

СЕКЦІЯ 1
КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ
НАВІГАЦІЇ І КЕРУВАННЯ

УДК 531.383

ВПЛИВ ШУМІВ ДАТЧИКІВ НА ВИПАДКОВУ ПОХИБКУ ВИЗНАЧЕННЯ
КУТІВ ОРІЄНТАЦІЇ КУРСОВЕРТИКАЛЮ З РІЗНИМИ АЛГОРИТМАМИ
РОБОТИ

Нестеренко О. І.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: oleg.i.nesterenko@gmail.com

Для визначення кутів орієнтації рухомих і нерухомих об'єктів різного класу широко використовуються курсовертিকали (КВ), побудовані на основі гіроскопічних датчиків, з корекцією від акселерометрів, магнітометрів та інших пристроїв. Сучасна тенденція полягає у використанні мікромеханічних датчиків для побудови малогабаритних, відносно невеликої вартості КВ, що дозволяє їх використання у більш широких галузях техніки.

Недоліком КВ на мікромеханічних датчиках є нижча точність у порівнянні з традиційними КВ, побудованими на прецизійних гіроскопах і акселерометрах. Одним з проявів зниження точності вимірювання кутів орієнтації є збільшення випадкової складової похибки вимірювання, викликаной значно вищим рівнем шуму мікромеханічних гіроскопів, акселерометрів, магнітометрів. У даній роботі досліджується вплив шумів вимірювання гіроскопів і акселерометрів на точність КВ.

При використанні у КВ мікромеханічних датчиків вони жорстко встановлюються на об'єкті, тому таку КВ відносять до класу безплатформних систем орієнтації. Спільною частиною алгоритмів безплатформних КВ є інтегрування рівнянь орієнтації, побудованих на даних гіроскопів, з корекцією за сигналами акселерометрів і магнітометрів. Найбільш поширеними алгоритмами роботи безплатформних КВ є комплементарні фільтри [1], [2] і різновиди фільтру Калмана [3] (у тому числі кватерніонні фільтри [4], [5]). При цьому комплементарні фільтри є «безплатформною» реалізацією класичних курсовертикалей з пропорційною, пропорційно-інтегральною, постійною і змішаними корекціями [6].

Розглянуті наступні алгоритми роботи КВ: комплементарні фільтри з пропорційно-інтегральною (ПІ) і постійною корекціями, фільтр Калмана.

Для дослідження випадкових похибок КВ розглянуто один канал роботи курсовертикалі – у визначенні кута тангажу. Отримано вирази для середньо-квадратичного відхилення (СКВ) похибки визначення тангажу у припущенні, що шуми вимірювання гіроскопу (датчика кутової швидкості) і акселерометру є

білими шумами з інтенсивностями відповідно N_{Γ}^2 , N_A^2 . Результати наведені у таблиці.

Таблиця. СКВ похибки вимірювання кута тангажу залежно від шуму датчиків

Алгоритм КВ	Шум гіроскопа	Шум акселерометра
Комплементарний фільтр, ПІ корекція,	$\sqrt{\frac{N_{\Gamma}^2}{2k}}$	$\sqrt{\frac{kN_A^2}{2}}$
Комплементарний фільтр, постійна корекція	$\frac{N_{\Gamma}^2}{2\omega_{\text{ПК}}\sqrt{1-2m/\omega_{\text{ПК}}}}$	$\sqrt{\omega_{\text{ПК}}\sqrt{\frac{N_A^2}{2\omega_A}}}$
Фільтр Калмана	$\sqrt{\frac{N_{\Gamma}^2}{2k_1}}$	$\sqrt{\frac{N_A^2(k_1^2+k_2)}{2k_1}}$

У таблиці позначено: k – коефіцієнт передачі ПІ корекції (пропорційна складова); $\omega_{\text{ПК}}$ – швидкість постійної корекції; m – математичне очікування вихідного сигналу гіроскопа (зсув нуля); ω_A – смуга пропускання акселерометра, рад/с.

У виразах для фільтра Калмана k_1 , k_2 – оптимальні коефіцієнти підсилення, значення яких можна порахувати за спрощеними формулами

$$k_1 = \sqrt{2\sqrt{\frac{Q_{\Gamma}}{N_A^2}} + \frac{N_{\Gamma}^2}{N_A^2}}; \quad k_2 = \sqrt{\frac{Q_{\Gamma}}{N_A^2}},$$

де Q_{Γ} – інтенсивність породжуючого шуму у вінеровській моделі зсуву нуля гіроскопа.

Наведені числові значення складових випадкової похибки КВ при типових характеристиках шумів мікромеханічних гіроскопів і акселерометрів. Показано, що ПІ корекції та застосуванні фільтра Калмана переважає вплив шуму гіроскопа, а при постійній корекції – вплив шуму акселерометра.

Ключові слова: орієнтація, курсовертикаль, гіроскоп, акселерометр, мікромеханічний датчик, фільтра Калмана.

