



УКРАЇНА

(19) UA

(11) 95709

(13) C2

(51) МПК (2011.01)

G01G 19/02 (2006.01)

G01P 9/00

G01C 19/00

G01G 19/12 (2006.01)

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИОПИС
ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(54) СПОСІБ ВИМІРУ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ КОРІОЛІСОВИМ ВІБРАЦІЙНИМ ГІРОСКОПОМ

1

(21) а201001344

(22) 09.02.2010

(24) 25.08.2011

(46) 25.08.2011, Бюл.№ 16, 2011 р.

(72) ЧІКОВАНІ ВАЛЕРІЙ ВАЛЕРІАНОВИЧ

(73) ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖУВАЛЬНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ "ІННАЛАБС ЮА"

(56) US 7120548 B2, 10.10. 2006.

UA 73632 C2, 15.08.2005

US 7216525 B2, 15.05.2007

US 7340954 B2, 11.03.2008

RU 2327110 C2, 20.06.2008

RU 2315953 C1, 27.01.2008

EP 1094297 B1, 27.07.2005

Беднова Елена Владимировна. Математические модели температурных погрешностей полусферического резонатора как элемента измерителя угловой скорости Автореф. дисс.. канд.физ-мат. наук. Саратов. 2002

(57) Спосіб виміру кутової швидкості коріолісовим вібраційним гіроскопом, заснований на генерації стоячої вібраційної хвилі на частоті, близькій або рівній одній з безлічі резонансних мод вібраційної

2

структури, з не менш, ніж двома електродами керування й вимірювальними електродами так, що пучність стоячої вібраційної хвилі розташована поблизу електрода одного з каналів керування, а обертання навколо осі симетрії вібраційної структури викликає дію сил Коріоліса, що збуджують додаткову стоячу вібраційну хвилю з пучністю, розташованою поблизу електрода іншого каналу керування, амплітуда якої пропорційна кутовій швидкості обертання, який **відрізняється** тим, що на електроди кожного каналу керування подають сигнали, що встановлюють пучність стоячої вібраційної хвилі посередині між двома електродами керування, а також сигнали, що стабілізують енергію коливань, сигнали, що компенсують кутову швидкість обертання вібраційної структури, й сигнали керування, що вирівнюють частоти коливань вібраційної структури по каналах керування, при цьому кутова швидкість обертання вимірюється піврізницею сигналів керування, що компенсують поворот стоячої вібраційної хвилі, викликаний дією кутової швидкості обертання.

Винахід належить до області приладобудування й може бути використано для виміру кутових швидкостей і кутів повороту в наземному транспорті, геодезії, комп'ютерній техніці, а також в авіації й космосі.

Відомі аналоги (патент США №7216525 від 15.05.07 і патент України №73632 від 14.10.2002) засновані, по суті, на генерації стоячої вібраційної хвилі, що формує сигнал на частотах, близьких або рівних одній з резонансних мод вібраційної структури, з не менш, ніж двома каналами управління й вимірювальними каналами, так, що обертання навколо осі симетрії вібраційної структури викликає дію сил Коріоліса, що збуджують додаткову вібраційну хвилю, амплітуда якої пропорційна кутовій швидкості обертання.

Аналоги мають знижену точність до вимірюваної кутової швидкості, при систематичній зміні (дрейфу) параметрів електронних сигналів, наприклад, дрейфу номіналів резисторів і конденсаторів у результаті самопрогріву або(і) під впливом зовнішніх умов і механічних параметрів вібраційної структури, наприклад, добротності вібраційної структури, різнодобротності по осях розташування електродів каналів управління. Це приводить до зменшення точності виміру кутової швидкості.

