

СЕКЦІЯ 1
КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ
НАВІГАЦІЇ І КЕРУВАННЯ

УДК 531.383

ОСОБЛИВОСТІ ПРОЕКТУВАННЯ ГІРОСТАБІЛІЗАТОРА
З МІКРОМЕХАНІЧНИМ ГІРОСКОПОМ

Нестеренко О.І.

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна

E-mail: oleg.i.nesterenko@gmail.com

Розглянута задача проектування малогабаритного гіроскопічного стабілізатора оптичного пристрою на борту безпілотного літального апарату.

Створення малогабаритного гіростабілізатора призводить до необхідності вибору мініатюрних вимірювальних елементів і виконуючих пристроїв. Останнє десятиліття велика увага привернута до мікромеханічних гіроскопів (ММГ) які мають мініатюрні розміри, і у той же час швидко прогресують у точності вимірювань.

У даній роботі розглянуто особливості проектування малогабаритного гіростабілізатора з використанням ММГ у якості вимірювального елемента.

Хоча за принципом своєї роботи всі ММГ є датчиками кутової швидкості (ДКШ), однак багато з них мають можливість видавати як кутову швидкість, так і приріст кута повороту (як вільні гіроскопи). В останньому випадку це означає лише інтегрування вимірюваної кутової швидкості у процесорі ММГ. Тому в даній роботі розглянуто використання ММГ саме як ДКШ, а необхідне інтегрування його даних реалізується у регуляторах гіростабілізатора.

У роботі розглянуто приклад проектування гіростабілізатора з ММГ і наведені результати моделювання його роботи. При цьому відмічені наступні особливості використання мікромеханічного ДКШ в гіростабілізаторі:

1. Як відомо, особливість використання ДКШ у якості чутливого елемента гіростабілізатора, призводить до необхідності проектування астатичного регулятора, а це означає інтегрування вихідного сигналу ДКШ.

2. Великий шум вимірювання мікромеханічного ДКШ при інтегруванні призводить до відносно великого випадкового блукання лінії візування оптичного пристрою.

3. Покращення точності стабілізації за рахунок підвищення порядку астатизму регулятора до другого і вище небажане через значну нестабільність лінії візування, викликану подвійним інтегруванням шуму вимірювання ДКШ.

4. Більшість мікромеханічних ДКШ містять вбудовані фільтри для зменшення рівня вихідного шуму. При проектуванні гіростабілізатора необхідно уникати ДКШ, які використовують вбудований фільтр з кінцевою

імпульсною характеристикою (КІХ) оскільки такий фільтр вносить надто велике запізнення у контур стабілізації у порівнянні з фільтром з безкінечною імпульсною характеристикою (БІХ), що значно погіршує стійкість замкненого контуру стабілізації.

Ключові слова: гіростабілізатор, мікромеханічний гіроскоп, датчик кутової швидкості

УДК 531.383

РЕДУКОВАНИЙ СПОСТЕРЕЖУВАЧ ДЛЯ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ РУХУ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ ГІРОТЕОДОЛІТУ В ГІРОСТАБІЛІЗОВАНІЙ ПЛОЩИНІ

¹⁾Боярчук А.О., ²⁾Мураховський С.А.

¹⁾Казенне підприємство спеціального приладобудування «Арсенал», Київ, Україна,

²⁾Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна
E-mail: s.murakhovsky@kpi.ua

Перші спроби впровадження гіроскопічних засобів наземного орієнтування були здійснені ще на початку ХХ ст., проте вони виявились невдалими внаслідок недостатнього технологічного рівня того часу. Впродовж другої половини століття гіроскопічні засоби наземного орієнтування вдосконалювались з метою покращення їх експлуатаційних характеристик, перш за все підвищення точності визначення азимуту та зменшення часу, необхідного для вимірювання.

