

Г. Ю. Строкач¹, PhD студент, С. В. Головач², к.т.н

ВИМІРЮВАННЯ РІЗНОЧАСТОТНОСТІ РЕЗОНАТОРА КОРІОЛІСОВОГО ВІБРАЦІЙНОГО ГІРОСКОПА МЕТОДОМ ОБЕРТАННЯ СТОЯЧОЇ ХВИЛІ

Ua

Розглядається можливість визначення різночастотності резонатора коріолісового вібраційного гіроскопа способом керованої зміни положення стоячої хвилі для діагностики параметрів чутливого елемента на різних етапах виробництва та функціонування гіроскопа. Демонструються результати контролю частоти резонатора як способом покрокової зміни кута стоячої хвилі так і за рахунок її постійного обертання. Приведені результати розрахунків різночастотності на основі вимірювань. Зазначені переваги запропонованого методу вимірювання різночастотності.

En

The possibility of determining the frequency split of a resonator in a Coriolis vibratory gyroscope by altering the position of the standing wave is considered. This method is proposed for diagnosing frequency split at various stages of gyroscope production and operation. The effect of stepwise changes in the standing wave angle and its continuous standing wave rotation on the resonator's excitation frequency are demonstrated. The examples of frequency split calculation based on measurements are presented. The advantages of the proposed frequency split measurement method are highlighted.

Вступ

Основною складовою чутливого елемента Коріолісового вібраційного гіроскопа (КВГ) є резонатор, який для високоточних гіроскопів може виготовлятися у вигляді циліндра чи напівсфери із металу або кристалів. Принципи та можливі режими роботи КВГ на основі таких чутливих елементів детально описані в роботі [1]. У даній роботі розглядається резонатор циліндричної форми, виготовлений із металу, який має вісім електродів розташованих радіально симетрично із кроком 45° . Неточність виготовлення резонаторів КВГ спричиняє явище розщеплення резонансної частоти, що означає існування одночасно двох осей резонансних частот (рис. 1).

Зазначене явище розщеплення прийнято називати різночастотністю (*frequency split*) [2], [3]. У зв'язку з тим, що різночастотність призводить до збільшення шумів для режиму роботи датчика кутових швидкостей її наяв-

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

² КПІ ім. Ігоря Сікорського

вність є негативним фактором, який потребує виконання процедур корекції.

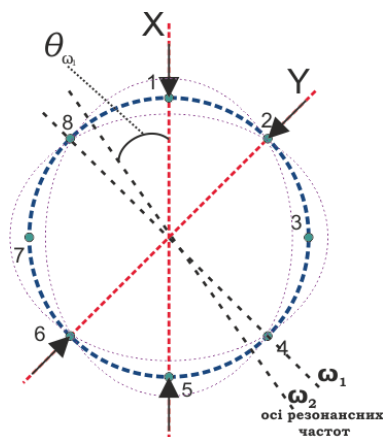


Рис. 1. Схематичне зображення стоячої хвилі у кромці резонатора

У роботі [6] різночастотність металевого циліндричного резонатора запропоновано вимірювати ручним акустичним методом, способом удару металевої кульки по ободу резонатора і одночасним записом звукового файлу для подальшого аналізу у режимі після обробки із використанням швидкого перетворення Фур'є. Розвиток даного способу шляхом автоматизації ударного механізму з демонстрацією різниці амплітуд різночастотності у залежності від місця удару відносно початкової точки, продемонстровано у роботі [7]. Крім того, в даній роботі було застосовано апроксимації невеликих ділянок спектру, що дало можливість визначати різночастотність із точністю не гірше 0,005 Гц. Необхідність застосування обладнання звукозапису робить акустичний метод ефективним лише на етапі ранньої перевірки якостей резонатора. Такий метод незручно використовувати у процедурах балансування і неможливо використовувати у якості діагностики у процесі роботи готового датчика. У роботі [8] описано спосіб вимірювання різночастотності півсферичного резонатора виготовленого з штучного діаманту. Метод ґрунтується на використанні лазерного доплерівського вібрметра (ЛДВ), крім того, показано суттєву різницю між вимірюванням різночастотності у нормальних умовах середовища такого резонатора відносно умов вакууму. Такий метод зручний тим, що ЛДВ дозволяє здійснювати вимірювання різночастотності резонатора через прозору скляну перегородку, у той час, як сам резонатор перебуває у вакуумному середовищі, що надзвичайно важливо для чутливих елементів виготовлених із кристалів кварцу, чи діаманту. Точність вимірювання різночастотності даним методом на рівні 20 кГц складає не більше 0,1 Гц. ЛДВ також може бути застосовано у випадку металевих резонаторів, проте зважаючи на здатність металевих резонаторів працювати в умовах атмосферного середовища без зміни основних частотних параметрів раціонально застосувати менш складне обладнання. Таким чином, у роботі [9] було запропо-

