

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

УДК 531.383

**МОДЕЛЮВАННЯ АСТАТИЧНОГО ІДЕНТИФІКАТОРА СТАНУ В СИСТЕМІ**  
**КЕРУВАННЯ ЧУТЛИВИМ ЕЛЕМЕНТОМ ГІРОТЕОДОЛІТА**

<sup>1)</sup>Боярчук А.О., <sup>2)</sup>Мураховський С.А.,  
<sup>1)</sup>КП СПБ «Арсенал», Київ, Україна, <sup>2)</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна  
E-mail: [s.murakhovsky@kpi.ua](mailto:s.murakhovsky@kpi.ua)

Сучасні високоточні засоби наземного орієнтування часто застосовуються у складних умовах, зокрема, при наявності зовнішніх збурень, що спричинені різними факторами, наприклад, переміщення людей, робота двигунів або інших механічних пристосувань. Такі збурення можна описати детермінованими (гармонічними) або випадковими (квазігармонічними) сигналами. При наявності вібраційних збурень чутливі елементи, що реалізовані у вигляді маятника, будуть схильні до появи додаткових шкідливих сигналів на виході датчика. Крім того можуть виникати значні постійні складові вібраційної похибки, що негативно впливає на точність приладу в цілому.

В даній роботі запропоновано астатичний ідентифікатор стану для оцінки параметрів руху чутливого елемента, який має властивість незбурюваності постійними складовими зовнішніх впливів, а також, можливість визначення оцінки величини постійної складової зовнішнього збурення.

Представимо математичну модель руху ЧЕ у вигляді:

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

де  $\alpha, \beta$  – 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;  $M_L$  – зовнішнє моментне збурення;  $J_x, J_z$  – осьові моменти інерції чутливого елемента;  $H$  – кінетичний момент гіроскопа;  $m$  – маса чутливого елемента;  $l$  – зміщення центру мас ЧЕ відносно точки підвісу;  $\omega_3$  – кутова швидкість обертання Землі;  $\varphi_g$  – географічна широта місця установки приладу;  $C_\alpha$  – кутова жорсткість підвісу відносно осі  $Z$ ;  $C_y$  – лінійна жорсткість підвісу відносно осі  $Y$ .

Зовнішнє моментне збурення, що діє на чутливий елемент гіротеодоліта, можна представити у вигляді:

$$M_L = mgl \left[ \left( n_E + \frac{1}{g} \ddot{z} \right) \beta + \left( n_N + \frac{1}{g} \ddot{x} \right) \gamma \right]$$

де  $n_E$ ,  $n_N$  – складові перевантаження точки підвісу гіротеодоліта.

Момент  $M_L$  обумовлений дією поступальних прискорень в горизонтальній площині, що виникають внаслідок власного руху чутливого елемента та вимушеного руху основи, на яку вставлено гіротеодоліт.

В роботі припускається вимірювання тільки кута повороту чутливого елемента  $\alpha$ ,  $\mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ . Можна показати, що в такому випадку система буде повністю спостережуваною.

Астатичний ідентифікатор стану може бути представлений матричним рівнянням:

$$\dot{\hat{\mathbf{X}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}} + \mathbf{B}U + \mathbf{K}(\mathbf{Y} - \mathbf{C}\hat{\mathbf{X}}) + \mathbf{K}_i \int (\mathbf{Y} - \mathbf{C}\hat{\mathbf{X}}) dt,$$

де  $\mathbf{K}$  – матриця коефіцієнтів відповідного статичного спостережувача,  $\mathbf{K}_i$  – матриця коефіцієнтів інтегральних зв'язків;

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \\ k_4 \\ k_5 \\ k_6 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{K}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ k_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Для визначення коефіцієнтів використовується стандартна форма полінома Ньютона:

$$\det(p\mathbf{E} - \mathbf{A} + \mathbf{K}\mathbf{C}) = p^6 + 6\omega_0 p^5 + 15\omega_0^2 p^4 + 20\omega_0^3 p^3 + 15\omega_0^4 p^2 + 6\omega_0^5 p + \omega_0^6$$

Результати моделювання показали, що запропонована модель оцінки параметрів руху чутливого елемента гіротеодоліту, яка включає астатичний ідентифікатор стану дозволяє суттєво зменшити вплив вібраційної похибки на вихідний сигнал приладу.

В подальших дослідженнях планується побудова узагальненої системи, яка включає керування рухом чутливого елемента як в азимуті, так і в негіростабілізованій площині, проте розширена модель в такому випадку буде нелінійною.

*Ключові слова:* гіротеодоліт, астатичний ідентифікатор стану, вібраційна похибка.

УДК 681.518.22

## ІНФОРМАЦІЙНЕ 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](mailto:zax2020@ukr.net)*

При практичній реалізації компактного лабораторного стенду для дослідження і визначення статичних і динамічних характеристик мікромеханічних датчиків, бюджетних (порівняно невисокої точності) гіроскопів та акселерометрів як датчиків кутової швидкості систем орієнтації і стабілізації рухомих об'єктів, належне керування електричним приводом одновісної обертової платформи [1] забезпечується інформаційними (апаратно-програмними) засобами. При керуванні приводом обертової платформи вирішуються три незалежні задачі: забезпечення стабільності кутової швидкості платформи із заданою точністю в статичному режимі; забезпечення заданого кутового прискорення платформи в динамічному режимі; забезпечення кутової позиції нерухомої платформи з заданою точністю.

