

The article presents two stand designed for testing and monitoring characteristics of low-frequency vibration transducers. The first one is a two-component, portable stand-alone stand. It can be used in field conditions in the absence of mains power at the test site. The stand design allows you to test accelerometers with both horizontal and vertical axes of sensitivity. A special feature of the stand is, on the one hand, its portability, and on the other, the ability to test sensors weighing up to 7 kilograms in the frequency range up to 10 Hz. The second stand is a laboratory pendulum stand of large displacements. It can be used to determine the parameters of vibration sensors with a dynamic range of displacements up to 200 mm, weight up to 20 kilograms, in the frequency range up to 2 Hz. Both stands are equipped with a universal information and measurement module, which provides for the collection, visualization and primary analysis of the data obtained and their storage on a PC, which was developed special software in NI LabVIEW environment.

**Keywords:** stand; tests; accelerometers; seismic receivers; control; information-measuring module.

Надійшла до редакції  
13 травня 2019 року

Рецензовано  
22 травня 2019 року

УДК 531.383

## СИСТЕМА КЕРУВАННЯ РУХОМ ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТУ ГІРОТЕОДОЛІТУ В НЕГІРОСТАБІЛІЗОВАНІЙ ПЛОЩИНІ

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

<sup>1)</sup>Казенне підприємство 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)

Розглянуто характеристики сучасних гіротеодолітів як пристроїв для наземного орієнтування. Показано, що для підвищення точності приладів в умовах зовнішніх збурень можна використовувати методи зменшення амплітуди коливань чутливого елемента в негіростабілізованій площині. Розглянуто кінематику поворотів та рівняння руху чутливого елемента гіротеодоліту.

Запропоновано нову систему керування положенням чутливого елемента гіротеодоліту в негіростабілізованій площині. Формування зворотного зв'язку проводиться методами модального керування. Проведено розрахунок коефіцієнтів регулятора. Розроблено спостережувач, інформація з якого використовується при формуванні керуючого впливу. Показано збіжність оцінок спостережувача точним значенням змінних стану системи.

Проведено аналіз частотних характеристик розімкненої та замкненої систем. Показано, що частотні характеристики розімкненої системи мають резонансні піки на частотах, які відповідають полюсам передаточних функцій. За рахунок вибору власної частоти замкненої системи досягнуто значне зменшення коефіцієнту передачі в області середніх частот. За результатами моделювання показано, що застосування запропонованої системи керування дозволяє суттєво зменшити амплітуду вимушених коливань чутливого елемента, а також забезпечує демпфірування власних коливань. Проведено моделювання роботи системи керування при неточних вимірюваннях кутового відхилення чутливого елемента в негіростабілізованій площині. Вимірювальний шум вважається білим шумом, причому показано, що випадкова складова вихідного сигналу має значно меншу амплітуду порівняно з некеруваною системою.

У подальшому дослідження можуть бути спрямовані на розробку методів підвищення точності гіротеодолітів з використанням інформаційних сигналів у системі керування.

**Ключові слова:** гіротеодоліт; система керування; динамічні властивості.

### Вступ

При використанні сучасних засобів наземного орієнтування основними характеристиками таких приладів є точність та час визначення азимуту [1-3]. Основною перевагою гіроскопічних засобів визначення меридіану є незалежність їх від зовнішніх джерел інформації, тому актуальною є задача

підвищення точності гіротеодолітів при збереженні їх автономності [4, 5].

Одним з факторів, що впливають на величину похибки гіротеодоліту, яка виникає при поступальній вібрації основи, є динамічні характеристики чутливого елемента (ЧЕ), що визначаються з рівнянь руху в гіростабілізованій та негіростабілізо-

ваній площинах. Кінематику поворотів наведено на рис. 1 [6].

При використанні гіртеодолітом компенсаційного методу вимірювання азимуту в приладі функціонує система керування положенням ЧЕ в гіростабілізованій площині  $XOY$ , при проектуванні якої можна корегувати частотні характеристики. В той же час в негіростабілізованій площині  $YOZ$  коливання ЧЕ є некерованими, що може призводити до значних величин вібраційної похибки приладу, а також його відмов при великих амплітудах коливань [6].

