

## МЕТОД КОМПЕНСАЦІЇ ЗМІЩЕННЯ НУЛЯ В П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНИХ ВІБРАЦІЙНИХ ГІРОСКОПАХ

Сучасне авіабудування, автомобілебудування, космічна та інші галузі, де є необхідність точного вимірювання параметрів переміщення об'єктів в просторі, широко використовують гіроскопічні прилади. На базі гіроскопів будуються системи керування безпілотних літальних апаратів, ракет, резервні системи топоприв'язки наземного транспорту. Обширність областей використання гіроскопічних приладів, постійне зростання вимог до їх точності, а також спрямованість на мікромініатюризацію без втрати визначаючих параметрів дозволяють говорити про те, що розробка, дослідження і їх удосконалення є важливим і актуальним завданням. Серед різноманітних технічних рішень створення високоточних гіроскопічних приладів окреме місце займають мікромеханічні п'єзоелектричні вібраційні гіроскопи. В даній роботі розглянуто можливість корекції дрейфу нуля чутливого елемента п'єзоелектричного перетворювача вібраційного гіроскопа, який виникає під дією змін температури, шляхом обробки вимірювального сигналу певним методом.

Ключові слова: п'єзоелектричні вібраційні гіроскопи, мікромеханічні, метод компенсації зміщення, сила Коріоліса, п'єзоелемент, вібрація.

A. PEREDERKO

Odessa State Academy of Technical Regulation and Quality

### ZERO DISPLACEMENT OFFSET COMPENSATION METHOD IN PIEZOELECTRIC VIBRATION GYROSCOPES

Modern aircraft, automotive, aerospace and other industries where there is a need for accurate measurement of the parameters of moving objects in space are widely used gyroscopic instruments. On the basis of gyroscopes, control systems for unmanned aerial vehicles, rockets, and backup systems of top-positioning of ground vehicles are built. The vastness of the areas of use of gyroscopic devices, the constant growth of requirements for their accuracy, as well as the focus on microminiaturization without losing the determining parameters, suggest that their development, research and improvement is an important and urgent task. Among various technical solutions for creating high-precision gyroscopic instruments, micromechanical piezoelectric vibratory gyroscopes occupy a special place. In this paper, we consider the possibility of correcting the zero drift of the sensitive element of a piezoelectric transducer of a vibrating gyroscope, which occurs under the influence of temperature changes, by processing a measuring signal by a certain method.

Keywords: piezoelectric vibration gyroscopes, micro-mechanical, displacement compensation method, Coriolis force, piezoelectric element, vibration.

Гіроскопи – це прилади, призначені для виявлення і вимірювання обертального руху або ж кутових переміщень об'єктів. Гіроскопи в основному використовуються в системах навігації, системах топоприв'язки, системах забезпечення стійкості і відсутності вібрацій, в автомобільній електроніці: бортові записуючі пристрої, лічильники шляху, протиугінні системи, безпілотні засоби пересування, в системах екстреного оповіщення, в супутникових антенах, в офісній техніці, в пристроях аеровідеозйомки та ін. Існує безліч різних видів гіроскопів, які відрізняються габаритами, точністю і принципом роботи. Особливе місце серед них займають мікромеханічні гіроскопи, яким притаманні такі показники, як малі габарити і відносно низька вартість при виготовленні. Мікромеханічні гіроскопи своєю появою зобов'язані, в першу чергу, успіхам у розвитку мікроелектронних технологій.

Треба відзначити, що останнім часом спостерігається швидкий розвиток мікромініатюризації датчиків в усіх напрямках використання вимірювальної техніки. У розрізі цих тенденцій широке застосування в багатьох областях техніки знайшли вібраційні гіроскопи. Причина цього – в новій технології їх виготовлення, що дозволяє отримати необхідні для вирішення нагальних завдань точності параметрів при різкому зниженні вартості і поліпшенні масогабаритних характеристик.

Зараз роботи в області удосконалення та розробки мікромеханічних гіроскопів ведуться науковими центрами багатьох країн світу. Один з перспективних напрямків розвитку мікромеханічних гіроскопів пов'язаний із застосуванням п'єзокераміки для виготовлення чутливого елемента і елемента збудження – вібратора. Застосування п'єзокерамічних матеріалів в конструкції вібраторів, на відміну від вібраторів мікромеханічних кремнієвих гіроскопів, має ряд переваг: п'єзокерамічний матеріал може служити як для збудження коливальних в режимі зворотного п'єзоефекту, так і для знімання інформації в режимі прямого п'єзоефекту. Крім того, в біморфних п'єзоелектричних гіроскопах цей же матеріал використовується в якості активної маси вібратора. Таке комплексне застосування п'єзокераміки дозволяє значно спростити конструкцію вібратора, знизити його масогабаритні показники. Крім цього, слід зазначити високий коефіцієнт перетворення п'єзокераміки як в режимі прямого, так і зворотного п'єзоефекту.

