

# ЦИФРОВИЙ ВІБРАЦІЙНИЙ ГІРОСКОП ДЛЯ СИСТЕМ СТАБІЛІЗАЦІЇ ТА НАВЕДЕННЯ

**Автори:** В.М. Азарсков, В.В. Чіковані, В.М. Гузєв, Г.В. Цірук, – НАУ НН ІАН, каф. СУЛА.

С.С. Шершнєв, А.В. Петренко – ПАТ «НВО Київський завод автоматики»

**Анотація:** Цифровий Вібраційний Гіроскоп (ЦВГ) - високотехнологічний сучасний прилад без деталей, що обертаються. Цей прилад, вимірює абсолютну кутову швидкість і кут повороту, а у складі систем стабілізації і наведення курсу, крен і тангаж рухомих об'єктів і платформ, на яких вони використовуються.

Основна відмінність технології ЦВГ від конкуруючих технологій, таких як волоконно-оптичні (ВОГ) і кільцеві лазерні (КЛГ), полягає в тому, що технічні рішення, розроблені в НАУ і запатентовані в Україні, дають можливість виготовляти дешеві резонатори з металевого сплаву із стабільною резонансною частотою і досить високою добротністю. Крім того, складання, налаштування електронних блоків, а також калібрування основних параметрів ЦВГ здійснюється з істотно меншими трудовими і фінансовими витратами, чим конкуруючі технології. При цьому, точність і експлуатаційні характеристики ЦВГ не поступаються, а надійність у багато разів перевищує відповідні показники в порівнянні з конкуруючими технологіями.

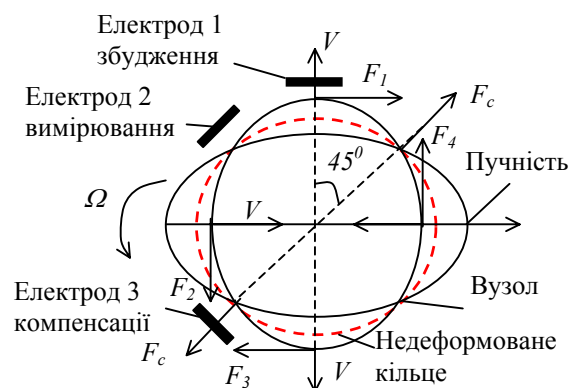
**Ключові слова:** Цифровий вібраційний гіроскоп, металевий резонатор, цифрова система управління.

**Ціль роботи:** Створення наукоємного високоточного та високонадійного цифрового гіроскопічного вимірювального приладу для систем стабілізації, орієнтації, курсових значення і наведення рухомих об'єктів широкого класу застосування.

## Короткий опис роботи:

Вібраційний гіроскоп є однією з хронологічно останніх сучасних гіроскопічних технологій існуючих нині на ринку. Міжнародний стандарт ІЕЕЕ 1431-2004 затвердив повну назву цього гіроскопа як Коріолісовий вібраційний гіроскоп (КВГ). Цифрову реалізацію КВГ ми назвали цифровий вібраційний гіроскоп (ЦВГ).

У резонаторі збуджується первинна пружна стояча хвиля електродом 1 (фіг1). На фіг.1 показана картина стоячої хвилі, що збуджена в кільцевому резонаторі на другій моді коливальності, яка характеризується 4-мя пучностями (максимум амплітуди



Фіг.1. До принципу роботи ЦВГ

коливань) і 4-мя вузлами (мінімум амплітуди коливань), розташованими по колу кільця через рівні кути 45 град.

При обертанні резонатора з кутовою швидкістю  $\Omega$  навколо осі перпендикулярної площині кільця виникають сили Коріоліса  $F_1, F_2, F_3, F_4$ , показані на фіг.1, які збуджують вторинну (коріолісову) хвилю у напрямі результуючої сили Коріоліса  $F_c$ . Результуюча сила Коріоліса пропорційна кутовій швидкості обертання  $\Omega$  і визначається виразом:

