

УДК 681.5.013

*Кривоносенко О. П., Сущенко О. А., Прокоф'єва І. Ю., Савченко О. В.*

## ДИНАМІЧНА АТЕСТАЦІЯ БОРТОВИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

*Розглянуто методи динамічної атестації основних бортових вимірювальних пристроїв, що дозволяє виконати експериментальну оцінку метрологічних характеристик гіроскопічних приладів в наземних умовах. Обґрунтовано необхідність створення спеціальних динамічних стендів для імітації кутових рухів об'єкта в умовах реального збуреного польоту. Представлено результати динамічної атестації блока датчиків кутових швидкостей у вигляді матриці передаточних функцій. Виконано оцінку спектральних щільностей шуму в конкретному режимі польоту.*

**Ключові слова:** динамічна атестація, динамічні характеристики датчиків, матриця передаточних функцій, матриця спектральних щільностей шуму.

**Висвітлення стану проблеми у загальному вигляді.** Ускладнення динамічних умов і необхідність автоматизації багатьох режимів польоту сучасних літальних апаратів (ЛА) зумовлюють жорсткі вимоги до точності бортових вимірювачів (БВ) в реальних умовах польотів. БВ повинні розглядатися, як складні багатовимірні та багатозв'язні динамічні системи, які знаходяться під дією стохастичних збурень. Точність БВ визначається не тільки конструкцією, а й характером режимів польотів.

Основними шляхами визначення моделей динаміки БВ і їх завад в реальних збурених режимах руху об'єктів є проведення етапів динамічної атестації БВ на спеціальних стендах, здатних з максимальною близькістю імітувати просторово стохастичні збуренні рухи об'єктів.

В сучасній авіації склалась наступна ситуація з атестацією БВ. Більшість БВ перед льотними випробуваннями і в експлуатації атестуються в статичних умовах. Лише окремі БВ іноді атестуються на спеціальних динамічних стендах в умовах, які не мають подібності зі збуреним реальним рухом ПС. Але саме для цих режимів польоту необхідно знати як динамічні характеристики самого вимірювача, так і його завад, щоб мати можливість оцінити та забезпечити необхідну точність БВ і систем керування. У статті представлено та проаналізовано деякі нові перспективні підходи до оптимізації різноманітних високоточних бортових вимірювальних засобів об'єктів, представлено підходи до створення випробувальних засобів, які відтворюють реальну динамічну обстановку польоту з найбільшою близькістю, а також методики динамічної атестації БВ на землі.

Метою статті є розробка методу випробувань при динамічній атестації основних датчиків параметрів польоту в умовах близьких до реальних експлуатаційних. Відомо, що дисперсія випадкових відхилень триступеневих гіроскопів в умовах, близьких до експлуатаційних (тобто при випадковому коливанні основи) на один порядок вище отриманої при стандартному тестовому сигналі. Це свідчить про важливість та актуальність наявності такого типу випробувальних стендів, які б на землі відтворювали динаміку польоту. Проведення атестації приладів при випадковому сигналі можливо тільки за наявністю спеціальної методики та технічних засобів (стендів – імітаторів рухів літака). Матриця спектральних щільностей випадкових коливань стенда-імітатора повинна бути

еквівалентною спектральним щільностям кутових рухів ЛА в кожному з випробувальних режимів польоту.

**Аналіз останніх досліджень.** На сьогодні більшість БВ перед льотними випробуваннями і в експлуатації атестуються в статичних умовах. Іноді БВ іноді атестуються на спеціальних динамічних стендах, які не враховують умов збуреного реального руху літака. Динамічна атестація бортових вимірювачів ЛА в наземних умовах повинна проводитися на стенді-імітаторі або стенді-генераторі просторових кутових рухів ЛА в заданих умовах польоту, забезпечуючи найточнішу близькість до реального польоту.

Наукову основу динамічної атестації складають сучасні алгоритми синтезу оптимальних систем стохастичної стабілізації, що висвітлені у працях [1, 2]. Застосування динамічної атестації для визначення динамічних характеристик бортових вимірювальних пристроїв, у тому числі в умовах, що наближаються до умов реальної експлуатації, надано у працях [3, 4]. Представлену статтю присвячено подальшому розвитку методів динамічної атестації.

