

▪ ИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ДАТЧИКИ ▪

ПРЕЦИЗИОННЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП С РАСШИРЕННЫМ ДИАПАЗОНОМ ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ

Ю.Н. Коркишко¹, В.А. Федоров², В.Е. Прилуцкий³, В.Г. Пономарев⁴, И.В. Морев⁵, Д.В. Обухович⁶,
С.В. Прилуцкий⁷, С.М. Кострицкий⁸, И.В. Федоров⁹, А.И. Зуев¹⁰, В.К. Варнаков¹¹

ООО НПК Оптилинк, 124489, Москва, Зеленоград, Сосновая аллея, д. 6А, стр. 2,
Тел: +7 495 6631760, Факс: +7 495 6631761, e-mail: opto@optolink.ru

Аннотация

Ключевые слова: волоконно-оптические гироскопы, динамический диапазон, стабильность масштабного коэффициента

В настоящее время волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) с замкнутым контуром обратной связи всё более широко применяются в системах инерциальной навигации. Одним из существенных ограничений применения ВОГ в навигации подвижных объектов является ограниченность диапазона измеряемых угловых скоростей. В данной работе представлены результаты разработки и исследования нового прецизионного волоконно-оптического гироскопа ОИУС-1001, созданного путем модификации серийного ВОГ ОИУС-1000, в котором снимаются указанные ограничения, так что динамический диапазон прибора расширен с 90 °/с до 550 °/с, и потенциально может быть расширен до 1000 °/с с сохранением высокой стабильности масштабного коэффициента во всем диапазоне измерения.

В настоящее время волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) с замкнутым контуром обратной связи всё более широко применяются в системах инерциальной навигации [1-2]. В ВОГ с замкнутым контуром механизм обратной связи сохраняет нулевой уровень сигнала путем компенсации фазового сдвига Саньяка дополнительным фазовым сдвигом. Величина этого дополнительного фазового сдвига позволяет получить информацию об угловой скорости вращения объекта.

Одним из существенных ограничений применения ВОГ в навигации подвижных объектов является ограниченность диапазона измеряемых угловых скоростей. Для серийно выпускаемого прецизионного ВОГ ОИУС-1000, класса точности 0.005 °/ч, с длиной волоконного контура 1000 м и диаметром 140 мм, диапазон измерения угловой скорости составляет 90 °/с. При этом, диапазон сохранения знака угловой скорости составляет 180 °/с. Для многих применений, где наряду с высокой точностью необходимо обеспечить измерение угловых скоростей порядка 300 °/с и более, назрела необходимость расширения динамического диапазона прибора ОИУС-1000.

В данной работе представлены результаты разработки и исследования нового волоконно-оптического гироскопа ОИУС-1001, созданного путем модификации серийного ВОГ ОИУС-1000, в котором снимаются указанные ограничения.

¹ Доктор физико-математических наук, профессор, генеральный директор.

² Доктор физико-математических наук, профессор, технический директор.

³ Директор Саратовского отделения.

⁴ Кандидат технических наук, ведущий конструктор, технический директор Саратовского отделения.

⁵ Ведущий инженер, руководитель группы.

⁶ Ведущий инженер.

⁷ Ведущий инженер.

⁸ Доктор физико-математических наук, доцент, технический директор Зеленоградского отделения.

⁹ Аспирант, инженер.

¹⁰ Директор Арзамасского отделения.

¹¹ Технический директор Арзамасского отделения.

Все ВОГ компании НПК «Оптолинк» изготавливаются в так называемой минимальной конфигурации, с цифровой обработкой сигналов (ЦОС). Минимальная конфигурация обеспечивает взаимность оптических путей для двух световых волн, распространяющихся навстречу друг другу в волоконном контуре.

Структурная схема одноосных ВОГ ОИУС-1000 с ЦОС, серийно выпускаемых компанией НПК «Оптолинк» представлена на рис 1. В состав одноосных ВОГ входят суперлюминесцентный источник света с центральной длиной волны излучения 1550 нм, фотоприемное устройство; волоконный разветвитель (1:1) для деления света, один кольцевой интерферометр, и блок электроники (блок цифровой обработки) [3-11].

Кольцевой интерферометр состоит из многофункционального интегрально-оптического элемента (МИОЭ) и из сохраняющего состояние поляризации света волоконного контура (ВК) длиной 1000 метров собственного производства. МИОЭ представляет собой интегрально-оптическую схему, сформированную на пластине кристалла ниобата лития методом протонного обмена [3].

Блок цифровой обработки (БЦО) формирует напряжения для получения пилообразной (ступенчатой) компенсирующей модуляции света для компенсации разности фаз Саньяка и для внесения постоянного фазового сдвига между встречными световыми волнами на $\pi/2$ рад с помощью вспомогательной модуляции (ВМ). Тем самым обеспечивается непрерывная работа каналов в режиме замкнутого контура [4-11].

