

УДК: 621.375.826

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771412021269245>

В. В. Чіковані¹, *д.т.н., професор,*

С. В. Головач², *к.т.н., головний конструктор*

Стан та перспективи розвитку вібраційної гіроскопії в Україні та у світі

Уа У роботі аналізується розробки та сучасний стан вібраційних гіроскопів в Україні. Приводяться та аналізуються розробки кварцових та металевих резонаторів різних діаметрів для вібраційних гіроскопів. Також, для порівняння зі світовою практикою, приводяться розробки кварцових та металевих резонаторів передових зарубіжних компаній лідерів у цій галузі. Розглядаються блок-схеми побудови системи керування стоячої хвилею вібраційного гіроскопа у трьох режимах роботи приладу, режимі датчика кутової швидкості, датчика кута (інтегруючий режим) та диференційному режимі. У перспективі показано можливість об'єднання усіх трьох режимів в одному приладі з автоматичним переключенням з режиму на режим, для максимального використання переваг кожного режиму в залежності від умов навколишнього середовища та параметрів руху. Представлені результати тестування датчиків з металевим резонатором, що зроблені в Україні, на дію широкого кола зовнішніх збурень. Оцінюються перспективи розвитку вібраційних гіроскопів та систем на їх основі. В роботі зроблені висновки про стан и перспективи розвитку вібраційної гіроскопії в Україні.

En The work analyzes the development and current state of vibration gyroscopes in Ukraine and in the world. The development of quartz and metallic resonators of various diameters for vibrating gyroscopes is presented and analyzed. In addition, for comparison with world practice, the developments of quartz and metallic resonators of advanced foreign companies, leaders in this field, are given. The block

¹ Національний авіаційний університет

² АТ «Елміз»

diagrams of the standing wave control system of the vibrating gyroscope in three modes of operation: as the angle rate sensor, as the rate-integrating or whole angle mode sensor and the differential mode are considered. In the perspective, the possibility of combining all three modes in one gyroscope with automatic switching from one mode to another one is shown, for maximum use of the advantages of each mode in dependence of environmental conditions and motion parameters. The test results of gyroscope with a metallic resonator made in Ukraine, on the effect of a wide range of external disturbances are presented. The development prospects of vibrating gyroscopes and systems based on them are evaluated. The paper draws conclusions about the state and prospects for the development of vibrating gyroscope in Ukraine.

Вступ

Твердотільні вібраційні гіроскопи (ТВГ) (за міжнародною класифікацією *Coriolis vibratory gyroscope, CVG*) є важливою інерціальною технологією не тільки тому, що вони продемонстрували повну навігаційну точність, але ще й тому, що два інших твердотільних гіроскопа, кільцевий лазерний гіроскоп (КЛГ) і волоконно-оптичний гіроскоп (ВОГ), не піддаються такій природній мініатюризації [1]. Мікромеханічні ТВГ, з іншого боку, є вже реалізованими на практиці і являються предметом постійного інтенсивного дослідження [2 - 5].

ТВГ поділяються на два класи залежно від характеру двох мод вібрації, які існують у резонаторі. У першому класі моди вібрації різні, тобто мають різні, допустимо близькі, резонансні частоти. Прикладом цього класу є балочний, камертонний та подвійний камертонний гіроскопи [6 - 9].

У другому класі обидві моди ідентичні, являючи собою дві ортогональні вироджені моди (моди однієї власної частоти) осесиметричного пружного тіла. Прикладами є вібраційні циліндричні та напівсферичні оболонки і фактично маятник Фуко [10-12].

ТВГ можуть працювати у режимі датчика кутової швидкості (ДКШ) з розімкненим контуром або замкнутим контуром зворотного зв'язку, тобто у режимі компенсації сили Коріоліса. У режимі ДКШ (*rate or force-rebalance mode*) із розімкнутим контуром неможливо забезпечити високу точність та задовільну смугу пропускання, тому цей режим не буде розглядатися у подальшому.

У режимі ДКШ із замкненим зворотним зв'язком сигнал збудження керується так, що амплітуда коливань підтримується на заданому рівні, а вібрація, що виникає через дію сил Коріоліса у разі обертання резонатора в інерційному просторі, компенсується до нуля. Сила, необхідна для обнуління вібрації, що виникає через силу Коріоліса, є пропорційною вхідній швидкості обертання. Цей режим забезпечує високу точність та малі шуми при вимірюванні невеликих кутових швидкостей [13 - 16].

Другим способом управління є режим інтегрування кутової швидкості (*rate-integrating mode*), за якого виконується вимірювання повного кута

повороту (*whole angle mode*). У цьому режимі сила Коріоліса не компенсується і викликає поворот хвилі на кут пропорційний куту повороту гіроскопа в інерційному просторі. Цей режим може забезпечувати вимірювання дуже великих діапазонів кутових швидкостей, що досягають тисяч і навіть десятки тисяч град/с, а також широку смугу пропускання, яка теоретично не обмежена, та дуже стабільний масштабний коефіцієнт [17 - 21].

Третім – є диференційний режим, за якого у гіроскопі формуються два вимірювальних канали, що міряють одночасно дві кутові швидкості з протилежними знаками $\pm\Omega$. Піврізниця сигналів цих двох каналів складає кутові швидкості та компенсує похибки які однакові у цих двох каналах. Цей режим був вперше створений Українськими фахівцями [22, 23], які показали його можливість ефективно компенсувати зовнішні та внутрішні збурення, що можуть діяти на гіроскоп у процесі експлуатації [24 – 29].

У роботі [30] вперше були об'єднані режими ДКШ та повного кута повороту (інтегруючого режиму) в одному гіроскопі з автоматичним переключенням із режиму на режим і, таким чином, було реалізовано двох-режимний гіроскоп, що має переваги обох режимів, тобто вимірює дуже малі кутові швидкості з малими шумами, та дуже великі кутові швидкості з мінімальними динамічними похибками.

Українськими фахівцями у роботі [31] було реалізовано трьох-режимний гіроскоп, додавши до перших двох ще один диференційний режим роботи. На даний час такий «універсальний» гіроскоп розробляється на київському підприємстві АТ «Елміз».

У цій оглядовій роботі розглядаються різні типи резонаторів для вібраційного гіроскопа. Представлено сучасний стан вібраційних гіроскопів в Україні. Приводяться та аналізуються розробки кварцових та металевих резонаторів різних діаметрів для вібраційних гіроскопів. Також, для порівняння зі світової практикою, приводяться розробки кварцових та металевих резонаторів передових зарубіжних компаній-лідерів у цій галузі. Більш детально аналізуються усі три режими роботи із блок-схемами систем керування хвилею для кожного режиму та для трьох-режимного ТВГ. Наводяться результати вимірів по кожному із режимів, із оцінкою точності. Показані їх переваги. Оцінюються перспективи розвитку вібраційних гіроскопів та систем на їх основі.

Резонатори вібраційних гіроскопів

Хронологічно перший і найбільший шлях технологічного розвитку серед усіх вібраційних гіроскопів пройшов варіант, що був виготовлений із плавленого кварцу, який отримав назву напівсферичного резонаторного гіроскопа (НРГ) (*Hemispherical Resonator Gyroscope, HRG*) і вперше став вироблятися у США, на даний час компанією *Northrop Grumman* (США) [10], а пізніше компанією *Sagem (Safran)* (Франція) [32].

ТВГ, особливо із осесиметричними резонаторами, відомі своїми видатними можливостями по забезпеченню високої точності, довговічності та надвисокої надійності. Відомі НРГ (HRG) виробництва компанії *Northrop Grumman* (США) продемонстрували 12 мільйонів годин (1369 років) безперервного сумарного напрацювання без жодного виходу з ладу [10]. Оскільки ця технологія є складною і досить дорогою, дослідники даного типу гіроскопів намагалися знайти прийнятний компроміс між їх вартістю та точністю.

Однією із запропонованих версій НРГ меншої вартості є складовий кварцовий напівсферичний резонатор, розроблений і виготовлений заводом «Арсенал» у Києві (Україна) [33]. Крім того, у рамках зниження вартості, інтенсивно досліджуються та виробляються циліндричні резонаторні гіроскопи (ЦРГ) із кварцу, металу та напівсферичні із п'єзокераміки [34 - 38].

Циліндричний резонатор є основним компонентом ЦРГ, який може використовуватися у різних рухомих об'єктах де *GPS* може бути недоступним, включаючи системи інерціальної навігації, системи керування польотом, стабілізацію бортової платформи, стабілізацію нафтогазової платформи, безпілотні наземні транспортні засоби, курсові системи та автоматизовані керовані транспортні засоби тощо.

На даний час, на світовому ринку доступні ЦРГ тактичного та промислового класу точності, такі як серія гіроскопів *Watson Industries Pro Gyro*® [37] та серії *Innalabs 2000* і *1000* [38].

Резонатори із плавленого кварцу

На сьогоднішній день існують кілька варіантів різних розмірів напівсферичних резонаторів із плавленого кварцу, що були вироблені у США. Першим був резонатор діаметром 58 мм (рис. 1, *a*) у вигляді келиха із 32 зубцями, які призначені для балансування, шляхом випаровування частини маси лазерним променем із метою зменшення різночастотності та різнодобротності резонатора без пошкодження якості його поверхні. Представлений сучасний резонатор (рис. 1, *b*) у вигляді гриба без зубців, що робить його більш технологічним у виробництві. Однак, балансування такого резонатора робиться на обладнанні, яке виконує сухе іонне травлення. Слід зазначити, що таке обладнання є надзвичайно дорогим.

*a)**b)*

Рис. 1. Кварцові резонатори ТВГ у вигляді келихом (*a*) та грибу (*b*)

У кінці 1980-х років завод «Арсенал» виготовив із цілого шматка плавленого кварцу напівсферичний резонатор діаметром 60 мм і добротністю $Q=10^7$. Цей резонатор (рис. 2, *a* та рис. 2, *b*) має внутрішню і зовнішню ніжки. Півсфера, покрита хромовою плівкою для забезпечення струмопровідності, а також має 32 балансувальних зуба. Таку конструкцію можна закріпити у корпусі як келихом, так і грибом.

*a)**b)*

Рис. 2. Український кварцовий резонатор, який може кріпитися як грибом (*a*) так і келихом (*b*)

Наприкінці 1980-х років у США був виготовлений майже вдвічі менший резонатор із плавленого кварцу діаметром 30 мм із внутрішнім і зовнішнім ніжками (рис. 3, *a*). Принцип конструкції корпусу чутливого елемента для резонаторів із двома ніжками представлено на рис. 3, *b*.