У даній роботі пропонується використання в гіртеодоліті нової системи керування, для роботи якої необхідний сигнал кута повороту ЧЕ в негіростабілізованій площині, а також виконавчий елемент, який може бути реалізований на виокремлених полюсах існуючого датчика моменту. Для формування напруги в колі зворотного зв'язку використовується алгоритм модального керування. Функціональна схема запропонованої системи керування представлена на рис. 2.

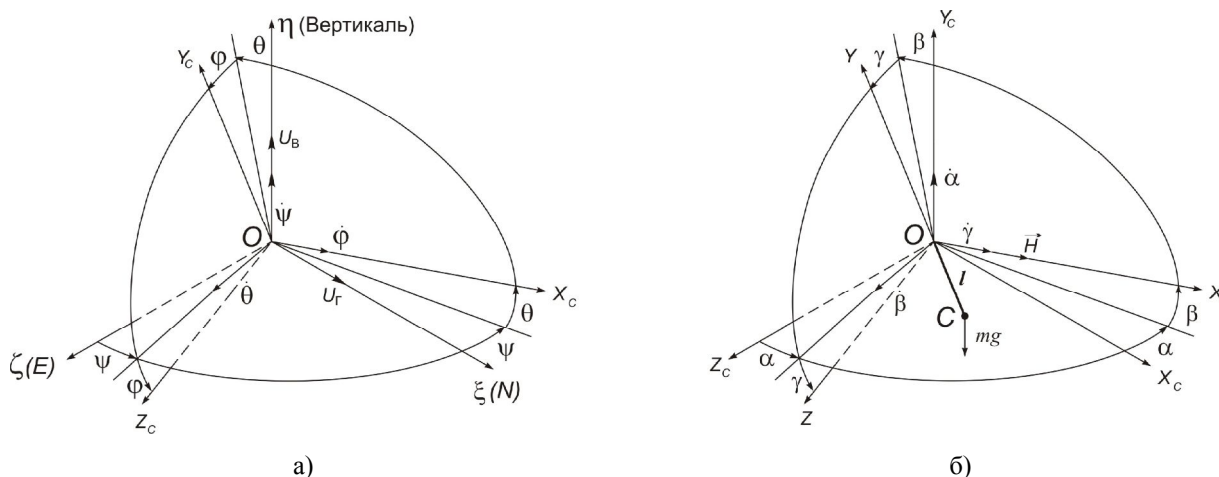


Рис. 1. Кінематика поворотів корпусу (а) та чутливого елемента (б)

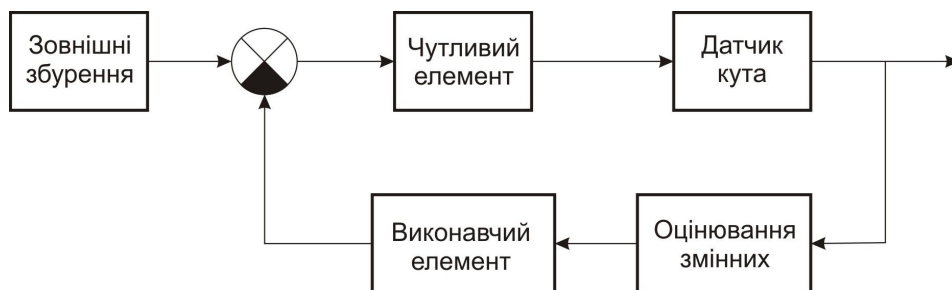


Рис. 2. Функціональна схема системи керування ЧЕ гіртеодоліта в негіростабілізованій площині

**Постановка задачі**

Розглянемо математичну модель руху ЧЕ гіртеодоліта в негіростабілізованій площині  $YOZ$  [6]

$$\begin{cases} (J_x + ml^2)\ddot{\gamma} + f_\gamma\dot{\gamma} + mgl\gamma - ml\ddot{z} - f_z\dot{z} = M_\gamma + M_K \\ ml\ddot{\gamma} + \frac{f_\gamma}{l}\dot{\gamma} - \left(m\ddot{z} + \frac{f_z}{l}\dot{z} + C_z z\right) = F_z \end{cases}, (1)$$

де  $\gamma$  – кут повороту ЧЕ відносно корпусу приладу по осі  $X$ ;  $z$  – зміщення точки підвісу ЧЕ відносно корпусу приладу в напрямку осі  $Y$ ;  $M_K$  – момент, який формується системою керування;  $J_x$  – момент інерції ЧЕ відносно осі  $X$ ;  $m$  – маса ЧЕ;  $l$  –

зміщення центру мас ЧЕ відносно точки підвісу;  $C_z$  – лінійна жорсткість підвісу відносно осі  $Z$ ;  $f_\gamma$  – коефіцієнт кутового демпфірування,  $f_z$  – коефіцієнт лінійного демпфірування;  $M_\gamma = mlW_E$  – момент зовнішніх збурень, що виникає внаслідок поступальної вібрації  $W_E$ ,  $F_z = mW_E$  – складова сили інерції, що виникає внаслідок поступальної вібрації  $W_E$ .