Розробка методу компенсації зміщення (дрейфу) нульового рівня вимірювального п'єзоелектричного перетворювача вібраційного гіроскопа, який виникає під дією температурних впливів.

При проведенні досліджень застосовувалась теорія обробки сигналів та теорія вимірювань, які використовувалися для аналізу виникнення та зменшення дрейфу нульового рівня вимірювального п'єзоелектричного перетворювача вібраційного гіроскопа.

Гіроскопи, робота яких заснована на використанні п'єзоелектричних вібраторів, називаються п'єзоелектричними вібраційними гіроскопами. Останнім часом спостерігається різке зменшення розмірів п'єзоелектричних гіроскопів, а також їх випуск в конструктивному виконанні, призначеним для поверхневого монтажу. В гіроскопах використовується фізичне явище, відоме як сила Кориоліса. Для пояснення природи цієї сили часто використовується маятник Фуко. Якщо масі, яка вібрує з певною швидкістю, надати обертальний рух з кутовою швидкістю, виникне сила Кориоліса. Сила Кориоліса діє в напрямку, перпендикулярному напрямку руху маятника, і пропорційна його кутовій швидкості. У п'єзоелектричному вібраційному гіроскопі є п'єзоелектричний керамічний вібратор у вигляді бруска, вібрації якого аналогічні коливанням маятника. Якщо зазначеної віброуючою системі надати обертання з деякою кутовою швидкістю, то виникне сила Кориоліса, спрямована перпендикулярно вихідної вібрації. Так як в гіроскопі використовується п'єзоелектричний кераміка, то відповідно до основних властивостей п'єзоелектричної кераміки сила Кориоліса перетворюється в електричні сигнали.

Розглянемо вібраційні гіроскопи – пристрої, що зберігають свої коливання в одній площині при повороті. Даний тип гіроскопів є набагато простішим і дешевшим при порівнянні точності в порівнянні, наприклад, з роторними гіроскопами. Крім того, мікромеханічні вібраційні гіроскопи мають малі енергетично масові характеристики (маса – менше грама, енергоспоживання – менше вата).

Принцип їх дії заснований на ефекті сили Кориоліса. Сила Кориоліса існує в неінерціальній системі відліку і проявляється при русі в напрямку під кутом до осі обертання. Причина появи сили Кориоліса – в поворотному (кориолісовому) прискоренні. Для того, щоб тіло рухалося з кориолісовим прискоренням, необхідно до тіла прикласти силу, яка дорівнює

$$F = ma, \quad (1)$$

де  $a$  – кориолісове прискорення.

Відповідно, тіло діє за третім законом Ньютона з силою протилежної спрямованості.

$$F_K = -ma, \quad (2)$$

де  $F_K$  – сила, яка діє з боку тіла (сила Кориоліса).

Характерним представником мікромеханічного вібраційного гіроскопу є гіроскоп, розроблений спеціалістами ВАТ "Елпа" та МДТУ ім. Баумана (Росія) [1]. Розроблений ними балочний вібраційний гіроскоп використовує вібратор на базі п'єзоелектричного керамічного елемента (рис. 1). Основним елементом даного вібраційного гіроскопу є балка. На кожній грані балки приклеєні по одному п'єзоелементу. На нижньому боці – силовий п'єзоелемент 4 (для збудження коливань), на бічних гранях – вимірювальні п'єзоелементи 5. Балка 1 розміщується на пружних підвісах 3, припаяних до дисків 2. За допомогою дисків балка 1 монтується в корпус гіроскопа.

Стосовно до конструкції вібраційного гіроскопа зображеного на рис. 1, то вона працює наступним чином. Балка, під дією силового п'єзоелемент 4 вібрує з частотою  $\omega_r$ . Горизонтальна швидкість балки визначається так:  $X_{ip} \omega_r \sin(\omega_r t)$ , а положення балки в площині –  $X_{ip} \omega_r \cos(\omega_r t)$ .