новано метод визначення різночастотності на етапі балансування за допомогою побудови АЧХ із застосуванням цифрового керування збудження стоячої хвилі в резонаторі при почерговій подачі збудження через електроди 1, 5 осі X та 6, 2 осі Y (рис. 1), при цьому визначались також кути максимальних частот ω_1 та ω_2 необхідні для подальшого розрахунку розташування незбалансованих мас. Недоліком даного методу є пряма залежність точності визначення різночастотності від кроку вимірювань для побудови АЧХ. Під час сканування резонансного діапазону із кроком 0,01 Гц тривалість процедури отримання АЧХ і подальшого визначення різночастотності складала 8-10 хв. У цій роботі описано новий метод вимірювання різночастотності за допомогою контрольованого обертання стоячої хвилі.

Постановка задачі

Важливою перевагою запропонованого методу є заміна набору вимірювальних приладів (генератор частот, осцилограф, прецизійні мультиметри), які застосовуються при стандартному вимірюванні різночастотності методом АЧХ на електронний блок керування і вимірювання (рис. 2) на базі сигнального мікропроцесора з програмним алгоритмом керування стоячою хвилею.

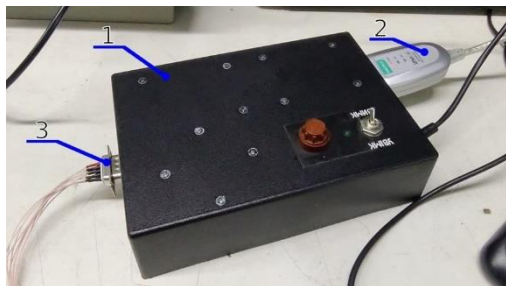


Рис. 2. Електронний блок керування і вимірювання:

- 1 – зовнішній корпус блоку із перемикачем;
- 2 – перетворювач інтерфейсів;
- 3 – кабельна частина з'єднання із ЧЕ

На етапі балансування резонатор представляє собою частину збірки ЧЕ, а тому його з'єднання з електронними платами системи керування гіроскопу дозволяє використати можливості реалізації функціональних особливостей трьох режимів керування КВГ [10]. Зокрема, перевагою трьохрежимної системи керування є можливість обертання кута розташування стоячої хвилі у резонаторі відносно його електродів.

Даний метод порівнюється із методом вимірювання різночастотності через побудову АЧХ. Важливою відмінністю запропонованого методу повинна бути можливість визначення різночастотності не тільки на етапі балансування, а й на всіх етапах функціонування гіроскопа за допомогою йо-

го стандартної електронно-апаратної частини, що можливо в подальшому використовувати у задачах діагностування стану приладу.

Метод вимірювання різночастотності на основі АЧХ

Вимірювання різночастотності через визначення АЧХ відбувається покроковою зміною частоти збудження. Знаходження однієї резонансної частоти відбувається відносно однієї пари електродів (наприклад, 1-5). Для простоти, вимірювання стоячої хвилі по одній парі електродів називається – каналом. Вимірявши резонансну частоту по двом каналам розраховується різночастотність за формулою (1). Зокрема для кожного каналу визначається кут позиціонування стоячої хвилі. Приклад АЧХ ЧЕ елемента показано на рис. 3. В наведеному прикладі, резонансною частотою по першому каналу є частота 3300,12 Гц, по другому – 3300,13 Гц. Відповідно, різночастотність складає 0,01 Гц.

