

¹В.В. Чиковани, д.т.н., ¹В.П. Квастников, к.т.н., проф.,
²В.Г. Цирук, к.т.н., ²С.П. Маляров
²Ю.Н. Кохан

ВЫСОКОНАДЕЖНЫЙ ВИБРАЦИОННЫЙ ГИРОСКОП С ЦИФРОВЫМ ВЫХОДОМ

¹Национальный авиационный университет, e-mail:chikovani-valeriy@rambler.ru

²ВАТ КЗА им. Г.И. Петровского

В работе представлен цифровой вибрационный гироскоп, разработанный украинскими специалистами, надежность которого превышает в десятки раз надежность таких современных гироскопов как волоконно-оптический и кольцевой лазерный гироскопы. По соотношению цена/качество он не уступает лучшим образцам гироскопов, которые производятся странами с передовыми гироскопическими технологиями.

Ключевые слова: вибрационный гироскоп, нестабильность нуля, среднее время наработки на отказ

Ведение. В работе представлены результаты разработки Украинскими специалистами цифрового вибрационного гироскопа (ЦВГ). Представлены результаты испытаний ЦВГ по дрейфу (нестабильности) нуля при его оценке по методике Аллана, рекомендуемой международным стандартом IEEE [1] на кориолисовый вибрационный гироскоп, а также по методике осреднения результатов измерений за 100с и расчета СКО по осредненным данным, которой часто пользуются предприятия производители. Кратко описан принцип работы ЦВГ в режиме измерения угловой скорости. Приведены структурная схема системы обработки и управления упругой волной. Представлены фотографии составных элементов гироскопа и точностные характеристики ЦВГ. Результаты сравнительных испытаний ЦВГ с одним из самых высокоточных волоконно-оптических гироскопов производства компании ФИЗОПТИКА (Россия) показывают ряд преимуществ ЦВГ по сравнению с ВОГ. Представлены результаты оценки среднего времени наработки на отказ по данным испытаний [2]. Рассчитаны значения среднего времени наработки на отказ при работе гироскопа в нормальных условиях окружающей среды и в условиях эксплуатации, которые соответствуют наиболее распространенным воздушным, наземным, морским и космическим объектам. По полученным оценкам среднее время наработки на отказ ЦВГ при работе в нормальных условиях эксплуатации достигает 2 509 145 часов (285 лет), что значительно превышает аналогичный параметр для ВОГ и КЛГ.

Главное достижение этой разработки состоит в том, что на практике была показана возможность достижения высоких точностей на основе недорогого резонатора из металлического сплава, который способен успешно конкурировать с волоконно-оптическим (ВОГ) и кольцевым лазерным гироскопами (КЛГ) по цене, точности значительно превышая их по надежности.

Цель работы. Показать, что недорогой вибрационный гироскоп с металлическим резонатором относительно невысокой добротности может конкурировать по точности с ВОГ и КЛГ, значительно превышая их по надежности и технологичности.

Принцип работы. Работа гироскопа основана на инерционных свойствах упругих волн, генерируемых в резонаторе на звуковой частоте. Стоячая волна, возбуждаемая, в частности, в цилиндрическом резонаторе (мода возбуждения) на второй моде колебаний, характеризуется четырьмя пучностями и четырьмя узлами колебаний, расположенных по окружности обода через равные углы 45°. При вращении резонатора с угловой скоростью Ω , возникают силы Кориолиса F_1, F_2, F_3, F_4 (см. рис.1) [3], которые возбуждают вторичную (кориолисовую) моду колебаний резонатора в направлении результирующей F_c силы.

Результирующая сила Кориолиса $F_c = 2m [V \times \Omega]$, пропорциональна угловой скорости вращения,

где $V = A_o \omega_r \cos(\omega_r t)$, A_o - амплитуда вибрации цилиндра на резонансной частоте ω_r , V - линейная скорость радиального движения в процессе вибрации; m - эффективная вибрирующая масса.

