

ность стенда обеспечивается решением обратных задач – определением в процессе испытаний статических и динамических характеристик электрического привода и измерительных датчиков, работающих на различных физических принципах. Предполагается, что компактный лабораторный стенд, кроме решения практических задач исследования микромеханических датчиков, при разработке соответствующего информационного интерфейса виртуального прибора, может эффективно применяться в учебном процессе при проведении лабораторных работ по соответствующим дисциплинам направления приборостроения.

**Ключевые слова:** лабораторный стенд; вращающаяся платформа; электрический привод; микродвигатели постоянного тока; датчики угловой скорости; микромеханические датчики; гироскопы; акселерометры.

**A.V. Zamorsky**

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*

### COMPACT ROTARY PLATFORM AS A UNIVERSAL LABORATORY STAND

A single axis rotary platform is distinguished among the laboratory equipment for testing gyroscopic devices and systems and their sensitive elements. An overview of the design principles of industrially developed stands for the study of static and dynamic characteristics of gyroscopic devices and systems is provided.

The scheme of design of the universal laboratory stand is suggested as the compact rotary platform for research of static and dynamic characteristics of micromechanical gyroscopes and accelerometers as sensors of angular speed. The physical components of such a stand and technical and technological problems of its practical implementation are reviewed. The proposed laboratory stand is considered as a cyberphysical system where computing components play a crucial role in determining the parameters of the system and the studied micromechanical sensors. For this purpose, in addition to the physical control loop of the electric drive to ensure the stability of the angular velocity of the platform, an independent measuring loop is considered for analytical determination of system parameters, including the studied micromechanical sensors.

The versatility of the stand is ensured by solving the inverse problems, namely determining in the process of testing static and dynamic characteristics of the electric drive and measuring sensors that work on various physical principles. It is assumed that, in addition to solving practical problems of micromechanical sensors in the development of the appropriate information interface of the virtual device, a compact laboratory stand can be effectively used in the educational process during laboratory work in relevant disciplines of instrument making direction.

**Keywords:** laboratory stand; rotary platform; electric drive; DC micromotors; angular velocity sensors; micromechanical sensors; gyroscopes; accelerometers.

*Надійшла до редакції  
18 березня 2021 року*

*Рецензовано  
12 квітня 2021 року*

УДК 531.383

### АСТАТИЧНИЙ ІДЕНТИФІКАТОР В СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ ЧУТЛИВИМ ЕЛЕМЕНТОМ ГІРОТЕОДОЛІТА

<sup>1)</sup>Боярчук А. О., <sup>2)</sup>Мироненко П. С., <sup>2)</sup>Мураховський С. А., <sup>3)</sup>Іваненко Р. О.,

<sup>1)</sup>КП СПБ «Арсенал», Київ, Україна, <sup>2)</sup>Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна,

<sup>3)</sup>Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України, Київ, Україна

E-mail: [s.murakhovsky@kpi.ua](mailto:s.murakhovsky@kpi.ua)

*Розглянуто основні особливості умов роботи засобів наземного орієнтування. Показано, що при наявності зовнішніх збурень можливим є виникнення додаткової похибки вимірювань. Наведено основні характеристики зовнішніх збурень.*

*Запропоновано нову структуру регулятора зворотного зв'язку, до складу якого входить астатичний ідентифікатор стану. Розглянуто математичну модель приладу у формі простору станів з врахуванням зовнішніх збурень. Керування положенням чутливого елемента запропоновано проводити методом модального керування за неповним вектором стану. Припускається, що вимірюваним параметром для ідентифікації вектору стану є кут відхилення чутливого елемента гіротеодоліту в азимуті. Проведено аналіз спостережуваності*

при заданій структурі матриць стану і вимірювань. Для зменшення похибки оцінювання, що виникає внаслідок наявності неконтрольованих збурень, в ідентифікаторі стану використовуються як пропорційний, так і інтегральний канали зворотного зв'язку. Визначено коефіцієнти спостережувача, що має астатичну складову в рівнянні стану у припущенні, що процес оцінювання має бути аперіодичним.

