

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП НАВИГАЦИОННОГО КЛАССА ТОЧНОСТИ

Ю. Н. Коркишко¹, В. А. Федоров², В. Е. Прилуцкий³, В. Г. Пономарев⁴, В. Г. Марчук⁵, И. В. Морев⁶,
С. М. Кострицкий⁷, Е. М. Падерин⁸
ООО НПК «ОПТОЛИНК», 124498, Москва, Зеленоград, проезд 4806, дом.5
Тел. (+7-495) 536 9933, Факс (+7-495) 536 9934, E-mail:opto@optelink.ru

Л. П. Несенюк⁹, А. С. Буравлев¹⁰, Л. Г. Лисин¹¹
ФГУП ЦНИИ «Электроприбор».
Санкт Петербург, Малая Посадская 30, Россия
Тел.: (+7 812) 232 59-15, Факс: (+7 812) 232 33-76 E-mail: office@eprib.ru

Аннотация

Ключевые слова: оптоволокно, волоконно-оптический гироскоп с замкнутым контуром обратной связи

Описан интерференционный волоконно-оптический гироскоп ОИУС-1000 с замкнутым контуром обратной связи навигационного класса точности, разработанный и изготавливаемый в Научно-производственной компании «Оптолинк». Представлены результаты измерений основных параметров гироскопа, проведенные в ЦНИИ «Электроприбор». Результаты измерений показали, что волоконно-оптический гироскоп ОИУС-1000 удовлетворяет требованиям, предъявляемым к гироскопам, используемых для построения точных навигационных систем.

Введение

В настоящее время волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) с замкнутым контуром обратной связи начинают широко применяться в системах инерциальной навигации. 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 о скорости вращения объекта.

В данной работе описывается одноосный ВОГ ОИУС-1000, разработанный и изготавливаемый в Научно-производственной компании «Оптолинк», с длиной волоконного контура 500 м. Габаритные размеры прибора: $\varnothing 150 \times 40$ мм, масса 0,8 кг.

Конфигурация прибора

ВОГ изготавливаются в так называемой минимальной конфигурации (рис. 1) с одинаковыми оптическими путями для двух лучей, распространяющихся в волоконном контуре. Прибор состоит из источника света – суперлюминесцентного диода с центральной длиной волны 1550 нм, волоконного разветвителя, кольцевого интерферометра Саньяка для измерения угловой скорости и электронных схем обработки сигналов [2, 3]. Кольцевой интерферометр состоит из многофункционального интегрально-оптического элемента (МИОЭ) и из сохраняющего состояние поляризации света волоконного контура (ВК). МИОЭ представляет собой интегрально-оптическую схему на кристалле ниобата лития, изготовленную с помощью технологии высокотемпературного протонного обмена [4, 5] и выполняющую три функции: 1) поляризации проходящего света в целях уменьшения нестабильности смещения нуля вследствие поляризационной невзаимности; 2) расщепление световых волн на распространяющиеся по и против часовой стрелки в ВК с равными мощностями с последующей рекомбинацией на Y-разветвителе; 3) внесение фазового сдвига между встречными волнами с помощью электрооптического фазового модулятора.

¹ Д.ф.-м.н., профессор, техн. директор.

² Д.ф.-м.н., профессор, техн. директор.

³ Директор саратовского отделения.

⁴ К.т.н., ведущий конструктор.

⁵ Ведущий инженер.

⁶ Ведущий инженер.

⁷ Д.ф.-м.н., доцент, начальник отдела.

⁸ Главный технолог.

⁹ Д.т.н., профессор, начальник отдела.

¹⁰ Инженер 1-й категории

¹¹ Инженер 2-й категории.

Применение волокна, сохраняющего состояние поляризации, обусловлено как необходимостью уменьшения дрейфа, вызываемого перекрестной поляризационной связью, так и дрейфа, вызываемого внешними магнитными полями вследствие эффекта Фарадея.

Структурная схема ОИУС с цифровой обработкой сигналов (ЦОС) представлена на рис 1.

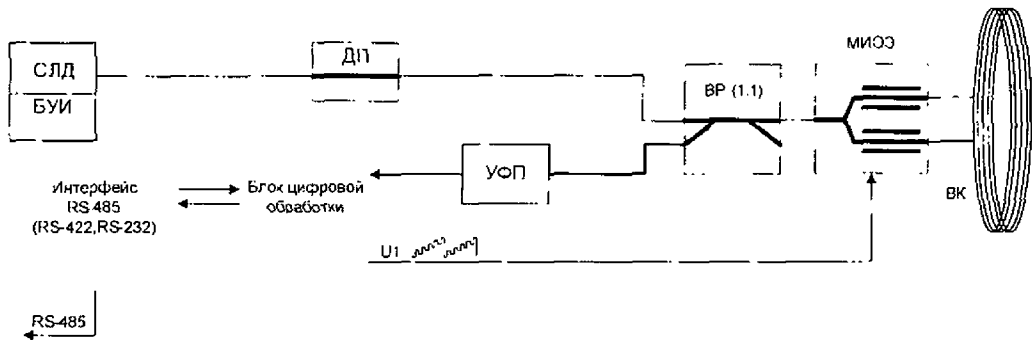


Рис. 1. Структурная схема ОИУС-1000.

СЛД – суперлюминесцентный диод, БУИ – блок управления излучателем, ВР – волоконный разветвитель, ВК – волоконный контур, МИОЭ – многофункциональный интегральный оптический элемент, УФП – устройство фотоприемное, ДП – деполаризатор, RS-485 – последовательный интерфейс.