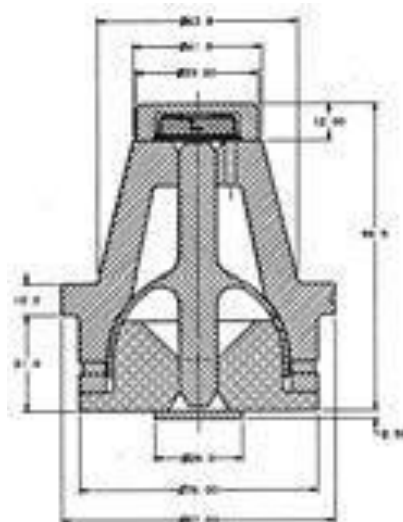
*a)**b)*

Рис. 3. Резонатор із плавленого кварцу діаметром 30 мм (*a*) та корпус для його кріплення (*b*)

Незважаючи на те, що діаметр резонатора зменшився майже у 2 рази для НРГ (HRG) на основі цього резонатора були досягнуті відмінні точносні параметри: випадкове блукання кута (*angle radom walk, ARW*) $ARW=0,0006^\circ/\text{год}^{1/2}$, зміщення нуля $0,005^\circ/\text{год}$ і 1 ppm стабільність масштабного коефіцієнта (за 100 днів) [10].

З метою зниження собівартості виготовлення кварцового резонатора фахівці заводу «Арсенал» запропонували виготовити беззубцевий складовий резонатор із плавленого кварцу діаметром 30 мм, залишивши тільки внутрішню ніжку. Такий складовий резонатор складається із півсфери та циліндричної ніжки, що виготовлені окремо з використанням існуючих добре налагоджених серійних технологічних процесів виготовлення сферичних та циліндричних лінз. У подальшому дві частини резонатора з'єднуються між собою за допомогою глибокого оптичного контакту [39]. Вартість виготовлення складених резонаторів була значно знижена. За проектом під патронатом Д. Д. Лінча (з боку США) протягом 1998-2000 років у цеху № 5 заводу «Арсенал» було виготовлено декілька десятків складених напівсферичних резонаторів із плавленого кварцу марки КУ-1.

На рис. 4, *a* і рис. 4, *b* показані компоненти складеного беззубцевого резонатора та його збірка шляхом глибокого оптичного контакту [33].

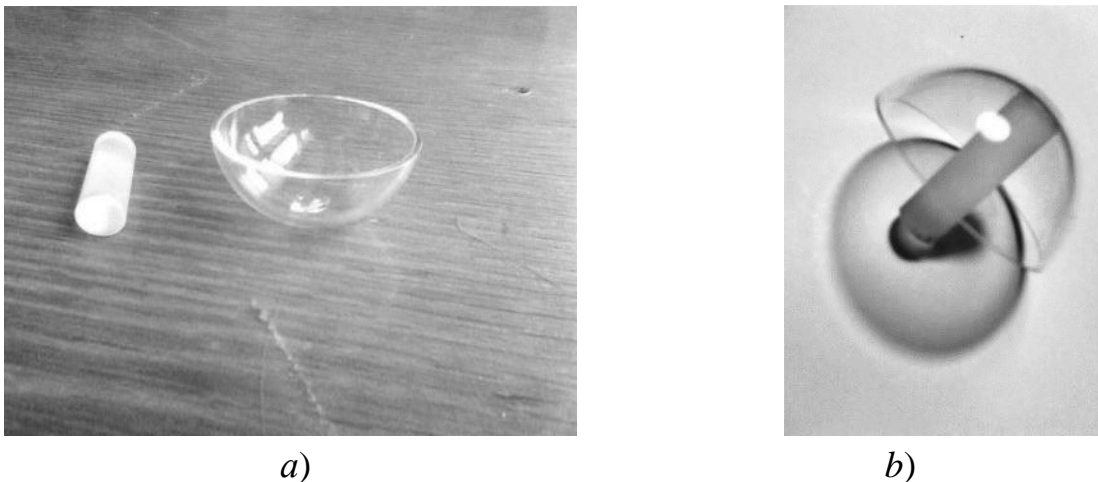


Рис. 4. Компоненти резонатора діаметром 30 мм (*a*) та його збірка (*b*)

Балансування маси беззубцевих резонаторів виконується сухим іонним [40, 41] або хімічним травленням [42].

На рис. 5 представлено резонатор із плавленого кварцу діаметром 20 мм виробництва компанії *Safran* (Франція). Результати випробувань показали, що повторюваність зміщення нуля була кращою за $0,01$ град/год, похибка масштабного коефіцієнта - кращою за 5 ppm , а випадкове блукання - краще ніж 10^{-4} град/год^{1/2} [43].

На рис. 6 [44] показаний один із варіантів конструкції чутливого елемента НРГ із резонатором, що має тільки внутрішню ніжку. На цьому рисунку: 1 – зовнішня частина кожуха із кварцового скла; 2 – кварцовий

Системи та процеси керування

резонатор; 3, 4, 5 – зовнішні, внутрішні кільцеві та дискретні електроди, 6 – внутрішня частина корпусу, також виготовлена із кварцу.

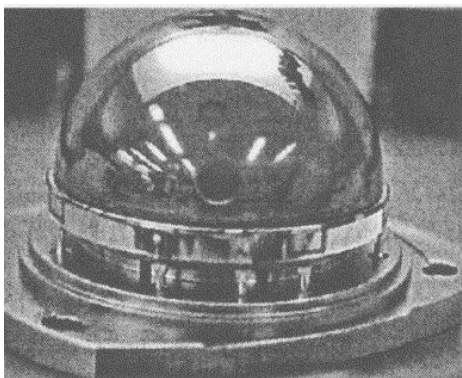


Рис. 5. Резонатор діаметром 20 мм компанії Safran

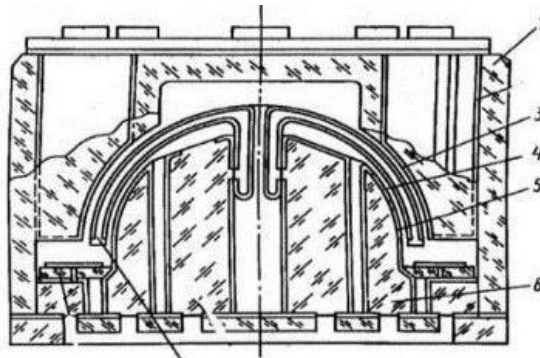


Рис. 6. Конструкція корпусу із внутрішній ніжкою

Для подальшого зниження собівартості виробництва українською дослідницькою групою у 2000 році було запропоновано чутливий елемент (ЧЕ) на основі напівсферичного резонатора з плавненого кварцу без ніжки. На рис. 7 представлена схема конструкції цього нетрадиційного ЧЕ з використанням третьої ($n=3$) моди вібрації [45].

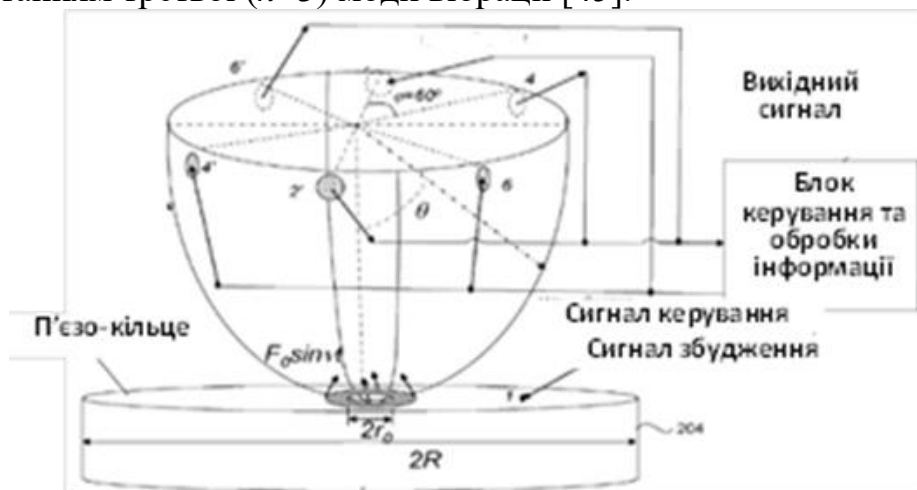


Рис. 7. Схема ЧЕ з кварцовим резонатором без ніжки

На п'єзокерамічному кільці встановлена півсфера із отвором у центрі, так що полюс резонатора залишається вільним. Резонатор кріпиться навколо кільця впритул до його полюса. Результати випробувань показали [46], що добротність моди вібрації $n=3$ досягає $Q=5 \times 10^6$. Резонансна частота для моди $n=3$ резонатора діаметром 30 мм становить 13,7 кГц. Підтвердженнями такого відмінного результату, отриманого для моди $n=3$ у разі такої конструкції є те, що різночастотність при цьому була у діапазоні 0,004 - 0,008 Гц навіть без будь-якої процедури балансування [46]. Також слід відмітити, що під час збудження від п'єзокільця достатнім було прикласти напругу амплітудою 3 В на резонансній частоті, щоб отримати відклик 0,75 В на виході без посилення сигналу, у той час як під час традицій-

ного варіанту збудження вібрації резонатора із плавленого кварцу ємнісними електродами, необхідно докладати напругу амплітудою близько 400 В на частоті вдвічі меншій від резонансної частоти, при цьому також сигнал відгуку необхідно посилювати в кілька десятків разів.

Пробні варіанти циліндричних резонаторів із кварцу, за аналогією з вдалою конструкцією циліндричного металевого резонатора з отворами на дні циліндра, були виготовлені компанією *Innalabs UA* (Київ, Україна) у 2008 році. Такі резонатори діаметру 25 мм і 43 мм, у зборі з металевою основою показані на рис. 8 [16]. Добротність цих неполірованих резонаторів мали значення в діапазоні $1 \div 2 \times 10^5$, а очікувані значення добротності були в діапазоні $5 \div 7 \times 10^5$.

Останнім часом значно кращих результатів у циліндричних резонаторах з плавленого кварцу досягли китайські дослідники [47, 48]. На рис. 9 показані циліндричні резонатори з плавленого кварцу з прямокутними тонкоплівковими п'єзоелектродами для збудження та знімання вібрації. Інвар використовується як основа для кріплення резонаторів на ніжки. Резонатор 25 мм має добротність близько 3×10^6 при тиску $2,6 \times 10^{-2}$ Па і резонансну частоту по другій моді коливань близько 4,6 кГц.

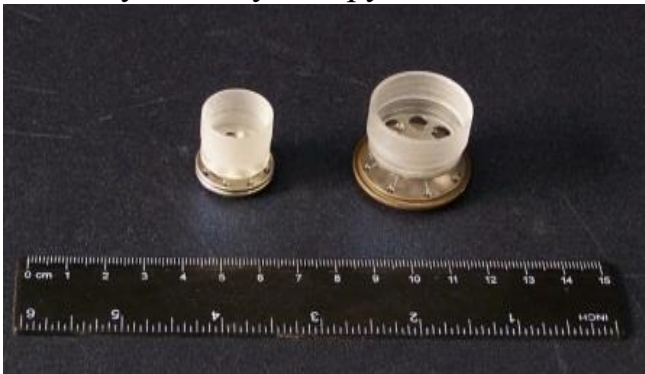


Рис. 8. Циліндричні резонатори із кварцу

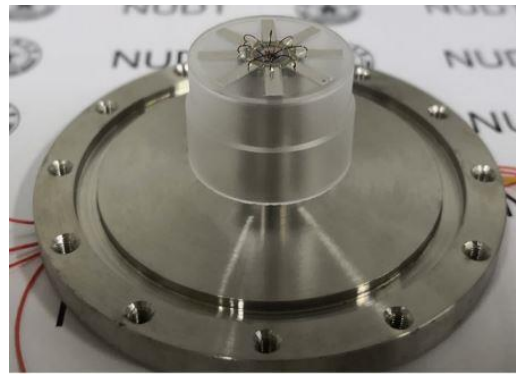


Рис. 9. Циліндричні резонатори з кварцу та збірка для тестування

Металеві резонатори

Подальше зниження ціни виготовлення ТВГ може бути досягнуто за рахунок використання недорогих і легко оброблюваних матеріалів, таких як металеві сплави та п'єзокераміка.