Проведено моделювання роботи астатичного ідентифікатора на основі розробленої програмної моделі. Коефіцієнти програмної моделі обрано на основі конструктивних рішень, що використовуються на сучасному етапі розвитку систем визначення азимутальних напрямків на базі гіртеодолітів. Розраховано коефіцієнти спостережувача для заданих параметрів приладу. Результати моделювання показали, що застосування запропонованого методу дозволяє суттєво зменшити вплив постійної складової зовнішнього збурення. Похибка оцінювання кутових координат і швидкостей, які використовуються в системі керування положенням чутливого елемента, астатичним ідентифікатором стану прямує до нуля, у той час, як статична система має постійну складову похибки.

У подальших дослідженнях планується побудова узагальненої системи, яка включає керування рухом чутливого елемента як в азимуті, так і в негіростабілізованій площині.

**Ключові слова:** гіртеодолит; астатичний ідентифікатор стану; система керування.

### Вступ

Сучасні високоточні засоби наземного орієнтування [1-3] часто застосовуються у складних умовах, зокрема, за наявності зовнішніх збурень, що спричинені різними факторами, наприклад, переміщення людей, робота двигунів або інших механічних пристосувань [4, 5]. Такі збурення можна описати детермінованими (гармонічними) або випадковими (квазігармонічними) сигналами.

За 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 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.

### Постановка задачі

Розглянемо математичну модель руху чутливого елемента (ЧЕ) гіртеодоліта в гіростабілізованій площині [6]:

$$\begin{cases} J_z \ddot{\alpha} + H \dot{\beta} + H \omega_3 \cos \phi_g \alpha + C_\alpha \alpha = M_K + M_L \\ (J_x + ml^2) \ddot{\beta} + mgl\beta - H \dot{\alpha} + m\ddot{y} = 0 \\ ml \ddot{\beta} + m\ddot{y} + C_y y = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

де  $\alpha, \beta$  – кути повороту ЧЕ відносно корпусу приладу;  $y$  – зміщення точки підвісу ЧЕ 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 ЧЕ;  $H$  – кінетичний момент гіроскопа;  $m$  – маса ЧЕ;  $l$  – зміщення центру мас ЧЕ відносно точки підвісу;  $\omega_3$  – кутова

швидкість обертання Землі;  $\phi_g$  – географічна широта місця встановлення приладу;  $C_\alpha$  – кутова жорсткість підвісу відносно осі  $Z$ ;  $C_y$  – лінійна жорсткість підвісу відносно осі  $Y$ .

Систему рівнянь (1) можна представити в просторі станів, якщо ввести відповідні змінні  $x_1 = \alpha$ ,  $x_2 = \dot{\alpha}$ ,  $x_3 = \beta$ ,  $x_4 = \dot{\beta}$ ,  $x_5 = y$ ,  $x_6 = \dot{y}$ :

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{G}\mathbf{L} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} \end{cases}, \quad (2)$$

де

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{k_\alpha}{J_z} & 0 & 0 & -\frac{H}{J_z} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{H}{J_x} & -\frac{mgl}{J_x} & 0 & \frac{C_y l}{J_x} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{Hl}{J_x} & \frac{mgl^2}{J_x} & 0 & -\frac{C_y}{m} - \frac{C_y l^2}{J_x} & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{G}^T = [0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0];$$

$$\mathbf{B}^T = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{J_z} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{U} = M_K, \quad \mathbf{L} = M_L.$$

У матриці стану  $\mathbf{A}$  позначено  $k_\alpha = H\omega_3 \cos \phi_g + C_\alpha$ .

Зовнішнє моментне збурення, що діє на ЧЕ гіртеодоліта, 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 гіртеодоліта [6, 7].

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

Водночас, залежно від зовнішніх умов може виникати постійна складова моменту  $M_L$  та, відповідно, суттєва статична похибка в показах приладу, яка може досягати значних значень (одиниць градусів).