Відомий спосіб виміру кутової швидкості, прийнятий за прототип (Патент США №7120548 від 10.10.2006), заснований на генерації основної вібраційної хвилі, на частотах, близьких або рівних одній з резонансних мод вібраційної структури й синтезуючих сигналів управління для стабілізації

(13) C2

(11) 95709

(19) UA

амплітуди коливань, а також компенсує вторинну хвилю, що виникає через дію коріолісових сил при обертанні вібраційної структури. При цьому, сигнали управління, що стабілізують амплітуду коливань і сигнали, що стежать за температурним дрейфом резонансної частоти, а також квадратурна компонента сигналу управління, що компенсує вторинну хвилю, їхньої суми добутків з ваговими коефіцієнтами використовуються для корекції температурного дрейфу нуля вихідного сигналу, що збільшує точність виміру кутової швидкості при температурному дрейфі параметрів вібраційної структури. Коефіцієнти корекції в технічному рішенні, викладеному в прототипі, пропонується визначати в процесі калібрування на стендах, наприклад, підприємства-виготовлювача.

Недоліком даного методу є значне погіршення точності корекції при відсутності повторюваності вимірів на стенді й у реальних умовах експлуатації приладу. У зв'язку з тим, що умови, при яких проводиться калібрування коефіцієнтів корекції (температура, вологість, тиск, місце розташування щодо джерел тепла й ін.) істотно відрізняються від умов експлуатації, виникають значні погрішності виміру кутової швидкості. Крім того, процес калібрування забирає тривалий час і трудомісткий, тому що необхідно набрати статистику при прогоні по температурному діапазоні, тобто потрібний багаторазовий прогін і обробка результатів вимірів з метою визначення коефіцієнтів корекції.

Перед авторами стояла задача збільшення точності за рахунок компенсації погрішностей виміру кутової швидкості в процесі її виміру при дії температурних і інших зовнішніх факторів. У цьому випадку погрішності компенсуються по факту їхнього виникнення й не залежать від повторюваності погрішностей і їхніх коефіцієнтів корекції, а також не потрібно тривалий і трудомісткий процес калібрування.

Поставлена задача вирішується тим, що в способі виміру кутової швидкості, заснованому на генерації стоячої вібраційної хвилі на частоті, близькій або рівній одній з безлічі резонансних мод вібраційної структури з не менш, ніж двома каналами управління й вимірювальними каналами так, що пучність стоячої вібраційної хвилі розташована поблизу з електродами одного з каналів управління, а обертання навколо осі симетрії вібраційної структури викликає дію сил Коріоліса, що збуджують додаткову вібраційну хвилю, амплітуда якої пропорційна кутовій швидкості обертання, вводяться нові сигнали управління, які встановлюють пучність стоячої вібраційної хвилі посередині між двома електродами управління, а також стабілізують енергію коливань і вирівнюють частоти коливань по каналах управління, при цьому кутова швидкість обертання вимірюється піврізницею сигналів управління, які компенсують коливання, викликані коріолісовими силами.

Пропонований спосіб виміру кутової швидкості дозволяє збільшити точність виміру за рахунок виключення погрішностей від зовнішніх і внутрішніх збурювань, що однаково впливають на обидва вимірювальні канали і, тим самим, практично повністю компенсуються при визначенні піврізниці

показань у випадку ідентичності й близькості розташування електродів знімання сигналу. Ідентичність каналів забезпечується за рахунок технології виготовлення чутливого елемента гіроскопа, а близькість розташування електродів знімання забезпечується малогабаритністю чутливого елемента. Наприклад, для вібраційної структури у вигляді циліндра діаметром 25 мм максимальна відстань між електродами знімання не більше 2,5 мм. Для мікромеханічних вібраційних структур ця відстань не більше 2-3 мікронів.

Суть винаходу пояснюється наступними фігурами:

На Фіг.1 представлений приклад вібраційної структури у вигляді кільця з вісьмома рівновіддаленими електродами, що з'єднані в діаметрально протилежні пари й, що утворюють два канали управління й два канали виміру так, що кут між сусідніми електродами становить 45° .

На Фіг.2 представлено розташування вібраційної хвилі, пучність (максимуму амплітуди коливань) якої розташована під кутом $22,5^\circ$ до однієї з пар електродів, позначених для зручності віссю X, а іншої - віссю Y, по яких спрямовані керуючі сили й, на яких виробляються виміри коливань.

На Фіг.3 представлена структурна схема із зазначенням блоків, що реалізують операції по пропонуваному технічному рішенню.

На Фіг.4 представлена різниця частот каналів X і Y при зміні температури в діапазоні від -40 до $+50$ градусів Цельсія зі швидкістю зміни 1 град./хв.