Marconi Avionics (GB) вперше розробила вібраційний гіроскоп *START*, виготовлений з металевого циліндра зі збудженням і зніманням сигналів, що здійснюються за допомогою п'єзо пластин, прикріплених до бічної поверхні циліндра поблизу відкритого кінця циліндра [49, 50]. Незважаючи на низьку добротність, *Marconi Avionics* виготовила кілька тисяч зразків для різних застосувань.

Вібраційний гіроскоп з металевим резонатором *Quarason*TM виготовлюється компанією *Safran* (Франція) масовим тиражом більш десятка років. Він використовується на різних рухомих об'єктах від літаків та робототехніки до бронемашин. Його чутливий елемент має подвійну камертону конструкцію, яка представлена на рис. 10. П'єзокерамічні електроди збудження та виміру вібрацій використовуються для керування вібрацією та визначення кутової швидкості. Він використовує чотири п'єзопластини, припаяні до кожного із чотирьох зубців подвійного камертона, щоб збудити та вимірювати дві ортогональні моди вібрації *R* і *T*, як показано на рис. 10 [9].



Рис. 10. ЧЕ ТВГ *Quarason*TM із металевим резонатором

Незважаючи на низьку добротність, цей гіроскоп надзвичайно міцний, його ударна стійкість перевищує 500 g (11 мс), також він має низьку чутливість до зовнішньої вібрації, а його робочий температурний діапазон становить $[-40 +85]^{\circ}\text{C}$. У результаті гіроскоп із металевим резонатором *Quarason*TM має багато різних застосувань, включаючи стабілізацію лінії візування, стабілізацію зброї бронетанкової техніки, стабілізацію залізничних вагонів швидкісних поїздів, симулятори руху, керування роботами.

Інші металеві резонатори для ТВГ використовують осесиметричну конструкцію циліндричного типу зі стінками різної товщини та отворами на його дні представлені на рис. 11. Ця конструкція була розроблена і виготовлена українськими фахівцями. Унікальна конструкція цього циліндричного резонатора виготовленого із елінварного сплаву з надзвичайно низьким температурним коефіцієнтом частоти та стабільним модулем Юнга дає можливість виготовляти точні і в той же час недорогі ТВГ, значно меншої вартості, ніж їх аналоги із плавленого кварцу.

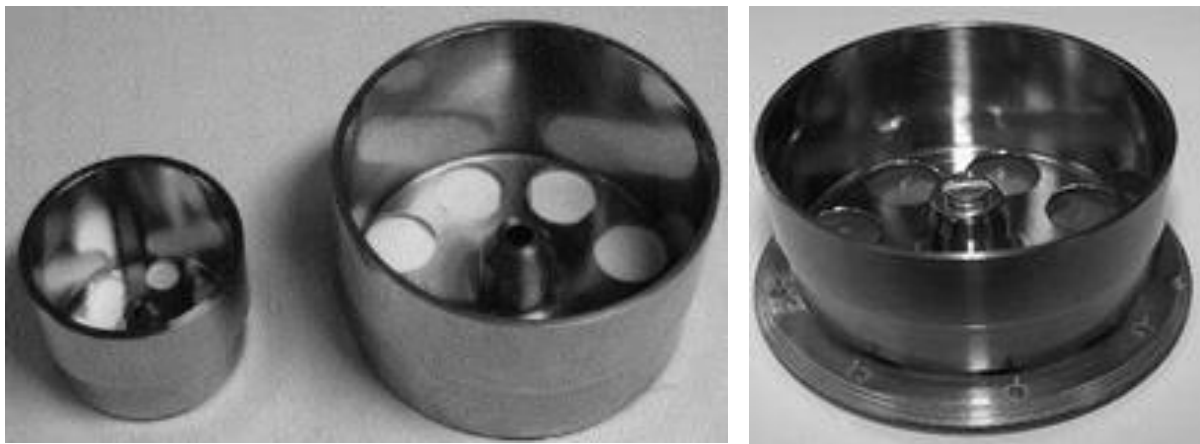


Рис. 11. Металевий резонатор та його збірка

Середнє значення добротності такої конструкції металевого резонатора становить близько $Q=4 \times 10^4$ у фар-вакуумному середовищі.

Максимальне значення добротності отримано на рівні $7,5 \times 10^4$. Працездатність ТВГ підтверджена під час та після ударів 400 g (2 мс), під час та після випадкових вібрацій зі середньквдратичної амплітудою 20 g у частотному діапазоні 40 - 6400 Гц.

Компанія *Innalabs Inc.* (Ірландія) постачає системи на основі гіроскопів із резонаторами, що представлені на рис. 11, Євросмосу для виконання різних завдань на євросупутниках і вже має статистику їх сумарного напрацювання понад 1 млн. годин без збоїв в роботі [38].

Пізніше в АТ “Елміз” (Київ, Україна) була виконана модифікація циліндричного резонатора, яка усунула недоліки вищевказаного резонатора щодо зниження похибки вимірювання кутової швидкості під час удару та вібрації вздовж осі чутливості гіроскопа. Модифікований резонатор і ЧЕ зображені на рис. 12 [51].



Рис. 12. Модифікована конструкція резонатора та ЧЕ ТВГ

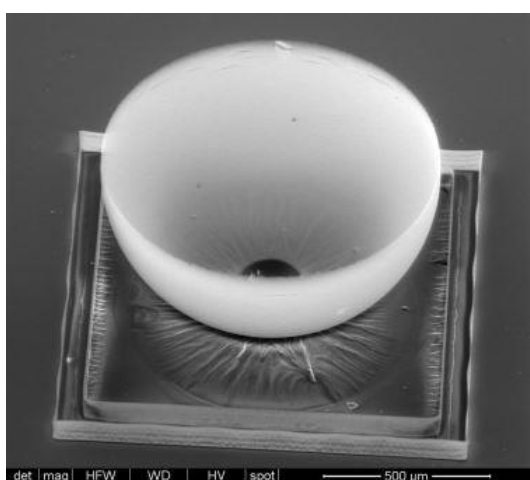
Незважаючи на те, що металеві та п'єзокерамічні резонатори не мають такої високої добротності як у порівнянні із аналогами із плавленого кварцу, тим не менш, ТВГ на основі резонаторів із нижчою добротністю можуть досягати високої точності за рахунок збільшення ефективної вібраційної маси, тобто розміру та питомої ваги матеріалу резонатора. Цей

факт підтверджується емпіричною формулою, представленою у роботі [52], де вихідний шум обернено пропорційний 6-ому ступеню лінійного розміру резонатора. Крім того, стабільність зміщення нуля також обернено пропорційна ефективній вібраційній масі. Результати вимірювань, які вперше виконанні українськими фахівцями, що представлені в роботах [14, 15], показали, що ТВГ на основі металевого циліндричного резонатора може досягати високої точності на рівні $0,01 \div 0,005$ град/год за кутового випадкового блукання 5×10^{-4} град/г^{1/2} для ТВГ із резонатором діаметром 43 мм, та $0,03 \div 0,01$ град/г для ТВГ із резонатором 25 мм.

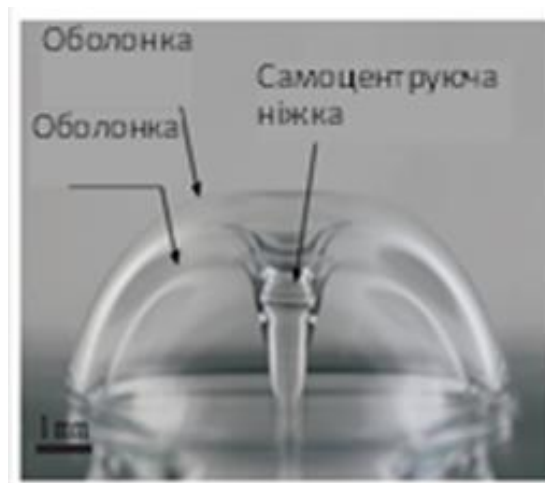
3D MEMS резонатори

В останнє десятиліття активно ведуться роботи по розробці мікропівсферичних резонаторів [53], схожих на конструкцію ЧЕ запропоновану українськими фахівцями (рис. 7). Такий MEMS резонатор показано на рис. 13, а. Він має резонансну частоту на третій моді коливань близько 17,5 кГц. Діаметр виготовленого резонатора зі скляною оболонкою становить 1 мм з товщиною оболонки 1,2 мкм. Добротність при атмосферному тиску складає близько 730.

Інші дослідники досягли значно кращих результатів по добротності. Рис. 13b ілюструє резонатор з подвійною оболонкою [54]. Внутрішня оболонка це є робоча частина резонатора, а зовнішньою оболонкою являється корпусний елемент. Внутрішня і зовнішня оболонки мають різну товщину і мають спільну ніжку. Радіус ніжки – 0.48 мм, радіус внутрішній оболонки - 3.24 мм, радіус зовнішній оболонки - 3.29 мм, сумарна висота резонатора з подвійною оболонкою – 2.67 мм. Цей резонатор має добротність на другій моді коливань близько $Q=2 \times 10^5$ з резонансною частотою 9.6 кГц та $Q=1.5 \div 1.6 \times 10^6$ на третій моді коливань з резонансною частотою близько 17 кГц.



a)



b)

Рис. 13. ЧЕ MEMS ТВГ із кварцу

Режими роботи ТВГ

Як обговорювалося у вступі, ТВГ здатний працювати у трьох режимах: у режимі датчика кутової швидкості, ДКШ, (*rate mode*), у режимі вимірювання кута повороту (*whole angle mode*) або інтегруючому режимі (*rate-integrating mode*), а також у диференціальному режимі (*differential mode*). Кожен із цих режимів має свої переваги, які можуть бути об'єднані в одному гіроскопі із автоматичним перемиканням режимів для забезпечення найкращої точності залежно від умов довкілля та параметрів руху.

Незважаючи на те, що системи керування ТВГ для трьох режимів його роботи будуть розглянуті в цьому розділі на прикладі вібраційних гіроскопів другого класу, представлені тут результати також справедливі як для ТВГ першого класу так і для МЕМС гіроскопів (МЕМС ТВГ).

