

ПРИЛАДИ

УДК 528.563

Ткачук А.Г.

Житомирський державний технологічний університет

Безвесільна О.М.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

БУДОВА ТА ПРИНЦИП РОБОТИ НОВОГО ПРЕЦИЗІЙНОГО П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ЧУТЛИВОГО ЕЛЕМЕНТА СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ

Проаналізовано склад та призначення автоматизованих систем стабілізації. Розглянуто класичну систему непрямої стабілізації та систему стабілізації авіаційних гравіметричних систем. Проаналізовано наявні сьогодні види чутливих елементів систем стабілізації. Описано будову та принцип роботи нового прецизійного чутливого елемента для системи стабілізації, що має вищу, ніж у відомих аналогів, точність.

Ключові слова: стабілізатор, п'єзоелемент, чутливий елемент, похибка, регулювання.

Постановка проблеми. Системи стабілізації – це один із типів систем автоматичного керування, які призначені для підтримання постійного значення керованої величини із заданою точністю. Сьогодні ці системи використовуються для стабілізації об'єктів фотокамер, вимірювальних осей наземних та авіаційних гравіметричних систем, а також у військовій сфері для стабілізації озброєння.

Під час військових конфліктів найбільші втрати легкої броньованої техніки є наслідком використання малоефективних систем стабілізації та наведення озброєння. Наявні сьогодні системи стабілізації не можуть достатньо ефективно виконувати поставлені завдання через малу швидкість та точність їхніх чутливих елементів.

Сьогодні нові комплекси (системи) стабілізації та її чутливі елементи, розроблені науковцями НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Житомирського державного технологічного університету в співпраці з ПАТ «НВО «Київський завод автоматики», не потребують закордонних комплектуючих та, порівняно з аналогами, мають невисоку собівартість [1, с. 10].

Тому актуальною науково-технічною проблемою є розроблення нових та підвищення точності наявних чутливих елементів систем стабілізації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1, с. 166] побудовано схематичні моделі та проведено моделювання п'єзоелектричних одноканальних перетворювачів із додатковими електричними коливальними контурами, які можуть бути використані як чутливий елемент стабілізатора озброєння. Використання таких моделей дозволяє за допомогою прикладних програм проводити оцінку характеристик і прогнозування параметрів і режимів роботи п'єзоелектричних перетворювачів. Проте отримані результати не можуть бути доказом того, що датчик такої конструкції має вищу точність, ніж в аналогів, оскільки не розглянуто двоканальні схеми компенсації похибок вимірювання.

У роботі [2, с. 112] виконано синтез нейромережевої системи наведення і стабілізації озброєння легкої броньованої техніки. Однак не розглянуто доцільність використання нейромережевого підходу для компенсації інструментальних похибок.

У роботах [3, с. 56; 4, с. 2] запропоновано за чутливий елемент системи стабілізації використовувати коріюлісовий вібраційний гіроскоп. Проаналізовано склад і принцип роботи відомої системи ударо- і віброзахисту навігаційного комплексу легкої броньованої техніки. Однак відсутні

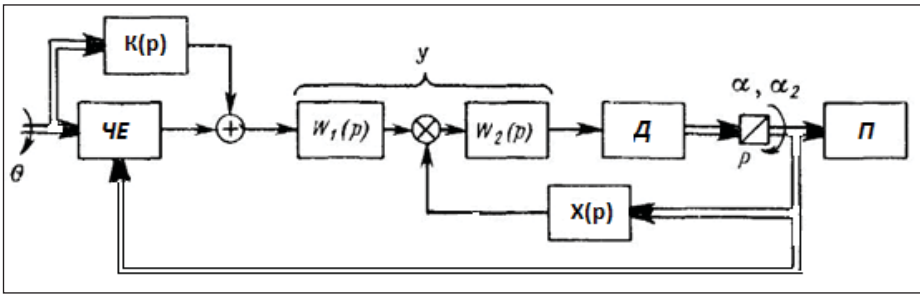


Рис. 1. Блок-схема системи непрямої стабілізації

пропозиції з покращення технічних характеристик системи, аналіз математичної моделі та похибок чутливих елементів системи.

У статті [5, с. 9] проведено розрахунок та аналіз статичних похибок двогіроскопного чутливого елемента. Проте не порівняно його точність із наявними аналогами.