На Фіг.5, графіки a, b, c і d, представлені величини вимірюваної кутової швидкості по кожному з каналів X (графік a) і Y (графік v), результуюча кутова швидкість (графік c) у вигляді піврізниці сигналів каналів X і Y, і амплітуди сигналів управління (графік d) по кожному каналу U_x і U_y , відповідно, при вимірюванні постійної кутової швидкості.

На Фіг.6, графіки a, b, c і d, представлені величини вимірюваної кутової швидкості по кожному з каналів X (a) і Y (b), результуюча кутова швидкість (c) у вигляді піврізниці сигналів каналів X і Y, коли температура (графік d) гіроскопа змінюється з невеликою швидкістю.

На Фіг.7, графіки a, b, c і d, представлені величини вимірюваної кутової швидкості по кожному з каналів X (a) і Y (b), результуюча кутова швидкість (c) у вигляді піврізниці сигналів каналів X і Y, коли температура (d) гіроскопа змінюється на 90 градусів Цельсія з великою швидкістю 1 град./хв. , створюючи більші градієнти температур у гіроскопі.

Вібраційна структура, у якій генерується стояча хвиля, шляхом подачі змінної напруги на керуючі електроди 1-5, розташовані по координаті X, представлена на Фіг.1 у вигляді кільця. Вібраційна структура може мати вигляд геометричної фігури, наприклад, циліндра, кільця, півсфери, затисненої балки, камертона та ін., а також структури, отримані методом мікромашинної або інтегральної технології. На Фіг.1 показані також електроди управління 2-6, розташовані по координаті Y, і вимірювальні електроди 3-7, 4-8. Електроди можуть бути ємнісного, електромагнітного або п'єзоелектричного типу, також можливе застосування електродів змішаного типу, наприклад, частина

електродів може бути ємнісного типу, а інша частина електромагнітного або п'єзоелектричного типів. На електроди управління 1-5 і 2-6 подаються сигнали управління, які встановлюють стоячу вібраційну хвилю посередині між керуючими електродами, тобто під кутом 22.5° до координатної осі X, і, відповідно до Y, як показано на Фіг.2. У випадку обертання вібраційної структури з кутовою швидкістю Ω , результуюча сила Коріоліса $F_{\Sigma \text{cor}}$ збуджує додаткову хвилю, пучність якої розташована по напрямку дії сили $F_{\Sigma \text{cor}}$ і має рівні, але протилежні за знаком проекції як на напрямок координатної осі X, так і на напрямок осі Y. При цьому, піврізниця сигналів управління, що компенсують поворот стоячої вібраційної хвилі, викликаний дією кутової швидкості обертання, дорівнює вимірюваній кутовій швидкості без погрішностей, що однаково впливають на канали X і Y. До таких погрішностей, насамперед, належать погрішності, пов'язані з не ідеальністю виготовлення вібраційної структури, що приводять до різної жорсткості вібраційної структури по осях X і Y. Ці погрішності, що є присутніми у технічному рішенні, прийнятому за прототип, приводять до різної частоти коливань стоячої хвилі по осях X, Y і збільшують погрішність виміру кутової швидкості, а також зменшують чутливість до вимірюваної кутової швидкості. Крім того, пропонуване технічне рішення виключає погрішність, що виникає через наявність перехресного зв'язку коефіцієнтів демпфування по осях X, Y, що приводить до зсуву нуля і є погрішністю виміру кутової швидкості.

Дійсно, рівняння коливань вібраційної структури, після компенсації різночастотності коливань по осях X, Y (див. Фіг.2), представляються у вигляді:

$$\begin{aligned} \ddot{X} + d_{xx} \dot{X} + \omega^2 X &= (2k\Omega - d_{xy}) \dot{Y} + U_x; \\ \ddot{Y} + d_{yy} \dot{Y} + \omega^2 Y &= (-2k\Omega - d_{yx}) \dot{X} + U_y; \end{aligned} \quad (1)$$

ω - власна частота коливань вібраційної структури, по обох осях;

d_{xx} , d_{yy} - коефіцієнти демпфірування коливань по осях X, Y, відповідно;

d_{xy} , d_{yx} - перехресні коефіцієнти демпфірування;

k - коефіцієнт Брайана, рівний приблизно 0,4;

Ω - вимірювана кутова швидкість;

U_x , U_y - керуючі сигнали по осях X, Y, відповідно.