Режим датчика кутової швидкості

Чутливий елемент ТВГ, що має 8 електродів, після з'єднання діаметрально протилежних електродів, може бути представлений у вигляді об'єкта керування з двома входами X_{in} , Y_{in} і двома виходами X_{out} , Y_{out} , як показано на блок-схемі цифрової системи керування хвилею ТВГ-ДКШ, що представлена на рис. 14.

Усі вхідні та вихідні сигнали ЧЕ ТВГ є амплітудно-модульованими.

Резонансна частота є несучою, а кутова швидкість є сигналом огинаючої. Для формування керуючих сигналів спочатку необхідно демодувати сигнали що вимірюються (X_{out} , Y_{out}), сформувати керуючі сигнали, потім повторно модулювати сигнали (X_{in} , Y_{in}) за резонансною частотою та подати їх на входи чутливого елемента для виконання функцій керування.

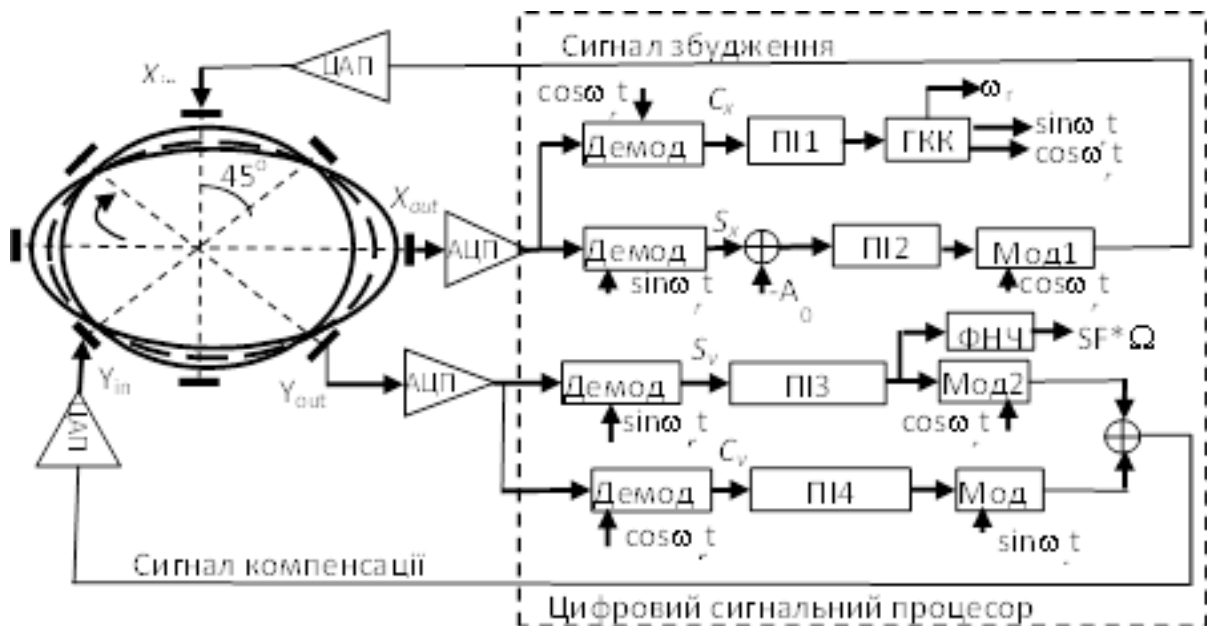


Рис. 14. Блок-схема цифрової системи керування ТВГ-ДКШ

Системи та процеси керування

На блок-схемі показані 4 канали керування. Перший канал стежить за резонансною частотою і складається із демодулятора 1, пропорційно-інтегрального (ПІ) регулятора та генератора керованого кодом (ГКК), який формує на виході два ортогональних сигналу синуса та косинуса резонансної частоти ω_r для модуляції і демодуляції. Інші три канали складаються з однакових блоків – демодулятор, ПІ регулятор і модулятор.

Другий канал стабілізує амплітуду вібрацій на значенні A_0 . Третій канал виділяє коріолісову компоненту сигналу вузла, що є пропорційною кутовій швидкості і після фільтру низької частоти (ФНЧ) подає його на вихідний роз'єм гіроскопа. Четвертий канал виділяє квадратурну похибку та після додавання до коріолісової компоненти подається на компенсацію. При цьому, вібраційна хвиля утримується на електроді збудження незалежно від значення кутової швидкості.

Режим ДКШ має достатньо невелику чутливість до похибок виготовлення резонатора, таких як різновтовщинність та неоднорідність матеріалу, може мати мінімальні шуми та високу точність при вимірюванні малих та середніх кутових швидкостей. Як приклад, приведемо результати вимірів ТВГ з металевим резонатором $Q=3 \times 10^4$ (менше середньої добротності кварцового резонатора 100÷200 разів) діаметром 25 та 43 мм, зробленими в Україні. На рис. 15 і рис. 16 представлені результати вимірювань та розрахунків варіації Алана, нестабільності зміщення нуля ТВГ по мінімуму варіації Алана, а також серед неквадратичне відхилення (СКВ) у разі осереднення вихідного сигналу за 100 с, 15 хв. та 1 години, що досягає 0,0023 град/год [14, 55].

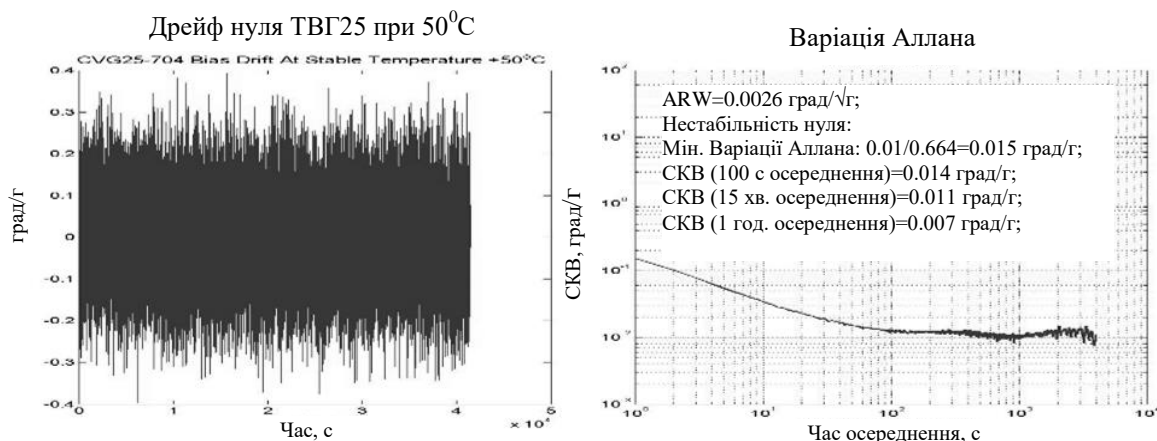


Рис. 15. Дрейф нуля ДКШ ТВГ-25 та його варіація Алана

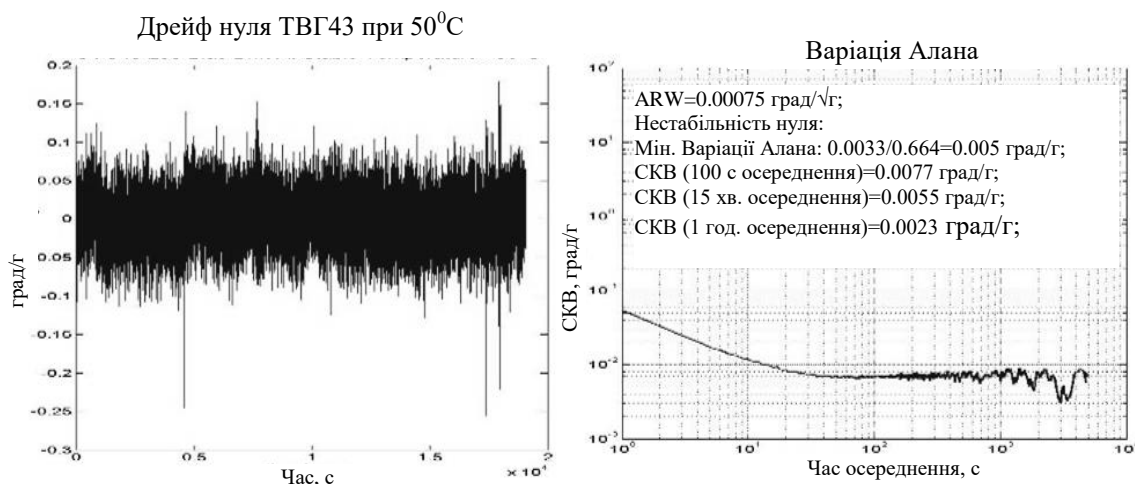


Рис. 16. Дрейф нуля ДКШ ТВГ-43 та його варіація Алана

Таким чином, низькодобротні, але дешеві та технологічні у виготовленні резонатори можуть бути використані для розробки високоточних систем орієнтації та навігації, що здатні конкурувати з оптичними гіроскопами (КЛГ та ВОГ) за точністю, маючи переваги в ціні та надійності.

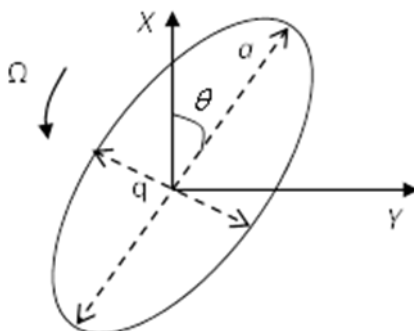
Інтегруючий режим ТВГ

В інтегруючому режимі роботи гіроскопа сила Коріоліса, що викликана його обертанням, не компенсується і це призводить до суперпозиції первинної моди, що збуджується, та вторинної (коріолісової) моди коливань, і, як наслідок, до обертання стоячої хвилі, тобто обертання множини його пучностей і вузлів по окружній координаті θ як твердого тіла.

Кут θ повороту хвилі (рис. 17) пропорційний куту повороту гіроскопа відносно інерційного простору. Коефіцієнт пропорційності між цими двома кутами повороту (стоячої хвилі та корпусу гіроскопа), який є масштабним коефіцієнтом інтегруючого ТВГ, називається коефіцієнтом Браяна k [1] або коефіцієнтом кутового посилення [13] і є безрозмірною величиною. Вихідний сигнал інтегруючого ТВГ визначається наступним виразом:

$$\theta(t) = -k\alpha(t); \quad \alpha(t) = \int_0^t \Omega(\tau) d\tau, \quad (1)$$

де $\theta(t)$ – кут повороту стоячої хвилі щодо корпусу ТВГ,
 $\alpha(t)$ – кут повороту ТВГ, щодо інерційного простору.

Рис. 17. Кут θ повороту хвилі відносно електроду збудження X

Блок-схема системи керування хвилею у інтегруючому режимі без використання кільцевого електроду представлена на рис. 18.