Постановка завдання. Система стабілізації у військовій галузі – це система, що здійснює стабілізацію прицілювання зброї під час переміщення платформи, на якій цю зброю встановлено. Вона призначена для спрощення прицілювання під час руху броньованих машин і підвищення точності вогню, є частиною системи керування вогнем. Технічно являє собою набір датчиків і обчислювальний комплекс, з'єднаний із приводом гармати. На підставі показників датчиків визначаються параметри переміщення платформи і видаються керуючі команди приводу гармати, який компенсує відхилення.

Як систему стабілізації в статті розглянуто систему автоматичного керування, що забезпечує збереження певної кутової орієнтації башти стосовно системи координат, осі якої певним чином орієнтовані в просторі. Ця система координат є опорною. Залежно від конкретного завдання це може бути, наприклад, інерціальна система координат або система, осі якої спрямовані по вертикалі місця, де розташований об'єкт, що рухається.

Система стабілізації забезпечує сталість кутів між осями нерухомої системи координат і осями, жорстко зв'язаними з об'єктом стабілізації, який надалі буде називатися стабілізуючою платформою [1, с. 23].

Мета статті – розробити структурну схему та надати принцип роботи нового прецизійного чутливого елемента системи стабілізації.

Виклад основного матеріалу дослідження. Класична система стабілізації складається із платформи, що стабілізується, чутливого елемента (або блока чутливих елементів), що визначає абсолютний кут повороту платформи α , підсилювача

вихідного сигналу чутливого елемента, двигунів і тахогенераторів.

Блок-схема класичної системи непрямої стабілізації представлена в [6, с. 106] та приведена на рис. 1, де ЧЕ – чутливий елемент; П – підсилювач; Д – двигун; Р – редуктор; П – стабілізована плат-

форма; $W_1(p)$ і $W_2(p)$ – передатні функції блоків підсилювача разом із засобами для корекції; $X(p)$ – передатна функція ланцюга сигналу за похідними кута повороту α_2 платформи щодо коливального об'єкта, $\lim_{p \rightarrow 0} X = 0$; $K(p)$ – передатна функція ланцюга сигналу за похідними кута коливання θ , $\lim_{p \rightarrow 0} K = 0$.

Диференційні рівняння системи непрямої стабілізації мають такий вигляд [6, с. 106]:

$$\left. \begin{aligned} J_0 p^2 \alpha + J_d n p^2 [(-1)^t \theta - n \alpha_2] &= M_B - n M_D; \\ M_D &= k_d U - s n p \alpha_2; \\ U &= W_y(p) \left[k_{u,e} \alpha - \frac{X(p)}{W_1(p)} \alpha + K(p) \theta \right]; \\ \alpha &= 0 - \alpha_2. \end{aligned} \right\} (1)$$

Де J_0 – момент інерції платформи, приведений до осі стабілізації; J_d – момент інерції ротора двигуна з редуктором, приведений до осі двигуна; n – передатне число редуктора, що має і пар зубчастих передач; M_B – сумарний момент збуренні від впливу моменту сухого тертя; M_D – момент стабілізуючого двигуна; U – напруга управління стабілізуючого двигуна; k_d і s – коефіцієнти, що характеризують стабілізуючий двигун; $k_{u,e}$ – коефіцієнт передачі чутливого елемента; $W_y(p) = W_1(p) W_2(p)$.

У роботі [7, с. 52] наведено приклад системи стабілізації, яку рекомендовано використовувати в складі авіаційних гравіметричних систем. У цій системі горизонтальна стабілізована платформа (далі – ГСП) має у своєму складі два лінійні акселерометри та виконавчі механізми у вигляді спеціальних двигунів (рис. 2).