Припустимо, що вимірюється тільки кут повороту чутливого елемента в азимуті  $\alpha$ . Тоді матриця вимірювань:

$$\mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0].$$

Для формування керуючого впливу можна використовувати, наприклад, регулятор за неповним вектором стану:

$$\mathbf{U} = -\mathbf{K} \begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix};$$

де  $\mathbf{K} = [k_1 \ k_2]$  – матриця коефіцієнтів регулятора, які визначено в роботі [8].

Отже, необхідно визначити оцінки змінних стану  $\hat{x}_1$  та  $\hat{x}_2$ , але слід зазначити, що у відповідному цим змінним рівнянні системи (2) присутнє зовнішнє збурення  $M_L$ .

Наявність такого шкідливого моменту призведе до статичної похибки у визначенні оцінок змінних стану, тому актуальною є задача побудови астатичного ідентифікатора, який позбавлений цього недоліку.

#### Розв'язання поставленої задачі

Розглянемо спочатку спостережуваність системи в цілому. Для цього визначимо матрицю повної спостережуваності:

$$\mathbf{Q} = \left[ \mathbf{C}^T : \mathbf{A}^T \mathbf{C}^T : (\mathbf{A}^T)^2 \mathbf{C}^T : (\mathbf{A}^T)^3 \mathbf{C}^T : (\mathbf{A}^T)^4 \mathbf{C}^T : (\mathbf{A}^T)^5 \mathbf{C}^T \right].$$

Ранг матриці спостережуваності дорівнює кількості змінних стану  $\text{rank}(\mathbf{Q}) = 6$ , отже, на основі інформації про кут  $\alpha$  можна визначити оцінки повного вектору стану  $\mathbf{X}$ .

Оскільки на об'єкт діє тільки одне зовнішнє збурення  $M_L$ , то астатичний ідентифікатор стану об'єкта керування (чутливого елемента гіртеодоліта) може бути представлений матричним рівнянням [9]:

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

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

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

Визначимо коефіцієнти  $\mathbf{K}$ , використовуючи звичайну методику прирівнювання характеристичного поліному спостережувача до стандартного стійкого полінома, наприклад бінома Ньютона:

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

Визначимо  $\det(p\mathbf{E} - \mathbf{A} + \mathbf{K}\mathbf{C})$ :

$$\det(p\mathbf{E} - \mathbf{A} + \mathbf{K}\mathbf{C}) = a_6 p^6 + a_5 p^5 + a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0,$$

де  $a_6 = 1$ ,

$$a_5 = k_1,$$

$$a_4 = \frac{k_a}{J_z} + \frac{H^2}{J_x J_z} + \frac{C_y}{m} + \frac{C_y l^2}{J_x} + k_2 + \frac{mgl}{J_x},$$

$$a_3 = \left( \frac{H^2}{J_x J_z} + \frac{C_y}{m} + \frac{C_y l^2}{J_x} + \frac{mgl}{J_x} \right) k_1 - \frac{H}{J_z} k_4,$$

$$a_2 = \left( \frac{C_y}{m} + \frac{C_y l^2}{J_x} + \frac{mgl}{J_x} \right) k_2 + \frac{mglH}{J_x J_z} k_3 - \frac{HlC_y}{J_x J_z} k_5 +$$

$$+ \left( \frac{C_y}{m} + \frac{C_y l^2}{J_x} + \frac{mgl}{J_x} \right) \frac{k_a}{J_z} + \frac{glC_y}{J_x} + \frac{H^2 C_y}{m J_x J_z},$$

$$a_1 = \left( \frac{glC_y}{J_x} + \frac{H^2 C_y}{m J_x J_z} \right) k_1 - \left( \frac{HC_y}{m J_z} + \frac{Hl^2 C_y}{J_x J_z} \right) k_4 -$$

$$- \frac{HlC_y}{J_x J_z} k_6,$$

$$a_0 = \frac{k_a glC_y}{J_x J_z} + \frac{HglC_y}{J_x J_z} k_3 + \frac{glC_y}{J_x} k_2.$$