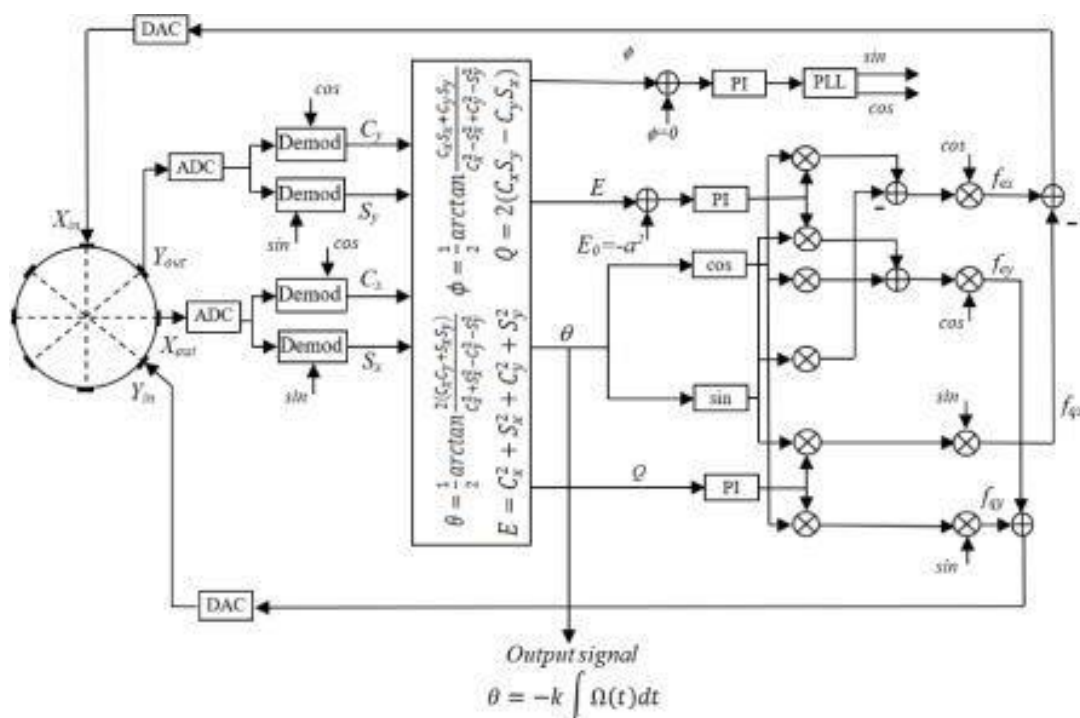


Рис. 18. Блок-схема системи керування інтегруючого ТВГ

Після демодуляції маємо повільні змінні C_x , S_x , C_y , S_y також як і ТВГ-ДКШ (рис. 14). Далі повільні змінні перетворюються на змінні маятника a , q , ϕ (фаза коливань) і θ (рис. 17) по співвідношенням [56] вказаним у прямокутнику на рис. 18.

Коли ТВГ працює в режимі інтегрування швидкості, залишкова (після процедури балансування) різночастотність $\Delta\omega$ та різнодобротність ΔQ призводить до зони нечутливості для малих кутових швидкостей через синхронізацію первинної та вторинної моди коливань (за аналогією із кільцевим лазерним гіроскопом). Поріг цієї зони нечутливості Ω_{np} визначається наступним виразом [57]:

$$\Omega_{np} \approx \frac{1}{2k} \left| \Delta \left(\frac{1}{\tau} \right) \right| + \frac{1}{k} \frac{q}{a} |\Delta\omega| \approx \frac{1}{2k} \frac{1}{\tau} \frac{\Delta Q}{Q} + \frac{1}{k} \frac{q}{a} |\Delta\omega|, \quad (2)$$

де $\Delta \left(\frac{1}{\tau} \right)$ є анізодемпфування, що пропорційна ΔQ , а τ – постійна часу.

Як правило, $\Delta\omega$ після процедури балансування наближається до нуля. Таким чином, поріг зони нечутливості, в основному, визначається першим доданком виразу (2), який пропорційний різнодобротності ΔQ . У високоякісних кварцових резонаторах різнодобротність балансується до такого ступеню, що Ω_{np} менше мінімальної кутової швидкості, що вимірюється гіроскопом. Для інших, більш дешевих гіроскопів, включаючи МЕМС та гіроскопи із металевими резонаторами, зона нечутливості після їх виготовлення залишається незмінною і визначає їх поріг чутливості до вимірювання кутової швидкості.

Одним із методів подолання зони нечутливості для дешевих гіроскопів є віртуальне примусове обертання хвилі шляхом подачі сигналів керування на електроди X_{in} та Y_{in} [58].

На рис. 19 показані результати вимірювання кута повороту ТВГ з металевим резонатором, виготовленим на підприємстві АТ «Елміз», що працює в інтегруючому режимі під дією постійної кутової швидкості. Так як даний резонатор був збалансований за різночастотністю, але небалансованим за різнодобротністю, зона його нечутливості склала більше 10 град/с. Щоб виміряти кут повороту при кутовій швидкості $\Omega_{реал} = 10$ град/с була додано віртуальну кутову швидкість, що дорівнює $\Omega_{вирт} = 803,57$ град/с. Таким чином, сумарна кутова швидкість нює $\Omega_{реал} + \Omega_{вирт} = 813,57$ град/с.

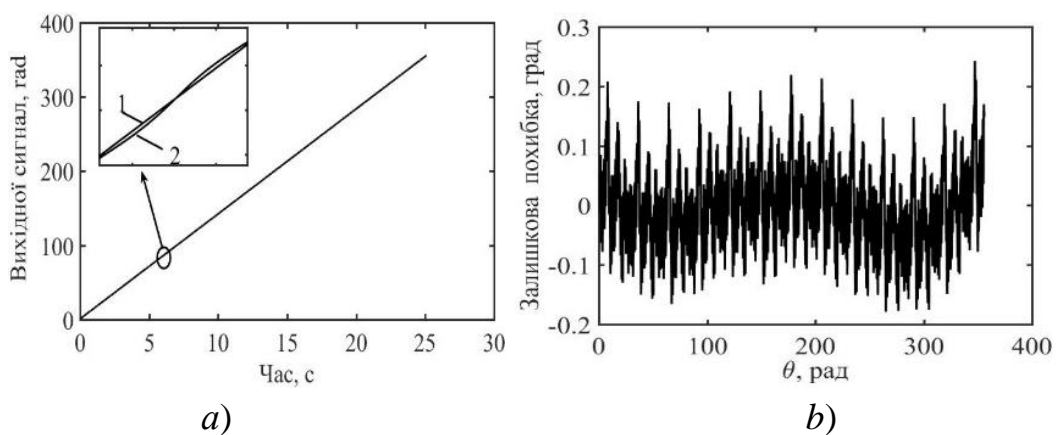


Рис. 19. Вимірювання кута повороту небалансованим резонатором

На рис. 19, а пряма 1 представляє істинний кут повороту, а крива 2 є вихідним сигналом інтегруючого гіроскопа із похибкою вимірювання, що залежить від кута хвилі θ . Це є періодичний дрейф ТВГ через різнодобротність. Періодичний дрейф можна коректувати [59, 60]. На рис. 19, б пока-

зана залишкова похибка після коректування за кутом хвилі θ . СКВ цієї похибки дорівнює $\sigma_a = 0.068^\circ$ у разі вимірювання кута близько 250° .

Періодичний дрейф інтегруючого ТВГ коректується також і по температурі [57].

Інтегруючий ТВГ має переваги перед ТВГ-ДКШ у разі виміру великих і надвеликих кутових швидкостей та кутів повороту, а також має значно більш високу смугу пропускання [61].

Диференціальний режим ТВГ

У диференціальному режимі роботи ТВГ стояча хвиля розташовується між електродами, як зображено на рис. 20 так, що кутове положення хвилі $\theta \neq \pi m/4$, $m=0, 1, \dots, 7$, тобто не співпадає із жодним з електродів. Система керування ТВГ в цьому режимі роботи призначена для утримання стоячої хвилі у будь-якому попередньо визначеному кутовому положенні по окружному куту θ , яке не збігається із жодним з електродів.

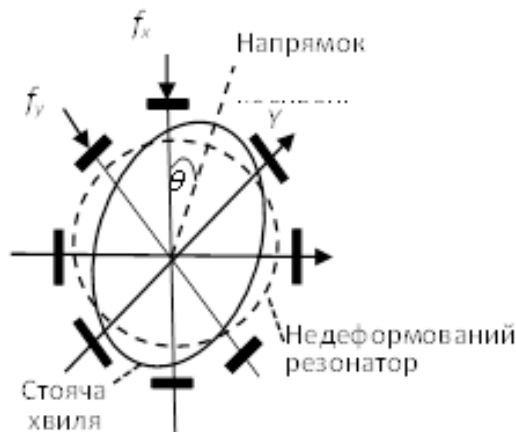


Рис. 20. Положення стоячої хвилі у диференційному ТВГ

У зазначеному вище випадку, у гіроскопі формуються два вимірювальних канали, які вимірюють кутові швидкості із протилежними знаками Ω_1 і $-\Omega_2$. У диференціальному режимі роботи рівняння вимірювання записуються так [27]:

$$\begin{aligned} z_x &= -2k\Omega D_y \sin 2\theta + d_{xx} D_x \cos 2\theta + d_{xy} D_y \sin 2\theta ; \\ z_y &= 2k\Omega D_x \cos 2\theta + d_{yy} D_y \sin 2\theta + d_{yx} D_x \cos 2\theta , \end{aligned} \quad (3)$$

де d_{xx} , d_{yy} , d_{xy} — коефіцієнти демпфування вздовж осей X , Y та коефіцієнт перехресного демпфування, відповідно, z_x , z_y — два сигнали каналу вимірювання X_{out} і Y_{out} у вольтах, відповідно, D_x , D_y — загальні коефіцієнти підсилення контуру, включаючи коефіцієнти перетворення деформацій у напруги електродами вимірювання X_{out} і Y_{out} , відповідно.

Із (3) випливає, що масштабні коефіцієнти каналів X і Y , SF_x і SF_y і зміщення нуля B_x і B_y представляються наступним чином:

$$\begin{aligned}
 SF_x &= 2kD_y \sin 2\theta; & SF_y &= 2kD_x \cos 2\theta; \\
 B_x &= D_x d_{xx} \cos 2\theta + d_{xy} D_y \sin 2\theta; \\
 B_y &= D_y d_{yy} \sin 2\theta + d_{xy} D_x \cos 2\theta.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

На рис. 21 представлена блок-схема системи керування хвилею диференційного ТВГ [23]. Перш за все, слід зазначити, що як масштабні коефіцієнти каналів, так і зміщення нуля періодично залежать від кутового положення стоячої хвилі θ . Це означає, що є кут θ^* , коли $SF_x(\theta^*) = SF_y(\theta^*)$, і є кут θ_0 , коли $B_x(\theta_0) = B_y(\theta_0)$.