Внаслідок малості коефіцієнтів демпфірування  $f_\gamma$  та  $f_z$  систему рівнянь (1) можна спростити, знехтувавши відповідними дисипативними силами

$$\begin{cases} (J_x + ml^2)\ddot{\gamma} + mgl\dot{\gamma} - ml\ddot{z} = M_\gamma + M_K \\ ml\dot{\gamma} - (m\dot{z} + C_z\dot{z}) = F_z \end{cases} \quad (2)$$

Запишемо систему рівнянь (2) у формі простору станів, позначивши змінні стану  $x_1 = \gamma$ ,  $x_2 = \dot{\gamma}$ ,  $x_3 = z$ ,  $x_4 = \dot{z}$ :

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{G}\mathbf{W} \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X} \end{cases}, \quad (3)$$

де  $\mathbf{X}$  – вектор стану,  $\mathbf{A}$  – матриця стану,  $\mathbf{B}$  – матриця передачі керування,  $\mathbf{U}$  – матриця керувальних впливів,  $\mathbf{G}$  – матриця передачі збурень,  $\mathbf{W}$  – матриця збурень;  $\mathbf{Y}$  – вектор вимірювання,  $\mathbf{C}$  – матриця вимірювання:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{mgl}{J_x} & 0 & 0 & -\frac{C_z l}{J_x} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{mgl^2}{J_x} & 0 & 0 & -\frac{C_z}{m} - \frac{C_z l^2}{J_x} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_x} \\ 0 \\ \frac{l}{J_x} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -gl \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C} = [1 \ 0 \ 0 \ 0]; \quad \mathbf{U} = M_K; \quad \mathbf{W} = W_E.$$

Таким чином, передбачається, що вимірюється одна змінна стану об'єкта – кут  $\gamma$  повороту ЧЕ відносно осі  $X$ , а керування є скалярною величиною. Керуючий вплив будемо шукати у вигляді:

$$\mathbf{U} = -\mathbf{H}\mathbf{X}; \quad (4)$$

де  $\mathbf{H} = [h_1 \ h_2 \ h_3 \ h_4]$  – матриця невідомих коефіцієнтів регулятора, які необхідно визначити.

#### Розв'язання поставленої задачі

Вимірювання кута повороту ЧЕ в негіростабілізованій площині можна проводити за методикою, запропонованою в роботі [7], або встановивши додатковий датчик кута. В той же час інші змінні стану, що необхідні для формування керуючого впливу (4) можна оцінити на підставі відомого кута  $\gamma$ , і відповідно формувати керування не за точним вектором стану, а за вектором оцінок:

$$\mathbf{U} = -\mathbf{H}\hat{\mathbf{X}};$$

де  $\hat{\mathbf{X}} = [\hat{x}_1 \ \hat{x}_2 \ \hat{x}_3 \ \hat{x}_4]^T$  – вектор оцінок змінних стану.

Для перевірки можливості визначення оцінок всіх змінних стану за виміряним вектором  $\mathbf{Y}$  розглянемо матрицю спостережуваності  $\mathbf{Q}$ , ранг якої дорівнює кількості змінних стану об'єкта  $\text{rank}\mathbf{Q} = 4$ , отже, за виміряним вихідним вектором  $\mathbf{Y}$  можна оцінити всі змінні стану.

Оцінювання змінних стану проводиться відповідно до рівняння [8]

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

де  $\mathbf{K} = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4]^T$  – матриця коефіцієнтів спостережувача.