**Динамічна атестація.** Для проведення динамічної атестації бортових первинних вимірювачів використовується стенд-генератор просторових стохастичних кутових рухів. Стенд повинен створювати випадкові кутові тривимірні коливання, статистичні характеристики яких задаються близькими до статистичних характеристик еволюцій ЛА в реальному польоті. Динамічний експлуатаційний режим польоту, відтворений на стенді, представляє собою багатовимірний стаціонарний випадковий процес, який характеризується матрицею спектральних щільностей вхідних сигналів (кутових коливань ЛА). Зовнішній вигляд стенда-генератора представлено на рис. 1.

Динамічна атестація основних БВ ЛА в наземних умовах являє собою визначення динамічних моделей як самих вимірювачів (передаточних функцій), так і завад (спектральних і взаємно-спектральних щільностей), що супроводжують вимірювання, в процесі наземних випробувань на засобах відтворення динамічних умов польоту. Пропонується можливість проведення таких випробувань в усіх режимах польоту, отримання моделей вимірювачів та їхніх завад, систематизація і сертифікація результатів динамічної атестації.



Рис. 1. Загальний вигляд стенда – генератора

Структурну схему лабораторного стенда для проведення динамічної атестації гіроскопічних приладів приведено на рис. 2. Динамічний стенд, призначений для відтворення експлуатаційних умов, що діють на прилад в польоті, складається з платформи у карданному підвісі, системи управління, блока порівняння та формуючого фільтра.

Метрологічне забезпечення стенда-генератора для визначення динамічних характеристик БВ повинно включати засоби відтворення реальних умов польоту. Воно також повинно включати засоби оцінки близькості динаміки відтворюваного режиму випробувань до

експлуатаційного.

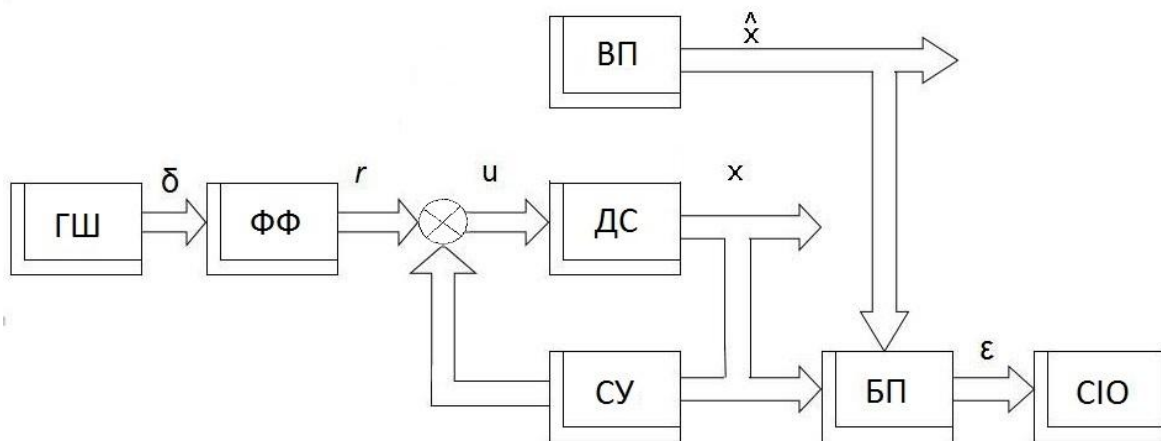


Рис. 2. Структурна схема лабораторної установки:

ГШ – генератор шумів; ФФ – формуючий фільтр; ВП – вимірювальний пристрій; СУ – система управління; ДС – динамічний стенд; БП – блок порівняння; СІО – система інформаційної обробки

В якості нормуючих метрологічних характеристик використовуються:

- спектральні щільності генераторів шумів, які є джерелом тестових сигналів;
- частотні характеристики механічної частини багатовимірної динамічної системи.

Динамічна атестація приладів в лабораторних умовах, наближених до експлуатаційних, проводилась на динамічному стенді, який відтворює умови роботи гіроскопічних приладів, які наближаються до експлуатаційних умов. При цьому виконувалося дослідження блоку датчиків кутової швидкості (БДКШ), призначених для функціонування у складі безплатформної інерціальної системи (БІНС).