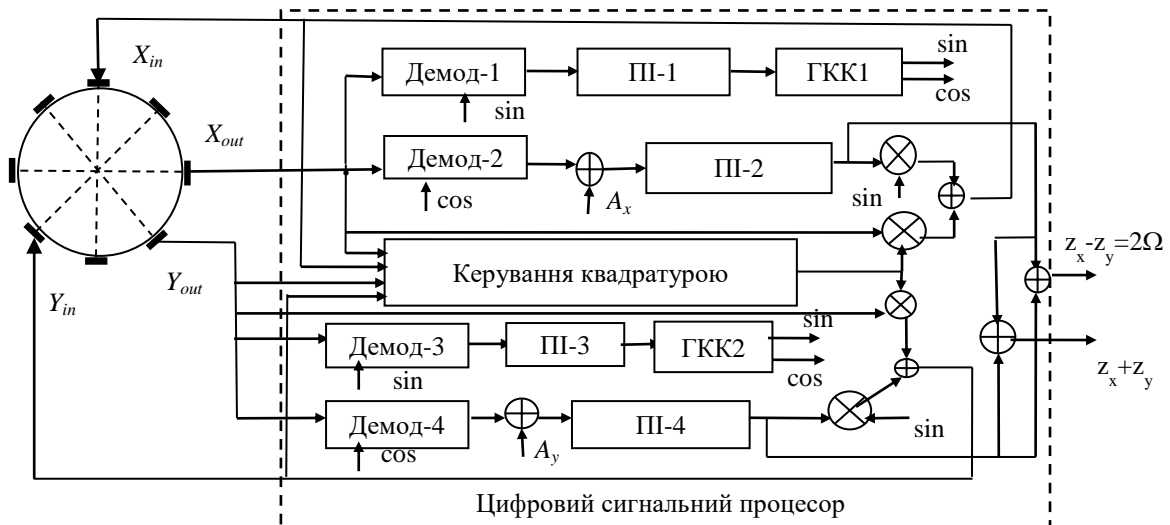


Рис. 21. Блок-схема системи керування хвилею диференційного ТВГ

Коли кут стоячої хвилі дорівнює θ^* , різниця, $z_y - z_x$, двох сигналів каналів вимірювання X і Y буде визначатися виразами:

$$z_y - z_x = SF_d(\theta^*) \left(\Omega + \frac{d_{yy} - d_{xx}}{4k} \right); \quad SF_d(\theta^*) = 4k \frac{D_x D_y}{\sqrt{D_x^2 + D_y^2}}, \tag{5}$$

де $SF_d(\theta^*)$ є масштабний коефіцієнт диференціального ТВГ, коли кут стоячої хвилі дорівнює θ^* .

На рис. 22 показані вихідні сигнали диференціального ТВГ, що вимірює постійні кутові швидкості $+40$ град/с і -40 град/с, коли $\theta = \theta^*$. Як бачимо з рис. 21, півсума сигналів не залежить від кутової швидкості, а піврізниця компенсує досить велике зміщення нуля.

Завдяки рівності масштабних коефіцієнтів двох вимірювальних каналів при $\theta = \theta^*$ зовнішні збурення, що діють на гіроскоп, які мають рівні знаки та амплітудні відклики, само-компенсуються у диференціальному каналі.

Системи та процеси керування

На рис. 23 представлені вихідні сигнали диференційного ТВГ під час удару 100 g [24]. Диференційний канал реагує на удар у 3 - 4 разів меншим сплеском чім усі інші канали.

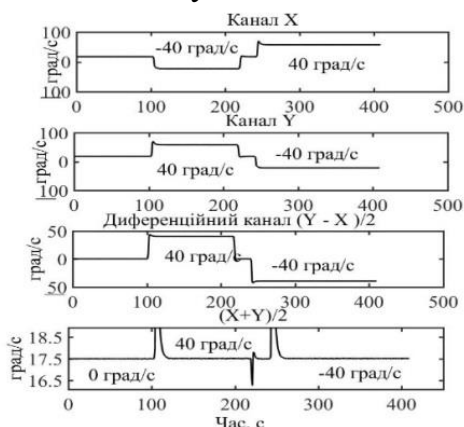


Рис. 22. Вихідні сигнали диференційного ТВГ

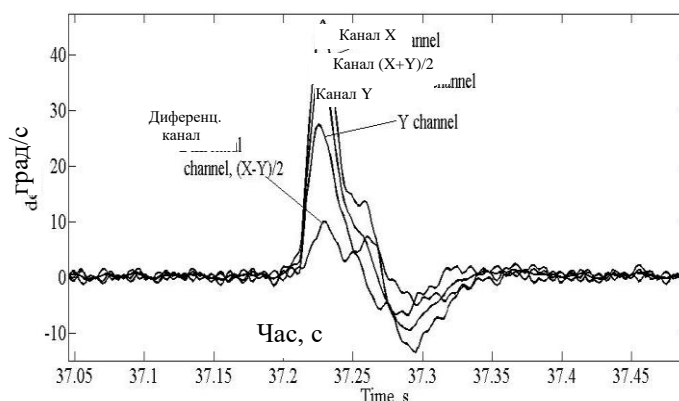


Рис. 23. Сигнали диференційного ТВГ у разі удару 100 g

На рис. 24 представлені результати впливу змінного магнітного поля на зміщення нуля ТВГ. Як бачимо, реагування вимірювальних каналів X та Y на дію магнітного поля практично однакові, тому диференційний канал є практично нечутливий до магнітного поля.

Оцінки показують, що коефіцієнт придушення цих збурень становить приблизно 25 [25].

На рис. 25 представлені відклики сигналів диференційного ТВГ на дію акустичних імпульсів на резонансній частоті. Мінімальний коефіцієнт придушення цих збурень оцінюється на рівні 65 [26], тобто 36 дБ, що дає кращий результат, ніж застосування сучасних звукоізоляційних матеріалів.

Таким чином, диференційний режим роботи ТВГ має переваги, перш за все, у протидії зовнішнім збуренням.

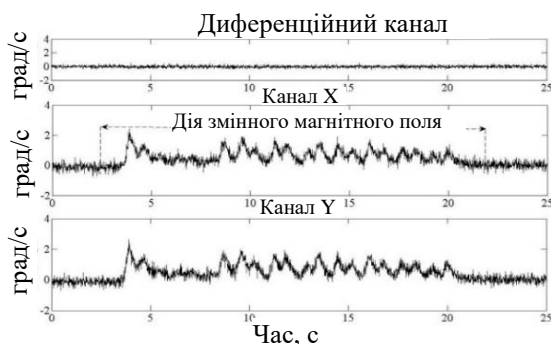


Рис. 24. Сигнали диференційного ТВГ у разі дії змінного магнітного поля

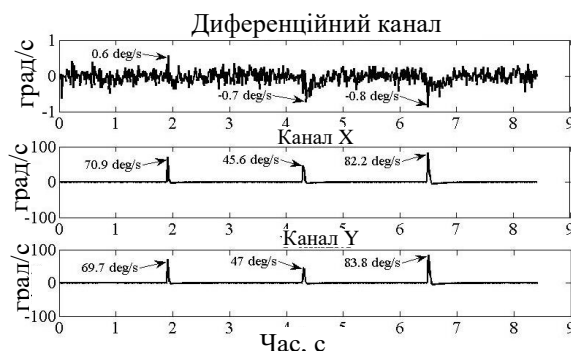


Рис. 25. Відклик диференційного ТВГ на звукові імпульси на резонансній частоті

Трьох-режимний ТВГ

Трьох-режимний ТВГ із автоматичним перемиканням з одного режиму в інший може бути реалізований для МЕМС і не-МЕМС ТВГ на основі модифікованого алгоритму, оснований на алгоритмі інтегруючого ТВГ, блок-схема якого представлена на рис. 26.

Ця блок-схема використовує перемикач 1 для перемикання з одного режиму в інший. Коли перемикач 1 знаходиться у положенні, показаному на рис. 25, а значення кута θ_{comm} фіксується на одному зі значень із набору $\theta_{comm}=m\pi/4$, $m=0, 1, 2, \dots$, він працює у режимі ДКШ [31]. Коли кут θ_{comm} фіксується на одному зі значень із набору $\theta_{comm} \neq m\pi/4$, він працює у диференціальному режимі, а коли перемикач 1 відкритий (пунктирна лінія на рис. 25), він працює в інтегруючому режимі.

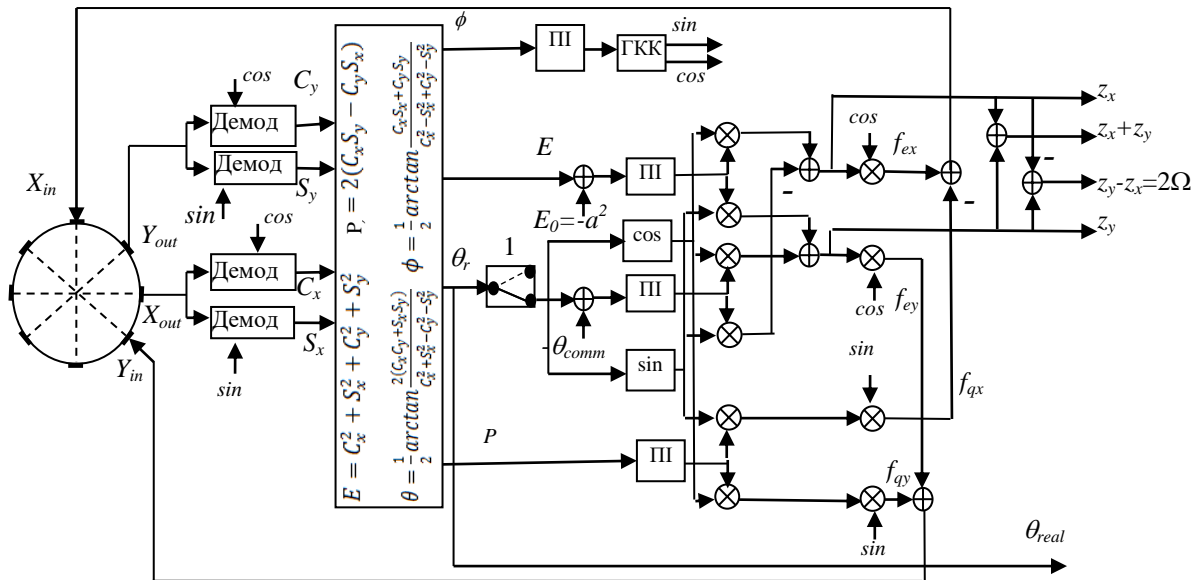


Рис. 26. Блок-схема системи керування трьох-режимного ТВГ

На рис. 27 показано моделювання роботи трьох-режимного ТВГ з автоматичним перемиканням з одного режиму на інший. Як бачимо, при переході від режиму ДКШ до інтегруючого режиму перехідний процес відсутній, а при переході з інтегруючого режиму до диференційного він досить незначний. Перехідний процес значно зменшується за рахунок плавного гальмування хвилі у потрібному положенні.

На даний час триває розробка трьох-режимного ТВГ та систем на його основі в АТ «Елміз».