Коефіцієнти матриці  $\mathbf{K}$  обираються на підставі бажаного розташування коренів характеристичного полінома на комплексній площині. Оберемо біноміальний розподіл коренів характеристичного рівняння [8], отже повинна виконуватися рівність

$$\det(p\mathbf{E} - \mathbf{A} + \mathbf{K}\mathbf{C}) = (p + \omega_n)^4, \quad (5)$$

де  $\det(p\mathbf{E} - \mathbf{A} + \mathbf{K}\mathbf{C})$  – характеристичний поліном спостережувача,  $\omega_n$  – власна частота спостережувача.

Привірюючи коефіцієнти при однакових степенях  $p$  в лівій і правій частинах виразу (5), можна визначити коефіцієнти матриці  $\mathbf{K}$ :

$$k_1 = 4\omega_n;$$

$$k_2 = 6\omega_n^2 - \frac{m^2 gl + C_z J_x + ml^2 J_x}{m J_x};$$

$$k_3 = 4\omega_n \frac{J_x + ml^2}{ml} - 4\omega_n^3 \frac{J_x}{C_z l};$$

$$k_4 = \frac{J_x + ml^2}{ml} \left( 6\omega_n^2 - \frac{m^2 gl + C_z J_x + ml^2 J_x}{m J_x} \right) - \omega_n^4 \frac{J_x}{C_z l} + g.$$

Збіжність оцінок до точних значень продемонстровано на рис. 3 на прикладі змінних стану  $x_1 = \gamma$  та  $x_3 = z$ . При цьому початкові значення координат обрано  $\gamma_0 = 10^{-4}$  рад,  $z_0 = 10^{-5}$  м, а власна частота спостережувача  $\omega_n = 40 \text{ с}^{-1}$ .

З представлених графіків видно, що оцінки (позначені пунктиром) збігаються до точних значень приблизно за 0,4 с. Швидка збіжність оцінок визначається власною частотою спостережувача, крім того можна відзначити відсутність перерегулювання в процесі оцінювання змінних стану.

Для визначення матриці коефіцієнтів  $\mathbf{H}$  запишемо характеристичний поліном замкненої системи

$$\det(p\mathbf{E} - \mathbf{A} + \mathbf{B}\mathbf{H}) = p^4 + \left( \frac{mlh_4 + mh_2}{m J_x} \right) p^3 +$$

$$+ \left( \frac{mlh_3 + mh_1 + m^2 gl + C_z J_x + C_z ml^2}{m J_x} \right) p^2 +$$

$$+ \frac{C_z h_2}{m J_x} p + \frac{C_z (mgl + h_1)}{m J_x}.$$

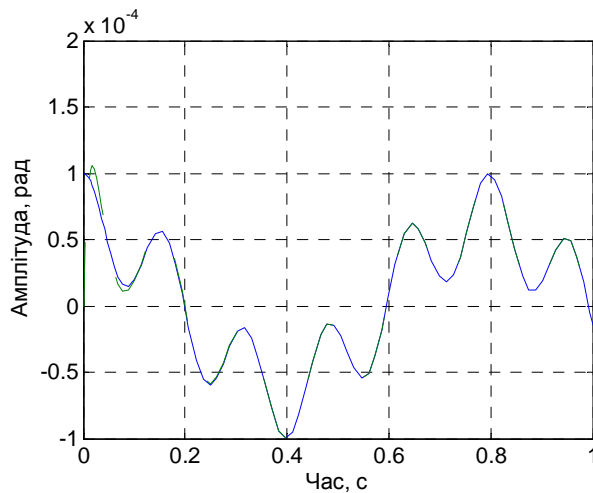
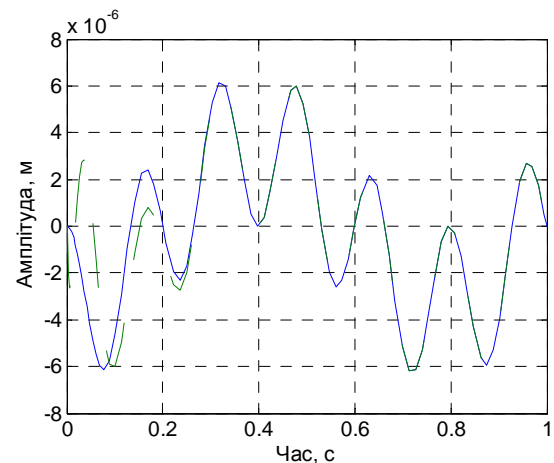
а) змінна  $\gamma$ б) змінна  $\zeta$ 