Система стабілізації працює так. Вихідні сигнали лінійних акселерометрів f_y , f_x , установлених на ГСП, орієнтованій у географічній системі координат, осі чутливості яких спрямовані на північ та на схід відповідно, матимуть вигляд [7, с. 51]:

$$\left. \begin{aligned} f_x &= -(2\dot{r}\dot{\phi}_c + r\ddot{\phi}_c) \cos \chi + (\ddot{r} - r\dot{\phi}_c^2) \sin \chi - 2r\omega_3 \lambda \cos \phi_c \\ &\sin \phi - r\lambda \cos \phi_c \sin \phi + \mathcal{N}g; \end{aligned} \right\} (2)$$

$$f_y = 2r\dot{\phi}_3 \omega_3 \sin \phi_c + 2r\phi_c \lambda \sin \phi_c - 2\dot{r}\lambda \cos \phi_c$$

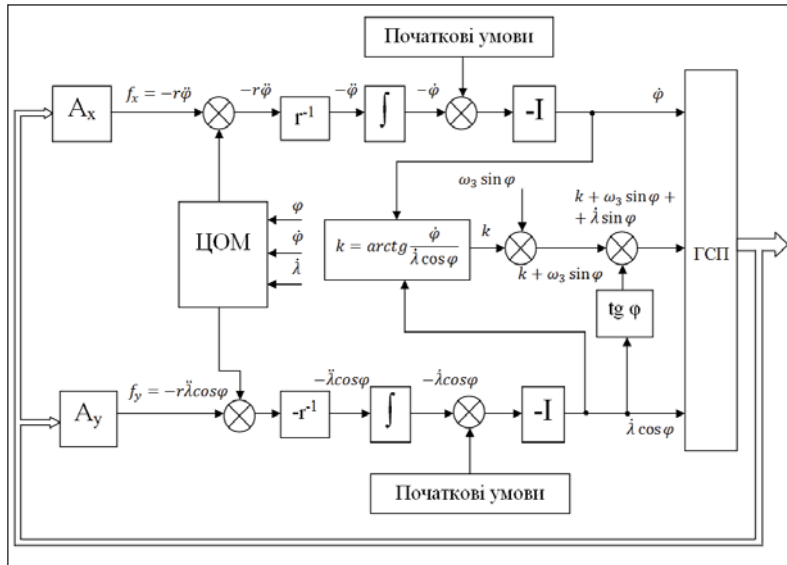


Рис. 2. Блок-схема системи стабілізації [7, с. 52]

$$-2\dot{r}\omega_3 \cos \phi_c - v g, \quad (3)$$

де \aleph, v – кути між нормаллями до еліпсоїда і геоїда відповідно в меридіональному перерізі та в площині перерізу, перпендикулярного площині меридіана; ϕ, ϕ_c – географічна та геоцентрична широта відповідно; χ – відхилення від вертикалі; λ – довгота; g – прискорення; r – радіус місцезнаходження; v – швидкість рухомого об'єкта.

Отримані сигнали надходять до бортового комп'ютера, де формується керуючий сигнал, що надходить до двигунів, які, у свою чергу, вирівнюють ГСП у нульове положення.

Якщо ГСП виставлена абсолютно точно в положення вертикалі, то горизонтальні компоненти прискорення сили тяжіння дорівнюють нулю. Вважаючи, що $\aleph g = -v g = 0$, запишемо складники, які буде компенсувати БЦОМ:

$$f_x \Rightarrow 0 = 2r\omega_3 \dot{\lambda} \cos \phi_c \sin \phi - r\dot{\lambda} \cos \phi_c \sin \phi; \quad (4)$$

$$f_y \Rightarrow 0 = 2r\dot{\phi} \omega_3 \sin \phi_c + 2r\phi_c \dot{\lambda} \sin \phi_c - 2r\dot{\lambda} \cos \phi_c - 2r\omega_3 \cos \phi_c. \quad (5)$$

Якщо знехтувати складниками другого порядку та прийняти відхилення від вертикалі рівним нулю, то:

$$f_x = -r\ddot{\phi}_c; \quad (6)$$

$$f_y = -2r\dot{\lambda} \cos \phi_c. \quad (7)$$

Якщо кожний із сигналів f_y і f_x помножити на r^{-1} , проінтегрувати і помножити на (-1) , то на виході відповідних каналів буде $\dot{\phi}$ та $\dot{\lambda} \cos \phi$. Сигнал $\dot{\phi}$ буде використовуватися для керування ГСП щодо осі x , спрямованої на північ, а сигнал $\dot{\lambda} \cos \phi$ – для керування щодо осі y , спрямованої на схід.