Сучасні досягнення мікропроцесорної техніки та цифрової електроніки дозволили значно зменшити масо-габаритні параметри гіротеодолітів (ГТ). При цьому точність визначення азимутів такими приладами досягає 10-15 кутових секунд. Проте відомо, що значний негативний вплив на характеристики гіротеодолітів мають лінійні поступальні вібрації основи. В декількох останніх роботах було запропоновано шляхи зменшення впливу вібрації на точність ГТ за допомогою методів алгоритмічної компенсації вібраційної похибки.

В даній роботі запропоновано синтез редукованого спостережувача для оцінки параметрів руху чутливого елемента ГТ, а також розглянуто можливості забезпечення інваріантності спостережувача до зовнішніх збурень.

Математична модель руху ЧЕ гіротеодоліта в гіростабілізованій площині YOZ може бути представлена у вигляді [6]:

$$\begin{cases} J_z \ddot{\alpha} + H \dot{\beta} + H \omega_3 \cos \varphi_g \alpha + C_\alpha \alpha = M_K \\ (J_x + ml^2) \ddot{\beta} + mgl\beta - H \dot{\alpha} + ml \dot{y} = 0 \\ ml \ddot{\beta} + m \ddot{y} + C_y y = 0 \end{cases},$$

де α, β – кути повороту чутливого елемента відносно корпусу приладу; y – зміщення точки підвісу чутливого елемента відносно корпусу приладу в напрямку осі Y ; M_K – компенсаційний момент, який формується системою керування; J_x, J_z – осьові моменти інерції чутливого елемента; H – кінетичний момент гіроскопа; m – маса чутливого елемента; l – зміщення центру мас ЧЕ відносно точки підвісу; ω_3 – кутова швидкість обертання Землі; φ_g – географічна широта місця установки приладу; C_α – кутова жорсткість підвісу відносно осі Z ; C_y – лінійна жорсткість підвісу відносно осі Y .

Матриці стану та передачі збурень, що відповідають вищезазначеній системі рівнянь мають вигляд:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_\alpha}{J_z} & 0 & 0 & -\frac{H}{J_z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H}{J_x} & -\frac{mgl}{J_x} & 0 & \frac{C_y l}{J_x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{Hl}{J_x} & \frac{mgl^2}{J_x} & 0 & -\frac{C_y}{m} - \frac{C_y l^2}{J_x} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \frac{J_z}{J_x} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Будемо вважати, що вимірюються дві змінні стану – кут повороту α та кутова швидкість $\dot{\alpha}$ чутливого елемента ГТ в азимуті, тоді матриця вимірювання:

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Відповідно, матриці стану та передачі збурень можна розбити на блоки:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \mathbf{A}_{12} \\ \mathbf{A}_{21} & \mathbf{A}_{22} \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_1 \\ \mathbf{B}_2 \end{bmatrix}.$$

Тоді рівняння спостережувача можна представити у вигляді:

$$\dot{\hat{\mathbf{X}}}_H = (\mathbf{A}_{22} - \mathbf{L}\mathbf{A}_{12})\hat{\mathbf{X}}_H + \mathbf{L}(\dot{\mathbf{Y}} - \mathbf{A}_{11}\mathbf{Y} - \mathbf{B}_1\mathbf{U}) + \mathbf{A}_{21}\mathbf{Y} + \mathbf{B}_2\mathbf{U}$$

де $\mathbf{L} = [l_1 \ l_2 \ l_3 \ l_4]^T$ - матриця коефіцієнтів спостережувача, яку необхідно визначити виходячи з умов стійкості та інваріантності до зовнішніх збурень.

На основі отриманої математичної моделі було проведено моделювання динаміки роботи редукованого спостережувача при наявності зовнішніх поступальних вібраційних збурень. Результати моделювання показали, що розроблений спостережувач забезпечує визначення оцінок параметрів руху чутливого елемента ГТ, які не піддаються прямому вимірюванню. При цьому також мінімізується похибка оцінювання, що виникає внаслідок зовнішніх вібраційних збурень.