Прирівнявши коефіцієнти при однакових степенях у лівій і правій частинах виразу (3), отримаємо систему алгебраїчних рівнянь, яку можна представити в матричній формі:

$$\mathbf{N} \cdot \mathbf{K} = \mathbf{D}_0 - \mathbf{D}_1, \quad (4)$$

де

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ \left( \frac{H^2}{J_x J_z} + \frac{C_y}{m} + \frac{C_y l^2}{J_x} + \frac{mgl}{J_x} \right) & 0 & 0 & \frac{-H}{J_z} & 0 & 0 \\ 0 & \left( \frac{C_y}{m} + \frac{mgl}{J_x} + \frac{C_y l^2}{J_x} \right) & \frac{mglH}{J_x J_z} & 0 & \frac{-HlC_y}{J_x J_z} & 0 \\ \frac{glC_y}{J_x} + \frac{H^2 C_y}{m J_x J_z} & 0 & 0 & \left( \frac{HC_y}{m J_z} - \frac{Hl^2 C_y}{J_x J_z} \right) & 0 & \frac{-HlC_y}{J_x J_z} \\ 0 & \frac{glC_y}{J_x} & \frac{HglC_y}{J_x J_z} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D}_0 = \begin{bmatrix} 6\omega_0 \\ 15\omega_0^2 \\ 20\omega_0^3 \\ 15\omega_0^4 \\ 6\omega_0^5 \\ \omega_0^6 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_\alpha}{J_z} + \frac{H^2}{J_x J_z} + \frac{C_y}{m} + \frac{C_y l^2}{J_x} + \frac{mgl}{J_x} \\ 0 \\ \left( \frac{C_y}{m} + \frac{C_y l^2}{J_x} + \frac{mgl}{J_x} \right) \frac{k_\alpha}{J_z} + \frac{glC_y}{J_x} + \frac{H^2 C_y}{m J_x J_z} \\ 0 \\ \frac{k_\alpha glC_y}{J_x J_z} \end{bmatrix}.$$

Система (4) має єдиний розв'язок, а саме, значення шести коефіцієнтів ідентифікатора стану, один з яких також використовується і в інтегральному каналі.

**Моделювання роботи астатичного ідентифікатора стану**

Для моделювання астатичного ідентифікатора стану в системі керування рухом ЧЕ гірогеодоліта

в азимуті створена динамічна модель, яка відповідає рівнянням (1).

Параметри приладу обрані на основі огляду гірогеодолітів вітчизняної розробки [1], а їх значення представлені в табл. 1.

Власна частота спостережувача обрана  $\omega_0 = 50 \text{ с}^{-1}$ , що з одного боку забезпечує стійкість процесу оцінювання, а з іншого – високу швидкість.

Таблиця 1. Параметри гірогеодоліту

Назва	Значення, одиниці вимірювання
Кінетичний момент гіроскопа	$H = 0.4 \text{ Нмс}$
Маса чутливого елемента	$m = 1 \text{ кг}$
Відстань від точки підвісу до центра мас ЧЕ	$l = 0.1 \text{ м}$
Момент інерції ЧЕ відносно осі X	$J_x = 13 \cdot 10^{-4} \text{ кгм}^2$
Момент інерції ЧЕ відносно осі Z	$J_z = 4 \cdot 10^{-4} \text{ кгм}^2$
Лінійна жорсткість підвісу відносно осі Y.	$C_y = 150 \text{ Н/м}$
Кутова жорсткість підвісу відносно осі Z	$C_\alpha = 5 \cdot 10^{-6} \text{ Нм}$

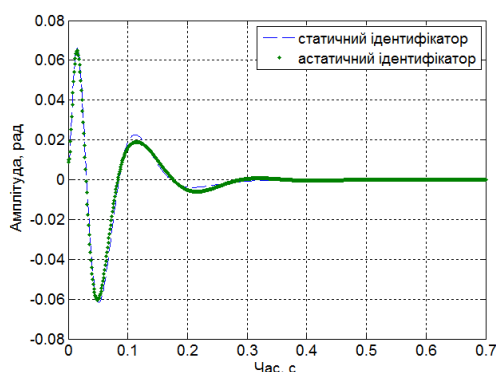
В результаті чисельних розрахунків коефіцієнтів ідентифікатора стану за розв'язком рівняння (4) отримані наступні значення:

$$k_1 = 300, \quad k_2 = -298290, \quad k_3 = 432,64, \\ k_4 = 93324, \quad k_5 = -23,17, \quad k_6 = -7980,8.$$