У роботах [8, с. 956; 9, с. 151; 10, с. 25; 11, с. 166; 12, с. 26;] описано нові високоточні як

п'єзоелектричні, так і ємнісні, струнні, гіроскопічні чутливі елементи, які можуть бути використані в складі системи стабілізації. Всі вони мають як свої переваги, так і недоліки. Описано навіть використання методу двоканальності для скасування впливу інструментальних похибок на точність перетворюючого пристрою.

Сьогодні перспективними є дослідження підвищення точності саме п'єзоелектричних чутливих елементів. Авторами статті в патенті [5, с. 1] описано новий прецизійний п'єзоелектричний чутливий елемент, який має вищу точність від відомих аналогів.

Підвищення точності вимірювання нового прецизійного чутливого елемента системи стабілізації забезпечується завдяки тому, що по кожній осі вимірювання O_z, O_x і O_y встановлено на ГСП чутливий елемент A_z, A_x, A_y , виконаний із двома каналами, в кожному з яких встановлено по одному п'єзоелементу, що є ідентичними. Інерційні маси прикріплені до низу п'єзопластин п'єзоелементів одного каналу та до верху п'єзопластин п'єзоелементів другого каналу. П'єзоелемент першого каналу кожного чутливого елемента працює на основі деформації розтягу, а п'єзоелемент другого каналу – на основі деформації стиснення (рис. 3).

Вихідні електричні сигнали п'єзопластин обох каналів усіх чутливих елементів надходять на входи операційних підсилювачів, що, окрім підсилення, виконують і функцію сумування сигналів, які надходять на входи бортового комп'ютера (далі – БЦОМ). У бортовому комп'ютері відбуваються необхідні розрахунки, результатом яких є відсилання керуючого сигналу на двигуни ГСП. Також на виході БЦОМ буде і значення повного вектора та повного модуля прискорення, в якому відсутній вплив інструментальних похибок від впливу залишкової неідентичності конструкції однакових п'єзопластин і мас, від впливу зміни температури, вологості та тиску зовнішнього середовища.

Висновки. Визначено що являє собою система стабілізації й описано її конструктивні елементи. Розглянуто класичну систему непрямої стабілізації та систему стабілізації авіаційних гравіметричних систем, здійснено їх математичний опис. Проаналізовано наявні сьогодні види чутливих елементів систем стабілізації. Описано будову та принцип роботи нового прецизійного чутливого елемента для системи стабілізації, що має вищу, ніж відомі аналоги, точність.

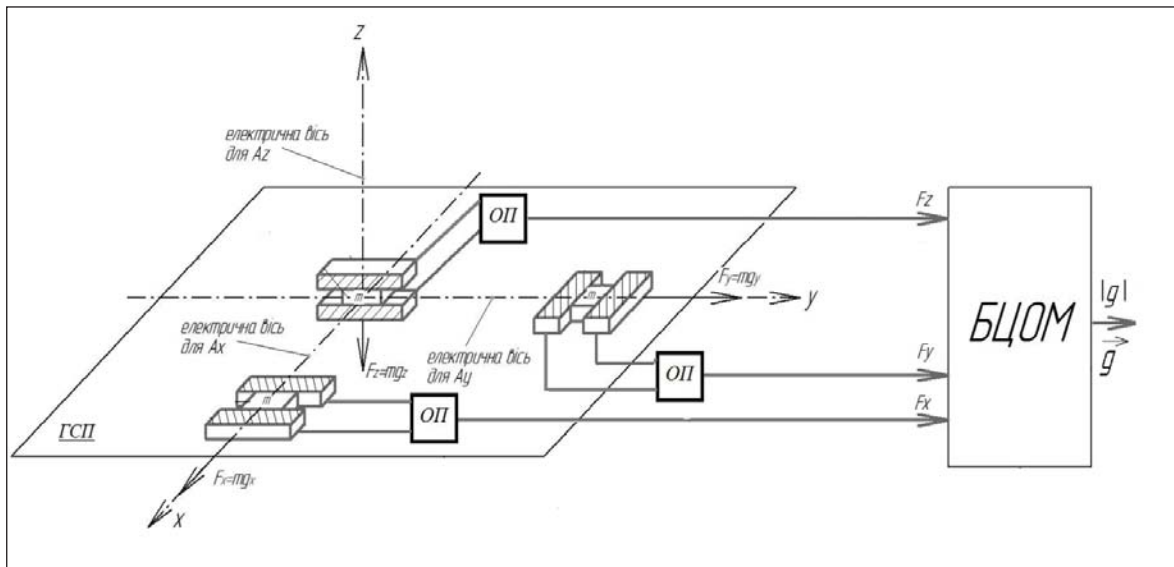


Рис. 3. Прецизійний п'єзоелектричний чутливий елемент

Список літератури:

