значень квадратів нев'язок, за мінімумів середніх значень відхилень квадратів складових кутової швидкості, за максимумом модулів різниць виміряних та розрахованих значень кутової швидкості складає 80,3%.

Список використаної літератури

1. Епифанов А. Д. Избыточные системы управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1978, 144 с.
2. 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.
3. Водичева Л. В. Повышение надежности и точности бесплатформенного инерциального измерительного блока при избыточном количестве измерителей.

4. *Измайлов Е. А., Чесноков Г. И., Троицкий В. А. Гордасевич А. А.* Дешевая, малогабаритная инерциальная навигационная система повышенной надежности.
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, 2016 г. 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., Горєлов Є. М., Щоголева С. Г., Янкелевич Г. Є.* «Методи пошуку сенсора, що відмовив в безплатформенному 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.