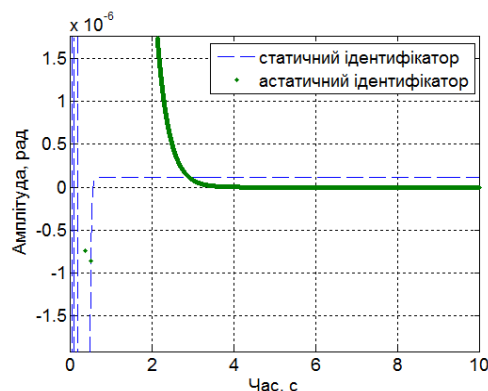
Для формування керуючого сигналу в системі управління положенням чутливого елемента

необхідні сигнали оцінок кута  $\hat{\alpha}$  та кутової швидкості  $\hat{\dot{\alpha}}$ . На рис. 1 наведено похибки оцінювання  $\tilde{\alpha}$ , а на рис. 2 –  $\tilde{\dot{\alpha}}$  порівняно для випадку статичного та астатичного ідентифікаторів стану. Похибкою оцінювання вважається різниця між точним значенням відповідної змінної та її оцінкою:

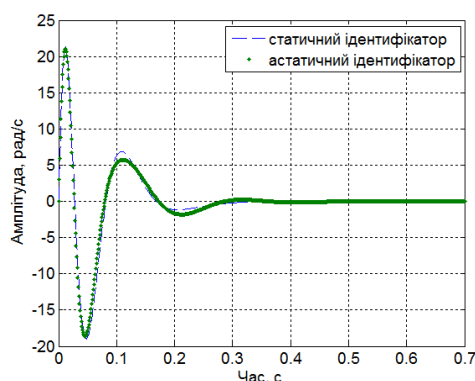
$$\tilde{\alpha} = \alpha - \hat{\alpha}, \quad \tilde{\dot{\alpha}} = \dot{\alpha} - \hat{\dot{\alpha}}.$$



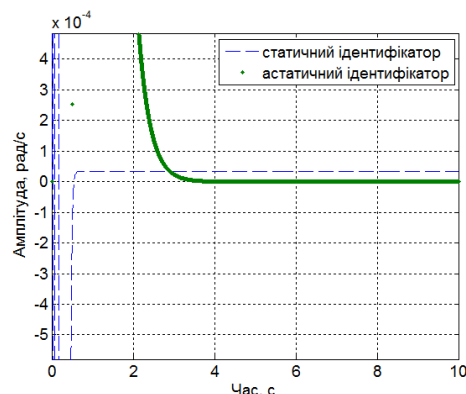
а) загальний характер процесу оцінювання



б) деталізація похибки оцінювання

Рис. 1. Похибка оцінювання  $\tilde{\alpha}$ 

а) загальний характер процесу оцінювання



б) деталізація похибки оцінювання

Рис. 2. Похибка оцінювання  $\tilde{\dot{\alpha}}$ 

Отримані результати (рис. 1, б, рис. 2, б) свідчать про те, що похибка оцінювання змінних стану  $\hat{\alpha}$ ,  $\hat{\dot{\alpha}}$  астатичним ідентифікатором стану прямує до нуля після закінчення перехідного процесу, в той час як статична система матиме постійну складову похибки, що відобразиться на функціонуванні системи автоматичного керування положенням чутливого елемента гіротеодоліта.

### Висновки

Запропонована методика оцінювання вектору стану за допомогою астатичного ідентифікатора дозволяє зменшити похибки оцінювання узагальнених координат  $\hat{\alpha}$ ,  $\hat{\dot{\alpha}}$  необхідних для роботи сис-

теми керування положенням чутливого елемента гіротеодоліта.