Література

[1] M. Euston, P. Coote, R. Mahony etc., “A Complementary Filter for Attitude Estimation of a Fixed Wing UAV”, in *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 340–345, 2008.

[2] L. Ryzhkov, “Complementary Filter Design for Attitude Determination”, in *IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC)*, pp. 214–217, 2018.

[3] О. И. Нестеренко, “Использование оптимальной фильтрации в задаче определения ориентации беспилотной системой”, *Вісник Інженерної академії України*, № 4, С. 245-249, 2015.

- [4] D. Gebre-Egziabher, G. H. Elkaim, J. D. Powell, B. W. Parkinson, “A gyro-free quaternion-based attitude determination system suitable for implementation using low cost sensors”, in *IEEE Position Location and Navigation Symposium*, pp. 185–192, 2000.
- [5] G. Zhong-yu, N. Xiao-ji, G. Mei-feng, “Quaternion-Based Kalman Filter for Micro-machined Strapdown Attitude Heading Reference System”, *Chinese Journal of aeronautics*, vol. 15, pp. 171–175, 2002.
- [6] А. А. Одинцов, *Теория и расчет гироскопических приборов*. Киев, СССР: Высшая школа, 1985.

УДК 629.7

МОДЕЛЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ КУТОВИМ ПОЛОЖЕННЯМ СУПУТНИКА З ВИКОРИСТАННЯМ КРИТЕРІЮ H_∞

*Мураховський С. А., Прозор Д. С., Ткаченко А. В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна
E-mail: s.murakhovsky@kpi.ua*

Проблема синтезу систем автоматичного керування для космічних об'єктів є достатньо актуальною. На даний момент системи, розроблені на основі стандартних підходів мають значну чутливість до зміни зовнішніх збурень, в той же час існують методи синтезу оптимальних систем, які дозволяють знизити вплив зміни зовнішніх факторів, а також параметрів об'єкту керування. В представленій роботі проведено моделювання та аналіз системи керування кутовим положенням супутника на основі критерію H_∞ . Отримані результати можуть також бути використані для інших об'єктів, що описуються аналогічними передатними функціями.

Об'єктом дослідження є система автоматичного керування, що призначена для кутової орієнтації супутника в орбітальній системі координат. Система диференціальних рівнянь динаміки об'єкту може бути представлена у вигляді:

$$\begin{cases} I_x(\ddot{\varphi}_x + \omega_0\dot{\varphi}_y) + (I_y - I_z)(\dot{\varphi}_y - \omega_0\varphi_x)(\dot{\varphi}_z - \omega_0) = M_x, \\ I_y(\ddot{\varphi}_y - \omega_0\dot{\varphi}_x) + (I_x - I_z)(\dot{\varphi}_x + \omega_0\varphi_y)(\dot{\varphi}_z - \omega_0) = M_y, \\ I_z\ddot{\varphi}_z + (I_y - I_x)(\dot{\varphi}_x + \omega_0\varphi_y)(\dot{\varphi}_y - \omega_0\varphi_x) = M_z; \end{cases}$$

де I_x , I_y , I_z – моменти інерції об'єкта відносно осей зв'язаної системи координат, φ_x , φ_y , φ_z – кути повороту об'єкта в орбітальній системі координат, M_x , M_y , M_z – проекції моменту зовнішніх сил на осі зв'язаної системи координат, ω_0 – орбітальна кутова швидкість.

Лінеаризація отриманої моделі дозволяє отримати передатні функції об'єкта керування, які використовуються для подальшого синтезу регулятора на основі критерію H_∞ .

Проведено аналіз динамічних характеристик об'єкта в часовій та частотній області. На основі математичної моделі створена програмна модель в середовищі Simulink, визначено передатну функцію регулятора за критерієм H_∞ , проведено моделювання роботи робастної системи.

Ключові слова: система орієнтації, система керування, супутник, моделювання.

УДК 629.058: 623.465.34:531.383

АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИЗНАЧЕННЯ ФАЗНОСТІ АМПЛІТУДИ ВУЗЛА ТА ПУЧНОСТІ ЦИЛІНДРИЧНОГО МЕТАЛЕВОГО РЕЗОНАТОРА У СКЛАДІ ТВЕРДОТІЛЬНОГО ВІБРАЦІЙНОГО ГІРОСКОПА

¹⁾Головач С. В., ²⁾Строкач Г. Ю.

¹⁾АТ «Елміз», Київ, Україна,

²⁾Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: golovach.s@meta.ua; gr.strokach@gmail.com

Основою роботи твердотільного вібраційного гіроскопа (ТВГ) є постійне збудження коливань у твердому тілі – резонаторі [1]. Залежно від характеру мод вібрації резонатора, ТВГ поділяються на два типи [2]: 1-ий тип – моди вібрацій різні (камертонний, балочний резонатор); 2-ий тип – моди вібрацій ідентичні (напівсферичні, циліндричні оболонки). В українській промисловості набули поширення гіроскопи другого класу. Точність таких датчиків залежить від якості виготовлення їх чутливого елемента (ЧЕ), який складається з таких основних деталей: резонатор, основа, гермовиводи, збуджуючі елементи, накривка. Резонатор, як основна деталь ЧЕ середнього та високого класу точності, виготовляється з плавленого кварцу [3] або металу [4]. У випадку з металевим ЧЕ, для досягнення високої точності і прийнятної вартості, виробники у якості матеріала резонатора використовують інварні сплави сталі.