1. Безвесільна О., Цірук В., Маляров С. Попередня прецизійна виставка навігаційних чутливих елементів приладового комплексу стабілізатора озброєння легкої броньованої техніки: монографія. Житомир: ЖДТУ, 2016, 235 с.
2. Кузнецов Б., Василець Т., Варфоломійєв О. Система наведення і стабілізації озброєння легкоброньованих машин із нейромережевим регулятором. Системи озброєння і військова техніка. 2010. № 1(13). С. 112–116.
3. Chikovani V. Influence of shock on the vibration amplitude stabilization system of Coriolis vibratory gyroscope resonator. Електроніка та системи управління. 2012. № 4 (34). С. 56–63.
4. Guerard J. Quartz structures for Coriolis Vibrating Gyroscopes. Phys. & Instrum. Dept. 2014. P. 1–4.
5. Безвесільна О., Ткачук А., Гуменюк А., Нечай С. Розрахунок та аналіз статичних похибок двогіроскопного чутливого елемента. Технологічний аудит та резерви виробництва: міжнародний науковий журнал. 2016. № 6/2 (32). С. 9–17.
6. Бесекерский В., Фабрикант Е. Динамический синтез системы гироскопической стабилизации. Ленинград: Судостроение, 1968, 348 с.
7. Безвесільна О. Вимірювання прискорень: підручник. Київ: Либідь, 2001, 264 с.
8. Korobiichuk I., Nowicki M., Bezvesilna O., Tkachuk A. Stabilization system of aviation gravimeter. International Journal of Scientific & Engineering Research. 2015. № 6 (8). P. 956–959.
9. Korobiichuk I. Mathematical model of precision sensor for an automatic weapons stabilizer system. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation. 2016. Vol. 89. P. 151–158.
10. Безвесільна О., Ткачук А. П'єзоелектричний гравіметр авіаційної гравіметричної системи: монографія. Житомир: ЖДТУ, 2013, 240 с.
11. Базіло К. Схемотехнічне моделювання п'єзоелектричного перетворювача з додатковими коливальними контурами. Вісник Хмельницького національного університету. 2013. № 6. С. 166–169.
12. Безвесільна О., Ткачук А., Хильченко Т., Пономаренко В. Компенсація інструментальних похибок низькочастотного гравіметра авіаційної гравіметричної системи шляхом використання методу двоканальності. Вісник інженерної академії України. 2015. № 3. С. 26–30.
13. Безвесільна О., Ткачук А., Хильченко Т., Бичук Р. Трикоординатний п'єзоелектричний гравіметр авіаційної гравіметричної системи. Патент України на винахід 113033, № а201509858; Заявл. 11.04.2016; Опубл. 25.11.2016, Бюл. № 22.

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ НОВОГО ПРЕЦИЗИОННОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ

Проанализирован состав и назначение автоматизированных систем стабилизации. Рассмотрены классическая система непрямо́й стабилизации и система стабилизации авиационных гравиметрических систем. Проанализированы существующие сегодня виды чувствительных элементов систем стабилизации. Описаны устройство и принцип работы нового прецизионного чувствительного элемента для системы стабилизации, более точного, чем известные аналоги.

Ключевые слова: стабилизатор, пьезоэлемент, чувствительный элемент, погрешность, регулирование.

STRUCTURE AND PRINCIPLE OF OPERATION NEW PRECISION PIEZOELECTRIC SENSING ELEMENTS OF STABILIZATION SYSTEM

The composition and purpose of automated stabilization systems are analyzed. The classical system of indirect stabilization and the system of stabilization of aviation gravimetric systems are considered. The existing types of sensitive elements of stabilization systems are analyzed. The structure and the principle of operation of a new precision sensitive element for a stabilization system with a higher accuracy from the known analogues is described.

Key words: stabilizer, piezoelement, sensitive element, error, regulation.