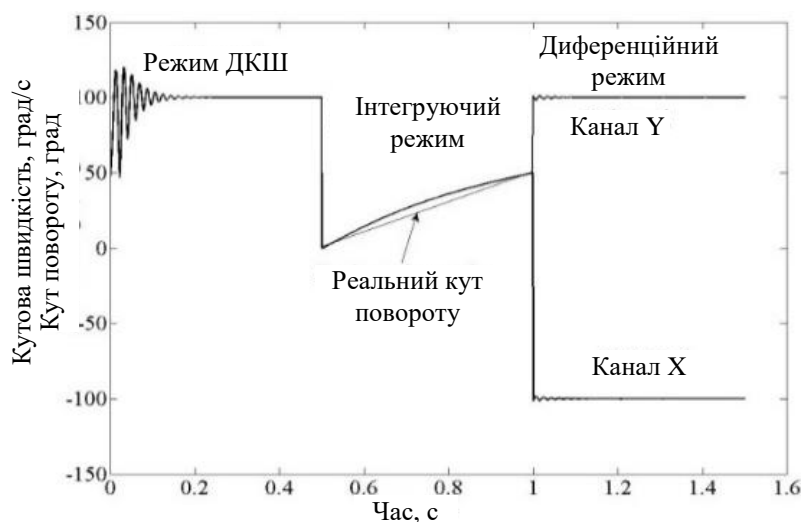


Рис. 27. Вихідні сигнал трьох-режимного ТВГ

Перспективи розвитку систем орієнтації та навігації на основі ТВГ в Україні

АТ «Елміз» на базі трьох-режимного ТВГ із металевими резонаторами різних діаметрів розробляє інерціальні вимірювальні модулі (ІВМ), які можуть вимірювати або тільки кутову швидкість, або кут, або мати обидва сигнали на виході. Такі ІВМ також можуть автоматично перетворюватися у трьох-режимні системи з адаптацією до змінних параметрів руху та умов навколишнього середовища (таких як зміна температури, удари, вібрації, постійні та змінні магнітні, електромагнітні та акустичні поля та імпульси) автоматично змінюючи режими роботи ТВГ. Системи будуть здатні забезпечувати найкращі точності у кожній з умов у поєднанні з СНС, або іншими альтернативними джерелами зовнішньої інформації або без них. При цьому розроблені ІВМ будуть мати перевагу відносно інших систем як українського так і зарубіжного виробництва у вартості, надійності та габаритно-масових характеристиках.

Інерціально вимірювальні модулі

Інерціально-вимірювальний модуль ІВМ-25Л

Призначенням ІВМ-25Л є застосування у складі навігаційних систем у якості автономного вимірювача кутових швидкостей та лінійних прискорень високодинамічних рухомих об'єктів [62]. Конструктивно ІВМ-25Л базується на трьох ТВГ-25 та тривісному МЕМС акселерометрі (виробництво *Analog Devices*), як показано на рис. 28.

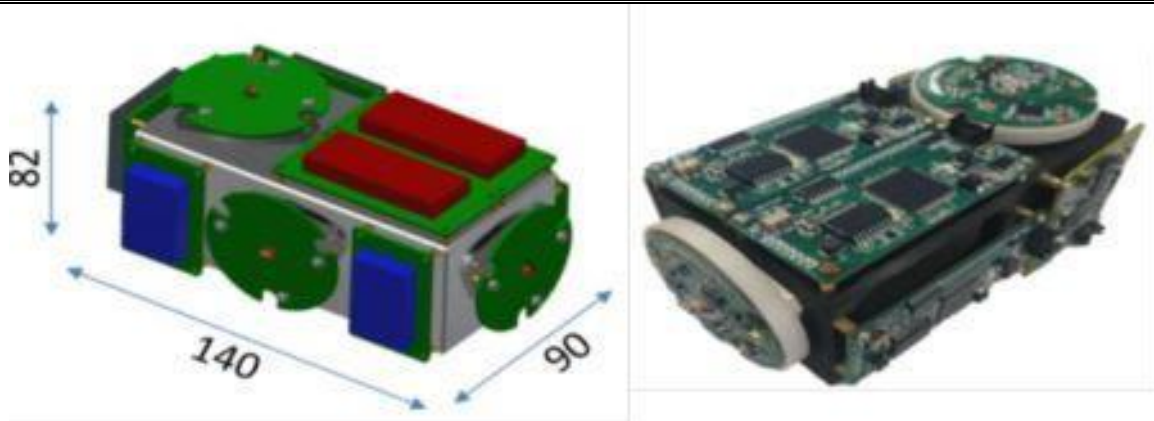


Рис. 28. Модель та макетний зразок ІВМ-25Л

Інерціально-вимірювальний модуль ІВМ-25М

Призначенням ІВМ-25М є застосування у складі навігаційних систем управління у якості вимірювача кутових швидкостей та лінійних прискорень для об'єктів із тривалими періодами автономної роботи [62] (рис. 29).

Конструктивно ІВМ-25М базується на трьох ТВГ-25 та трьох маятникових акселерометрах (виробництво Україна/Китай).

Інерціально-вимірювальний модуль ІВМ-43

ІВМ-43 є оптимальним для застосування у комплексованих навігаційних системах для вирішення навігаційних задач рухомих об'єктів із високою точністю [62] (рис. 30).



Рис. 29. Модель ІВМ-25М

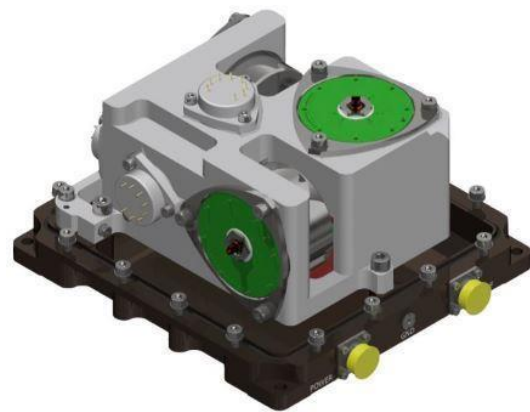


Рис. 30. Модель ІВМ-43

Висновки

Сучасний стан розвитку вібраційної гіроскопії в Україні знаходиться на рівні передових світових стандартів, а у деяких напрямках таких, як реалізація трьох-режимного ТВГ, навіть випереджає передові технологічні країни світу.

Високоточні ТВГ можливо реалізувати на резонаторах невисокої добротності за рахунок зростання ефективної віброуючої маси, що, звичайно,

приводить до зростання розмірів гіроскопа, однак, робить гіроскоп дешевим.

Значні перспективи розвитку високоточній вібраційної гіроскопії у світі очікуються за рахунок переходу на осесиметричні МЕМС резонатори, які являються оболонками тіл обертання. У цьому напрямку на даний час активно працюють передові гіроскопічні держави світу. Тому, в Україні негайно треба почати освоювати цей напрямок на державному рівні, щоб у майбутньому утримувати передовий рівень не тільки у гіроскопії, але й у акселерометрії та інших типах МЕМС датчиків.

У найближчій перспективі розвитку систем орієнтації та навігації в Україні пов'язані з розробкою інформаційних вимірювальних модулів на основі трьох-режимного ТВГ, що здатний забезпечить оптимальний режим роботи в залежності від параметрів руху та навколишнього середовища.

Список використаної літератури

1. Lynch D. D. Coriolis Vibratory Gyros, Symposium Gyro Technology 1998 Stuttgart, Germany.
2. Chikovani V. V., Sushchenko O. A., Azarskov V. M. et al. Errors Compensation of Ring-Type MEMS Gyroscopes Operating in Differential Mode.// 2020 IEEE XVIth International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH), Ukraine, Lviv 22-26 April, 2020, pp. 68-71, DOI: 10.1109/MEMSTECH49584.2020.9109455.
3. Chikovani V. V., Tsiruk H. V. Digital Rate MEMS Vibratory Gyroscope Modeling, Tuning and Simulation Results.– An International Journal of Computing Science and Applications (Computación y Sistemas), v. 21, No. 1, 2017, pp. 147- 159, doi: 10.13053/CyS-21-1-2497.
4. Збруцкий А. В., Кисленко С. П., Коржевин Д. А. Собственные колебания микромеханического гироскопа// Механика гироскопических систем, Киев, вып. 12, 1993, с. 86-92.
5. Збруцкий А. В., Кисленко С. П., Шахов С. А. Частотные характеристики динамически симметричного микромеханического вибрационного гироскопа// Механика гироскопических систем, Киев, вып. 12, 1993, с. 93-99.
6. IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros// IEEE std.1431TM, Annex A, pp. 53-55, Dec. 2004.
7. Cao H. L., Li H., Shao X. et al Sensing mode coupling analysis for dual-mass MEMS gyroscope and bandwidth expansion within wide-temperature range, Mech. Syst. Signal Process. 2018, 98, pp. 448–464.
8. Leger P. QuapasonTM – A new low-cost vibrating gyroscope, 3-d S. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems, 28-29 May 1996, Part 1, pp. 143-150.

9. *Beitia J., Caron J.-M., V. Paredes* Quapason: A Low Vibration Sensitivity Vibrating Rate Gyro// Int. Symp. on Inertial Components and Integrated Systems, 16-17 Sept., Karlsruhe, Germany, 2008.
10. *Rozelle D. M.* The hemispherical resonator gyro: From wineglass to the planets// 19th AAS AIAA Space Flight Mechanics Meeting, v. 134, 2013, pp. 1157–1178.
11. *Meyer D., Rozelle D. M., Trusov A. A., Sakaida D. K.* Milli-HRG inertial sensor assembly — A reality// IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), 23–26 April 2018, DOI: 10.1109/PLANS.2018.8373359.
12. *Xiao P. et al.* Influence of temperature variation on the vibrational characteristics of fused silica cylindrical resonators for Coriolis vibratory gyroscopes// Sensors 20, 1032, 2020. doi.org/10.3390/s20041032.
13. *Cho J. Y.* High-Performance Micromachined Vibratory Rate- And Rate- Integrating Gyroscopes// Ph. D. Dissertation, Michigan University, P. 293, 2012.
14. *Chikovani V. V.* Trends of Ukrainian all digital Coriolis vibratory gyroscopes development//IEEE Proc. Int. Conf. on Methods and Systems of Navigation and Motion Control, NAU, Kyiv, Ukraine, Oct.14–17, 2014, pp. 25-28.
15. *Chikovani V. V.* Fiber optic gyro versus Coriolis vibratory one. /Військово-технічний збірник. — Л.: Академія сухопутних військ ім. П. Сагайдачного, № 1 (10), 2014 р. стор. 78–82.
16. *Chikovani V. V., Okon I. M., Barabashov A. S., Tewksbury P.* A Set of High Accuracy Low Cost Metallic Resonator CVG. — IEEE/ION: PLANS, 5-7 May 2008, Monterey, CA, pp. 112–115.
17. *Trusov A. A., Prikhodko I. P., Rozelle D. M. et al.* “1 ppm Precision Self-Calibration of Scale Factor in MEMS Coriolis Vibratory Gyroscope”// Transducers 2013, Barcelona, Spain, 16–20 June 2013, pp. 2531–2534.
18. *Rozelle D. M.* Closed loop scale factor estimation// US patent 7,628,069, Dec. 9, 2009.
19. *Zbrutsky A. V., Minaev Yu. K.* The hemispherical resonator axis non-perpendicularity to fixing plane on wave solid-state gyro accuracy characteristics//Gyroscopy and Navigation, №1 (24), 1999, pp. 106–111.
20. *Zbrutsky A. V., Sarapuloff S. A., Lokot N. M.* Rotation Influence of upon Self-Excited Vibration of a Ring Resonator// USSR Higher Educ. Establ. Proc. ser. Instrument Building № 9, 1989, pp. 45–51.
21. *Pavlovskii M. A., Sarapuloff S. A., Klimenko S. P.* Dynamic Symmetry Condition of an Imperfect Hemispherical Shell under Free Edge Perturbations// Applied Mechanics, Kyiv, v. 25, № 9, 1989, pp. 102–108.
22. *Chikovani V. V., Umakhanov E. O., Marusyk P. I.* The compensated differential CVG// Gyro Technology, Symposium, 16–17 Sept. 2008, Karlsruhe, Germany, pp. 3.1–3.8.