При виготовленні резонаторів ЧЕ з інварних сплавів виникають неоднорідності розподілу мас та жорсткості по окружній координаті резонатора. Це призводить до розщеплювання резонансної частоти [5] та, відповідно, зменшення добротності, параметра від якого в основному залежить точність подальшого виробу. Значне зменшення цих дефектів можливо досягнути за допомогою операції балансування. Така технологічна операція виконується шляхом зняття мас з визначених точок дебалансу, що розташовані, як правило, на ефективній віброуючій масі резонатора і є ітеративною, тобто повторюється багато разів до досягнення необхідного ефекту. Вказані точки розраховуються за параметрами, які визначаються на основі вимірювань стандартної лабораторної апаратури, що складається з мультиметрів, осцилографа, генератора сигналів та комутуючого блока. До параметрів дебалансу належать: резонансна частота коливань, амплітуда коливань вузла та

пучності резонатора (рис.1), різночастотність, різнодобротність, фазність сигналів з вузла та пучності, кути позиціонування незбалансованих мас. Операції вимірювання при такому балансуванні виконуються оператором і є досить кропітким процесом, що вимагає значних затрат часу та уваги.

Автоматизація вимірювання параметрів дебалансу здатна суттєво зменшити витрати часу та кількість ітерацій за рахунок запобігання помилок оператора. При цьому, одним з запропонованих способів такої автоматизації є заміна стандартної електронно-вимірювальної апаратури на нестандартний управляючий електронний блок на основі сигнального мікропроцесора, що програмно керується оператором ПК. Сигнальний мікропроцесор виконує формування завдання по збудженню коливальних через АЦП та підсилювач, а вихідні коливання резонатора реєструються за допомогою ЦАП. На рис. 1 показано

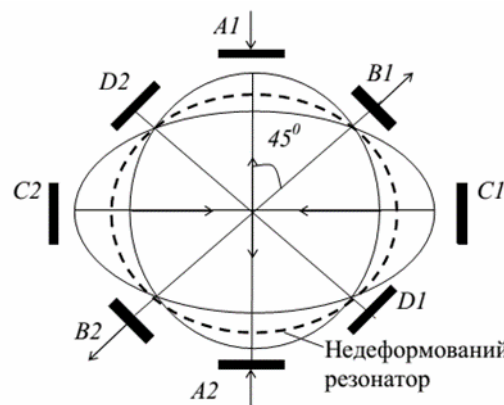


Рис. 1. Схема електродів на резонаторі

схему резонатора з чотирма парами електродів (А,В,С,В), які збуджують та реєструють коливання резонатора. Збудження відбувається парою електродів А1-А2. Реєстрація амплітуди коливальних – парою В1-В2 (вузол) та С1-С2 (пучність). Для оцінки різночастотності необхідно змінювати електроди збудження та зчитування. Ця зміна виконується шляхом переміщення на сусідні електроди: В1-В2 – збудження; С1-С2 – вузол; D1-D2 – пучність. Перший описаний спосіб підключення називають «канал 1», другий – «канал 2». Таким чином, автоматизується функціонал генератора частот, мультиметрів та комутуючого блока.

Для автоматизації визначення фазності сигналу пучності та вузла, розглянемо за яким принципом відбувається класифікація фазності. Фазністю вихідних сигналів збудженого резонатора називають зсув синусоїд вихідних сигналів амплітуд з вузла та пучності відносно один одного. Коли сигнал з пучності по відношенню до сигналу з вузла має фазовий зсув менше 45°, то такий випадок називається синфазністю. Коли сигнал з пучності по відношенню до сигналу з вузла має фазовий зсув 90° – протифазністю. Схематично вигляд сигналів фазності та протифазності, що спостерігається за допомогою осцилографа, показано на рис. 2.