Керуючі сигнали U_x , U_y формуються в такий спосіб:

$$\begin{aligned} U_x &= K_x \dot{X} + K_f X; \\ U_y &= K_y \dot{Y} + K_f Y; \end{aligned} \quad (2)$$

K_x - сигнал на виході регулятора 5 (Фіг.3);

K_ϕ - сигнал на виході регулятора 6 (Фіг.3);

K_y - сигнал на виході регулятора 5 (Фіг.3).

Рішення рівняння (1), з урахуванням виражень (2) дає:

$$\frac{1}{2}(K_y - K_x) = 2k\Omega + \frac{1}{2}(d_{xx} - d_{yy}); \quad (3)$$

Таким чином, піврізниця сигналів K_y і K_x визначає вимірювану кутову швидкість без погрішностей, обумовлених різночастотністю коливань по осях X, Y і виключає погрішність, пов'язану з коефіцієнтами перехресних зв'язків по демпфуванню d_{xy} , d_{yx} . При цьому, різниця коефіцієнтів демпфування d_{xx} і d_{yy} , що визначає зсув нуля гіроскопа для практичних вібраційних структур на кілька порядків менше значення кожного коефіцієнта, $d_{xx} - d_{yy} \ll d_{xx}$, d_{yy} , що збільшує точність вимірів кутової швидкості в порівнянні із прототипом.

На Фіг.3 представлена структурна схема гіроскопа із зазначенням блоків, що реалізують операції по пропонуваному технічному рішенню. Для конкретності опису роботи гіроскопа будемо вважати, що вібраційна структура має форму кільця, як показано на Фіг.3.

Гіроскоп працює в такий спосіб: Для генерації стоячої хвилі використовується сигнал з позитивним зворотним зв'язком по похідній вимірюваного сигналу, як по каналу X, так і по каналу Y. Канали X і Y еквівалентні, тобто виконують однакові операції. Сигнали з вимірників каналів X і Y надходять на амплітудні демодулятори 2 і 4, де виділяються амплітуди сигналів. Далі, амплітуди сигналів обох каналів порівнюються з їх заздалегідь заданими значеннями A_x і A_y на суматорах S_x , S_y і подаються на регулятори 5 і 7 цих каналів, відповідно. Регулятори 5 і 7 формують сигнали K_x , K_y , які після множення на $1/2$, визначають вимірювану кутову швидкість обертання Ω .

Додатково сигнали каналів X і Y надходять на фазовий детектор 3, вихідний сигнал якого порівнюється на суматорі S_ϕ із заздалегідь заданим значенням різниці фаз, наприклад, нуль градусів ($\phi=0$) і надходить на регулятор 6 фазового каналу. Регулятор 6 фазового каналу формує сигнал K_ϕ , що розпаралелюється й після множення на вхідні сигнали каналів X і Y і доданні до сигналів K_x і K_y , які у свою чергу множаться на похідні сигналів X і Y, формують сигнали управління, що вирівнюють частоти коливань по обох каналах і стабілізують амплітуди коливань A_x і A_y по цих каналах незалежно від наявності або відсутності кутової швидкості обертання, у відповідність із формулою 2. При цьому, значно знижується зсув нуля гіроскопа, виключаються погрішності, обумовлені перехресними зв'язками за коефіцієнтом демпфірування d_{xy} , d_{yx} , і погрішності пов'язані з різницею частот коливань по каналах X і Y так, як ця різниця зводиться до нуля сигналами управління.

Для того, щоб показати як у реальному приладі реалізується пропонуваний спосіб виміру кутової швидкості й наскільки збільшується точність вимірів, наведені графіки сигналів управління, кутової швидкості й сигналу різниці частот каналів X і Y у різних температурних умовах.