Таким образом, амплитуда, генерируемых силой Кориолиса колебаний прямо пропорциональна входной угловой скорости Ω . Амплитуда кориолисовой моды измеряется с помощью электродов установленных на месте расположения узлов колебаний и с помощью схемы управления с обратной связью, демпфируется, путем подачи сигнала компенсации на другой из четырех узлов. При этом

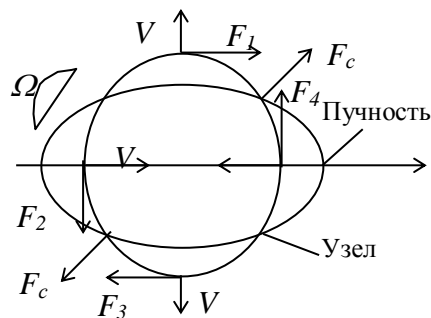
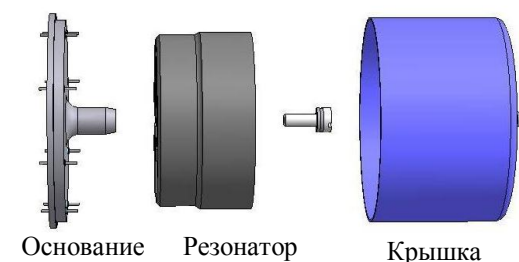


Рис. 1. К принципу работы КВГ

амплитуда сигнала компенсации пропорциональна измеряемой угловой скорости, Ω .

Конструкция ЦВГ. На рис. 2 показаны компоненты чувствительного элемента (ЧЭ) ЦВГ. ЧЭ состоит всего из трех компонентов: основания, резонатора и крышки. Резонатор крепится на основание стандартным винтом. Из-за простоты конструкции ЧЭ и малого количества сборочных единиц его сборка технологична и пригодна к массовому производству. Единственный высокотехнологичный элемент это резонатор, который должен быть изготовлен с высокой точностью по круглости цилиндрического обода и минимальной его разнотолщинности. Требуемая точность изготовления может быть реализована на современных токарных станках с ЧПУ.



Основание Резонатор Крышка
Рис. 2. Компоненты чувствительного элемента

Восемь пьезоэлектродов приклеиваются через 45° к нижней более тонкой части цилиндра. Такая конструкция позволила переложить требования высокой точности изготовления только на обод цилиндра. Под крышкой создается давление порядка 10^{-4} атм. ЧЭ с резонатором диаметром 25 мм, габариты которого $\varnothing 40 \times h 27$ мм и вес 80 гр., представлен на рис.3.

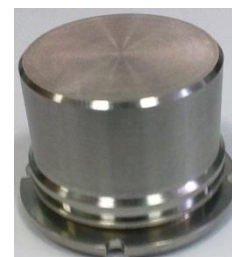


Рис. 3. ЧЭ ЦВГ

Система управления волной. Структурная схема системы управления волной ЦВГ показана на рис.4. Диаметрально противоположные электроды (1-5; 2-6; 3-7; 4-8) соединены между собой. В результате ЧЭ имеет два выходных сигнала (X_{in} , Y_{in}) и два входных сигнала (X_{out} , Y_{out}) (см. рис.4). Это означает, что резонатор можно рассматривать как объект управления с двумя входами и двумя выходами. Возбуждение колебаний резонатора обеспечивается за счет подачи периодического сигнала на электроды (1-5) на резонансной частоте. Отклик на возбуждение снимается с электродов (2-6) и используется для поддержки колебаний и слежения за частотой. Амплитуда моды Кориолиса воспринимается пьезоэлектрическим электродом (3-7), который установлен на узловой точке волны возбуждения и, с помощью обратной связи подавляется подачей противофазного сигнала на узел (4-8). Таким образом, амплитуда сигнала обратной связи, которая компенсирует вибрацию узлов, пропорциональна угловой скорости Ω .

Алгоритм управления и обработки информации реализован на процессоре Sharp компании Analog Devices. На рис.5 [4] показаны платы обеспечивающие работу ЦВГ размером 45×45 мм и общим весом 30 гр.