Виходячи з поняття визначення фазності вихідних сигналів резонатора запропоновано спосіб автоматичного визначення фазності вузла та пучності каналів за допомогою уведення системи лічильників, що застосовуються для великої кількості періодів коливальних (не менше 1000) які описані системою рівнянь:

$$\begin{cases} (A_N \geq 0 \wedge A_{AN} \geq 0) \vee (A_N \leq 0 \wedge A_{AN} \leq 0) \Rightarrow PhasePlus = PhasePlus + 1 \\ (A_N > 0 \wedge A_{AN} < 0) \vee (A_N < 0 \wedge A_{AN} > 0) \Rightarrow PhaseMinus = PhaseMinus + 1 \end{cases}$$

де A_N, A_{AN} – дискретизовані значення сигналів амплітуд коливань вузла та пучності в кодах АЦП відповідно; $PhasePlus$ – лічильник кількості співпадінь знаків A_N, A_{AN} ; $PhaseMinus$ – лічильник для випадків не співпадінь. За результатами роботи лічильників розраховується фазовий коефіцієнт (ФК):

$$ФК = PhaseMinus / PhasePlus .$$

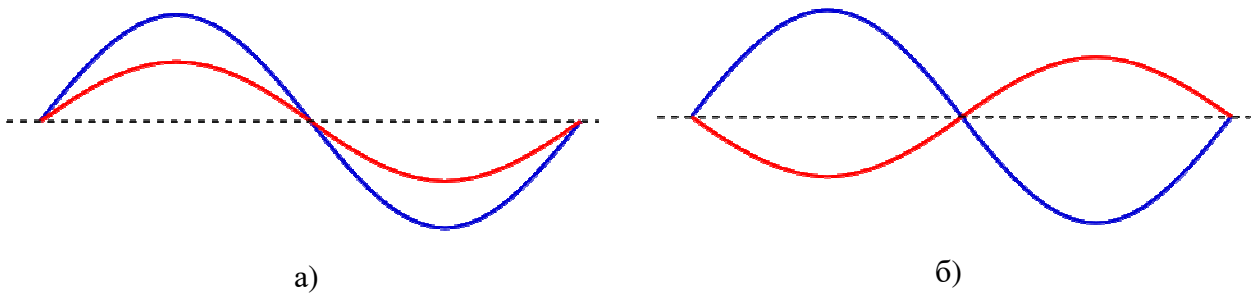


Рис. 2. Схематичний вигляд положення вихідних сигналів у випадку, де:
а) фазності; б) протифазності

Отже, очікується, що при $ФК > 1$ сигнали амплітуд пучності та вузла досліджуваного резонатора знаходяться в протифазності, а при $ФК < 1$ – у синфазності.

Для перевірки запропонованого способу визначення фазності, в якості дослідних зразків, використовувалися ЧЕ для яких попередньо вже було визначено фазність обох каналів за допомогою осцилографа. Тестування проводилося для обох можливих значень фазності.

Автоматизоване вимірювання фазності запропонованого методу дало можливість виконати серію вимірювань ФК при зміні частоти збудження резонатора з кроком 0,01 Гц, що дозволило отримати графіки залежності між фазністю (вузла і пучності каналу) та близькістю до резонансної частоти. Як видно з рис. 3, рис. 4, такі залежності представляють собою практично монотонно зростаючі або спадаючі криві.

Поблизу резонансної частоти F_{res} помітно близькість ФК до 1, що може призводити до невизначеності фази запропонованим методом у деяких випадках. Проте при виконанні серії автоматизованих вимірювань для багатьох резонаторів у складі ЧЕ, вдалося встановити емпіричним шляхом наступне. Спадаюча крива залежності коефіцієнта ФК від частоти збудження є свідченням протифазності сигналів амплітуди вузла та пучності у каналі, а зростаюча крива – синфазності.

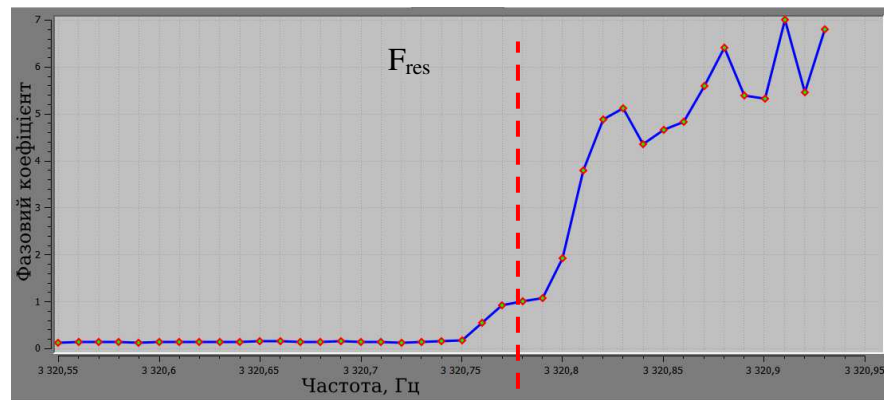


Рис. 3. Вимірювання ФК (випадок 1)