На Фіг.4 показано, що система управління втримує різницю частот коливань каналів X і Y, близькою до нуля (менше $\pm 0,0002$ Гц), навіть тоді, коли температура змінюється в широкому діапазоні від -40 до $+50$ градусів Цельсія зі швидкістю змі-

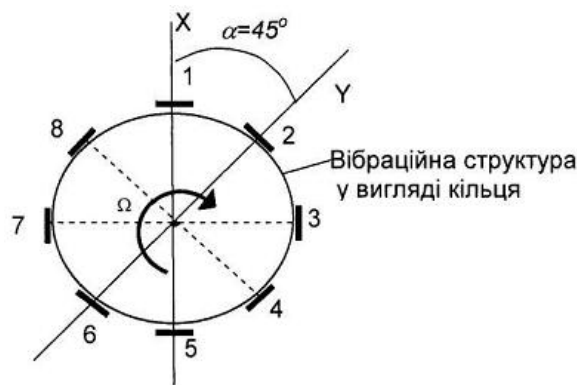
ни 1 град./хв, створюючи більші температурні градієнти.

На Фіг.5, графіки а, b, і с, показані вимірювана кутова швидкість по кожному каналу X (графік а) і Y (графік b), сигнали яких не симетричні щодо нуля, тобто мають великий зсув нуля близько 16 і 15 град./сек, відповідно, а їхня піврізниця (графік с), що представляє результуючий сигнал кутової швидкості має зсув нуля практично рівне нулю, що є безсумнівною перевагою. Графік d на цій фігурі показує, які сигнали управління виробляються регуляторами 5 і 7 (див. Фіг.3).

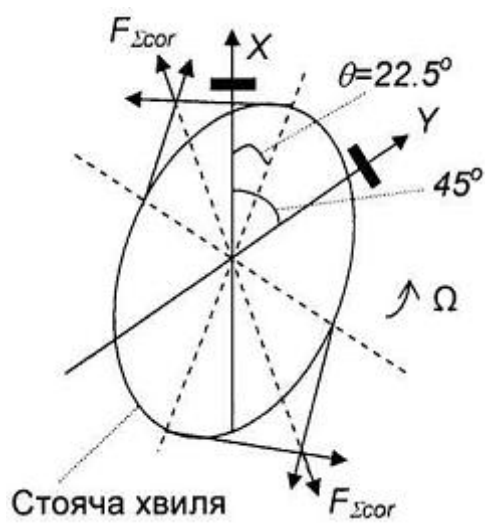
На Фіг.6, графіки а і b, показують сигнали каналів X і Y, коли кутова швидкість обертання дорівнює нулю, тобто, показані погрішності гіроскопа. Однак, однакова зміна цих сигналів приводить до значної компенсації погрішностей вимірів при обчисленні результуючого сигналу (графік 6с). Погрішність результуючого сигналу майже в 1000 разів менше, ніж погрішності по кожному з каналів X і Y. Графік d показує довільний характер зміни температури гіроскопа з незначними градієнтами температур.

На Фіг.7, графіки а, b і 3, показують аналогічні погрішності каналів X, Y і результуючу кутову швидкість, коли температура гіроскопа, графік d, змінюється з великою швидкістю в широкому діапазоні температур. Видно, що крім значного зменшення погрішності гіроскопа, пропонуване технічне рішення компенсує неадекватність зміни вихідного сигналу при більших градієнтах температур. Така неадекватна поведінка погрішності ніяким чином не може бути скомпенсована в технічному рішенні, прийнятому за прототип, тому що неадекватна поведінка погрішності виникає по факту її виникнення й не відбивається на інших сигналах, наприклад, температурі гіроскопа й, тому не може бути скомпенсована корекцією по температурі.