Використана конструкція випробувального стенду дозволяє здійснити імітацію кутових рухів ЛА. Досліджуваний БДКШ складається з трьох датчиків, чутливі вісі якого орієнтовані в трьох взаємно-перпендикулярних напрямках. БДКШ закріплюється в центрі динамічної платформи стенда, по осях якого виконується обертання платформи по курсу, крену та тангажу. Вектор кутових швидкостей – вхідний сигнал БДКШ, який є необхідним для вирішення задачі ідентифікації, визначається розрахунковим шляхом.

Платформа з датчиками, встановлена в карданному підвісі і здійснює кутові рухи відносно трьох взаємно-перпендикулярних осей. Вона приводиться до руху трьома реверсивними двигунами, що встановлюються по одному на кожній осі. Вихідний сигнал платформи є вектором кутів повороту  $\theta \approx (\psi, \nu, \gamma)$ . Кутові рухи стенда за допомогою потенціометричних перетворювачів кута перетворюються на електричні сигнали постійного струму, які поступають в систему управління. Глибина жорсткого зворотного зв'язку була підібрана так, щоб забезпечити потрібну смугу пропускання частот для передачі програмних сигналів, які визначають рух платформи стенду. Програмний сигнал управління стендом складається з широкосмугового шумового сигналу ("білий шум") та після пропускання його через формуючі фільтри подається в ПЕОМ. Передаточні функції формуючих фільтрів визначаються заданими динамічними характеристиками. Генератор шуму і формуючі фільтри реалізовані у вигляді відповідних комп'ютерних програм. Для забезпечення можливості калібрування каналів стенда додатково використовується генератор стандартних сигналів.

Швидкість руху блоку датчиків, закріплених на платформі стенду, в горизонтальній системі координат з центром  $O$  в точці перетину осей трьох платформ визначається співвідношенням

$$\bar{V} = \bar{V}_0 + \bar{\omega} \rho.$$

Враховуючи кути повороту, програмний вектор кутових швидкостей в місці розташування БДКШ визначається у такий спосіб:

$$\bar{\omega}_p = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma + \psi \sin \vartheta \\ \psi \cos \vartheta \cos \gamma + \dot{\vartheta} \sin \gamma \\ \dot{\vartheta} \cos \gamma - \psi \cos \vartheta \sin \gamma \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \dot{\gamma} \\ \dot{\psi} \\ \dot{\vartheta} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де  $\gamma, \psi, \vartheta$  — кути повороту платформ.

Слід зазначити, що у виразі (1) не береться до уваги мале зміщення точки установки блоку датчиків відносно точки перетину осей карданного підвісу платформи. Таким чином, в першому наближенні можна вважати, що програмні сигнали кутових швидкостей руху блока дорівнюють похідним кутових рухів.

Структурну схему моделі блоку датчиків представлено на рис. 3 [5].

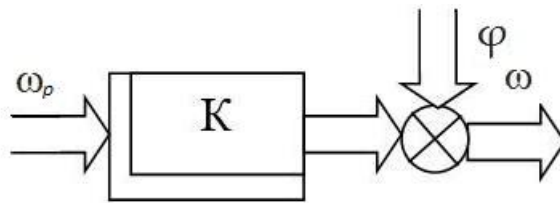


Рис. 3. Структурна схема моделі блоку датчиків:

$\omega_p$  – вектор розрахункової кутової швидкості;  $\omega$  – вектор вихідних сигналів;

$\varphi$  – вектор шумів

**Результати експериментальних досліджень.** Внаслідок обробки векторів вихідних сигналів  $\omega_i$  і розрахункових програмних кутових швидкостей  $\omega_p$  БДКШ за алгоритмом [5] було отримано матриці спектральних і взаємно-спектральних щільностей вхідних і вихідних векторів сигналів кутового руху. Матриця вхідних сигналів була створена на підставі експериментальних даних. Отримані матриці спектральних і взаємно-спектральних щільностей після апроксимації можуть бути представлені у наступному вигляді