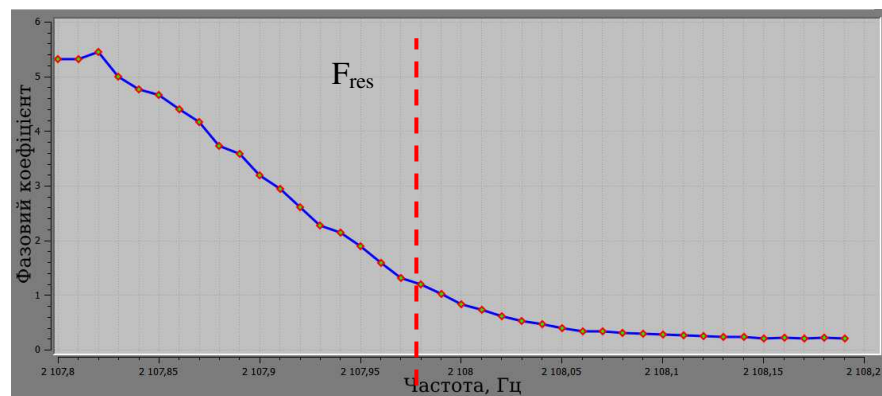


Рис. 4. Вимірювання ФК (випадок 2)

Висновки. Одиначне вимірювання запропонованим способом автоматичного визначення фазності за допомогою ФК не дає гарантію її правильного визначення. Виконання серії визначень ФК на частотах близьких до резонансної дає змогу отримувати криву, за трендом якої вже можна отримати результат, що повністю відповідає результатам визначення фазності ручним методом за допомогою стандартних приладів. Коректність запропонованого методу повністю підтверджено результатами експериментальних вимірювань на значній кількості реальних ЧЕ ТВГ в умовах виробництва.

Ключові слова: твердотільний вібраційний гіроскоп, ТВГ, балансування, фазність, автоматизація.

Література

- [1] D. D. Lynch, “Coriolis Vibratory Gyros”, in *Symposium Gyro Technology, Stuttgart, Germany*, 1998.
- [2] IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros”// IEEE std.1431™, Annex A, pp. 53-55, Dec. 2004.
- [3] D. M. Rozelle, “The hemispherical resonator gyro: From wineglass to the planets”, in *19th AAS AIAA Space Flight Mechanics Meeting*, vol. 134, pp. 1157–1178, 2013.
- [4] V.V. Chikovani, I. M. Okon, A.S. Barabashov, P. Tewksbury, “A Set of High Accuracy Low Cost Metallic Resonator CVG”, in *IEEE/ION: PLANS*, 5-7 May 2008, Monterey, CA, pp.112-115.
- [5] В. А. Матвеев, В. И. Липатников, А. В. Алехин, Проектирование волнового твердотельного гироскопа. Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997.

УДК 62-1, 629.01

ОРГАНІЗАЦІЯ ТА ЛАБОРАТОРНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ
МІКРО-ОПТИКОЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРИЛАДІВ ДЛЯ СИСТЕМ
КЕРУВАННЯ АВТОНОМНИМИ БЕЗПІЛОТНИМИ ПІДВОДНИМИ
АПАРАТАМИ

Гуриненко С. О.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: stas_gurynenko@ukr.net

Системи керування автономним безпілотними підводними апаратами (АБПА) – це не тільки математично-програмне та алгоритмічне забезпечення, а ще і апаратне забезпечення. Із розвитком науки та технологій вимоги до систем керування АБПА поступово стають все більш жорсткішими та вибагливішими до характеристик та якості керування [1]. Для забезпечення якісного та прецизійного керування АБПА у склад та конструкцію систем керування, на етапі розробки та проектування, закладають елементи та методи інтелектуального керування із використанням сучасних приладів та датчиків, таких як МЕМС датчики [1, 2]. Інтелектуальне керування, у більшості випадків, складається із математично-програмної обробки отриманої інформації від приладів орієнтації та навігації побудованих на МЕМС датчиках.

Зазвичай МЕМС датчики це акселерометри, гіроскопи та магнітометри, проте із розвитком технологій та досягнень у мікроелектроніці МЕМС датчиками можуть бути оптичні прилади, такі як камера, скануючі лінзи, інфрачервоні та магнітні сканери, англійський термін – MicroOptoElectroMechanical Sensor (МОЕМС) [3, 4]. На рис. 1 зображено умовна 3D модель МЕМС лінзи (а) та готового приладу МЕМС лінзи (б) [5], рис. 2 – модель модуля МЕМС камери.

Поява оптичних МЕМС сенсорів дає можливість застосовувати такі методи інтелектуального керування як машинний та комп’ютерний зір [6].