Рис. 3. Результати моделювання визначення оцінок змінних стану

Прирівняємо отриманий вираз до стандартної форми

$$p^4 + 4\omega_p p^3 + 6\omega_p^2 p^2 + 4\omega_p^3 p + \omega_p^4.$$

В результаті отримаємо значення коефіцієнтів регулятора:

$$h_1 = \omega_p^4 \frac{mJ_x}{C_z} - mgl;$$

$$h_2 = 4\omega_p^3 \frac{mJ_x}{C_z};$$

$$h_3 = 6\omega_p^2 \frac{J_x}{l} - \left( \frac{m^2 gl + C_z J_x + C_z ml^2}{ml} \right) - \omega_p^4 \frac{mJ_x}{C_z l} - mg;$$

$$h_4 = 4\omega_p \frac{J_x}{l} - 4\omega_p^3 \frac{mJ_x}{C_z l}.$$

### Моделювання роботи системи керування

Для моделювання роботи розробленої системи керування чутливим елементом гіртеодоліта в негіростабілізованій площині, була розроблена програмна модель приладу, яка відповідає рівнянням (2). Параметри гіртеодоліту обрані на підставі відомих з літературних джерел [1], значення параметрів наведено в табл. 1.

Частоти власних коливань некерованої системи визначаються коренями характеристичного рівняння  $\det(p\mathbf{E} - \mathbf{A}) = 0$ :

$$p^4 + \left( \frac{m^2 gl + C_z J_x + C_z ml^2}{mJ_x} \right) p^2 + \frac{C_z gl}{J_x} = 0.$$

$$p_{1,2} = \pm 7,997 j; \quad p_{3,4} = \pm 39,433 j.$$

Таблиця 1. Параметри гіртеодоліту

Назва	Значення, одиниці вимірювання
Маса чутливого елемента	$m = 1$ кг
Відстань від точки підвісу до центра мас ЧЕ	$l = 0.1$ м
Момент інерції ЧЕ відносно осі X	$J_x = 13 \cdot 10^{-4}$ кгм <sup>2</sup>
Лінійна жорсткість підвісу відносно осі Z	$C_z = 150$ Н/м

Розглянемо частотні характеристики системи за відсутності керування, які можна отримати з передавальних функцій за збурювальним впливом  $\mathbf{W}$ . Передавальні функції можна отримати з рівнянь (3) для некерованої системи:  $\mathbf{W}(p) = (p\mathbf{E} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{G}$ . Відповідні амплітудно-частотні характеристики для вихідних змінних  $\gamma$  та  $\dot{\gamma}$  представлено на рис. 4.

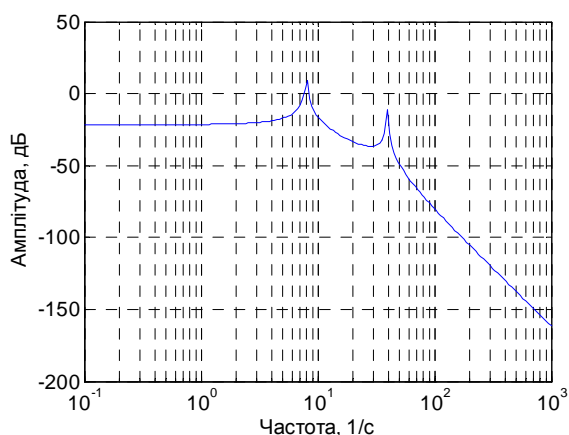
Отримані результати свідчать про наявність резонансних піків АЧХ на відповідних власних частотах, знайдених при розв'язанні характеристичного рівняння. Отже, в діапазоні частот від 1 до 100 с<sup>-1</sup> можливі значні за амплітудою коливання ЧЕ в негіростабілізованій площині.