$$\begin{bmatrix} \left| \frac{0,49 \cdot 10^{-3} (2,32S + 1)}{2,07S^2 + 1,73S + 1} \right|^2 & \frac{10^{-3} (-2,32S + 1)(0,673S + 1) \cdot 0,116}{(2,07S^2 - 1,73S + 1)(1,42S^2 + 1,92S + 1)} & \frac{0,0361(4,11S + 1)(-2,32S + 1) \cdot 10^{-3}}{(0,63S^2 + 1,27S + 1)(2,07S^2 - 1,73S + 1)} \\ \frac{10^{-3} (2,32S + 1)(-0,673S + 1) \cdot 0,116}{(2,07S^2 + 1,73S + 1)(1,42S^2 - 1,92S + 1)} & \left| \frac{10^{-3} (0,673S + 1)}{1,42S^2 + 1,92S + 1} \right|^2 & \frac{0,038(4,11S + 1)(-0,673S + 1) \cdot 10^{-3}}{(0,63S^2 + 1,27S + 1)(1,42S^2 - 1,92S + 1)} \\ \frac{0,0361(-4,11S + 1)(2,32S + 1) \cdot 10^{-3}}{(0,63S^2 - 1,27S + 1)(2,07S^2 + 1,73S + 1)} & \frac{0,038(-4,11S + 1)(0,673S + 1) \cdot 10^{-3}}{(0,63S^2 - 1,27S + 1)(1,42S^2 + 1,92S + 1)} & \left| \frac{0,2 \cdot (4,11S + 1) 10^{-3}}{1,42S^2 + 1,92S + 1} \right|^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Частотні характеристики БДКШ показано на рис. 4. Графіки елементів матриць спектральних і взаємно-спектральних щільностей завод приведені на рис. 5.

Отримана інформація являє собою дані, необхідні для структурної ідентифікації БВ та його шумів. Для визначення моделей динаміки БВ та вимірювальних шумів було використано модернізований алгоритм структурної ідентифікації [6]. Алгоритм, заснований на процедурі Вінера-Колмогорова, дозволяє визначити модель пристрою за допомогою мінімізації функціонала якості. Матриця передаточних функцій визначається після підстановки початкових даних у вищезгаданий алгоритм структурної ідентифікації. Результуюча матриця передаточних функцій вимірювача набуває вигляду

$$K_{\omega} = K_0 \begin{bmatrix} 1,0 & 0,06 & 0,07 \\ 0,06 & 1,0 & 0,09 \\ 0,07 & 0,09 & 1,0 \end{bmatrix} \cdot e^{-\tau_0 S}, \quad (3)$$

де  $K_0$  – коефіцієнт передачі;  $\tau_0$  – час затримки.