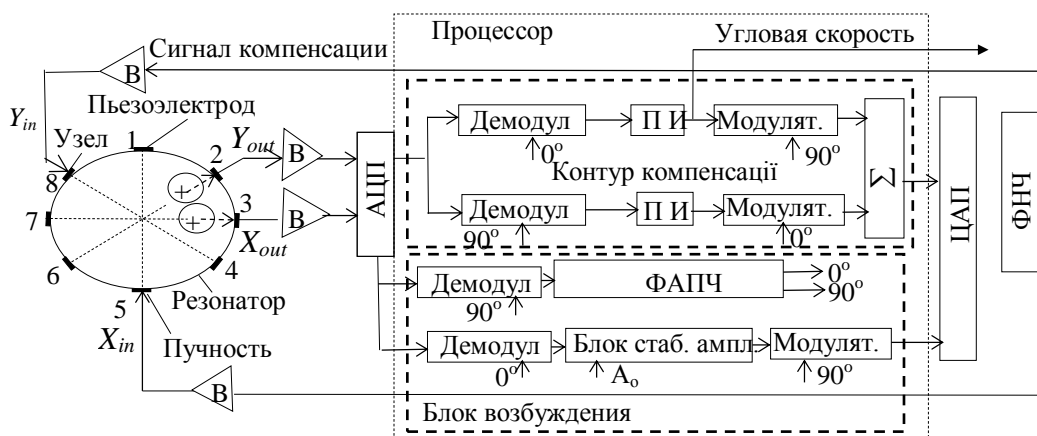


Рис.4. Блок схема системы управления ЦВГ.



Буферная плата



Плата цифрового управления



Плата питания

Рис.5. Электронные платы ЦВГ

Точностные характеристики ЦВГ. На рис. 6 представлен выходной сигнал ЦВГ и расчет

стабільності нуля (дрейф) при температурі $+50^{\circ}\text{C}$. Як видно з представлених даних, стабільність нуля ЦКВГ з діаметром резонатора 25 мм равна 0.014 град/ч при часі усереднення 100 с, а випадкова складова, визначається по кривій варіації Аллана, равна 0.0025 град/ $\sqrt{\text{ч}}$. При цьому мінімум кривої Аллана равен 0.01 град/ч.

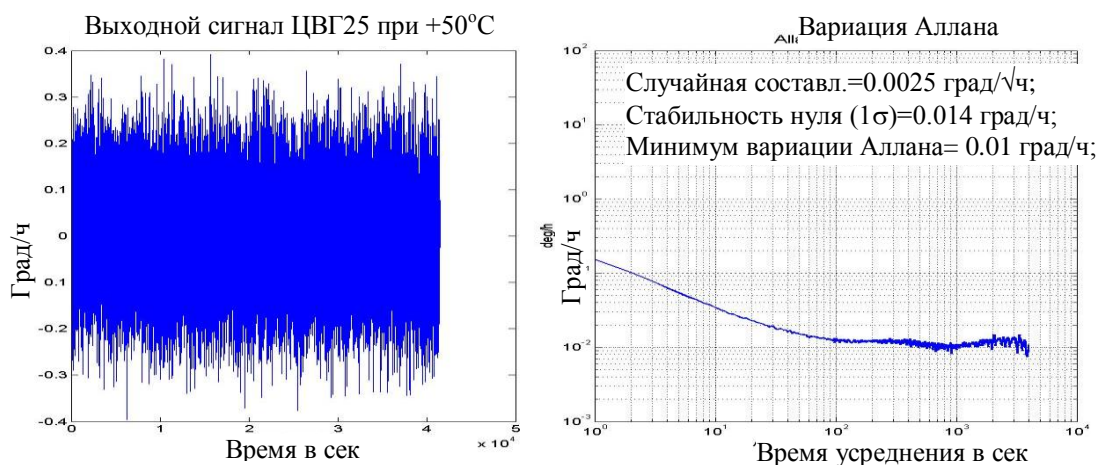


Рис.6. Стабільність нуля ЦКВГ-25 при температурі $+50^{\circ}\text{C}$

Для ЦВГ діаметром резонатора 43 мм, ЧЭ которого представлено на рис.7 з габаритами $\varnothing 58 \times h 33$ мм і вагою 165 гр., має стабільність нуля (дрейф) 0.0077 град/ч, а випадкову складову 0.00075 град/ $\sqrt{\text{ч}}$ см. рис. 8). Для порівняння результатів випробувань стабільності нуля ЦВГ з аналогічним параметром одного з найточніших ВОГ виробництва компанії «Фізоптика» (Росія), габарити якого $\varnothing 150 \times h 25$ мм, вага 850 гр, на рис.9 представлені результати випробування ВГ-951D стабільності нуля при $+50^{\circ}\text{C}$. Розрахунки показали, що в однакових умовах з ЦВГ стабільність нуля ВГ-951D равна 0.014 град/ч, випадкова складова равна 0.015 град/ $\sqrt{\text{ч}}$, а нестабільність нуля, розрахована по мінімуму кривої варіації Аллана равна 0.06 град/ч.