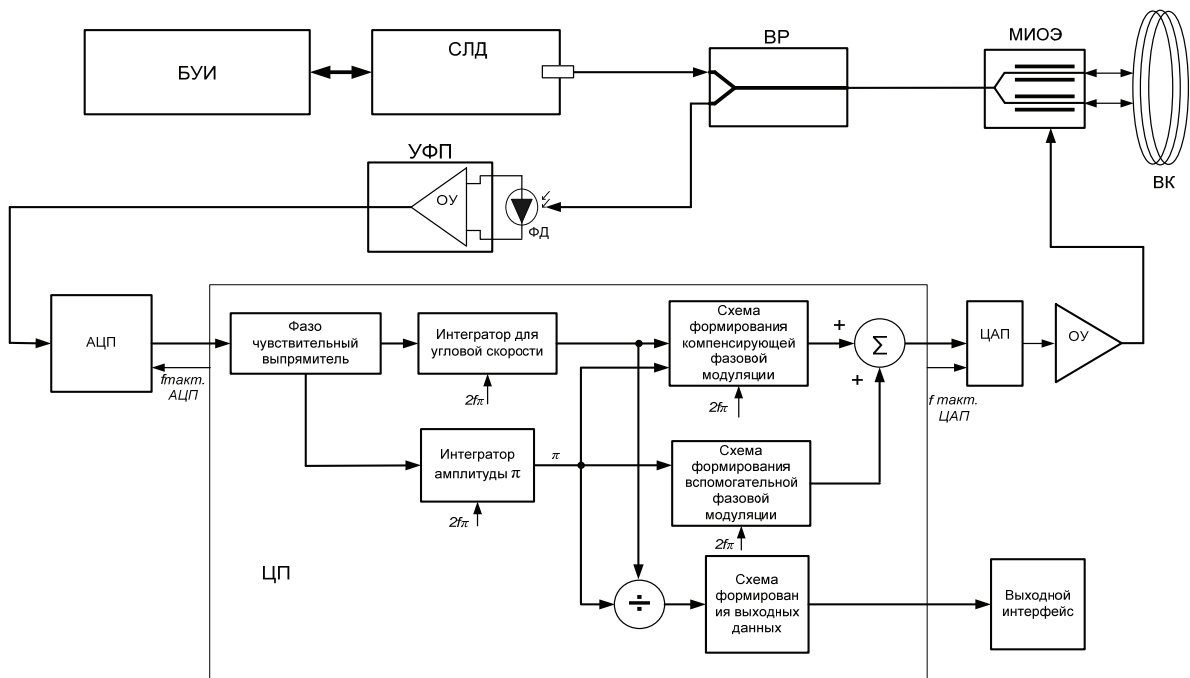


Рис. 1. Структурная схема ОИУС с цифровой обработкой сигнала:

СЛД - суперлюминесцентный диод, БУИ – блок управления излучателем, ВР – волоконный разветвитель, ВК – волоконный контур, МИОЭ – многофункциональный интегральный оптический элемент, УФП – устройство фотоприемное, АЦП - аналогово-цифровой преобразователь, ЦАП - цифро-аналоговый преобразователь, ОУ – операционный усилитель, ЦП - цифровой процессор

В новых разработанных ВОГ ОИУС-1001 также применена схема с замкнутым контуром обратной связи по угловой скорости. Выходная угловая скорость пропорциональна наклону приложенной компенсирующей фазовой модуляции, амплитуда которой поддерживается у значения 2π рад.

Известно, что зависимость интенсивности излучения на фотоприемнике от скорости вращения волоконного контура меняется по косинусному закону, число периодов которого может быть сколь угодно большим. Оказавшись в точке, соответствующей изменению фазы Саньяка 2π рад (включение ВОГ при действующей угловой скорости, создающей фазовый сдвиг около 2π рад), ВОГ измерит угловую скорость, соответствующую $\Omega_{\Delta\phi}$ рад, а не истинную $\Omega_{2\pi} + \Omega_{\Delta\phi}$ рад (рис. 2).

Значение угловой скорости $\Omega_{2\pi}$ определяется по значению фазовой амплитуды компенсирующей модуляции. Таким образом, для определения истинной угловой скорости остается определить номер полу-периода, в котором находится сдвиг фазы Саньяка.

На первом этапе была разработана схема обработки, позволяющая измерять угловую скорость до более $1000^\circ/\text{с}$ при условии включения ВОГ на угловых скоростях ниже $90^\circ/\text{с}$. Суть ее заключается в том, что схема автоматически сбрасывает интегратор, меняет знак на входе интегратора и добавляет на выходе значение угловой скорости Ω_{π} , при достижении значения угловой скорости, соответствующей фазовому сдвигу, кратному π рад.