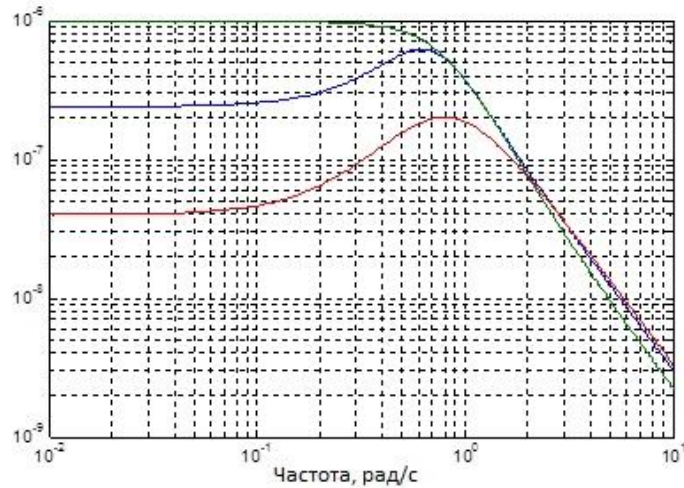


Рис. 4. Спектральна щільність вхідних сигналів

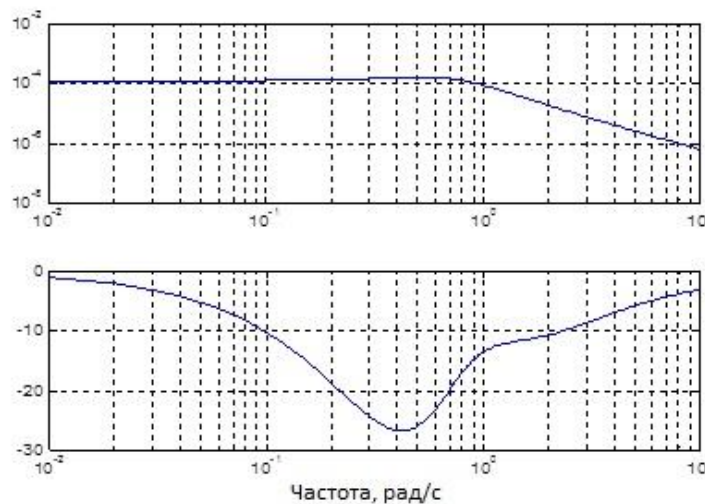


Рис. 5. Взаємно-спектральні щільності вхідних сигналів

Беручи до уваги перехресні зв'язки, матрицю передаточних функцій атестованого пристрою (3) можна представити у вигляді:

$$K_w = \begin{bmatrix} 1,2K_1 & 0,01\sqrt{K_1K_2} & 0,02\sqrt{K_1K_3} \\ 0,05\sqrt{K_1K_2} & 0,8K_2 & 0,04\sqrt{K_1K_3} \\ 0,03\sqrt{K_1K_3} & 0,05\sqrt{K_2K_3} & 0,3K_3 \end{bmatrix} \cdot e^{-\tau_0 S}, \quad (4)$$

де  $K_i$  – коефіцієнти передачі вимірювальних каналів.

Матриці спектральних щільностей шумів на виході блока, що атестується, були визначені у такий спосіб

$$S_{\psi_0\psi_0}^{\omega} = 10^{-5} \begin{bmatrix} 1 & \frac{0,4}{|\tau S + 1|^2} & \frac{0,1}{|\tau S + 1|^2} \\ \frac{0,4}{|\tau S + 1|^2} & 1 & \frac{0,1}{|\tau S + 1|^2} \\ \frac{0,1}{|\tau S + 1|^2} & \frac{0,1}{|\tau S + 1|^2} & 2 \end{bmatrix} \cdot e^{-\tau_0 S} \quad (5)$$

Тут  $\tau_0$  є стала часу, зумовлена особливостями каналів передачі.

Графік взаємної спектральної щільності вимірювального шуму представлено на рис. 6.

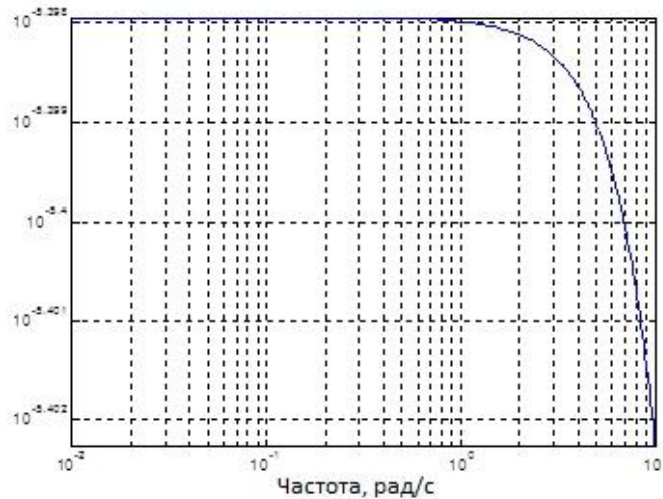


Рис. 6. Взаємно-спектральна щільність вимірювального шуму

Наочними результатами експериментальних досліджень, після апроксимації аналітичними виразами графічної інформації, є матриці передаточних функцій (конкретні цифрові значення, збережені для можливості оцінок величини перехресних зв'язків в моделях).

**Висновки.** Отримані результати динамічної атестації необхідні для розв'язання актуальної та складної науково-технічної проблеми, яка полягає в оптимальному оцінюванні стану БВ та їх ідентифікації, аналізі та синтезі систем управління польотом та корекції систем управління під час їх функціонування.