Рис.7. ЧЭ ЦВГ діаметром резонатора 43 мм.

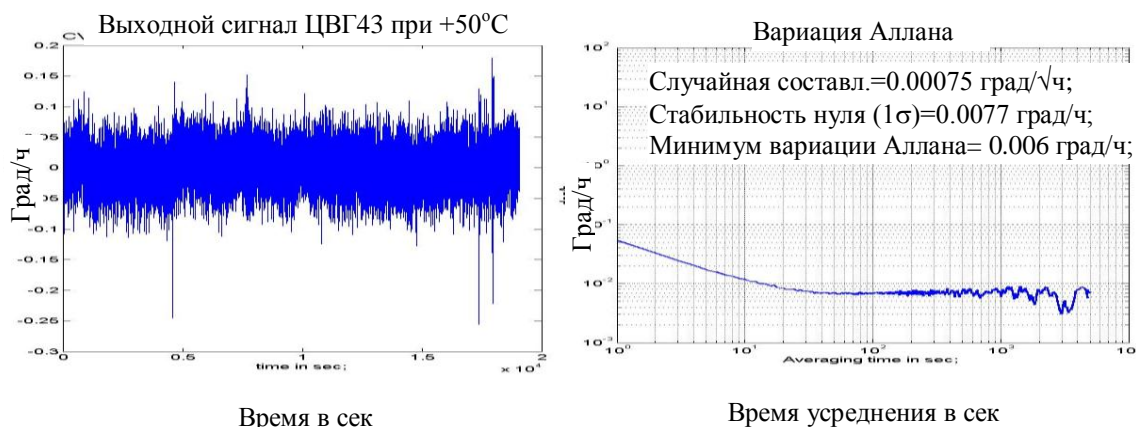


Рис.8. Стабільність нуля ЦВГ43 при температурі $+50^{\circ}\text{C}$

Таким чином, нестабільність нуля ВОГ ВГ-951D приблизно равна нестабільності нуля ЦВГ25 і значно поступає ЦВГ43. Випадкова складова ВОГ ВГ-951D майже на порядок більше, ніж у ЦВГ25 і майже на 2 порядки більше, ніж у ЦВГ43. Порівняння по другим параметрам можна провести по даним таблиці 1.

Надійшливість ЦВГ. Метод впливу стрес факторів дозволяє отримати оцінку надійності пристрою в комплексі, включаючи всі його компоненти і з'єднання, по даним випробувань пристрою в «утяжелених» умовах зовнішніх впливів (стрес факторів). Даний метод може застосовуватися при серійному виробництві пристрою, не порушуючи виробничий процес.

Оцінка надійності вироблялась по даним випробувань достатньо великої кількості (около 40 шт.) ЦВГ25, але так як ЦВГ43 відрізняється від ЦВГ25 тільки розмірами (використовувані матеріали, технології виготовлення компонентів і др. однакові), то отриману оцінку можна в

равной мере отнести и к ЦВГ43. Методика расчета интенсивности отказов основана на расчетах коэффициентов ускоренной деградации, с использованием моделей Аррениуса, Коффина-Менсона и Холберга-Пека [6]. Результаты расчетов среднего времени наработки на отказ представлены в таблице 2.