Метою роботи є аналіз способів і методик, схем і компонентів для вирішення першої і головної задачі керування приводом обертової платформи – забезпечення стабільності заданої кутової швидкості.

Класичним вважається спосіб забезпечення стабільності кутової швидкості обертової платформи за рахунок її значної інерційної маси (значного моменту інерції), яка обертається в масивному корпусі стенду. Такі стенди, від простих перших з шарикопідшипниковим підвісом та приводним двигуном з редуктором до сучасних прецизійних з аеростатичним підвісом та безщітковими і безпідшипниковими двигунами, з ртутними струмознімачами та безконтактними датчиками вирізняються значними розмірами та вагою. Обертові платформи зі значною інерційною масою застосовуються, наприклад, в прецизійних стендах провідної фірми Acutronic. Спосіб забезпечення високої точності і стабільності кутової швидкості обертової платформи в стендах нового покоління базується на високоточній системі керування приводним двигуном по замкнутій схемі з застосуванням інерціальних датчиків [2]. По такій схемі побудована, наприклад, високоточна система ГС1Л підприємства «Арсенал» (Київ) [3] для вимірювання кутів у динамічному режимі, в якій кутова швидкість платформи вимірюється лазерним гіроскопом.

В роботі розглядається гнучка замкнута система керування приводним мікродвигуном з постійним магнітом і з якірним управлінням, з внутрішнім контуром регулювання струму в зовнішньому контурі регулювання кутової швидкості. Гнучке регулювання кутової швидкості забезпечується, залежно від діапазону заданих кутових швидкостей платформи, застосуванням в контурі

регулювання кутової швидкості мікромеханічних гіроскопів або акселерометрів з вищою чутливістю і точністю порівняно з досліджуваними мікромеханічними датчиками. Наприклад, гіроскоп мікромеханічного інерціального модуля MAX21105 фірми Maxim Integrated Products має чутливість  $0,008^\circ/\text{с}$  в діапазоні  $\pm 250^\circ/\text{с}$ , майже на порядок вище чутливості  $0,07^\circ/\text{с}$  гіроскопів ITG-3205 фірми InvenSense TDK Corporation. При застосуванні в контурі регулювання кутової швидкості акселерометрів вимірюються тангенціальне та доцентрове прискорення в точці їх кріплення на платформі. Наприклад, акселерометри інерціального модуля MAX21105 при їх кріпленні на радіусі 10 см від осі обертання платформи, при їх чутливості  $0,07 \cdot 10^{-3} \text{g}$  в діапазоні  $\pm 2 \text{g}$  здатні виміряти тангенціальне прискорення  $0,08 \cdot \text{с}^{-2}$  та доцентрове прискорення  $0,007 \cdot \text{с}^{-2}$ , що відповідає здатності виміряти мінімальні кутові швидкості  $0,45^\circ/\text{с}$  та  $0,04^\circ/\text{с}$  відповідно при тактовій частоті вимірювання 10 Гц. При вказаних умовах такими акселерометрами можна вимірювати кутову швидкість в діапазоні  $\pm 1150^\circ/\text{с}$ .

В роботі експериментально апробовано найпростіший (найдешевший) спосіб визначення кутової швидкості обертової платформи, через непрямі вимірювання зворотної електрорушійної сили приводного мікродвигуна, яка пропорційна кутовій швидкості обертової платформи при постійному навантаженні. Коефіцієнт пропорційності (коефіцієнт зворотної електрорушійної сили) розраховувався по даним датчика напруги, струму і потужності на основі сенсора INA219 з нульовим дрейфом і послідовним інтерфейсом I2C фірми Texas Instruments. Також експериментально апробовано спосіб визначення кутової швидкості на основі трансмісійного фотомікросенсора EE-SX1103 фірми Omron Electronic Components. В обох випадках по результатам експериментальних досліджень точність вимірювання становила один порядок – похибка (оцінювалась по сходженню результатів вимірювання) складала значення на рівні 2 % від вимірюваної кутової швидкості. Проте, при визначенні коефіцієнта зворотної електрорушійної сили, необхідно враховувати можливу зміну опору обмоток ротора приводного мікродвигуна від їх самонагрівання, що може ускладнити застосування такого способу визначення кутової швидкості платформи при високих обертах та підвищеному навантаженні.

*Ключові слова:* лабораторний стенд, обертова платформа, електричний привід; інформаційне забезпечення автоматизованих систем; мікромеханічні гіроскопи та акселерометри.

#### **Література**

- [1] О. В. Заморський, «Електромеханічне забезпечення лабораторного стенду для дослідження статичних і динамічних характеристик мікромеханічних датчиків», на XIX Міжнар. наук.-техн. конф. Приладобудування: стан і перспективи, Київ, 2020, с. 15-16.
- [2] Д. М. Калихман, Прецизионные управляемые стенды для динамических испытаний гироскопических приборов; под общ. ред. акад. В. Г. Пешехонова. Санкт-Петербург, РФ: ГНЦ РФ «Электроприбор», 2008.
- [3] Електронний ресурс. Режим доступу [http://old.arsenal.co.ua/index.phtml?id=\\_3\\_4](http://old.arsenal.co.ua/index.phtml?id=_3_4).