В подальших дослідженнях планується побудова системи керування рухом ЧЕ в азимуті, яка не піддається впливу вібраційних збурень, наприклад на основі H_∞ - критерію.

Ключові слова: гіротеодолит, спостережувач, вібраційна похибка.

УДК 681.518.22

ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДУ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МІКРОМЕХАНІЧНИХ ДАТЧИКІВ

Заморський О.В.

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна

E-mail: zax2020@ukr.net

Одновісні, двовісні і трьохвісні стенди з обертовою платформою є основним технологічним обладнанням при дослідженні, калібруванні і випробовуванні гіроскопів і акселерометрів та інерціальних систем навігації на їх основі. Точні чутливі елементи і системи випробовуються на прецизійних стендах достатньо високої вартості. Стандартні характеристики таких стендів: статичні параметри – стабільність кутової швидкості 0,001% в діапазоні $\pm 3000^\circ/\text{с}$ з дискретністю завдання швидкості 0,001 $^\circ/\text{с}$, похибка кутового позиціонування менше 15"; динамічний параметр – максимальне прискорення 40 $^\circ/\text{с}^2$ без навантаження на платформу; механічний параметр – биття менше 15". Такі характеристики забезпечує «бюджетна» одновісна обертова платформа серії AC1120S фірми Acutronic. Діаметр платформи AC1120S – 250 мм, навантаження – до 20 кг.

В вітчизняних учбових лабораторіях використовуються одновісні обертові платформи типу МПУ-1 і інші. Всі ці стенди є електромеханічними з розімкнутою схемою керування привідним двигуном і з механічною редукторною схемою передачі. В МПУ обертання привідного валу синхронного гістерезисного двигуна Г-31А (число обертів 3000 об/хв, крутний момент 1,275 мНм) передається на вал платформи через муфту, черв'ячний редуктор (передатне відношення 150:1) і фрикційний варіатор (передатне відношення від 0,8:1 до 4000:1). Таким чином, забезпечується діапазон кутових швидкостей платформи від 0,03 $^\circ/\text{с}$ до 150 $^\circ/\text{с}$. Статичні характеристики платформи в діапазоні змінюються нерівномірно, похибки зростають при зменшенні частоти обертів – нестабільність кутової швидкості від 1% до 2%, різниця між кутовими швидкостями при реверсі від 1% до 1,5%, похибки встановлення кутової швидкості ручним способом по лімбу від 2% до 5%. Особливістю фрикційного варіатора МПУ є зростання інтенсивності зношення його елементів при малих обертах платформи. Завдання і визначення кутових позицій і динамічних параметрів платформи не забезпечуються. Визначення кутової позиції можливо

лише візуально по градусній шкалі. Діаметр платформи – 220 мм, розміри МПУ – 405×275×290 мм, навантаження – до 8 кг.

Ціль роботи – розрахунок і практична реалізація лабораторного стенду – компактного пристрою з одновісною обертовою платформою та відповідним електромеханічним, електротехнічним і апаратно-програмним (інформаційним) забезпеченням для дослідження і визначення статичних і динамічних характеристик мікромеханічних датчиків – гіроскопів і акселерометрів, як датчиків кутової швидкості систем орієнтації і стабілізації рухомих об'єктів.

Сучасний ринок пропонує широкий спектр мікромеханічних датчиків достатньо низької вартості, ціна модуля з трьохвісним мікромеханічним гіроскопом і з вихідним послідовним інтерфейсом може бути менше 10 USD. Основні стандартні статичні характеристики таких бюджетних мікромеханічних гіроскопів, які визначають необхідні статичні параметри обертової платформи – діапазон $\pm 2000^\circ/\text{с}$, роздільна здатність 14,375 LSB/($^\circ/\text{с}$), чутливість 0,07 $^\circ/\text{с}$ (трьохвісний гіроскоп ITG-3205 фірми InvenSense TDK Corporation). Інші стандартні значення, відповідно: $\pm 1000^\circ/\text{с}$, 32,8 LSB/($^\circ/\text{с}$), 0,03 $^\circ/\text{с}$; $\pm 500^\circ/\text{с}$, 64,5 LSB/($^\circ/\text{с}$), 0,015 $^\circ/\text{с}$; $\pm 250^\circ/\text{с}$, 131 LSB/($^\circ/\text{с}$), 0,008 $^\circ/\text{с}$ (гіроскоп ITG-1010).