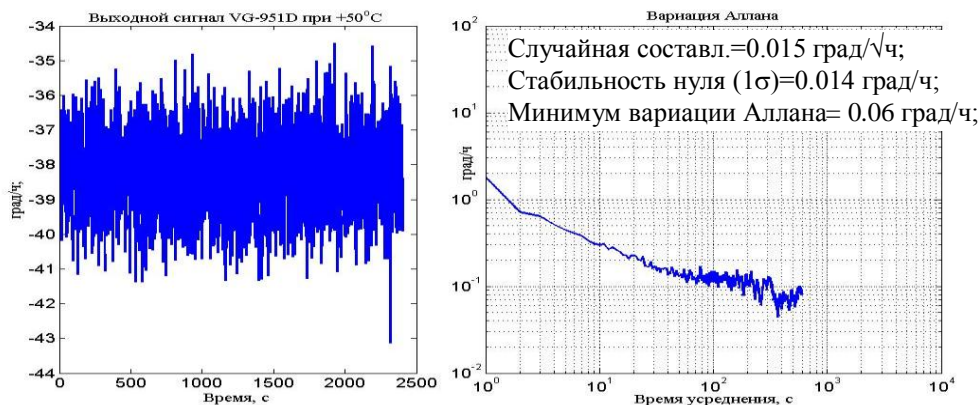


Рис.9. Стабильность нуля ВОГ ВГ-951D при температуре +50°C

Таблица 1.

Сравнительная таблица параметров ВОГ и ЦВГ

Наименование параметра	ВГ-951D	ЦВГ43	ЦВГ25
Диапазон угловых скоростей, град/с	±80	±200	±400
Нестабильность масштабного коэффициента, %	0.1	0.03	0.05
Диапазон рабочих температур, °C	-30 +70	-40 +75	-40 +75
Полоса частот, Гц	400	100	100
Ударопрочность, g	40, 1 мс	100, 2 мс	400, 2 мс
Вибропрочность, амплитуда (СКО) g, частота, Гц	2, 20-500	10, 20-2000	15, 10-3000

Таблица 2

Среднее время наработки на отказ при работе ЦВГ на различных объектах

Условия окружающей среды по применениям	СВНО Доврит. вероятн. 95% часов (лет)	СВНО Доврит. вероятн. 99% часов (лет)	СВНО Доврит. вероятн. 99.9% часов (лет)
Наземные неподвижные объекты, контролируемые условия GB, $\pi_E = 1.0$	2 509 145 (286)	1 632 170 (186)	1 087 719 (124)
Наземные неподвижные объекты, неконтролируемые условия GF, $\pi_E = 2.0$	125 472 (143)	816 085 (93)	543 859 (62)
Наземные подвижные объекты Gm, $\pi_E = 4.0$	627 286 (71)	408 042 (46)	271 929 (31)
Морские объекты, в помещении NS, $\pi_E = 4.0$	627 286 (71)	408 042 (46)	271 929 (31)
Самолеты с экипажем, грузом, истребители, $\pi_E = 5.0$	501 829 (57)	326 434 (37)	217 543 (24)
Вертолеты, ARW, $\pi_E = 8.0$	313 643 (36)	204 021 (23)	135 964 (15)
Космические объекты на орбите ARW, $\pi_E = 0.5$	5 018 290 (572)	3 264 340 (372)	2 175 438 (248)

Заключение. Цифровой вибрационный гироскоп с металлическим резонатором является недорогим высокоточным прибором, созданным украинскими специалистами. Он способен успешно конкурировать с волоконно-оптическим (ВОГ) и кольцевым лазерным (КЛГ) гироскопами по цене и точности, в тоже время значительно превосходя их по надежности.

Литература:

1. "IEEE Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros".- IEEE std.1431TM-2004.-79p.
2. В.В. Чиковани, С.П. Маляров «Методика и расчет среднего времени наработки на отказ по результатам испытаний кориолисового вибрационного гироскопа».- Військово –технічний збірник. - Л.: Академія сухопутних військ ім. П. Сагайдачного.- №2 (5), 2011 р., стор.119-124.1.
3. Матвеев М.А., Лунин Б.С., Басараб М.А. «Навигационные системы на волновых твердотельных гироскопах».- М.: Физматлит, 2008, 240 с.
4. V.V. Chikovani, Yu.A. Yatsenko, V.A. Kovalenko, V.I. Scherban "Digitally Controlled High Accuracy Metallic Resonator CVG", Proc. Symposium Gyro Technology, ed. H. Sorg, Stuttgart University, Stuttgart, Germany, 19-20 September 2006, pp.4.0-4.7.
5. Scott Speaks "Reliability and MTBF Overview".- Vicor Reliability Engineering.