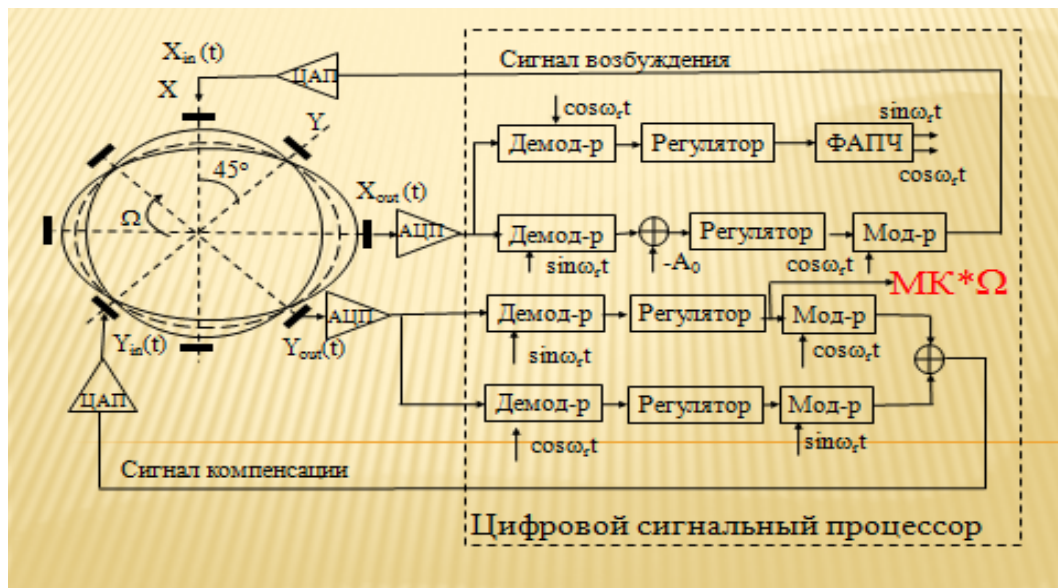
$$\vec{F}_c = 2m[\vec{\Omega} \times \vec{V}];$$

$$V = A_0 \omega_r \cos(\omega_r t); F_c = 2mA_0 \omega_r \Omega \cos(\omega_r t),$$

де  $A_0$  - амплітуда вібрацій на резонансній частоті  $\omega_r$ ,  $V$  - радіальна швидкість руху кільця в процесі вібрацій,  $m$  - ефективна віброуюча маса.

Амплітуда вібрацій вторинної хвилі, викликана результуючою силою Коріоліса, пропорційна вимірюваній кутовій швидкості  $\Omega$ . Цю амплітуду вимірюють електродом 2, розташованим на вузлу первинної хвилі і за допомогою блоку управління з негативним зворотним зв'язком синтезують компенсаційний сигнал, який пригнічує вторинну хвилю, шляхом подання компенсаційного сигналу на електрод 3. При цьому, амплітуда компенсаційного сигналу пропорційна вимірюваній кутовій швидкості  $\Omega$ .

### Блок схема системи управління ЦВГ



$X_{in}, Y_{in}$  - сигнали управління;  $X_{out}, Y_{out}$  - сигнали виміру; ФАПЧ - блок фазового автопідстроювання частоти;  $A_0$  - амплітуда коливань первинної хвилі; МК - масштабний коефіцієнт; АЦП - аналогово-цифровий перетворювач; ЦАП - цифро-аналоговий перетворювач.

### Отримані результати:

В результаті проведених робіт було розроблено та виготовлено на ПАТ «НВО Київський завод автоматики» партію дослідних зразків ЦВГ. Зовнішній вид ЦВГ та його компоненти показані на фото 1.



Фото 1

Були також розроблені варіанти трьохосних блоків, які показані на фото 2.

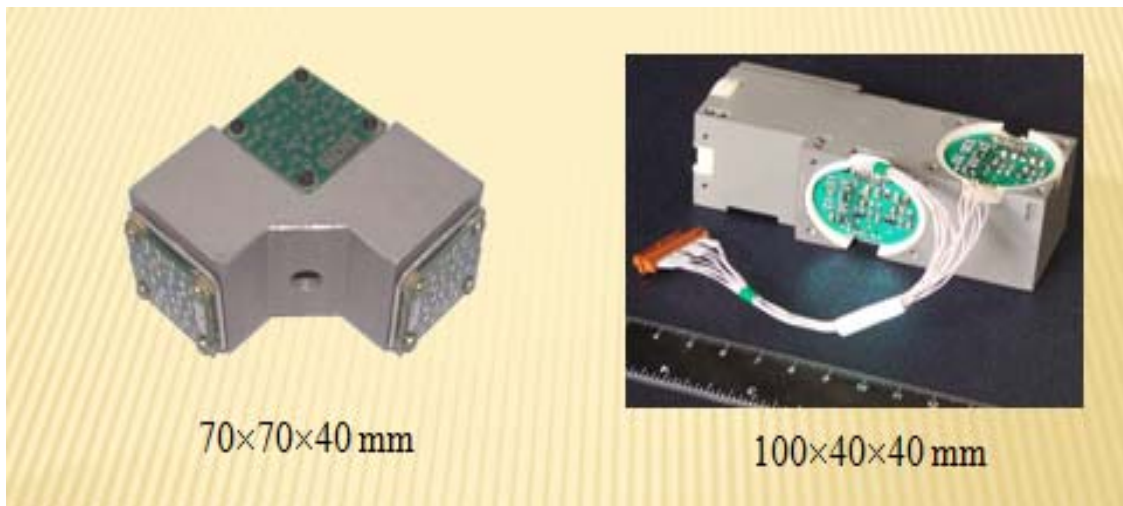


Фото 2

Були проведені розрахунки середнього часу напрацювання на відмову (СЧНВ) методом дії стрес чинників. Результати представлені у таблиці 1.