Передавальна функція замкненої системи з керуванням визначається виразом

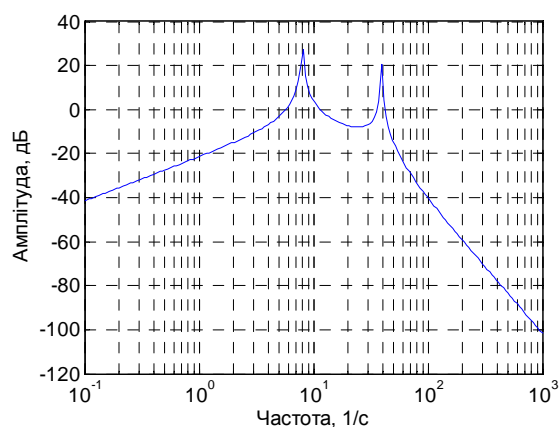
$$\Phi(p) = (pE - A + BH)^{-1}G.$$

Амплітудно-частотні характеристики замкненої системи порівнян з некерованою системою

(пунктирний графік) наведено на рис. 5. Власна частота замкненої системи  $\omega_p = 20 \text{ c}^{-1}$ .

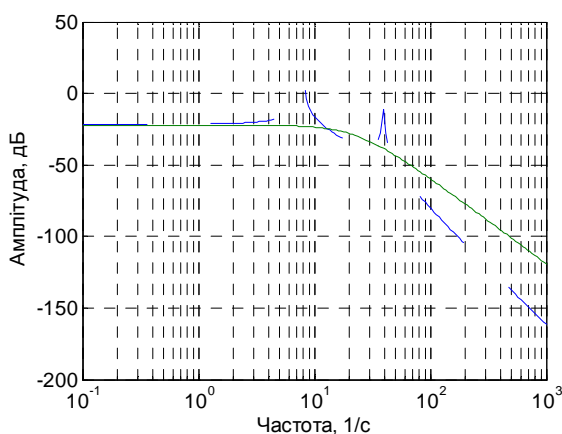


а) АЧХ по виходу  $\gamma$

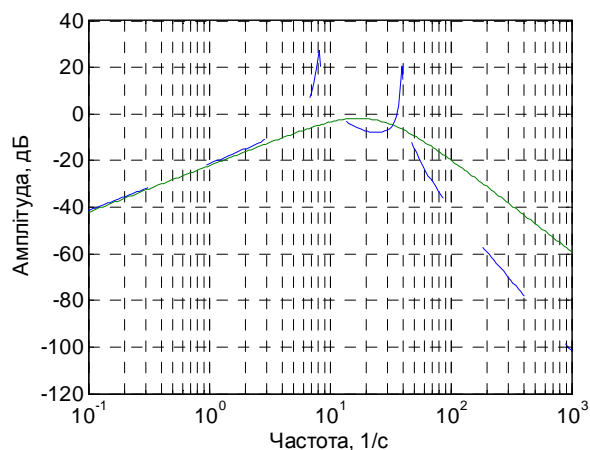


б) АЧХ по виходу  $\dot{\gamma}$

Рис. 4. Амплітудно-частотні характеристики некерованої системи



а) АЧХ по виходу  $\gamma$



б) АЧХ по виходу  $\dot{\gamma}$

Рис. 5. Амплітудно-частотні характеристики замкненої системи

Як видно з отриманих графіків амплітудно-частотних характеристик, запропонована система керування дозволяє значно зменшити амплітуду вимушених коливань ЧЕ при частотах зовнішньої вібрації основи близьких до власних частот коливань в негiростабілізованій площині.

Крім вимушених коливань на динаміку ЧЕ також суттєво впливатимуть вільні коливання, оскільки в некерованій системі відсутнє демпфiрування. Розроблена система керування дозволяє загасити також і власні коливання за короткий період. Приклад перехідного режиму власних коливань розімкненої (пунктирний графік) та замкненої систем наведено на рис. 6.

Як видно з наведеного графіку перехідного процесу в розімкненій системі вільні коливання є незгасаючими, амплітуда яких визначається поча-

тковим відхиленням ЧЕ від положення рівноваги. Розроблена система керування забезпечує загасання власних коливань ЧЕ за період приблизно 1 с.

Вимірювання кута повороту ЧЕ в негiростабілізованій площині  $\gamma$ , що проводиться датчиком кута, матиме крім корисного сигналу також і вимірювальний шум  $V$ , який може призводити до появи додаткової похибки в системі

$$Y = CX + V.$$

Змоделюємо вплив шкідливої складової, яку вважатимемо білим шумом з середнім квадратичним відхиленням  $\sigma_v = 10^{-5}$  рад, що відповідає точності оптичних датчиків кута. Моделювання перехідного режиму в системі керування за наявності вимірювального шуму представлено на рис. 7.