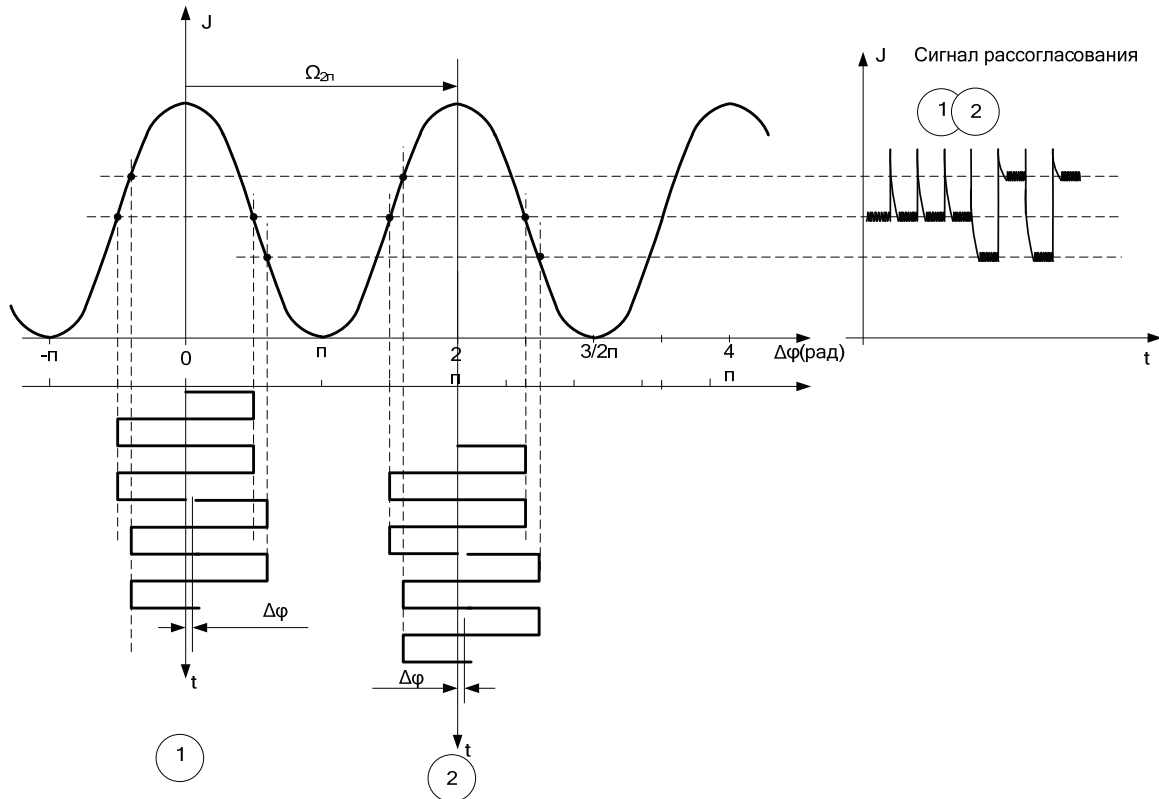


Рис. 2. Диаграмма формирования сигнала рассогласования интерферометра Саньяка

Схема цифровой обработки ВОГ для этого варианта представлена на рис. 3.

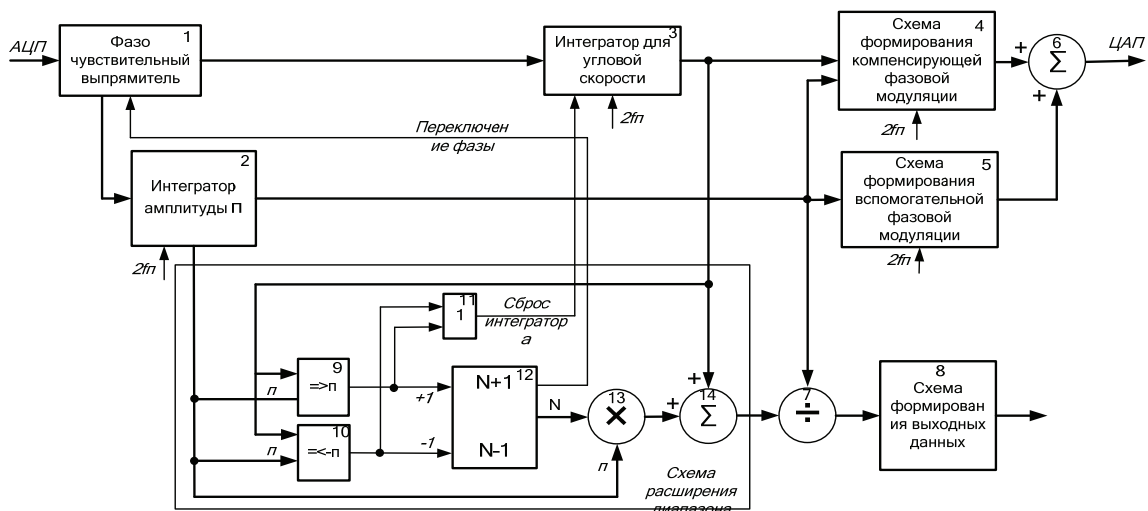


Рис. 3. Схема цифровой обработки ВОГ с расширенным диапазоном:

- 1 - фазочувствительный выпрямитель, 2 - интегратор амплитуды компенсирующей фазовой модуляции,
- 3 - интегратор угловой скорости, 4 - схема формирования компенсирующей фазовой модуляции, 5 - схема формирования вспомогательной фазовой модуляции, 6 - сумматор для формирования кода фазовой модуляции,
- 7 - делитель угловой скорости на код, соответствующий амплитуде компенсирующей фазовой модуляции, 8 - схема формирования выходных данных, 9, 10 - компаратор, 11 - схема «или», 12 - счетчик числа переходов через π , 13 - умножитель, 14 - сумматор

Описание работы схемы расширения диапазона

Код, пропорциональный действующей угловой скорости, с интегратора угловой скорости (3) поступает в схему расширения диапазона на компараторы (9), (10) и сумматор (14).