$$\Delta F_{res} = |F_{res_1} - F_{res_2}| \quad (1)$$

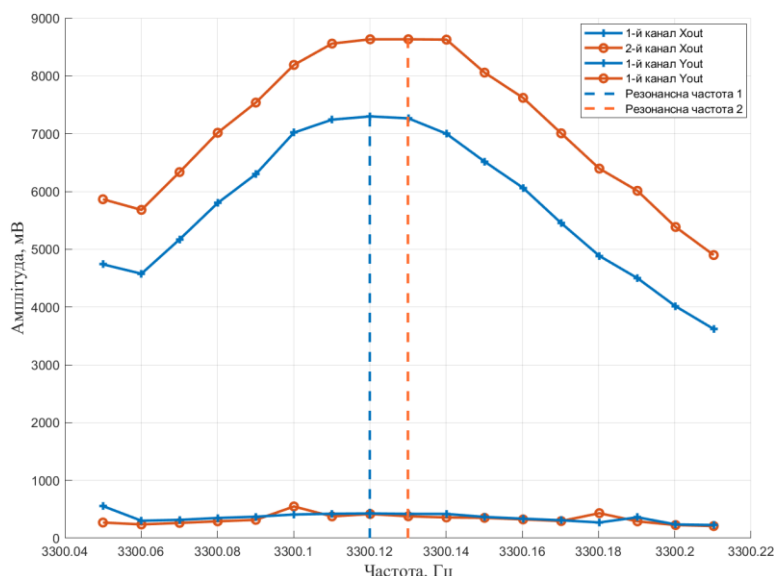


Рис. 3. Графік амплітудно-частотної характеристики чутливого елемента

Загальна кількість вимірюваних частот залежить від передбачуваного діапазону та кроку вимірювань. Для наведеного прикладу було виміряне діапазон 0,2 Гц на канал із кроком 0,01 Гц. Такий великий діапазон необхідний для вірогідного покриття частоти резонансу та можливості розрахунку добротності та різнодобротності, які теж виступають контролем якості резонатора.

Під час вимірювання методом АЧХ неможливо напряму відслідковувати вплив температури на дрейф резонансної частоти. Зокрема, через велику кількість точок для вимірювання, резонансна частота одного каналу

може дрейфувати поки триває вимірювання другого каналу. Тож для контролю відсутності дрейфу у разі вимірювання різночастотності необхідно проводити декілька дублюючих вимірювань, щоб впевнитись у достовірності отриманих результатів.

Вимірювання різночастотності обертанням стоячої хвилі

Трьох-режимна функціональна схема керування КВГ, яка дозволяє керувати стоячою хвилею, показана на рис. 4.

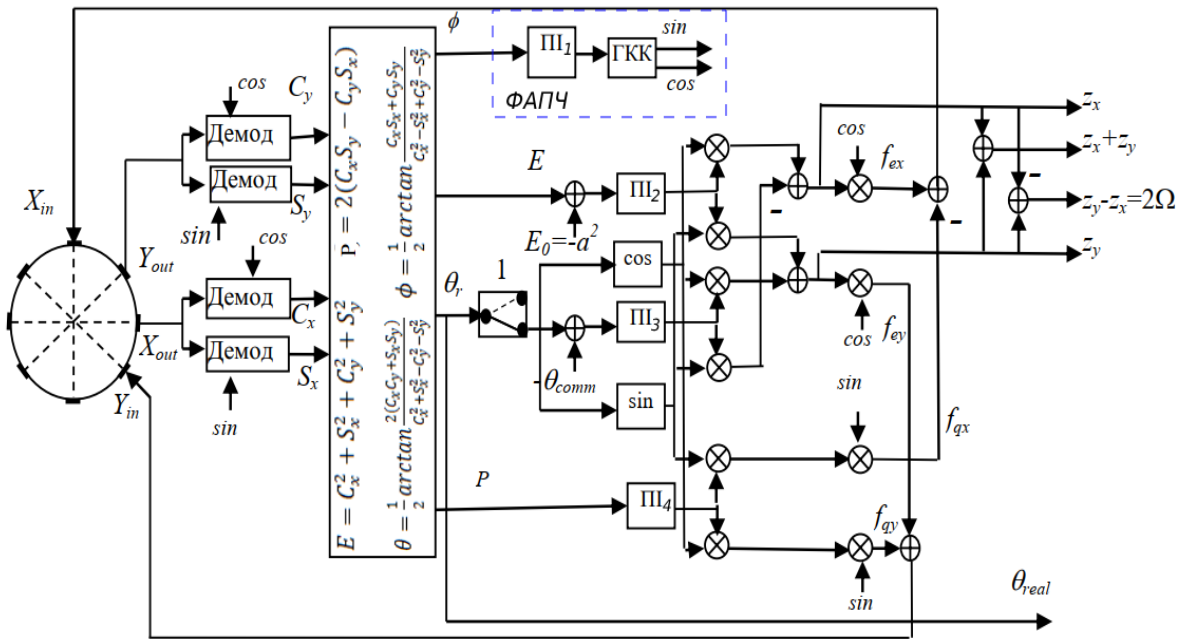


Рис. 4. Трьох-режимна система керування КВГ

Безпосереднє керування стоячою хвилею виконується за допомогою сигналів, що подаються на електроди X_{in} та Y_{in} . Розрахунок цих сигналів виконуються за наступними формулами:

$$\begin{aligned} X_{in} &= Zx \cos(\varphi) + PI_4 \sin(\theta) \sin(\varphi) \\ Y_{in} &= Zy \cos(\varphi) - PI_4 \cos(\theta) \sin(\varphi) \end{aligned} \quad (2)$$