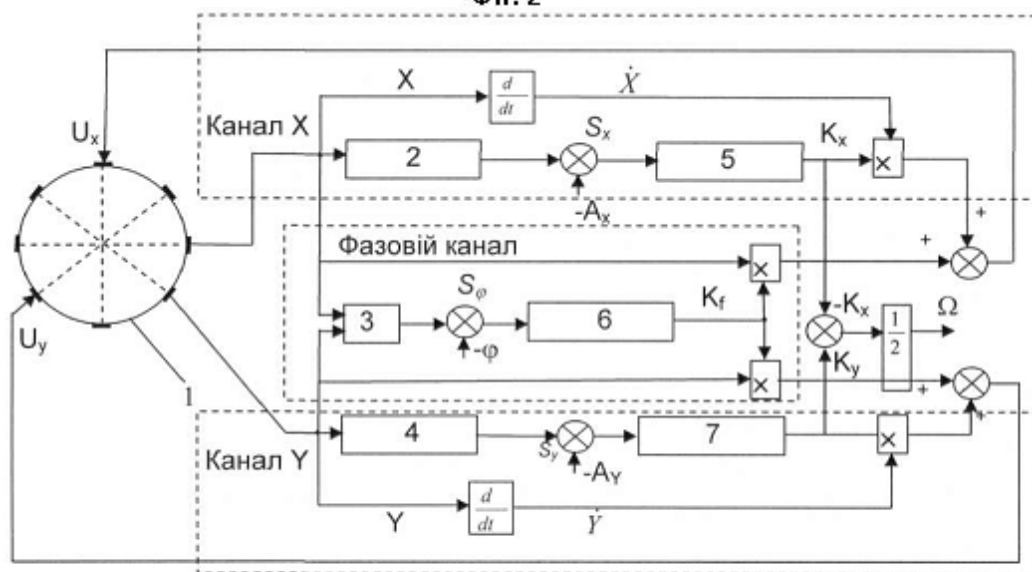
Таким чином, з аналізу представлених графіків знятих з реального приладу виходить, що задача винаходу збільшення точності виміру кутової швидкості досягнута й пропонуване технічне рішення має значні переваги в точності в порівнянні із прототипом.