Пороги срабатывания для компараторов (9), (10) формируются из кода, полученного на интеграторе амплитуды компенсирующей фазовой модуляции (2). Код соответствует угловой скорости, создающей сдвиг фаз в интерферометре Саньяка, равный π рад.

Компаратор (9) предназначен для положительных значений действующей угловой скорости с интегратора угловой скорости (3); компаратор (10) - для отрицательных. При достижении значения угловой скорости, соответствующего сдвигу фаз, равному π рад и более, компаратор (9) вырабатывает сигнал увеличения на единицу счетчика числа переходов через π (12). При достижении значения угловой скорости, соответствующего сдвигу, равному $-\pi$ рад и менее, компаратор (10) вырабатывает сигнал уменьшения на единицу счетчика числа переходов через π (12).

Сигналы с компараторов (9), (10) поступают также на схему «или» (11), где формируется сигнал сброса интегратора угловой скорости (3). Счетчик числа переходов через π (12) формирует число N со знаком, соответствующее сумме срабатываний компараторов (9), (10). При нечетных значениях кода счетчика (12) вырабатывается сигнал переключения фазы фазочувствительного выпрямителя (1).

Число переходов через π поступает на множитель (13), где умножается на значение угловой скорости, соответствующей сдвигу фаз, равному π рад. Результат умножения прибавляется на сумматоре (14) к значению угловой скорости с интегратора угловой скорости (3). Результат с сумматора поступает на делитель (7) для коррекции на амплитуду π .

Испытание ВОГ ОИУС-1000 с такой схемой обработки показало сохранение линейности и стабильности масштабного коэффициента до значений угловых скоростей $\pm 1000^\circ/\text{с}$ и надежность переключения пределов измерения.

Результаты тестирования разработанного ВОГ ОИУС-1001 с расширенным динамическим диапазоном представлены на рис. 4-6. Выходной сигнал ОИУС-1001 при тестировании ВОГ в одном запуске при ступенчатом изменении скорости вращения в диапазоне $10\text{--}540^\circ/\text{с}$ показан на рис. 4. Результаты обработки подобных записей для двух из изготовленных и протестированных приборов ОИУС-1001 представлены на рис. 5. Они подтверждают высокую стабильность масштабного коэффициента (погрешность масштабного коэффициента меньше 50 ppm) во всем расширенном диапазоне измерения скоростей вращения (до $550^\circ/\text{с}$).