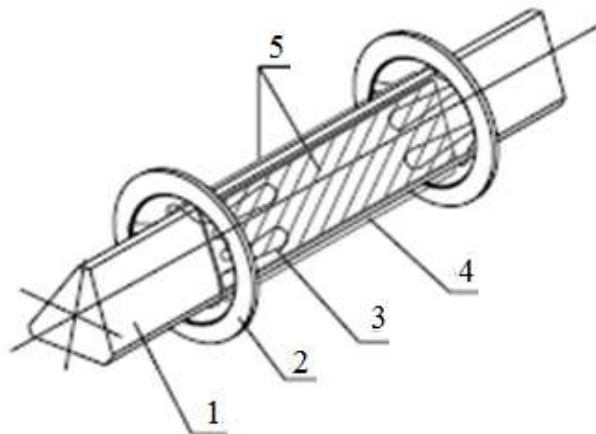


Рис. 1. Вібратор балочного вібраційного гіроскопа

1 – балка; 2 – диск; 3 – пружний підвіс; 4 – силовий п'єзоелемент; 5 – вимірювальні п'єзоелементи

Позаплощинний рух  $y_{op}$  балки, що викликається поворотом гіроскопа, буде дорівнювати:

$$y_{op} = \frac{F_K}{k_{op}} = \frac{2m\Omega X_{ip} \omega_r \cos(\omega_r t)}{k_{op}}, \quad (3)$$

де  $m$  – маса балки;  $\Omega$  – величина повороту в площині, перпендикулярній коливальному руху балки;  $t$  – час;  $k_{op}$  – коефіцієнт жорсткості пружних підвісів в напрямку, перпендикулярному площині.

Недоліком мікромеханічних п'єзоелектричних вібраційних гіроскопів є нестабільність їх параметрів під час перепадів температур в температурному діапазоні їх застосування. Це пов'язано з температурною нестабільністю п'єзокераміки [2]. Вказаний недолік суттєво обмежує галузі їх застосування. Цей недолік можна знизити як компенсаційними способами, так і розробкою нових, більш стабільних матеріалів.

В даній роботі розглянуто метод компенсації впливу флуктуації температури на вимірювальні п'єзоелементи шляхом обробки сигналу вимірювання певним чином. Температурний вплив на вимірювальні п'єзоелементи працюючі на первинному п'єзоефекті виражається в тому, що зміщується нульовий рівень відтвореного сигналу. Тому, для нівелювання дії температури пропонується застосувати метод виділення постійної складової з комплексного сигналу, який полягає в тому, фазовий фільтр 6 затримує сигнал на  $180^\circ$ , а на суматорі 7 з коефіцієнтом передачі 0,5 (рис. 2) відбувається складання сигналів. У підсумку на виході суматора 7 отримуємо постійну складову з коефіцієнтом передачі рівним одиниці. Таким чином змінні складові комплексного сигналу, що приходять на суматор 7 в протифазі, взаємно віднімаються. Виділений постійний рівень ще раз складається з сигналом основного каналу на суматорі 8. І, таким чином, отримуємо вихідний сигнал  $U_{\delta 2}$ , який повністю відтворює змінну складову сигналу з вимірювальних п'єзоелементів. Структурна схема реалізації вказаного методу приведена на рис. 2.

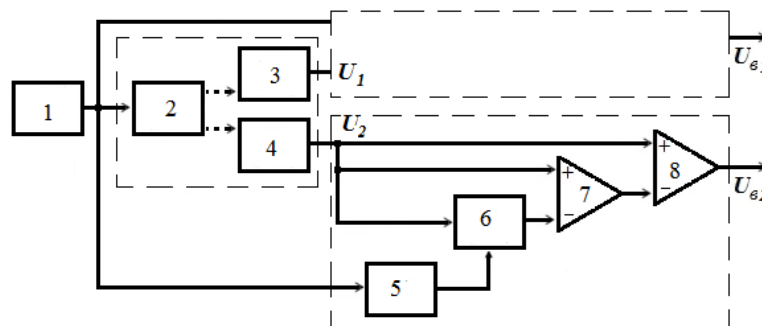


Рис. 2. Схема корекції зміщення нуля вимірювальних п'єзоелементів

1 – задаючий генератор; 2 – силовий п'єзоелемент; 3, 4 – вимірювальні п'єзоелементи; 5 – перетворювач частота–напруга; 6 – фазовий фільтр; 7 – суматор;  $U_1, U_2, U_{\delta 1}, U_{\delta 2}$  – вихідні та опрацьовані вимірювальні сигнали з п'єзоелементів 3 і 4 відповідно

В паралельних каналах, для затримки сигналів, застосовано фазові фільтри першого порядку [5]. Кут затримки фазового фільтра  $\alpha$  визначається виразом:

$$\alpha = -2 \arctg(\omega_r RC) 180^\circ / \pi, \tag{4}$$

де  $R$  і  $C$  – елементи часозадаючого ланцюга фазового фільтра.