Метрологічне забезпечення стенда – генератора для визначення динамічних характеристик випробуваних БВ має включати засоби для моделювання умов польоту, наближених до реальних. Динамічні характеристики БВ та вимірювальні шуми мають бути визначені до їх встановлення на ЛА та подальшої експлуатації.

Визначення характеристик шумів гіроскопічних пристроїв в специфічних режимах роботи необхідне для точного визначення місцеположення та орієнтації ЛА в інерціальному просторі. Представлено результати експериментальних досліджень, а саме матриця передаточних функцій БВ, а також матриця взаємно-спектральних щільностей вимірювального шуму, які було отримано на підставі апроксимації графічної інформації аналітичними виразами.

Отримані результати можуть бути корисними для модернізації БВ, що дозволить підвищити точність вимірювання стохастичних параметрів руху ЛА.

Аналізуючи отримані моделі динаміки, можна зробити наступні висновки:

- 1) атестований БДКШ в досліджуваних режимах має істотні перехресні зв'язки між каналами вимірювання;
- 2) компоненти вектора вихідних завад БДКШ сильно корельовані між собою;
- 3) при використанні високоточних алгоритмів обробки інформації БНС необхідно враховувати перехресні зв'язки в моделях динаміки блоку.

---

---

Таким чином, використання отриманих результатів дозволяє підвищити точність, а значить і якість, вимірюваних стохастичних параметрів руху ЛА.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Блохин Л.Н. Оптимальные системы стабилизации. – К: Техніка, 1982. – 143 с.
2. Блохін Л.М., Буриченко М.Ю. Статистична динаміка систем управління. – К: НАУ. 2003. – 208 с .
3. Кривоносенко О.П., Савінов О.М., Сущенко О.А. Методологія та результати визначення динамічних характеристик кутового збуреного руху літального апарата. Вісник Національного авіаційного. – №. 4. – 2002. – С. 76 – 80.
4. Блохин Л.Н., Держак С.В., Сущенко О.А. Динамическая аттестация бортовых измерителей в условиях приближенных к эксплуатационным. Техническая электродинамика. Спец. вып. «Проблемы современной электротехники». – ч. 9. – 2002. – С. 59 – 62.
5. Blokhin, M. Yu. Burichenko, A.P. Krivonosenko. Identification of models of dynamics of blocks of sensitive elements of SINS. IEEE Journal of Automation and Information Sciences, vol. 30, no. 6, 1998, P. 64-71.
6. L.N. Blokhin, A.P. Krivonosenko. Problem and algorithms of structural identification of unstable vehicles. IEEE 2<sup>nd</sup> International Conference Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Development, October 15–17, 2013. P. 173-175, Kyiv, Ukraine.

### **О.П. Кривоносенко, О.А. Сущенко, І.Ю. Прокоф'єва, Савченко О.В. ДИНАМІЧНА АТЕСТАЦІЯ БОРТОВИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ**

*Рассмотрены методы динамической аттестации основных бортовых измерительных устройств, позволяющие экспериментально оценить метрологические характеристики гироскопических приборов в наземных условиях. Обоснована необходимость создания специальных динамических стендов для имитации угловых движений объекта в условиях реального возмущенного полета. Представлены результаты динамической аттестации блока датчиков угловых скоростей в виде его матрицы передаточных функций. Также оценены спектральные плотности шума в конкретном режиме полета.*

**Ключевые слова:** динамическая аттестация, динамические характеристики датчиков, матрица передаточных функций, матрица спектральных плотностей шума.

### **O.Krivonosenko, O.Sushchenko, I.Prokofieva, O. Savchenko DYNAMIC CERTIFICATION OF AIRBORNE MEASURING DEVICES**

*Methods of dynamic attestation of basic airborne measuring instruments, which provide experimental researches of metrological characteristics of gyro devices in the ground conditions, are considered. The necessity to create special dynamic benches, which simulate an angular motion in conditions of the real flight disturbed modes, is grounded. The results of the dynamic attestation of the unit of angular rate sensors are represented. The matrix of transfer functions of the unit of angular rate sensors is obtained. The spectral densities of the noise in the concrete modes of the flight are estimated.*

**Key words:** dynamic attestation, dynamic characteristics of sensors, matrix of transfer functions, matrix of the noise spectral densities.