В лабораторному стенді статичний діапазон кутових швидкостей обертової платформи забезпечується електромеханічною передачею з гнучкою структурною схемою. При цьому, для вибраної схеми передатне число є постійним, а статичні і динамічні характеристики платформи регулюються через якірне керування виконавчим двигуном постійного струму по замкнутій схемі. Стаціонарними елементами передачі є вихідний конічний вал платформи (половина кута конуса – 4,5 $^\circ$, момент тертя ковзання – до 4 мН м без мастила) і черв'ячний редуктор (число зубців колеса – 64, число заходів черв'яка – 2, передатне відношення – 32:1), які пов'язані між собою через вал черв'ячного колеса компенсаційною муфтою. Інші елементи передачі є взаємно замінними. Для цього на корпусі черв'ячного редуктора є посадкові місця для приводів, які забезпечують міжосьові відстані 9,6 мм і 12 мм між вихідним валом привода і вхідним валом черв'яка, що дає змогу реалізувати одноступеневу зубчасту передачу з передатними відношеннями 3:1 (модуль 0,2 мм, число зубців 12 і 36) або 2:1 (0,2 мм, 20 і 40) відповідно. Таким чином, можливе мінімальне передатне відношення від валу двигуна до валу обертової платформи – 64:1. Для реалізації приводу з високим передатним відношенням застосовуються стандартні редуктори типу РЦБ. При застосуванні редуктора РЦБ-і128 (передатне відношення 128:1) можливе максимальне передатне відношення 12288:1. Для регулювання статичних і динамічних характеристик обертової платформи використовується двигун постійного струму фірми Mabuchi Motor з якірним керуванням, тип якого вибирається з широкої лінійки в залежності від структурної схеми електромеханічної передачі так, щоб забезпечити максимальну ефективність двигуна.

Розміри лабораторного стенду: діаметр – 145 мм; висота – 150 мм. Діаметр обертової платформи – 100 мм. Параметри платформи (момент інерції біля $180 \cdot 10^{-6} \text{ кг м}^2$) мають найбільший вплив на динамічні властивості стенду. Для підвищення динамічних властивостей стенду можливе розміщення датчиків безпосередньо на площині (біля $7,5 \text{ см}^2$) кінцевого валу (момент інерції біля $20 \cdot 10^{-6} \text{ кг м}^2$) без використання платформи.

Ключові слова: мікромеханічні датчики, гіроскопи, акселерометри, обертова платформа, лабораторний стенд, електромеханічні засоби автоматики.

УДК 681.200

АНАЛІЗ ШВИДКОДІЇ АЛГОРИТМІВ БЕЗПЛАТФОРМЕННИХ ІНЕРЦІАЛЬНИХ СИСТЕМ ОРІЄНТАЦІЇ

Сапегін О.М., Яковенко В.А.

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна

E-mail: sapegin_a@ukr.net

Безплатформенні інерціальні навігаційні системи (БІНС) є основою навігаційного забезпечення широкого призначення. БІНС є універсальним джерелом інформації про поточну орієнтацію і розташування рухомого об'єкта.

Для роботи БІНС необхідно створити математичний апарат, який дозволяє описати орієнтацію системи координат (СК), пов'язаної з об'єктом щодо опорної СК. В рамках БІНС цю задачу виконує підсистема, яку називають безплатформенною інерційною системою орієнтації (БІСО).