Умовою безпомилкової передачі сигналів є постійний коефіцієнт передачі. У фазових фільтрах ця умова виконується повністю. Друга умова полягає в тому, щоб груповий час затримки фільтра для всього динамічного діапазону частот первинного перетворювача був постійним. З формули (4) видно, що затримка фази також залежить від частоти сигналу який надходить на вхід фазового фільтра. Для цього в схемі використовується перетворювач частота–напруга 5, який при зміні частоти задаючого генератора 1 проводить налаштування часозадаючого ланцюга фазових фільтрів для забезпечення фазового зсуву в  $180^\circ$ .

Запропонований метод автоматичної корекції (зменшення) дрейфу нуля в сигналі з вимірювальних п'єзоелектричних елементів мікромеханічного вібраційного гіроскопу, який є наслідком генерації паразитного заряду під впливом змін температури являється актуальним. Він дозволяє підвищити точність вимірювань виконуваних за допомогою вказаних гіроскопів і розширити їх сферу застосування. Особливо це стосується авіації і ракетної техніки де перепади температур є суттєвими і швидкоплинними.

### Література

1. <https://www.elpapierzo.ru/gyroscopes.pdf>.
2. Антоненко А.М. Влияние доменной структуры на электромеханические свойства сегнетокерамики ЦТС и МНВТ / А.М. Антоненко, А.Ю. Кудзин, М.Г. Гавшин // Физика твердого тела. – 1997. – Том 39, № 5. – М. : ФТИ им. А.Ф. Иоффе.
3. Пьезоэлектрическое приборостроение. Т. 1. Физика сегнетоэлектрической керамики / А.В. Гориш, В.П. Дудкевич, М.Ф. Куприянов и др. – М. : Издат. предпр. ред. жур. «Радиотехника», 1999. – 368 с.
4. Левшина Е.С. Электрические измерения физических величин: (Измерительные преобразователи)

/ Левшина Е.С., Новицкий П.В. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. – 320 с.

5. Титце У. Полупроводниковая схемотехника. Том II / Титце У., Шенк К. ; пер. с нем. – 12-е изд. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 942 с.

6. Осадчий Е.П. Проектирование датчиков для измерения механических величин / под ред. Е.П. Осадчего. – М. : Машиностроение, 1979. – 480 с., ил.

7. Острём К. Системы управления с ЭВМ / К. Острём, Б. Виттенмарк ; пер. с англ. – М. : Мир, 1987. – 480 с., ил.

8. Дорф Р. Современный системы управления / Р. Дорф, Р. Бишоп ; пер. с англ. – М. : Лаборатрия Базовых Знаний, 2002. – 832 с. : ил.

9. Ким Д. Теория автоматического управления. Т. 1. Линейные системы / Д. Ким. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2003. – 220 с.

#### References

1. <https://www.elpapiezo.ru/giroscopes.pdf> .

2. Antonenko A.M. Vliyaniye domennoy struktury na elektromekhanicheskie svoystva segnetokeramiki CTS i MNVT / A.M. Antonenko, A.Yu. Kudzin, M.G. Gavshin // Fizika tverdogo tela. – 1997. – Tom 39, № 5. – М. : FTI im. A.F. Ioffe.

3. Pezoelektricheskoe priborostroenie. T. 1. Fizika segnetoelektricheskoy keramiki. / A.V. Gorish, V.P. Dudkevich, M.F. Kupriyanov i dr. – М. : Izdat. predpr. red. zhur. «Radiotekhnika», 1999. – 368 s.

4. Levshina E.S. Elektricheskie izmereniya fizicheskikh velichin: (Izmeritelnye preobrazovateli) / Levshina E.S., Novickij P.V. – Л. : Energoatomizdat. Leningr. otd-nie, 1983. – 320 s.

5. Titce U. Poluprovodnikovaya shemotekhnika. Tom II / Titce U., Shenk K. ; per. s nem. – 12-e izd. – М. : ДМК Пресс, 2007. – 942 с.

6. Osadchij E.P. Proektirovaniye datchikov dlya izmereniya mekhanicheskikh velichin / pod red. E.P. Osadchego. –М. : Mashinostroenie, 1979. – 480 s., il.

7. Ostryom K. Sistemy upravleniya s EVM / K. Ostryom, B. Vittenmark ; per. s angl. – М. : Mir, 1987. – 480 с., il.

8. Dorf R. Sovremennyy sistemy upravleniya / R. Dorf, R. Bishop ; per. s angl. – М. : Laboratriya Bazovykh Znaniy, 2002. – 832 s.: il.

9. Kim D. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. T. 1. Lineynye sistemy / D. Kim. – М. : FIZMATLIT, 2003. – 220 s.

Рецензія/Peer review : 5.1.2020 р. Надрукована/Printed : 14.2.2020 р.  
Стаття рецензована редакційною колегією