де Zx та Zy – диференціальні складові, φ – вихід фазо-амплітудного підстроювача частоти (ФАПЧ), PI_4 – вихід ПІ регулятора № 4, який є сигналом квадратурної складової, θ – розрахований кут позиціонування стоячої хвилі в резонаторі. Диференціальні складові Zx та Zy розраховуються за наступним рівняннями:

$$\begin{aligned} Zx &= PI_2 \cos(\theta) + PI_3 \sin(\theta) \\ Zy &= PI_2 \sin(\theta) - PI_3 \cos(\theta), \end{aligned} \quad (3)$$

де PI_2 та PI_3 – виходи ПІ регулятора № 2 та № 3, які є сигналами амплітуди та компенсації відповідно. З формули (3) випливає, що кут, за якого Z_y буде близьке до нуля, буде кутом стоячої хвилі [9].

Положення стоячої хвилі, керується значенням θ_{comm} із використанням ПІ-регулятора № 3. У режимі датчика кутової швидкості θ_{comm} зводить відхилення від θ_r до 0 і є пропорційним до кутової швидкості. У режимі датчика кута θ_r не компенсується і є пропорційним до кута повороту. У диференційному режимі θ_{comm} виставляє стоячу хвилю у бажане положення. Таким чином, результуюча θ з PI_3 впливає на диференціальні складові Z_x та Z_y .

Результати вимірювання

Під час вимірювання різночастотності кут стоячої хвилі по чергово збільшується на 18° від 0° до 360° , де 0° – початковий кут відносно електроду збудження X_{in} , 360° – повний оберт до електроду збудження X_{in} . Вимірювання проводилось на попередньо збалансованому ЧЕ із відомою АЧХ (рис. 3) та значенням різночастотності. Графік зміни частоти протягом експерименту показано на рис. 5. Зміна кута відбувалась із періодичністю у 5000 тактів вимірювання.

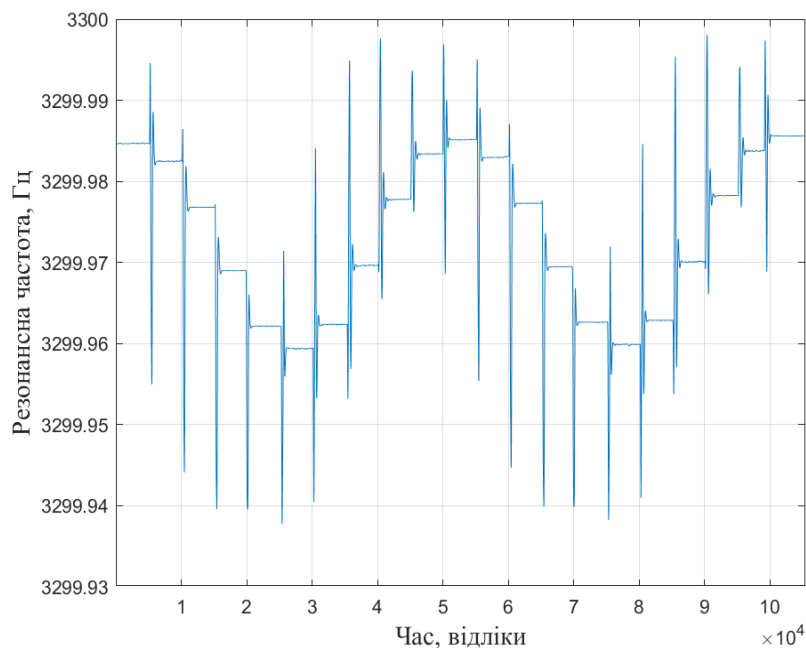


Рис. 5. Графік сигналу зміни частоти у залежності від кута стоячої хвилі

Результуючий графік усереднених значень частоти для кожного кута хвилі показано на рис. 6. На відміну від описаного раніше визначення величини різночастотності на основі АЧХ, величиною різночастотності у разі визначення даним методом є різниця між максимальним і мінімальним значенням отриманої характеристики згідно рис. 5. Згідно отриманим ре-