В ході своєї роботи БІСО розраховує кінематичні параметри орієнтації, пов'язаної СК. Це можуть бути кути орієнтації Ейлера-Крилова, матриця направляючих косинусів (рівняння Пуассона), кватерніон повороту, вектор орієнтації Ейлера кінцевого повороту. Алгоритми БІСО використовують в якості вхідних величин проекції абсолютної кутової швидкості пов'язаної СК, виміряні датчиками кутової швидкості БІНС. На основі проекцій кутової швидкості формуються кінематичні рівняння, які після інтегрування визначають поточну орієнтацію об'єкта відносно пов'язаної СК.

Використання рівняння Ейлера найбільш наочне і просте у використанні, проте воно вироджується при складних еволюціях об'єкту, тому у роботі досліджувалися кватерніонне рівняння орієнтації, як найбільш поширене та кінематичне рівняння Пуассона.

Кінематичні рівняння орієнтації, незалежно від обраних кінематичних параметрів, мають диференціальну форму. Вони формуються по дискретним сигналам, що надходять з датчиків кутової швидкості НС. Для знаходження поточної орієнтації об'єкта потрібно організувати процедуру їх чисельного

інтегрування. Вибір алгоритму інтегрування значно впливає на точність і швидкодню БІСО, тому під час проектування він потребує найбільшої уваги.

$$\frac{dC^{SP}}{dt} = C^{SP} \cdot (\omega_P^{PS} \times), \quad (1)$$

де C^{SP} – матриця напрямних косинусів (МНК) між нерухомою системою координат S і системою координат P, пов'язаної з рухомим об'єктом; ω_P^{PS} – вектор кутової швидкості рухомої системи координат відносно нерухомої.

Права частина цього матричного диференціального рівняння має вигляд

$$Z(t, C^{SP}) = C^{SP} (\omega_P^{PS} \times) \quad (2)$$

Алгоритми методів Рунге–Кутти використовують інформацію про виміряні значення вектору кутової швидкості основи.

Всі алгоритми Рунге–Кутти проводять інтегрування рівняння Пуассона (1) відповідно до формули

$$C_{N+1}^{SP} = C_N^{SP} + H \cdot F(t_N, C_N^{SP}),$$

де N – номер попереднього моменту часу інтегрування t_N ; C_N^{SP} – значення МНК в поточний момент часу; C_{N+1}^{SP} – значення МНК в момент часу через крок інтегрування; $F(t_N, C_N^{SP})$ – деяка функція значень правої частини рівняння (1).

Хоча кінематичне рівняння руху Пуассона досить просто отримати для заданої кінематики руху, проте їх використання часто не вигідно через надмірну складність математичних моделей, а отже і навантаження на бортовий комп'ютер.

Ці проблеми можна частково вирішити перейшовши до іншого способу опису кінематики рухомого об'єкта у просторі – використання кватерніонів поворотів. Векторне рівняння орієнтації у кватерніонах представлено нижче.

$$\frac{dQ^{SP}}{dt} = \frac{1}{2} Q^{SP} \circ \Omega_P^{PS} \quad (3)$$

де Q^{SP} – кватерніон повороту між нерухомою системою координат S і системою координат P, пов'язаної з рухомим об'єктом; Ω_P^{PS} – вектор-кватерніон із проєкцій кутової швидкості рухомої системи відліку P.

Вектор Ω_P^{PS} визначається з проєкцій вектору кутової швидкості ω_P^{PS} обертання системи P відносно системи S:

$$\Omega_P^{PS} = \mathbf{1}_P \cdot \omega_{1P}^{SP} + \mathbf{2}_P \cdot \omega_{2P}^{SP} + \mathbf{3}_P \cdot \omega_{3P}^{SP}$$

Права частина цього векторного диференціального рівняння (3) має вигляд

$$Z(t, Q^{SP}) = Q^{SP} (\Omega_P^{PS} \times) \quad (4)$$

Для створення систем низької точності, побудованих з використанням мікро-електромеханічних датчиків, застосовуються, як правило, методи чисельного інтегрування широкого призначення. Зазвичай в літературі по алгоритмам БІСО наводяться синтез дискретних алгоритмів інтегрування і

аналізується їх точність. Однак, для побудови реальних систем має велике значення швидкодія створених алгоритмів.