Отримані аналітичні залежності коефіцієнтів ідентифікатора стану від параметрів приладу та бажаної швидкодії системи оцінювання. Результати моделювання свідчать про те, що перехідний режим ідентифікатора закінчується за 0,5 с, а похибка оцінювання прямує до нуля на відміну від статичної системи.

У подальших дослідженнях планується побудова узагальненої системи, яка включає керування рухом чутливого елемента як в азимуті, так і в негіростабілізованій площині [10, 11], проте розширена модель у такому випадку буде нелінійною.

**Література**

- [1] Ю. Ю. Юр'єв, "Сучасні гіроскопічні засоби азимутального орієнтування", на VI Міжнар. наук.-техн. конф. Приладобудування: стан і перспективи, Київ, 2007, с. 24-25.
- [2] "GYROMAT 5000. The Most Accurate Precision-Surveying Gyroscope in the World", 2013. [Online]. Available: [https://www.dmt-group.com/fileadmin/user\\_upload/GYROMAT\\_5000\\_En.pdf](https://www.dmt-group.com/fileadmin/user_upload/GYROMAT_5000_En.pdf). [Accessed: Apr. 05, 2019]
- [3] "GYROMAX™ Gyroscopes", 2014. [Online]. Available: <http://www.gmt-heger.com/index.php?id=8&lang=en>. [Accessed: Apr. 05, 2019]
- [4] Andrew R. Spielvogel, Louis L. Whitcomb, "A stable adaptive attitude estimator on SO(3) for true-North seeking gyrocompass systems: Theory and preliminary simulation evaluation", in Proc. 2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation, May 29 -June 3 2017, pp. 3231 – 3236.
- [5] Ю. Ю. Юр'єв, Е. С. Машиністов, О. М. Ліхоткін, "Малогобаритний пристрій для азимутального орієнтування напрямків. Перспективи розвитку", на VIII Міжнар. наук.-техн. конф. Приладобудування: стан і перспективи, Київ, 2009, с. 23-24.
- [6] С. А. Мураховский, Ю. Ф. Лазарев, П. С. Мироненко, "Динамика наземного компенсационного маятникового гирокомпаса", Вісник Інженерної академії України, № 2, с. 125-130, 2010.
- [7] С. А. Мураховский, "Визначення похибки гіртеодоліту при дії випадкової вібрації", Вісник НТУУ "КПІ". Серія Приладобудування, Вип. 45, с. 24-30, 2013.
- [8] А. О. Боярчук, П. С. Мироненко, С. А. Мураховский, "ПД-регулятор в контурі компенсаційного зворотного зв'язку гіртеодоліта", Вісник НТУУ "КПІ". Серія Приладобудування, Вип. 55(1), с. 19-25, 2018.
- [9] Н. Т. Кузовков, Модальное управление и наблюдающие устройства. Москва, СССР: Машиностроение, 1976.
- [10] А. О. Боярчук, П. С. Мироненко, С. А. Мураховский, "Система керування рухом чутливого елемента гіртеодоліту в негіростабілізованій площині", Вісник НТУУ "КПІ". Серія Приладобудування, Вип. 57(1), с. 19-25, 2019.
- [11] А. О. Боярчук, П. С. Мироненко, С. А. Мураховский, "Система керування гіртеодолітом, яка забезпечує інваріантність вихідного сигналу щодо вібраційних прискорень основи", Вісник Інженерної академії України, № 1, с. 52-57, 2020.

УДК 531.383

<sup>1)</sup>А. А. Боярчук, <sup>2)</sup>П. С. Мироненко, <sup>3)</sup>С. А. Мураховский, <sup>3)</sup>Р. А. Іваненко<sup>1)</sup>КП СПБ «Арсенал», Киев, Украина<sup>2)</sup>Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", Киев, Украина<sup>3)</sup>Украинский научно-исследовательский институт специальной техники и судебных экспертиз Службы безопасности Украины, Киев, Украина**АСТАТИЧЕСКИЙ ИДЕНТИФИКАТОР В СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ ГИРТЕОДОЛИТА**

Рассмотрены основные особенности условий работы средств наземного ориентирования. Показано, что при наличии внешних возмущений возможно появление дополнительной погрешности измерений. Приведены основные характеристики внешних возмущений.