Фіг. 1



Фиг. 2



Фиг. 3

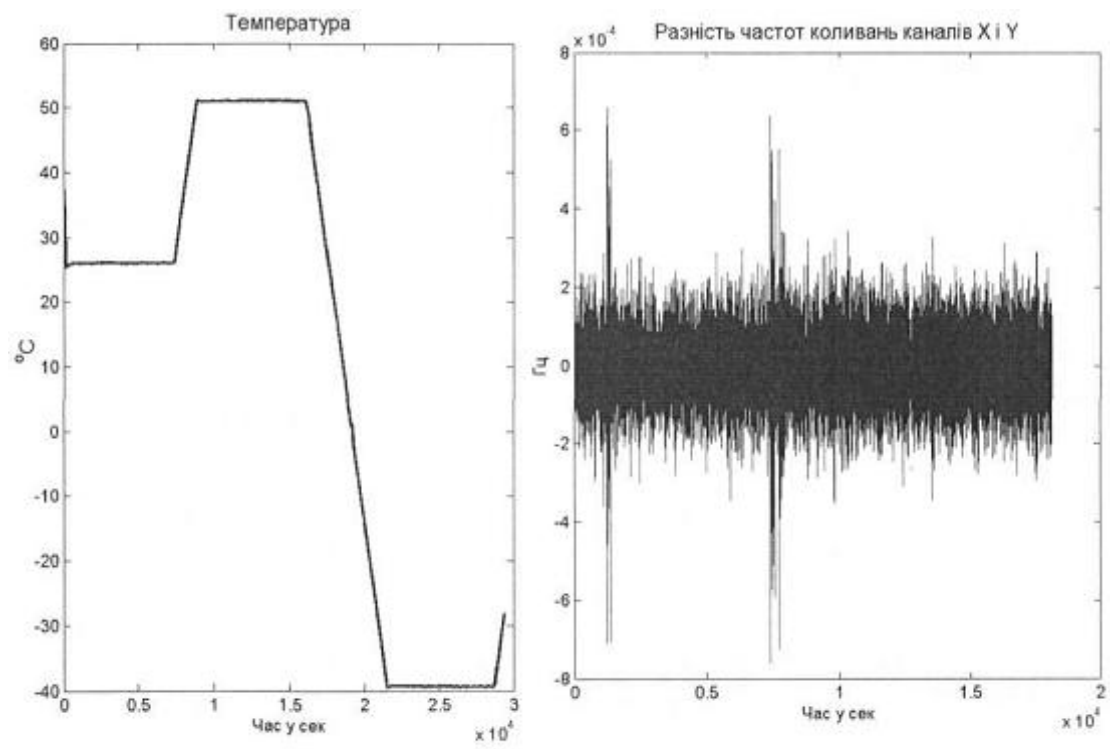


Fig. 4

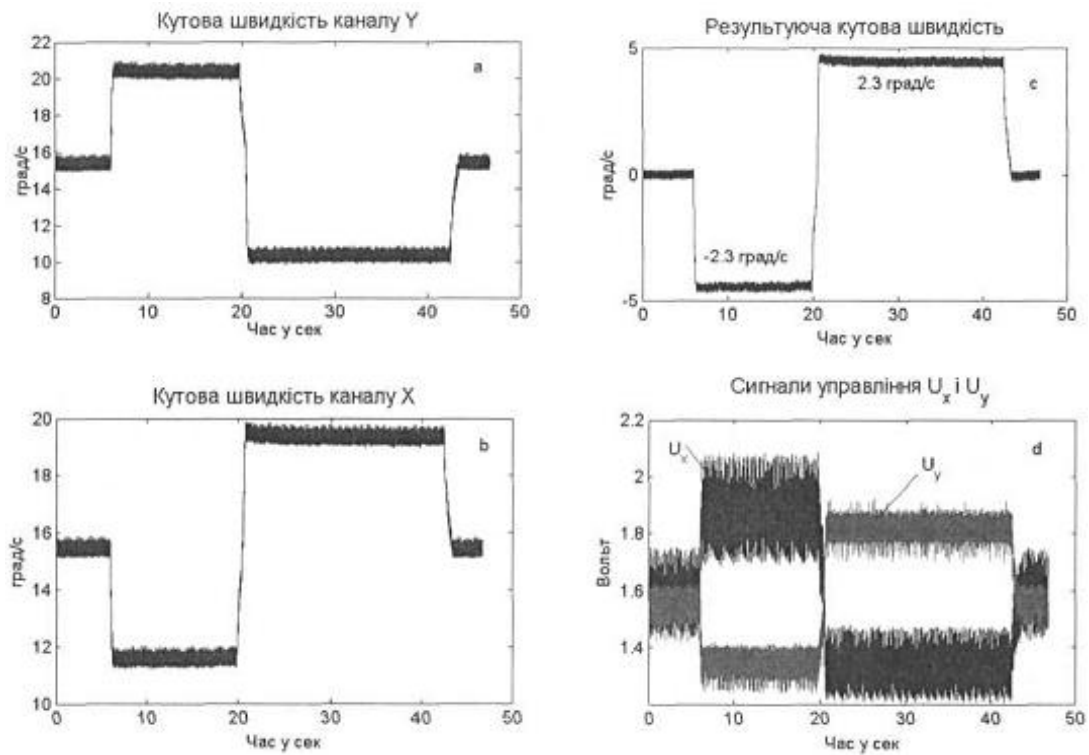