23. Чиковані В. В. Спосіб виміру кутової швидкості коріолісовим вібраційним гіроскопом// Патент України № 95709 від 25.08.2011, опубл. 10.08.2011, бюл. № 15
24. Chikovani V. V., Sushchenko O. A., Tsiruk H. V. External Disturbances Rejection by Differential Single-Mass Vibratory Gyroscope// Acta Polytechnica Hungarica, 2017, vol. 14, #3, pp. 251–270.
25. Chikovani V., Sushchenko O. Self-Compensation for Disturbances in Differential Vibratory Gyroscope for Space Navigation// Hindawi, Int. J. of Aerospace Engineering, v. 2019, Article ID 5234061, 9 pages, <https://doi.org/10.1155/2019/5234061>.
26. Chikovani V. V., Tsiruk H. V. Effective Rejection of Acoustic and Magnetic Field's Disturbances by Single-Mass Differential Vibratory Gyroscope//Військово-Технічний Збірник, Національна академія сухопутних військ ім. П. Сагайдачного, Львів, № 16, 2017, стор. 31–37.
27. Chikovani V., Sushchenko O., Tsiruk H. Redundant Information Processing Techniques Comparison For Differential Vibratory Gyroscope// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 4/7 (82), 2016, pp. 45–52, DOI: 10.15587/1729-4061.2016.75206.
28. Chikovani V. V., Sushchenko O. A., Azarskov V. M. et al. Errors Compensation of Ring-Type MEMS Gyroscopes Operating in Differential Mode// 2020 IEEE XVIth Int. Conf. on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design, Ukraine, Lviv, 22–26 April 2020, pp. 68–71, DOI: 10.1109/MEMSTECH49584.2020.9109455
29. Tsukamoto T., Tanaka S. Fully-Differential Single Resonator FM/Whole Angle Gyroscope Using CW/CCW Mode Separator// J. of MEMS, v. 27, Issue 6, Dec. 2018, pp. 985 – 994. DOI: 10.1109/JMEMS.2018.2874060.
30. Lynch D. D., Matthews A. Dual Mode Hemispherical Resonator Gyro Operating Characteristics// 3-rd S. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems, part 1, pp. 37–44, May 1996.
31. Chikovani V., Tsiruk H., Korolova O. Triple-Mode Vibratory Gyroscope// Військово-Технічний Збірник, Національна академія сухопутних військ ім. П. Сагайдачного, Львів, № 18, 2018, pp. 18–24.
32. Jeanroy, A. Bouvet, G. Remillieux HRG and marine applications. – Gyroscopy and Navigation, v. 5, No. 2, 2014, pp. 67–74
33. Yatsenko Y. A., Petrenko S. F., Vovk V. V., Chikovani V. V. Technological aspects of Manufacturing of Compound Hemispherical Resonator for Small-Sized Vibratory Gyroscopes//Integrated Navigation Systems: 6-th int. conf., 27–29 May 1999.– SP: CRI “Electropribor”, pp. 71–76.
34. Yatsenko Yu. A., Chikovani V. V., Borisyuk L. V., Petrenko S. F. Development of Stemless Quartz Hemispherical Resonator for Vibratory Gyroscope// Gyro Technology: Symposium, 19–20 Sept. 2000, Germany: Stuttgart university, pp. 7.0–7.10.

35. *Pan Y., Wang D., Wang Y. et al.* Monolithic cylindrical fused silica resonators with high Q factors, *Sensors* 2016, 16, 1185; doi:10.3390/s16081185.
36. *Yatsenko Yu. A., Chikovani V. V., Kovalenko V. A.* Cylindrical sensing element for Coriolis vibratory gyroscope// Пат. України # 79166, G01C 19/56, Опубл. 15.12.2006, Бюл. № 7 стор. 7.
37. *Watson W. S.* Vibratory gyro skewed pick-off and driver geometry, IEEE/ION Symposium, Indian Wells, CA, 2010, pp. 171–179. <http://www.Innalabs.com>
38. *Вовк В. В.* Способ соединения элементов резонатора А.С. СССР, № 1577192, 12.04.91, G 01 C 25/00.
39. *Bodunov B. P., Lopatin V. M., Lunin B. S. et al.* Low cost hemispherical resonator for use in small commercial HRG-based navigation systems, 4-th Int. conf. on Integrated Navigation Systems, 26–28 May 1997, SP, CRI “Electropribor”, 1997, pp. 41–47.
40. *Бодунов Б. П., Лопатин В. М., Лунин Б. С.* Способ балансировки резонаторов волновых твердотельных гироскопов/ Патент РФ 2147117, 7G01C 19/56, RU, 1998.
41. *Basarab M. A., Lunin B. S., Matvee, V. A. et al.* Balancing of hemispherical resonator gyros by chemical etching. *Gyroscope Navig.* 6, 218–223 (2015). <https://doi.org/10.1134/S2075108715030025>.
42. *Jeanroy A. Bouvet G. Remillieux* HRG and marine applications. – *Gyroscope and Navigation*, v. 5, No. 2, 2014, p. 67–74.
43. *Матвеев В. А., Липатников В. И., Алехин А. В.* Проектирование волнового твердотельного гироскопа – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997, С. 168.
44. *Chikovani V. V., Yatsenko Yu. A., Kovalenko V. A. et al.* Stemless Hemispherical Resonator Gyroscope, US Patent #7281426, Int. cl. G01P 9/04, 16 Oct. 2007.
45. *Yatsenko Yu. A., Chikovani V. V., Borisyuk L. V.* Development of Stemless Quartz Hemispherical Resonator for Coriolis Vibratory Gyroscope, Symposium Gyro Technology, Stuttgart, Germany, September 19/20, 2000, pp. 7.0-7.10.
46. *Luo Y., Qu T., Cui Y. et al.* Cylindrical fused silica resonators driven by PZT thin film electrodes with q factor achieving 2.89 million after coating. – *Scientific Reports*, (2019) 9:9461, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45180-5>.
47. *Xiao P., Qiu Z., Luo Y. et al.* Influence of temperature variation on the vibrational characteristics of fused silica cylindrical resonators for Coriolis vibratory gyroscopes. – *Sensors* 2020, 20, 1032; doi:10.3390/s20041032.
48. *Langdon R.* The vibrating cylinder gyro. *The Marconi Review*, 46, p. 231-249, 1982 IN-IR-MPD-73-69 rev 1.1, date: 09/09/2013.
49. *Harris D. G.* START, a novel gyro for weapons guidance. DGON Symposium on Gyro Technology, 1988, Stuttgart, Germany.

50. *Petrenko O. V.* Design analysis and parameters choice of metallic cylindrical resonator sensor for Coriolis vibratory gyroscope /O. V. Petrenko // Electronics and Control Systems, NAU, Kyiv, №2 (40), 2014, pp. 87–91.
51. *Watson W. S., Henke T. J.* Coriolis Gyro Configuration Effects on Noise and Drift Performance// Symposium Gyro Technology, Stuttgart, Germany, 17–18 Sept. 2002, pp. 1.1–1.10.
52. *Rahman M., Mastrangelo C. H., Kim H.* 3-D hemispherical micro glass-shell resonator with integrated electrostatic excitation and capacitive detection transducers// Proc. of the IEEE Int. Conf. on MEMS, San Francisco, CA, USA, January 26 – 30, 2014, DOI: 10.1109/MEMSYS.2014.6765730.
53. *Ardakani M.* Development of 3D High-Q Fused Quartz Micro Structures for Precision Coriolis Vibratory Gyroscopes// Ph.D. Diss., Univ. of California, Irvine, 2019, P. 196. <https://escholarship.org/uc/item/83z1x9nq>.
54. *Andrei M.* Shkel Inertial MEMS Sensors are Becoming 3D and Atomically Precise, 9-th Int. conf. on Indoor Positioning and Indoor Navigation, Sept. 24-27, 2018, Nantes, France.
55. *Chikovani V. V., Petrenko O. V., Tsiruk H. V.* Precise vibratory gyroscope based on resonator made of elinvar alloy// Proc. of the sixth world congress “Aviation in the XXI-st century”, v. 2, Complex systems control, Kyiv, Ukraine, Sept. 23–25, 2014, pp. 3.5.34 – 3.5.38.
56. *Lynch D. D.* Vibratory Gyro Analysis by the Method of Averaging// II S. Petersburg Conf. on Integrated Navigation System, part I, May 24 - 25, 1995, p. 26 – 34.
57. *Prikhodko P., Zotov S. A., Trusov A. A., Shkel A. M.* 2012 Foucault pendulum on a chip: Rate integrating silicon MEMS gyroscope// Sensors and Actuators A: Physical, 177, 2012, pp. 67–78. doi:10.1016/j.sna.2012.01.029.
58. *Prikhodko P., Gregory J. A., Judy M. W.* Virtually rotated MEMS gyroscope with angle output, in IEEE 30–th Int. Conf. on (MEMS), Las Vegas, NV, USA, Jan 2017, p. 323–326.
59. *Askari S., Asadian M. H., Shkel A. M.* Retrospective Correction of Angular Gain by Virtual Carouseling in MEMS Gyroscopes// IEEE Int. Symp. on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL), 1–5 April 2019, Naples, FL, USA. DOI: 10.1109/ISISS.2019.8739340
60. *Chikovani V. V., Azarskov V. M., Golovach C. V.* Whole Angle Mode for Low Q-factor Vibratory Gyroscopes// The 9-th World Congress “Aviation in the XXI-st century”, Sept. 22–24, 2020, Kyiv, Ukraine.
61. *Jeanroy P., Featonby J-M.* Caron Low-Cost Miniature and Accurate Sensors for Tactical Applications// 10-th S. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems, May, 2003, pp. 286–293.
62. *Довгополий А. С., Головач С. В., Збруцький А. В.* та інші. Огляд стану гіроскопії в Україні. Світові тенденції. Роль гіроскопії у навігаційних системах вітчизняного ВПК// Аналітична записка, ЦНДІ ОБТ ЗСУ, Київ, 2021, С. 36.