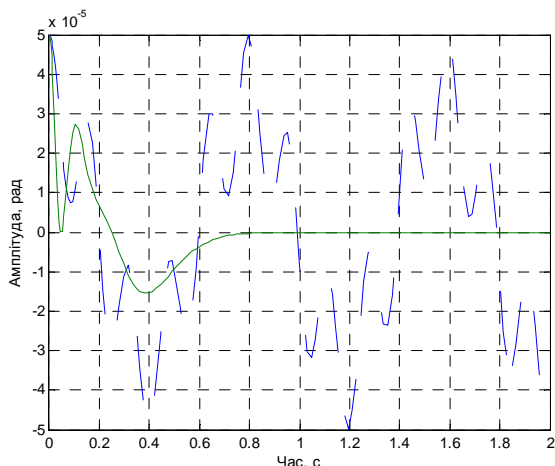


Рис. 6. Перехідний процес у розімкненій та замкненій системах

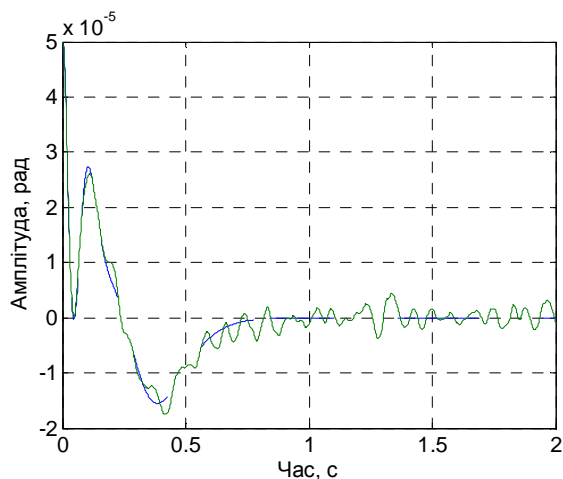


Рис. 7. Перехідний процес у замкненій системі за наявності вимірювального шуму

Результати моделювання свідчать, що при наявності білого шуму у вимірюваннях датчика кута положення ЧЕ в негіростабілізованій площині, процес на виході системи керування також матиме випадкову складову (графік перехідного процесу при "ідеальних" вимірюваннях наведено пунктиром), але з меншою амплітудою. В подальшому, для зменшення впливу випадкових шумів вимірювань, можна запропонувати використання фільтра Калмана.

#### Висновки

Запропонована структура системи керування положення чутливого елемента гіртеодоліту в негіростабілізованій площині. Формування керуючого впливу здійснюється методами модального керування.

Отримано залежності коефіцієнтів регулятора від параметрів гіртеодоліту та бажаних динамічних властивостей замкненої системи. Розроблено

методику оцінювання змінних стану, яка використана при формуванні керувального впливу.

Результати моделювання свідчать про те, що використання запропонованої системи керування дозволить зменшити амплітуду вимушених коливань чутливого елемента гіртеодоліту в негіростабілізованій площині при зовнішніх збуреннях на частотах, близьких до власних частот некеруваної системи. Розроблена система керування також забезпечує демпфірування власних коливань чутливого елемента, водночас, перехідний процес закінчується менше ніж за 1 с.

У подальшому перспективним є аналіз можливостей використання розробленої системи керування для підвищення точності гіртеодолітів при наявності зовнішніх збурень, наприклад використання інформативних сигналів для компенсації похибок.

#### 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] 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.
- [3] Li Guodong; Wang Xiangjin; Wang Jia; Su Peng, "Design and Analysis of North-seeking Method by Time Differencing Method of Gyrotheodolite", In *Proc. 2012 Second International Conference on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control*, 8-10 December, 2012, pp. 313 – 317.
- [4] "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]
- [5] "GYROMAX™ Gyroscopes", 2014. [Online]. Available: <http://www.gmt-heger.com/index.php?id=8&lang=en>. [Accessed: Apr. 05, 2019]
- [6] С. А. Мураховский, Ю. Ф. Лазарев, П. С. Мироненко, "Динамика наземного компенсационного маятникового гироскопа", *Вісник Інженерної академії України*, №2, с. 125-130, 2010.
- [7] С. А. Мураховский, "Метод определения дополнительных параметров движения чувствительного элемента гироскопа", *Вісник Інженерної академії України*, №2, с. 106-109, 2012.
- [8] Н. Т. Кузовков, *Модальное управление и наблюдающие устройства*. Москва, СССР: Машиностроение, 1976.