Fig. 5

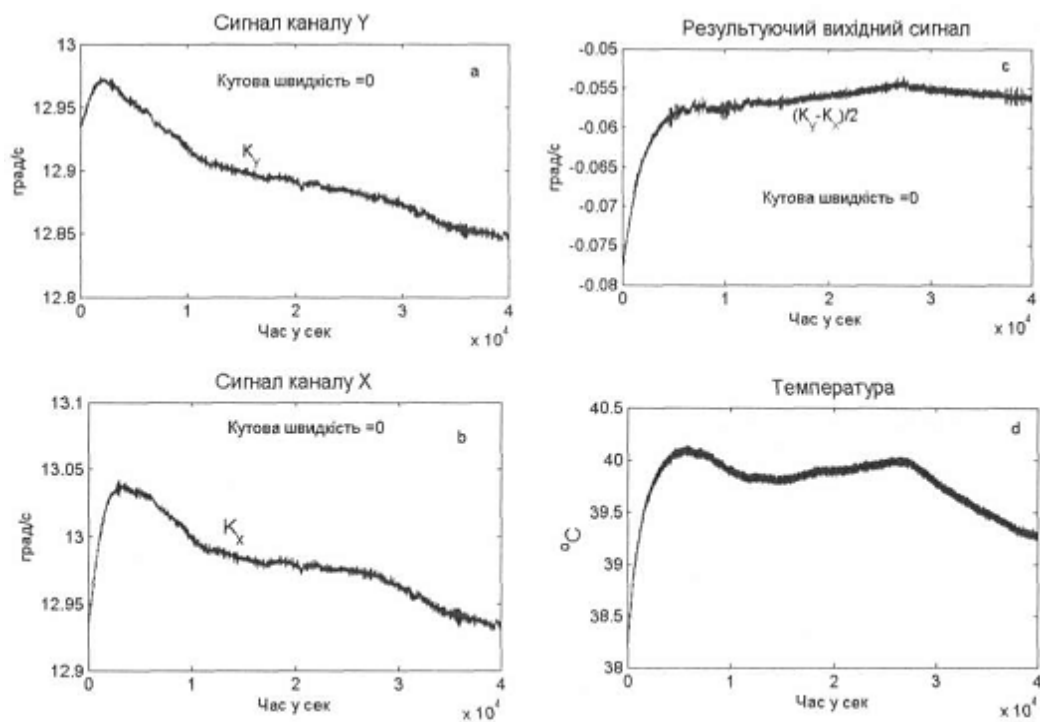


Fig. 6

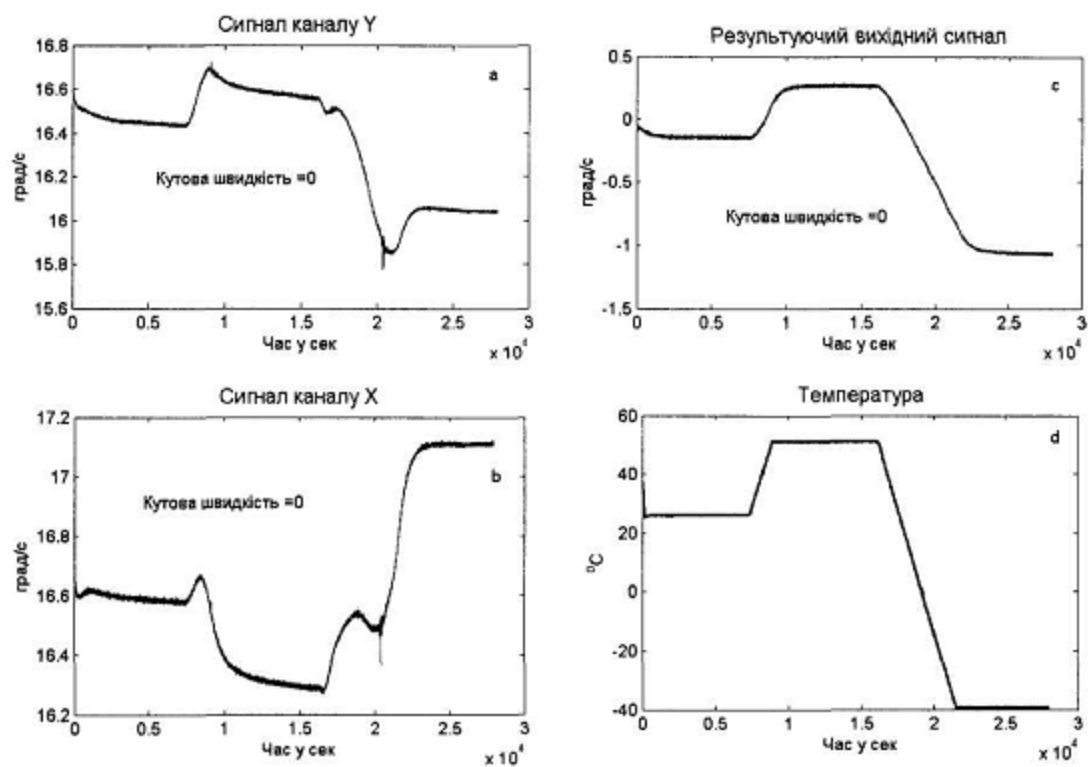


Fig. 7