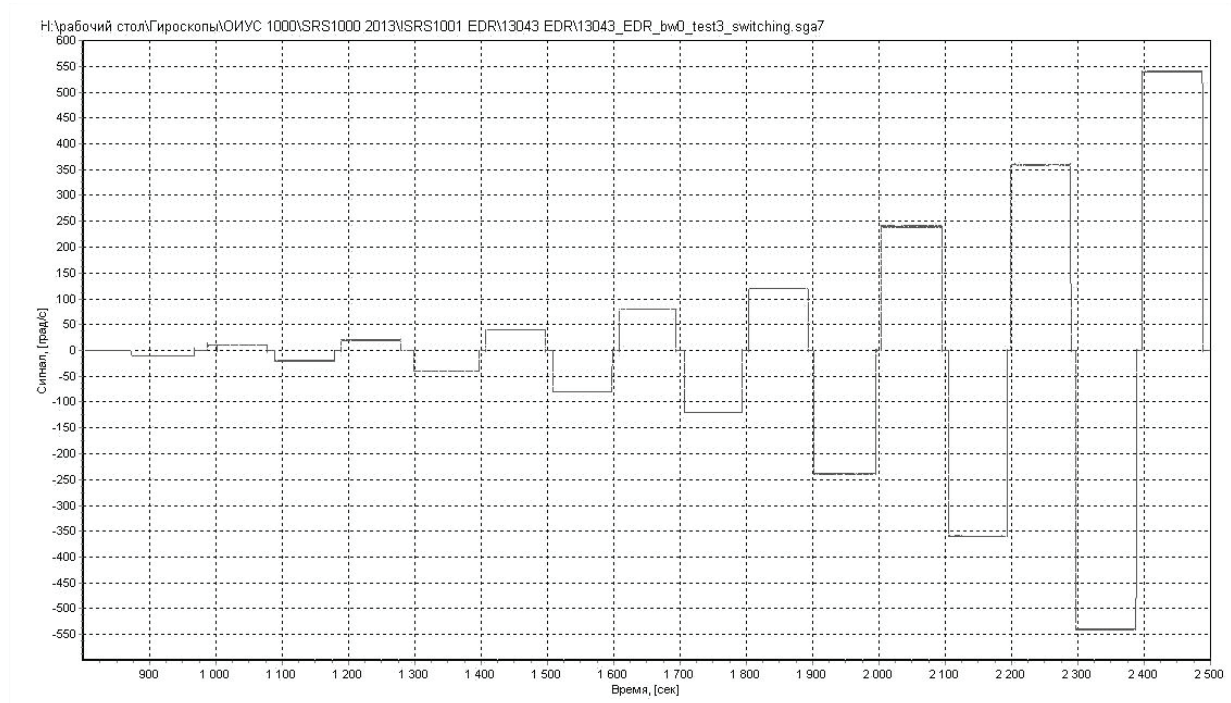


Рис. 4. Выходной сигнал ОИУС-1001 при тестировании в одном запуске при ступенчатом изменении скорости вращения в диапазоне $\pm 10\text{--}\pm 540^\circ/\text{с}$

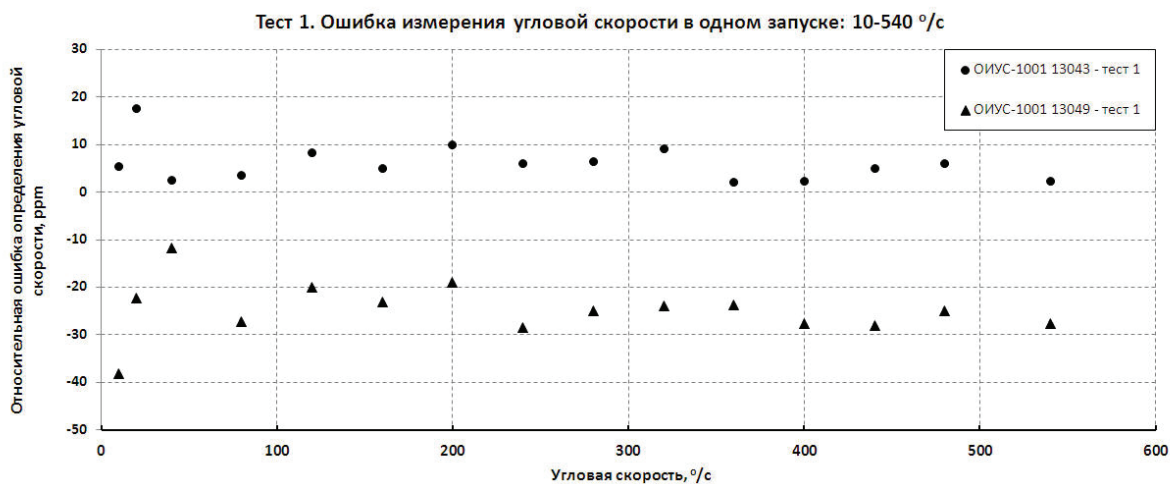


Рис. 5. Погрешность измерения угловой скорости ОИУС-1001 в одном запуске при ступенчатом изменении скорости вращения в диапазоне 10-540 °/с

На рис. 6 показаны результаты тестирования изготовленных ОИУС-1001 в одном запуске на границе двух октав (значения угловой скорости (~90 °/с), соответствующей фазовому сдвигу, кратному π рад) – результаты подтверждают, что на границе октав не происходит какого-либо заметного изменения параметров ОИУС-1001.

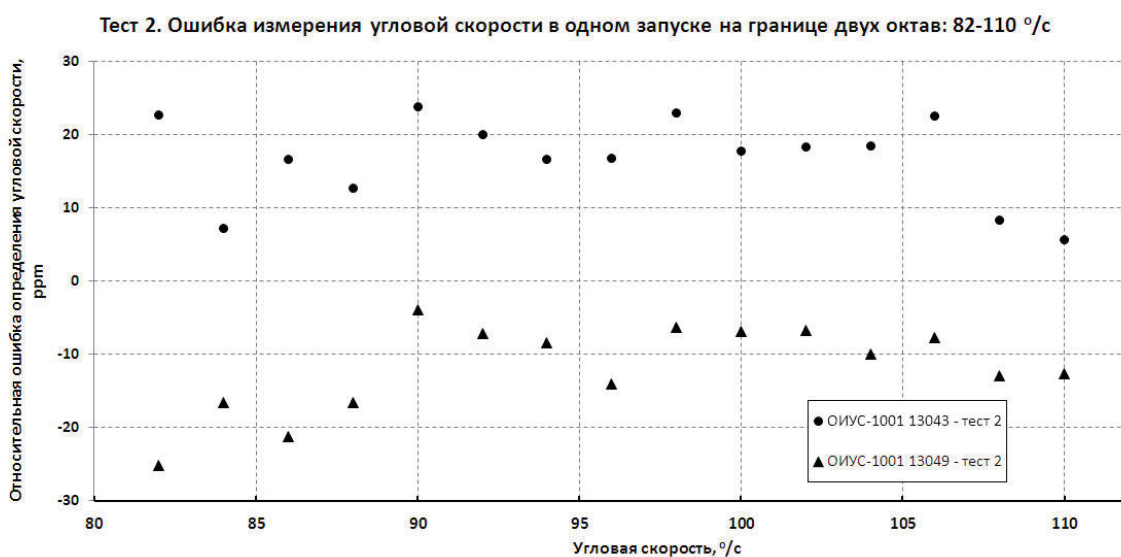


Рис. 6. Погрешность измерения угловой скорости ОИУС-1001 в одном запуске на границе двух октав