Таблиця 1

| Умови довілля по застосуваннях             | СЧНВ<br>Довірча ймовірність 99%<br>годин (років) | СЧНВ<br>Довірча ймовірність 99.9%<br>годин (років) |
|--|--|--|
| Наземні рухомі об'єкти, $\pi_E = 4.0$      | 408 042 (46)                                     | 271 929 (31)                                       |
| Морські об'єкти, приміщенні, $\pi_E = 4.0$ | 408 042 (46)                                     | 271 929 (31)                                       |

|  |                 |                 |
|--|-----------------|-----------------|
| Літаки з екіпажем, вантажем, винищувачі, $\pi_E = 5.0$ | 326 434 (37)    | 217 543 (24)    |
| Вертольоти, $\pi_E = 8.0$                              | 204 021 (23)    | 135 964 (15)    |
| Космічні об'єкти на орбіті, $\pi_E = 0.5$              | 3 264 340 (372) | 2 175 438 (248) |
| Ракети в польоті $M_F, \pi_E = 5.0$                    | 326 434(37)     | 217 543(24)     |
| Ракети, розгінний ділянку $M_U, \pi_E = 12.0$          | 136 014(15)     | 90 643(10)      |

Середні параметри ЦВГ представлені в таблиці 2  
Таблиця 2

| Параметри   | Розмірність  | Значення           |
|---|--|--------------------|
| Діапазон вимірювання                                | град/с   | $\pm 200, \pm 400$ |
| Смуга пропускання                                   | Гц   | 100                |
| Масштабний коефіцієнт (МК)                          | 1/(град/с)*  | 0.02-0.04          |
| <b>Нормальні умови (+25 °C)</b>                     |  |                    |
| Лінійність МК                                       | %  | $\leq 0.04$        |
| Повторюваність МК                                   | %  | $\leq 0.03$        |
| Повторюваність зміщення нуля                        | град/с   | $\leq 0.01$        |
| Стабільність зміщення нуля (1 $\sigma$ )            | град/с   | $\leq 0.003$       |
| Випадковий шум (1 $\sigma$ )                        | град/ $\sqrt{с}$   | 0.003              |
| <b>Температурний діапазон [-40 +75] °C</b>          |  |                    |
| Температурна чутливість зміщення нуля (1 $\sigma$ ) | град/с/°C  | 0.0003-0.003       |
| Температурна чутливість МК, (1 $\sigma$ )           | %/°C   | $\leq 0.003$       |
| <b>Умови експлуатації</b>                           |  |                    |
| Робочий температурний діапазон                      | град C   | -40 +75            |
| Температура зберігання                              | град C   | -50 +95            |
| Випадкова вібрація                                  | g СКО, 20...3000Гц   | $\geq 15$          |
| Удар  | g, 2 мс  | $\geq 400$         |
| Середня напрацювання на відмову (СНВ)               | г  | > 500 000          |
| <b>Фізичні параметри</b>                            |  |                    |
| Напруга живлення                                    | + В  | 15...30            |
| Потужність споживання                               | Вт   | <2.5               |
| Інтерфейс   |  | RS-485, RS-422     |
| Вихідної сигнал                                     | Середнє значення кутової швидкості і температури (6-байт, плаваюча кома) з частотою не більше 600 Гц.  |                    |
| Режим видачі вихідного сигналу                      | Безперервна видача через асинхронний інтерфейс з частотою до 600 Гц. Можливо більше 600 Гц за погодженням. Видача даних за запитом (синхронний режим) за погодженням |                    |
| Габарити  | мм   | 72x62x58;          |
| Маса  | гр   | 400                |
| * Вихідної код/МК = $\Omega$ град/с                 |  |                    |