зультатам максимальне значення даної характеристики становить 3299,985 Гц, мінімальне – 3299,959 Гц. Різничастотність визначена даним методом склала 0,026 Гц. Отримані результати близькі до раніше визначених методом вимірювання АЧХ: $F_{res1} = 3298,65$ Гц, $F_{res2} = 3298,63$ Гц та різничастотністю $\Delta F_{res} = 0,020$ Гц. Величина ΔF_{res} отримана із округленням після – 2 степені у зв'язку з тим, що точність вимірювання резонансних частот визначається кроком зміни частот збудження 0,01 Гц. Порівняння одержаних двома методами результатів 0,026 Гц та 0,020 Гц показує працездатність та достовірність методу вимірювання різничастотності методом обертання стоячої хвилі.

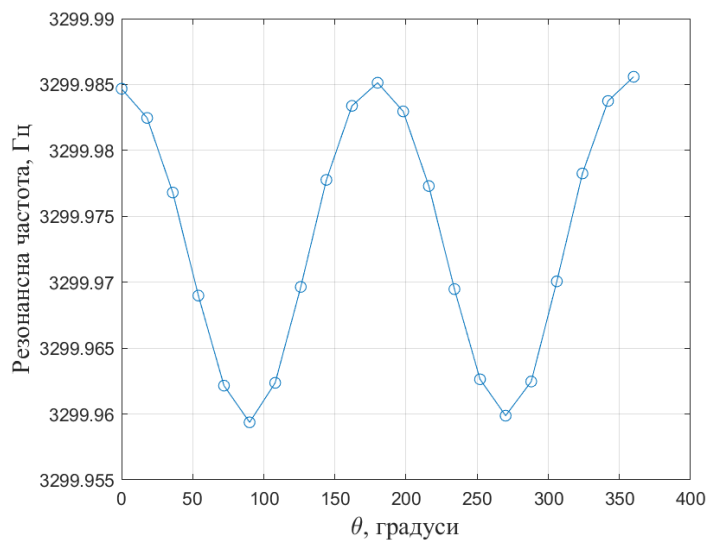


Рис. 6. Графік результуючого усереднення значення частоти у залежності від кута стоячої хвилі

Альтернативним до покрокового способу вимірювання може бути оберт стоячої хвилі із постійною швидкістю. За такого способу контур компенсації приймає фіксований сигнал збудження, який спричиняє зміну положення стоячої хвилі з постійною швидкістю 9 °/с. Графік вимірювання у такому режимі приведено на рис. 7. Отриманий результат демонструє нестабільність вихідної частоти 0,07 Гц. Інтерпретація результатів даного вимірювання у відношенні до характеристик резонатора на даний час є незавершеною і потребує подальших досліджень.

Перевагами методу вимірювання різничастотності шляхом обертання хвилі можна назвати:

- відсутність потреби зміни електроду збудження й повного проходу діапазону частот, де має бути резонансна частота;
- більша точність вимірювання;
- відслідкування температурного дрейфу резонансної частоти.

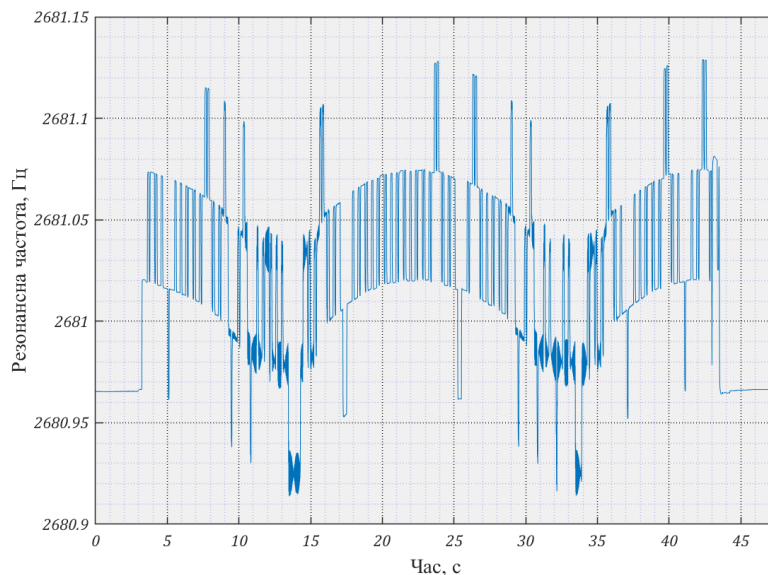


Рис. 7. Графік сигналу зміни частоти під час постійного обертання стоячої хвилі

Враховуючи те, що вимірювання проводились на вже збалансованому ЧЕ, в майбутньому, необхідно провести додаткові експерименти визначення різночастотності для незбалансованого ЧЕ, придатність використання методу на етапі балансування.