Однако оставалась проблема измерения угловых скоростей при включении прибора в состоянии вращения со скоростями более 90°/с. Для решения этой проблемы был разработан волоконно-оптический гироскоп ОИУС-1001, в котором для определения полупериода, в котором находится значение фазы Саньяка, использован микромеханический (МЭМС) гироскоп с диапазоном измерения угловых скоростей более 1000°/с. Схема цифровой обработки ВОГ с МЭМС гироскопом представлена на рис. 7.

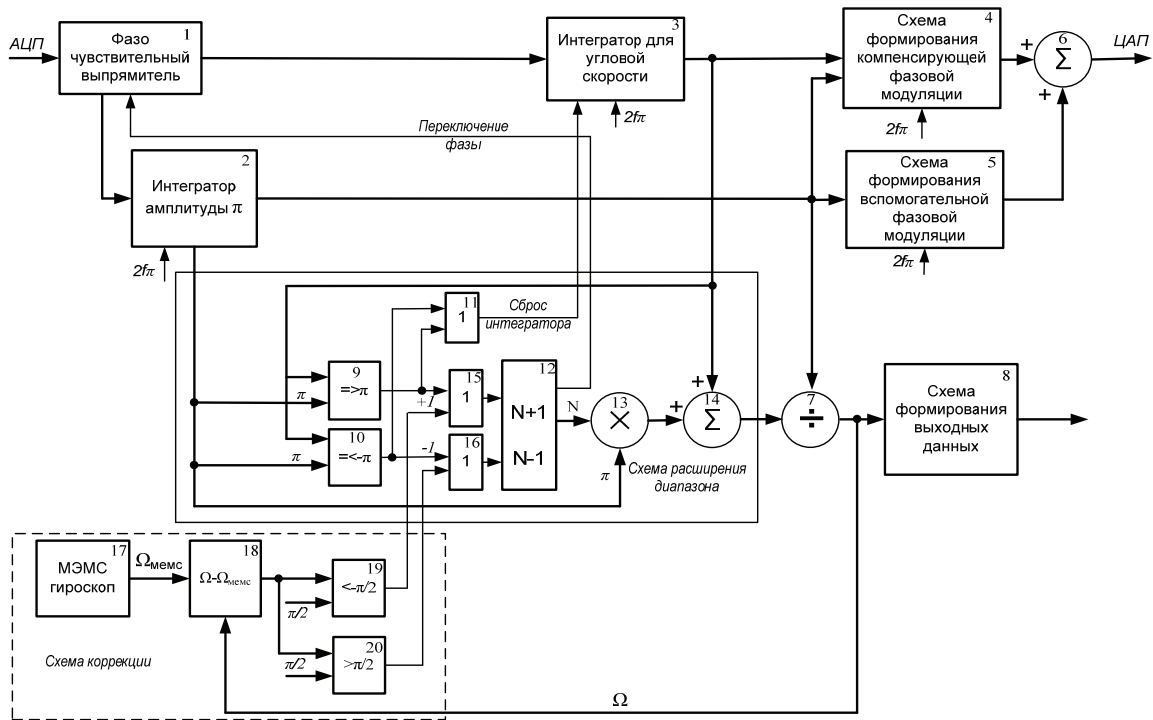


Рис. 7. Схема цифровой обработки ВОГ с расширенным диапазоном и схемой коррекции по МЭМС гироскопу: 15, 16- схема «или», 17 – МЭМС-гироскоп, 18 - схемы вычитания, 19, 20 –компаратор

Описание работы схемы коррекции по МЭМС гироскопу

Угловая скорость, измеренная МЭМС-гироскопом (17) вычитается на схеме вычитания из угловой скорости, измеренной ВОГ. Полученная разница сравнивается на компараторах (19), (20) с угловой скоростью, соответствующей сдвигу фаз, равному $\pi/2$ рад. Если разница меньше $-\pi/2$ рад вырабатывается сигнал на увеличение на единицу счетчика, числа переходов через π (12), который проходит через схему «или» (15). Если разница больше $\pi/2$ рад вырабатывается сигнал на уменьшение на единицу счетчика, числа переходов через π (12), который проходит через схему «или» (16).

Результаты измерения погрешности угловой скорости ОИУС-1001 при включении во время вращения, представленные на рис. 8, показывают адекватность разработанной схемы применения МЭМС гироскопа для подсчета номера полупериода выходного сигнала, и независимость точности (стабильности масштабного коэффициента) приборов от условий включения (в отсутствии вращения или во время вращения ВОГ).