Було досліджено швидкодію найпопулярніших методів чисельного інтегрування кватерніонного рівняння і кінематичного рівняння Пуассона.

За методом прямокутників отримали: матриця Пуассона - 54 операції на такт; кватерніонне рівняння - 36 операцій на такт.

За методом трапецій: матриця Пуассона - 109 операцій на такт; кватерніонне рівняння - 73 операції на такт.

За методом Рунге-Кутти 2-го порядку: матриця Пуассона - 81 операція на такт; кватерніонне рівняння - 48 операцій на такт.

За методом Рунге-Кутти 4-го порядку: матриця Пуассона - 155 операцій на такт; кватерніонне рівняння - 82 операції на такт.

Ключові слова: алгоритми БНС, швидкодія, метод Рунге-Кутти.

УДК 519.688

ПРО ЕФЕКТИВНІСТЬ ОБРОБКИ ДІАГНОСТИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ БАГАТОКЛАСОВОЇ ДІАГНОСТИКИ СКЛАДНОЇ ОБЕРТОВОЇ СИСТЕМИ

Паздрій О. Я.

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ, Україна

E-mail: olgapazdri@gmail.com

У роботі продовжується попередні дослідження та вдосконалення віброакустичної функціональної діагностики складної обертової системи, наприклад авіаційного газотурбінного двигуна під час його експлуатації.

Основним завданням моніторингу є багатокласова діагностика початкових несправностей системи в стаціонарному та нестаціонарному режимах. Важливим етапом моніторингу виступає обробка діагностичної інформації (ДІ) з метою виявлення ознак несправностей. В якості ДІ використовується низькочастотна вібрація та акустичний шум у діапазоні 0-10 кГц, результати обробки таких сигналів часто досить складні для інтерпретації, порівняння та прийняття рішення про технічний стан обертової системи.

У роботі пропонується застосування декілька рівнів обробки ДІ, заснованої на різних методах, з метою виявлення ознак несправностей та підвищення їх діагностичної цінності. Застосування вейвлет аналізу та безрозмірних пікових характеристик віброакустичних сигналів у [1], а також частотно-часовий аналіз та фрактальний аналіз (ФА) у [2] показали ефективність багаторівневої системи обробки віброакустичних сигналів для діагностики невеликих тріщиноподібних дефектів в лопатках обертової системи. У цій роботі ми пропонуємо застосувати біспектральний аналіз (БА) для обробки вібраційних сигналів на першому рівні обробки сигналу та ФА біспектральних контурних зображень на

другому рівні обробки сигналів з метою діагностики початкового дебалансу обертової системи.

Експериментальні дослідження вимушених коливань фізичної моделі (ФМ) обертової системи (крильчатка повітряного пускача) проводяться під час стаціонарного та нестаціонарного вібраційних режимів. Досліджено наступні два технічні стани ФМ: відсутність та наявність початкового дебалансу (додаткове навантаження невеликої ваги на одну лопатку).

Отримані результати порівняльного аналізу значень фрактальної розмірності Мінковського за умов відсутності та наявності дебалансу у всіх режимах роботи ФМ відображають ефективність застосування запропонованої багаторівневої обробки вібраційних сигналів.

Ключові слова: моніторинг технічного стану, газотурбінний двигун, тріщиноподібне пошкодження, віброакустичний сигнал, частотно-часовий аналіз, біспектральний аналіз, фрактальний аналіз.

Література

- [1] Н. І. Бурау, Л. Л. Яцко, О. М. Павловський, Ю. В. Сопілка, *Методи цифрової обробки сигналів для вібраційної діагностики авіаційних двигунів*. Київ, Україна: НАУ, 2012.
- [2] O. Pazdrii, N. Bouraou, “Two-level signal processing of vibroacoustical signals for condition monitoring of complex rotary systems”, *Proc. of NTSP* (2018), pp. 164-168.