УДК 531.383

**А. А. Боярчук, П. С. Мироненко, С. А. Мураховский**<sup>1)</sup>КП СПБ «Арсенал», Киев, Украина<sup>2)</sup>Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского", Киев, Украина**СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ГИРОТЕОДОЛИТА В НЕГИРОСТАБИЛИЗИРОВАННОЙ ПЛОСКОСТИ**

Рассмотрены характеристики современных гиротеодолитов как устройств для наземного ориентирования. Показано, что для повышения точности приборов в условиях внешних возмущений можно использовать методы уменьшения амплитуды колебаний чувствительного элемента в негиростабилизированной плоскости. Рассмотрены кинематику поворотов и уравнения движения чувствительного элемента гиротеодолита.

Предложена новая система управления положением чувствительного элемента гиротеодолита в негиростабилизированной плоскости. Формирование обратной связи проводится методами модального управления. Проведен расчет коэффициентов регулятора. Разработан наблюдатель, информация с которого используется при формировании управляющего воздействия. Показана сходимости оценок наблюдателя к точным значениям переменных состояния системы.

Проведен анализ частотных характеристик разомкнутой и замкнутой систем. Показано, что частотные характеристики разомкнутой системы имеют резонансные пики на частотах, соответствующих полюсам передаточных функций. За счет выбора собственной частоты замкнутой системы достигнуто значительное уменьшение коэффициента передачи в области средних частот. По результатам моделирования показано, что применение предложенной системы управления позволяет существенно уменьшить амплитуду вынужденных колебаний чувствительного элемента, а также обеспечивает демпфирование собственных колебаний. Проведено моделирование работы системы управления при неточных измерениях углового отклонения чувствительного элемента в негиростабилизированной плоскости. Измерительный шум считается белым шумом, причем показано, что случайная составляющая выходного сигнала имеет значительно меньшую амплитуду по сравнению с неуправляемой системой. В дальнейшем исследования могут быть направлены на разработку методов повышения точности гиротеодолитов с использованием информационных сигналов в системе управления.

**Ключевые слова:** гиротеодолит; система управления; динамические характеристики.

<sup>1)</sup>**A. O. Boyarchuk, <sup>2)</sup>P. S. Mironenko, <sup>2)</sup>S. A. Murakhovsky***Arsenal Special Device Production State Enterprise, Kyiv, Ukraine**National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine***THE MOTION CONTROL SYSTEM OF THE SENSITIVE ELEMENT OF A GYROTHEODOLITE IN A NON-GYROSTABILIZED PLANE**

The characteristics of modern gyrotheodolites as devices for land orientation are considered. It is shown that to improve the accuracy of devices under external disturbances, methods of reducing the amplitude of oscillations of a sensitive element in a non-gyrostabilized plane can be used. The kinematics of turns and the equations of motion of the sensitive element of the gyrotheodolite are considered.

A new system for controlling the position of the sensitive element of the gyrotheodolite in the non-gyrostabilized plane is proposed. The formation of feedback is carried out by modal control methods. The calculation of the coefficients of the regulator is shown. An observer has been developed, information from which is used in the formation of a control signal. The convergence of the observer's estimates to the exact value of the system state variables is shown.

The frequency characteristics of open-loop and closed-loop systems is analyzed. It is shown that the frequency characteristics of an open-loop system have resonance peaks at frequencies corresponding to the poles of the transfer functions. By choosing the natural frequency of the closed-loop system, a significant reduction in the transmission coefficient in the medium frequency range has been achieved. According to the simulation results, it is shown that the application of the proposed control system allows to significantly reduce the amplitude of forced oscillations of the sensitive element, and also provides damping of natural oscillations. A simulation of the operation of the control system was carried out with inaccurate measurements of the angular deviation of the sensitive element in the non-gyrostabilized plane. Measuring noise is considered white noise, and it is shown that the random component of the output signal has a much smaller amplitude compared to the open-loop system. Further studies can be directed to the development of methods for improving the accuracy of gyrotheodolites using information signals in the control system.

**Keywords:** gyrotheodolite; control system; dynamic properties.

*Надійшла до редакції  
19 квітня 2019 року*

*Рецензовано  
26 квітня 2019 року*