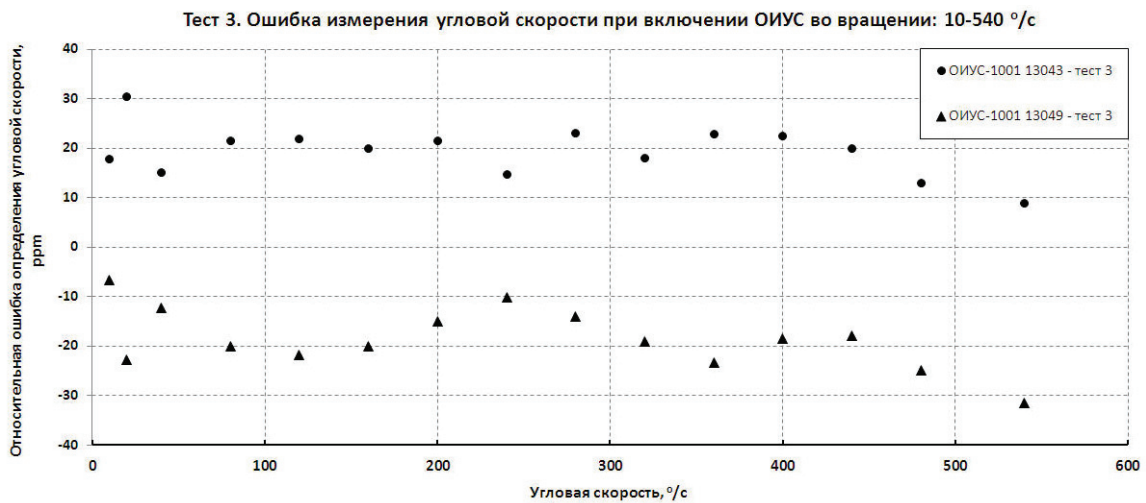


Рис. 8. Погрешность измерения угловой скорости ОИУС-1001 при включении во время вращения

На рис. 9 также представлены результаты расчетов погрешности измерения угловой скорости ОИУС-1001 от запуска к запуску при скорости вращения 100 °/с при включении во время вращения – эти результаты показывают, что значения стабильности масштабного коэффициента в одном запуске и от запуска к запуску практически совпадают.

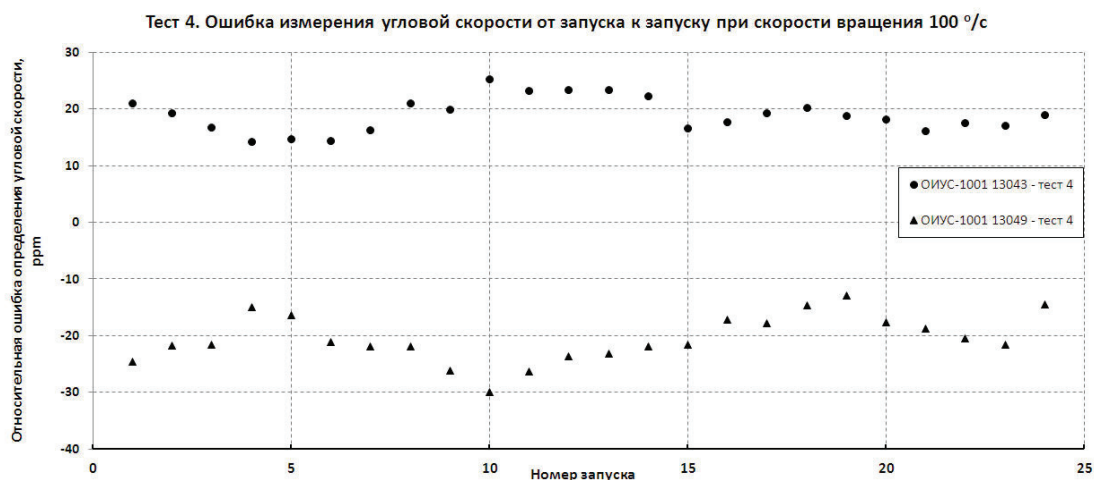


Рис. 9. Погрешность измерения угловой скорости ОИУС-1001 от запуска к запуску при скорости вращения 100 °/с

Результаты исследования ВОГ ОИУС-1001 при температурах +20°С, -30°С и +60°С, а также при плавном изменении температуры в диапазоне - 30°С...+60°С также показали сохранение всех параметров ВОГ ОИУС-1000 при расширении диапазона измеряемых угловых скоростей до ±550°/с. Суммарные точностные и эксплуатационные параметры (спецификация) разработанных прецизионных волоконно-оптических гироскопов ОИУС-1001 с расширенным динамическим диапазоном представлены в таблице.

Точностные и эксплуатационные параметры прецизионных волоконно-оптических гироскопов ОИУС-1001 с расширенным динамическим диапазоном

Характеристики	ОИУС-1001
Диапазон измеряемых угловых скоростей, °/с	± 550
Смещение нуля при фиксированной температуре, °/ч	0.005
Погрешность масштабного коэффициента, ppm	200
Полоса пропускания, Гц	100
Спектральная плотность мощности шума, °/√ч	0.0005
Масса прибора, кг	0.8
Габаритные размеры, мм	Ø150x80
Выходной сигнал	RS485

На рис. 10 представлены фотографии изготовленного и прошедшего тестирование разработанного ВОГ ОИУС-1001 с расширенным динамическим диапазоном.