Предложена новая структура регулятора обратной связи, в состав которого входит астатический идентификатор состояния. Рассмотрена математическая модель прибора в форме пространства состояний с учетом внешних возмущений. Управление положением чувствительного элемента предложено проводить методом модального управления с неполным вектором состояния. Предполагается, что измеряемым параметром для идентификации вектора состояния является угол отклонения чувствительного элемента гиртеодолита в азимуте.

Проведен анализ наблюдаемости при заданной структуре матриц состояния и измерений.

Для уменьшения погрешности оценки, которая возникает вследствие наличия неконтролируемых возмущений, в идентификаторе состояния используются как пропорциональный, так и интегральный каналы обратной связи. Определены коэффициенты наблюдателя с астатической составляющей в уравнении состояния в предположении, что процесс оценки должен быть аperiодическим.

Проведено моделирование работы астатического идентификатора на основе разработанной программной модели. Коэффициенты программной модели выбраны на основе конструктивных решений, используемых на современном этапе развития систем определения азимутальных направлений на базе гиртеодолитов. Рассчитаны коэффициенты наблюдателя для заданных параметров прибора.

Результаты моделирования показали, что применение предложенного метода позволяет существенно уменьшить влияние постоянной составляющей внешнего возмущения. Погрешность оценивания угловых координат и скоростей, которые используются в системе управления положением чувствительного элемента, астатиче-

ским идентификатором состояния стремится к нулю, в то время как статическая система имеет постоянную составляющую погрешности.

В дальнейших исследованиях планируется построение обобщенной системы, которая включает управления движением чувствительного элемента, как в азимуте, так и в негиростабилизированной плоскости.

**Ключевые слова:** гиротеодолит; астатический идентификатор состояния; система управления.

<sup>1)</sup>**A. O. Boyarchuk**, <sup>2)</sup>**P. S. Mironenko**, <sup>2)</sup>**S. A. Murakhovsky**, <sup>3)</sup>**R. Ivanenko**

<sup>1)</sup>*Arsenal Special Device Production State Enterprise, Kyiv, Ukraine*

<sup>2)</sup>*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*

<sup>3)</sup>*Ukrainian Research Institute of Special Equipment and Forensic Science of the Security Service of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

### ASTATIC IDENTIFIER IN THE CONTROL SYSTEM OF THE GYROTHEODOLITE'S SENSITIVE ELEMENT

The basic features of working conditions of means of ground orientation are considered. It is shown that in the presence of external vibration the appearance of additional measurement error is possible. The main characteristics of external vibration are given.

A new feedback controller structure has been proposed, which includes an astatic state identifier. The mathematical model of the device in the form of space of states taking into account external vibration is considered. It is proposed to control the position of the sensitive element by the method of modal control by an incomplete state vector. It is assumed that the measured parameter for identifying the state vector is the angle of deviation of the sensitive element of the gyrotheodolite in azimuth.

The analysis of observability at the set structure of matrices of a condition and measurements is carried out. To reduce the estimation error that occurs due to the presence of uncontrolled vibration, the state identifier uses both proportional and integrated feedback channels. The coefficients of an observer with an astatic component in the equation of state are determined under the assumption that the evaluation process should be aperiodic.

Simulation of the work of the astatic identifier on the basis of the developed software model is carried out. The coefficients of the software model are selected on the basis of constructive solutions used at the present stage of development of systems for determining azimuthal directions based on gyrotheodolites. The coefficients of the observer for the given parameters of the device are calculated.

The simulation results showed that the application of the proposed method can significantly reduce the impact of the constant component of external vibration. The error of estimating the angular coordinates and velocities used in the control system of the position of the sensing element, the astatic status identifier goes to zero, while the static system has a constant component of the error.

In further research it is planned to build a generalized system, which includes control of the motion of the sensing element both in the azimuth and in the non-gyrostabilized plane.

**Keywords:** gyrotheodolite; astatic state identifier; control system.

*Надійшла до редакції  
8 квітня 2021 року*

*Рецензовано  
24 квітня 2021 року*