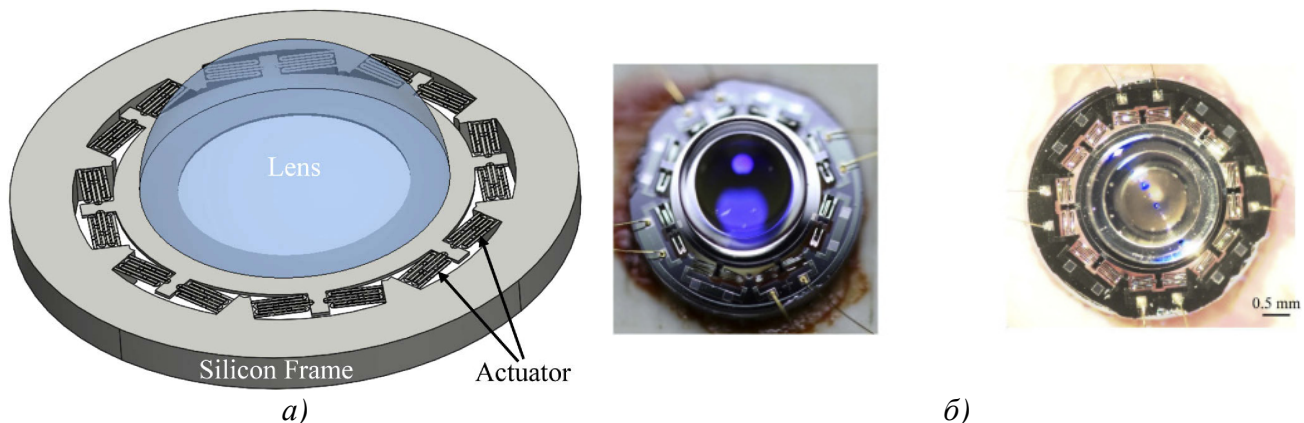


Рис. 1. 3D модель МЕМС лінзи (а) та виготовлена МЕМС лінза (б)



Рис. 2. Модуль МЕМС камери

Для традиційних МЕМС датчиків та визначення їх характеристик і придатності у застосуванні у системах керування, орієнтації та навігації безпілотних апаратів, методи та лабораторні і експериментально-дослідні установки описані у таких роботах, як [7, 8]. Проте, для застосування МОЕМС у системах керування, орієнтації та навігації безпілотних апаратів, мало описані та майже відсутнє розроблене експериментально-дослідне обладнання та прилади для визначення характеристик і похибок сенсорів під час імітування роботи сенсора у реальній системі керування.

Метою роботи є розробка методики та розширення матеріально-технічної бази дослідного обладнання для дослідження оптичних МЕМС датчиків, та визначення придатності застосування цих датчиків у тій чи іншій інтелектуальній системі керування, орієнтації та навігації автономними безпілотними підводними апаратами та безпілотними апаратами в цілому. Наданому етапі розроблена ерзац-модель експериментально-дослідного стенда, яка зображена на рис. 3.

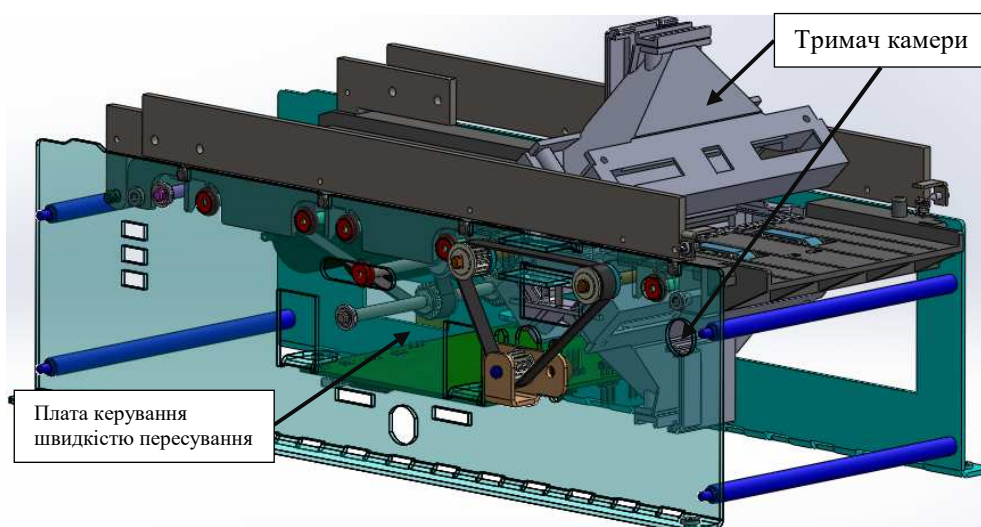


Рис. 3. 3D ерзац-модель експериментально-дослідного стенда

Пропонований експериментально-дослідний стенд здатен переміщувати як двовимірні (наприклад, намальовані) об'єкти, так і об'ємні об'єкти. Плата

керування призначена для регулювання швидкості переміщення, де швидкість відповідає швидкості руху АБПА, що дає змогу досліджувати алгоритми обробки зображень, наприклад такі, які описані у роботі [9], для забезпечення керування орієнтації та навігації.

Подальші дослідження будуть спрямовані на визначення впливу швидкості руху на швидкодію, похибки та точність роботи алгоритмів обробки зображень, дослідження впливу швидкості руху на характеристик швидкодії оптичних МЕМС датчиків.

Ключові слова: МЕМС датчики, оптичні МЕМС датчики, експериментально-дослідна установка, система керування, автономний безпілотний підводний апарат, дослідження характеристик МОЕМС.