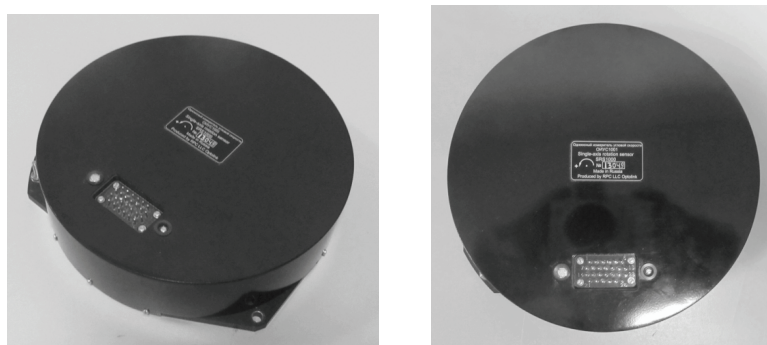


Рис. 10. Фотографии ВОГ ОИУС-1001 с расширенным динамическим диапазоном

Таким образом, компанией НПК «Оптолинк» разработан и подготовлен для серийного производства высокоточный волоконно-оптический гироскоп ОИУС-1001 с расширенным диапазоном измеряемых угловых скоростей с сохранением высокой стабильности масштабного коэффициента во всем диапазоне измерения.

Литература

1. **Lefevre H.**, The Fiber -Optic Gyroscope, Artech House, 1993.
2. Optical fiber rotation sensing, edited by **W.K.Burns**, Academic press, 1994.
3. **Yu.N.Korkishko, V.A.Fedorov, S.M.Kostritskii, A.N.Alkaev, E.M. Paderin, E.I.Maslennikov, D.V.Apraksin.** Multifunctional integrated optical chip for fiber optical gyroscope fabricated by high temperature proton exchange // in Proceedings of SPIE, Vol.4944, Integrated Optical Devices: Fabrication and Testing, edited by Giancarlo C. Righini, (SPIE, Bellingham, WA, 2003), pp. 262-267.
4. **Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Фенюк М.А., Марчук В.Г., Кострицкий С.М., Падерин Е.М.**, Высокоточный волоконно-оптический гироскоп с линейным цифровым выходом // Гироскопия и навигация, 2004. N1 - С.69-82.
5. **Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Марчук В.Г., Фенюк М.А., Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Кострицкий С.М., Падерин Е.М., Зуев А.И.**, Интерферометрические волоконно-оптические гироскопы с линейным выходом // Гироскопия и навигация, 2004. N3 - С.62-72.
6. **Yu.N. Korkishko, V.A. Fedorov, V.E. Prilutskii, V.G. Ponomarev, V.G.Marchuk, I.V.Morev, E.M. Paderin, S.M.Kostritskii, V.N.Branets, V.S.Ryzhkov.** Space grade three-axis fiber optical gyroscope // in Proc. EOS Topical Meeting on Photonic Devices in Space, October 18-19, 2006, Paris, France. Vol.5, pp.32-35.
7. **Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Морев И.В., Марчук В.Г., Кострицкий С.М., Падерин Е.М.** Интерферометрические волоконно-оптические гироскопы // Фотон-Экспресс, 2007, 6(62), с. 47-49.
8. **Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Марчук В.Г., Морев И.В., Кострицкий С.М., Падерин Е.М., Несенюк Л.П., Буравлев А.С., Лисин Л.Г.** Волоконно-оптический гироскоп навигационного класса точности // Гироскопия и навигация, 2008, № 1, с.71-81.
9. **Yu.N. Korkishko, V.A.Fedorov, V.E.Prilutskii, V.G.Ponomarev, I.V.Morev, S.M.Kostritskii.** Interferometric closed-loop fiber-optic gyroscopes // in Proceedings of SPIE, Vol.8351, Third Asia Pacific Optical Sensors Conference, edited by John Canning, Gangding Peng, (SPIE, Bellingham, WA, 2012), 83513L, pp. 83513L-1-83513L-8 (2012).
10. **Yu.Korkishko, V.Fedorov, V.Prilutskii, V.Ponomarev, I.Morev, S. Kostritskii, A.Zuev, V.Varnakov.** Closed loop fiber optical gyroscopes for commercial and space applications // in Proc. Inertial Sensors and Systems - Symposium Gyro Technology 2012, Karlsruhe, Germany, 18-19 September 2012, p.14.1-14.15.
11. **Yu.N.Korkishko, V.A.Fedorov, V.E.Prilutskii, V.G.Ponomarev, I.V.Morev, S.M.Kostritskii, A.I.Zuev, V.K.Varnakov.** Interferometric closed loop fiber optical gyroscopes for commercial and space applications // in Proceedings of SPIE, Vol.8421, OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors, edited by Yanbiao Liao, Wei Jin, David D. Sampson, Ryozo Yamauchi, Youngjoo Chung, Kentaro Nakamura, Yunjiang Rao, (SPIE, Bellingham, WA, 2012), 842107, pp. 842107-1-842107-8 (2012).