## Перелік статей з тематики проекту:

1. V. Chikovani, O. Suschenko, H. Tsiрук Redundant Information Processing Techniques Comparison For Differential Vibratory Gyroscope.- Eastern-European Journal of Enterprise Technologies 4/7 (82), 2016, pp. 45-52.
2. С.П. Малярів, В.Г. Цірук, В.В. Чіковані, О.В. Петренко «Спосіб компенсації температурної погрішності масштабного коефіцієнту вібраційного гіроскопа».- Пат. України № 111408, МПК G01 С 19/56.- Опубл. 25.04.2016, бюл. № 8.
3. V.V. Chikovani “Fiber optic gyro versus Coriolis vibratory one”. - Військово-технічний збірник.-Л.: Академія сухопутних військ ім. П. Сагайдачного, №1 (10), 2014 р. стор.78-82.
4. В.М. Азарсков, В.В. Чіковані «Розробка методик корекції та паспортизації параметрів коріолісового вібраційного гіроскопа та дослідження режимів його роботи».- НДР № 796-Х13, НАУ, 2013 - 128 с.
5. V. V. Chikovani, G.V. Tsiрук “ Vibratory gyro accuracy parameters improving by means of excitation control ”.- Electronics and control systems, №3 (36), NAU, Kyiv, 2013, pp.43-48.
6. V. V. Chikovani “Influence of external shocks and internal noises on the resonant frequency tracking system in Coriolis vibratory gyroscope”.- Військово-технічний збірник.-Л.: Академія сухопутних військ ім. П. Сагайдачного, №1 (8), 2013 р. стор.96-101.
7. V. V. Chikovani “Influence of shock on the vibration amplitude stabilization system of Coriolis vibratory gyroscope resonator”.-Електроніка та системи управління, №4 (34), 2012р., стор.56-63.
8. В.М. Азарсков, В.В. Чіковані «Розробка та дослідження методів обробки інформації та реалізація блоків управління хвилею коріолісового вібраційного гіроскопа».- НДР № 795-Х12, НАУ, 2012 р., 93 С.
9. В.В. Чіковані, С.П. Малярів «Методика и расчет среднего времени наработки на от-каз по результатам испытаний коріолісового вибраціонного гіроскопа».- Військово –технічний збірник, Л.: Академія сухопутних військ ім.. П. Сагайдачного №2 (5), 2011, стор.119-124.
10. В.В. Чіковані «Спосіб виміру кутової швидкості коріолісовим вібраційним гіроскопом».- Пат. 95709 Україна, МПК G01 С 19/02.- Опубл. 25.08.2011, бюл. № 16/2011
11. В.М. Азарсков, В.В. Чіковані «Розробка вимог до обладнання та алгоритмів балансування резонатора коріолісового вібраційного гіроскопа».- НДР № 744-Х11, НАУ, 2011 р., 57 С.

## Апробація:

1. V.V. Chikovani “Low-Cost Multi-Functional Metallic Resonator Vibratory Gyroscope”.- Матеріали XII міжнародної науково-технічної конференції, АВІА-2015”. –К.: НАУ, 2015, pp.13.5-13.13.
2. В.В. Чіковані «Украинский вибраціонный гироскоп для систем стабилизации и ориентации».- Науково-техн. конф. Проблеми розвитку

- глобальної системи зв'язку, навігації, спостереження та організації повітряного руху», CNS/ATM, тези доповідей, Ки-їв, 17-19 листопада 2014, стор.148.
3. V.V. Chikovani "Trends of Ukrainian all digital Coriolis vibratory gyroscopes development".- IEEE Proc. Intern. Conf. on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), NAU, Kyiv, Ukraine, Oct.14-17, 2014, pp.25-28.
  4. V.V. Chikovani , H.V. Tsiрук "Differential CVG shock damping capacity. Computer simulation results".- IEEE Proc. Intern. Conf. on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), NAU, Kyiv, Ukraine, Oct.14-17, 2014, pp.132-134.
  5. V.V. Chikovani, O.V. Petrenko, H.V. Tsiрук "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 (3.5), Kyiv, Ukraine, Sept. 23-25, 2014, pp. 3.5.34- 3.5.38.
  6. В.В.Чиковани «Двухосный кориолисовый вибрационный гироскоп на одном чувствительном элементе».- 6-я міжнародна науково-практична конференція «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси», Київ, НАУ, 27-29 травня 2013 р., збірник тез, стор. 39-42.
  7. В.В.Чиковани «Высоконадежный вибрационный гироскоп с цифровым выходом».- IX міжнародна науково-технічна конференція «Гіротехнології, навігація, керування рухом і конструювання авіаційно-космічної техніки», Київ, НТУУ «КПІ», 17-18 квітня 2013 р., ч.1, стор. 324-331.
  8. V.V. Chikovani "Performance parameters comparison of ring laser, Coriolis vibratory and fiber-optic gyros based on Allan variance analysis".- IEEE 2-nd Int. Conf. Proc. "Actual problems of unmanned air vehicles development", Oct.15-17, NAU, Kyiv, Ukraine, 2013, pp. 153-156.
  9. V.V. Chikovani, Yu.A. Yatsenko "Investigation of azimuth accuracy measurement with metallic resonator Coriolis vibratory gyroscope".- Integrated Navigation Systems:17-th int. conf., 25-27 May 2010.- СПб: Изд-во ЦНИИ "Электроприбор", 2010.- С. 98-102.
  10. V.V. Chikovani "Reliability prediction of metallic resonator Coriolis vibratory gyroscope".- Methods and systems of navigation and motion control: I-st int. conf., 13-16 Oct., 2010.- К.: Вид-во Нац. авіац. ун-ту.- С.117-121.