Література

- [1] С. О. Гуриненко, «Організація систем керування сучасних безпілотних підводних апаратів», на XIV *Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених “ПОГЛЯД У МАЙБУТНЄ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ”*, Київ, 2021, с. 34-37.
- [2] С. О. Гуриненко, «Система автоматичного керування автономним безпілотним підводним апаратом на основі мікроелектромеханічних систем», на *Чотирнадцята міжнар. наук.-практ. конф. Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2021)*, Київ, 2021, с. 19-21.
- [3] M. E. Motamedi, MOEMS: Micro-opto-electro-mechanical Systems. SPIE press, T. 126, 2005.
- [4] P.Rai-Choudhury, MEMS and MOEMS Technology and Applications. Spie Press, T. 85, 2000.
- [5] Liang Zhou, Xiaomin Yu, Philip X.-L. Feng, Jianhua Li, Huikai Xie, "A MEMS lens scanner based on serpentine electrothermal bimorph actuators for large axial tuning," *Opt. Express* 28, 23439-23453 (2020).
- [6] H. Liu et al. "A control and detecting system of micro-near-infrared spectrometer based on a MOEMS scanning grating mirror", *Micromachines*, T. 9, no 4, pp. 152, 2018.
- [7] В. В. Аврутов, С. В. Головач, О. М. Сапегін, М. Ю. Хутко, "Метод калібрування і корекції вихідних сигналів тривісного акселерометра", *Research Bulletin of the National Technical University of Ukraine "Kyiv Politechnic Institute"*, №. 1, с. 92-98, 2016.
- [8] О. В. Заморський, *Електромеханічне забезпечення лабораторного стенду для дослідження статичних і динамічних характеристик мікромеханічних датчиків*, 2020.
- [9] C. Harris, M. Stephens, "A combined corner and edge detector", *Alvey vision conference*. T. 15, no 50, pp. 10-5244, 1988.

УДК 531.383-11:681.7

МЕТОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВОЛОКОННО-ОПТИЧНОГО ГІРОСКОПА

Кучеренко О. К.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: oleg.k.kucherenko@gmail.com

Для точної навігації, орієнтації та управління рухом об'єктів все частіше використовуються інтерферометричні волоконно-оптичні гіроскопи (ВОГ) засновані на використанні ефекту Саньяка. ВОГ мають цілу низку переваг

перед механічними та кільцевими лазерними гіроскопами, наприклад, за розмірами, часом виходу на робочий режим, вартістю та енергоспоживанням.

Використання котушки з великою кількістю витків світловода надало можливість суттєво підвищити чутливість ВОГ. У цьому випадку різниця фаз зустрічних хвиль може бути визначена з виразу [1]:

$$\phi_s = \frac{8\pi Ns}{\lambda c} \Omega = \frac{4\pi RL}{\lambda c} \Omega = \frac{8\pi^2 R^2 N}{\lambda c} \Omega,$$

де N – кількість витків світловода; s – площа витка; λ – довжина хвилі; c – швидкість світла; R – радіус витка; Ω – кутова швидкість, яка вимірюється.

Практика використання ВОГ виявила низку паразитних ефектів, що призводять до реєстрації помилкової кутової швидкості обертання. До таких ефектів, в першу чергу, відносяться:

- а) шумовий сигнал обумовлений властивостями фотоприймача ВОГ;
- б) фактори пов'язані з розсіюванням світла, що призводять до інтерференційних явищ в осерді світловода;
- в) поляризаційна невзаємність, яка призвела до мінімальної конфігурації кільцевого інтерферометра з одним поляризатором замість кількох, а також до використання випромінювання з низьким ступенем поляризації і широким спектром;
- г) температурний дрейф кутової швидкості, що спричинив необхідність застосування спеціального намотування волоконної котушки, особливих конструкцій каркасу для неї та специфічних компаундів, що наносяться на волокно в процесі його намотування;
- д) нестаціонарні ефекти несиметричні відносно осердя світловода;
- е) білий шум вихідного сигналу ВОГ, який знижується за допомогою збільшення глибини допоміжної фазової модуляції або компенсації надлишкових шумів джерела випромінювання;
- ж) фактори, пов'язані з ефектом Фарадея і нелінійним ефектом Керрі;
- з) втрати у волоконній котушці, зумовлені радіацією, що долаються за допомогою використання радіаційно-стійкого волокна для намотування котушки.

Результуюча різниця фаз на виході волоконно-кільцевого інтерферометра в наслідок дії перерахованих факторів дорівнює:

$$\phi_z = \phi_s + \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4 + \phi_5 + \phi_6,$$

де ϕ_s – сигнал кутової швидкості обертання; ϕ_1 – шумовий сигнал; ϕ_2 – сигнал, пов'язаний з розсіюванням світла; ϕ_3 – сигнал, пов'язаний з поляризацією; ϕ_4 – сигнал, пов'язаний з нестаціонарними ефектами; ϕ_5 – сигнал, пов'язаний з накладанням магнітного поля; ϕ_6 – сигнал, пов'язаний з нелінійними ефектами.