Висновок

Застосування трьох-режимної системи керування КВГ є зручною не тільки у його прямому застосуванні, як датчика, але також надає можливість виконання діагностики на основі вимірювання такого важливого параметра резонатора, як різночастотність. Вимірювання різночастотності методом зміни куткового положення стоячої хвилі у чутливому елементі має найбільш вагоме значення під час застосування у операціях балансування резонатора КВГ на етапі виготовлення його ЧЕ.

Метод вимірювання різночастотності на основі обертання стоячої хвилі має значну перевагу у швидкості в порівнянні із методом автоматизованого вимірювання АЧХ. У даній роботі вимірювання різночастотності за рахунок здійснення повного оберту стоячої хвилі було реалізовано за 40 секунд у той час, як покрокова побудова АЧХ має тривалість близько 8-10 хвилин, при цьому можливо визначати різночастотність із точністю близько 0,001 Гц відносно 0,01 Гц у порівнянні за методом побудови АЧХ.

Одним із важливих факторів прискорення вимірювання різночастотності є значне зменшення впливу температурних дрейфів на вимірювання, які пов'язані з коливаннями умов зовнішнього середовища з часом.

Вимірювання під час обертання стоячої хвилі резонатора із різними параметрами швидкості також показали, що існують передумови для розробки нових і вдосконалення існуючих методів визначення інших параме-

трів резонатора, наприклад, таких, як кути максимальних частот відносно електрода збудження, кути осей максимальної добротності, максимальної жорсткості та величини різнодобротності.

Список використаних літератури

1. Чіковані В. В., Головач С. В. Стан та перспективи розвитку вібраційної гіроскопії в Україні та у світі. *Механіка гіроскопічних систем*. 2021. №41. С. 61-87.
2. Chikovani V. V. *Vibratory Gyroscopes Based on Micro-Electro-Mechanical and non-Micro-Electro-Mechanical Systems*. Cambridge Scholars Publishing, 2023. 375 p.
3. Zeng K., Hu Y., Deng G., Sun X., Su W., Lu Y., Duan J. A. Investigation on eigenfrequency of a cylindrical shell resonator under resonator-top trimming methods. *Sensors*. 2017. Vol. 17, no. 9. P. 2-11.
4. Hu Y., Zhong H., Lu Y., Duan J. A., Sun X. Laser trimming method for reducing frequency split of cylindrical vibrating gyroscope. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 793, no. 1. P. 12-27.
5. Lin Z., Fu M., Deng Z., Liu N., Liu H. Frequency split elimination method for a solid-state vibratory angular rate gyro with an imperfect axisymmetric-shell resonator. *Sensors*. 2015. Vol. 15, no. 2. P. 3204-3223.
6. Цірук В. Г. Визначення параметрів металевого резонатора вібраційного гіроскопа акустичним методом. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2018. № 3. С. 74-79.
7. Petrenko O., Chikovani V., Golovach S., Strokach G. Experimental investigation of the maximum quality factor axes temperature deviation in metallic Coriolis vibratory gyroscopes resonator. *Механіка гіроскопічних систем*. 2021. № 42. С. 69-79.
8. Taheri-Tehrani P., Su T., Heidari A., Jaramillo G., Yang C., Akhbari S., Najjar H., Nitzan S., Saito D., Lin L., Horsley D. A. Micro-scale diamond hemispherical resonator gyroscope. *Hilton Head Workshop*. 2014. P. 289-292.
9. Строкач Г. Ю., Головач С. В. Підвищення ефективності методу балансування чутливого елемента коріолісового вібраційного гіроскопа шляхом автоматизації процедур вимірювання. // XIV Науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Погляд у майбутнє приладобудування», Київ, Україна, 18-19 травня 2021, С. 58-62.
10. Чіковані В. В., Цірук Г. В., Корольова О. В. Трирежимний вібраційний гіроскоп. *Військово-технічний збірник*. 2018. № 18. С. 18-25.