Коли додаткові сигнали систематичні, то при обробці можна врахувати їх дію. Якщо додаткові сигнали випадкові, то вони обумовлюють дрейф сигналу ВОГ і впливають на похибку вимірювання кутової швидкості.

На чутливість ВОГ суттєво впливають шуми різного походження на виході фотоприймача. Це дробовий шум, теплові флуктуації, флікер шум та інші чинники. Одним з варіантів зменшення впливу шумових факторів на чутливість ВОГ є використання гетеродинних методів прийому оптичного сигналу.

Для зменшення впливу факторів, пов'язаних з розсіюванням світла, було запропоновано декілька методів. Однак найбільш вирішальним способом, який знімає вплив зворотних відбитків і розсіювань виявився перехід від монохроматичних джерел – лазерних діодів до напівпровідникових суперлюмінесцентних світлодіодів із високою спектральною інтенсивністю і малою довжиною когерентності. Завдяки цьому вдалося позбутися інтерференційних явищ, які можуть бути сприйняті як корисний сигнал.

У доповіді розглянута так звана «мінімальна схема» ВОГ [2], що дозволяє суттєво зменшити вплив поляризаційних ефектів на чутливість ВОГ і не потребує настроювання поляризатора. Перевагами цієї схеми є вимірювання сигналу з додаткового світло дільника, що розташований на вході волоконно-кільцевого інтерферометра. При цьому виключається вплив фазових характеристик світло дільників на різницю фаз зустрічних хвиль.

У «мінімальній схемі» сигнал інтерференції на виході контуру несе інформацію про різницю фаз між відбитим променем і тим що пройшов через світло дільник розташований на вході контуру. Це пов'язано з тим що одна хвиля два рази відбивається, а зустрічна хвиля два рази проходить через світло дільник.

До нестационарних ефектів відносяться додаткові сигнали при локальних змінах параметрів волоконного контуру гіроскопа за рахунок акустичних, механічних і температурних змінних дій. Дослідження цих ефектів показало, що тільки несиметричні відносно осердя волоконного контуру збурення фази, поляризації і амплітуди зустрічних хвиль на частотах, що не перевищують ширину смуги прийому можуть впливати на різницю фаз зустрічних хвиль на виході волоконно-кільцевого інтерферометра [3].

Зсув фаз зустрічних хвиль у ВОГ може бути пов'язаний з ефектом Фарадея при накладанні магнітного поля на поляризоване випромінювання, що розповсюджується у волоконно-кільцевому інтерферометрі. Позбутися поляризації випромінювання у світловоді майже неможливо внаслідок випадкових скручень, що виникають при намотці волокна на котушку. Наявність цього ефекту погіршує характеристики точності, і тому потрібно екранування всього контуру ВОГ.

Нелінійний оптичний ефект Керрі проявляється у одномодовому волокні і виникає при високій щільності оптичної потужності у світловоді малого діаметру (8 – 10 мкм). Ці ефекти можуть бути суттєво знижені при використанні низько когерентних широкосмугових джерел випромінювання. Числові оцінки приведені в [4] дають при раціональному виборі параметрів елементної бази ВОГ величину $\phi_6 = 2 \times 10^{-5}$ град.ч⁻¹.

Характеристики чутливості ВОГ достатньо широкі і лежать в межах від 100 град.ч^{-1} до $0,005 \text{ град.ч}^{-1}$. Відповідно кожна галузь може скористатися ВОГ різного класу точності. ВОГ використовують на автомобілях, електрокарах, різних машинах, які повинні рухатись за певною програмою. Ці ВОГ мають чутливість порядку 10 град.ч^{-1} . Для застосування в навігації вже розроблені ВОГ з чутливістю $0,01-0,001 \text{ град.ч}^{-1}$. Підвищення чутливості ВОГ пов'язано з використанням удосконаленої елементної бази, включаючи і спеціальні волоконні світловоди. Важливим фактором підвищення чутливості ВОГ є використання інтегрально-оптичних елементів в якості направлених відгалужувачів, акустооптичних модуляторів, поляризаторів і деполіризаторів, фотоприймальних пристроїв і т. ін.

Ключові слова: інтерферометр Саньяка, волоконно-оптичний гіроскоп, дрейф нуля волоконно-оптичного гіроскопа, точність волоконно-оптичного гіроскопа.

Література

- [1] О. Кучеренко, “Волоконно-оптичні датчики для автоматизованих інформаційних і інтелектуальних систем”. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/47620>.
- [2] R. Ulrich, “Fiber-optic rotation sensing with low drift”, *Opt. Lett.*, vol. 5, no. 5, pp.173-177, 1980.
- [3] D. Shupe, “Thermally induced non-reciprocity in the fiber-optic interferometer”, *Appl. Opt.*, no. 5, pp. 654-658, 1980.
- [4] Г. Малыкин, “Методы устранения влияния нелинейного эффекта Керра на дрейф нуля волоконных кольцевых интерферометров”, *Оптика и спектроскопия*, т. 91, № 5. с. 846-851, 2001.