В ОИУС-1000 применена схема с замкнутым контуром обратной связи с импульсной вспомогательной и ступенчато-пилеобразной компенсирующей фазовыми модуляциями света. Схема предполагает наличие стабильного значения фазовой амплитуды компенсирующей модуляции. Это достигается с помощью дополнительной следящей системы в схеме обработки.

Блок цифровой обработки (БЦО) формирует напряжения, поступающие на МИОЭ для формирования постоянного фазового сдвига между встречными световыми волнами, равного $\pi/2$ рад, и компенсации разности фаз Саньяка. Тем самым обеспечивается работа прибора в режиме непрерывно замкнутого контура.

Структурная схема БЦО представлена на рис 2.

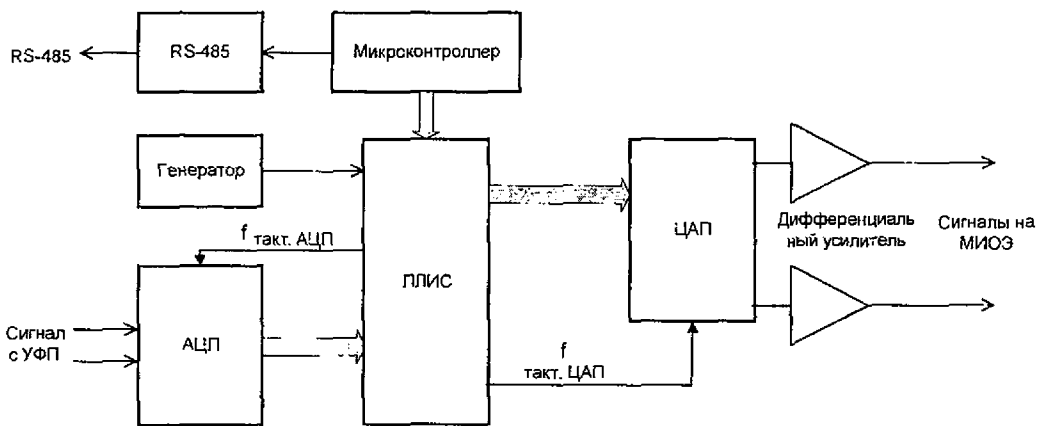


Рис. 2. Структурная схема БЦО:

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь, ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь, ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема

Аналоговый сигнал о наличии угловой скорости (сигнал рассогласования) поступает на АЦП с УФП, где предварительно усиливается. Высокоскоростной АЦП под управлением цифрового автомата, реализованного на ПЛИС, преобразует аналоговый сигнал в цифровой и передает в ПЛИС. В ПЛИС цифровой сигнал с АЦП демодулируется и полученный цифровой код со знаком, соответствующим знаку сигнала рассогласования, поступает на цифровой интегратор. Код с интегратора используется для получения наклона фазовой «пилы», соответствующего скорости вращения. Преобразованный в ЦАП сигнал поступает на МИОЭ. При амплитуде сброса фазовой «пилы», равной 2π рад, как известно, разность фаз Саньяка компенсируется сигналом с частотой f , определяемой соотношением

постоянная времени цифрового интегратора. Сумматор используется в качестве интегратора. Код с интегратора поступает на формирователь кода для компенсирующей модуляции и через цифровой фильтр на последовательный интерфейс связи с контроллером.

Формирователь кода для компенсирующей модуляции состоит из сумматора, с помощью которого формируется код «пилы» и второго сумматора, который используется в контуре цифрового регулятора амплитуды компенсирующей модуляции. Сигналом рассогласования для цифрового регулятора амплитуды компенсирующей модуляции служит сигнал со схемы обработки сигнала с УФП, снятый в моменты спадов «пилы». Этот же сигнал используется и для подстройки амплитуды вспомогательной модуляции.

Для достижения максимальной чувствительности необходимо устранить все источники невязности, кроме тех, которые возникают в результате эффекта Саньяка при распространении волн по часовой стрелке и против часовой стрелки. Возникновение дополнительных фазовых сдвигов из-за недостаточного качества оптических компонентов или внешних возмущений на фоне фазового сдвига Саньяка приводит к дополнительному дрейфу нулевого сигнала [1].

Рассмотрим основные факторы, ограничивающие точность ВОГ и влияние которых удалось ослабить при разработке ВОГ ОИУС-1000.

Оптические потери

Чувствительность ВОГ ограничена дробовым шумом, который вычисляется как величина, обратная квадратному корню из мощности, которая уменьшается с увеличением длины волокна, в то время как эффект Саньяка увеличивается. Эти два конкурирующих эффекта определяют длину волокна для данной чувствительности.

Тепловые помехи

Зависящий от времени температурный градиент вдоль длины волокна может привести к ложным фазовым сдвигам вследствие температурной зависимости показателя преломления волокна. Для минимизации этого эффекта необходимо использовать волокна с меньшим значением dn/dT . Квадрупольная намотка, в которой равноотстоящие от центра точки волокна расположены в физически равных условиях, также значительно уменьшает этот эффект.

Обратное рассеяние света

Обратное рассеяние на входных-выходных соединителях и других неоднородностях ИВОГ может являться причиной возникновения паразитных интерференций. Иммерсионные элементы для уменьшения разностей показателей преломления, а также использование наклонных поверхностей в МИОЭ снижают обратное рассеяние.

Оптический эффект Керра

Электрические поля распространяющихся в противоположных направлениях лучей могут привести к таким изменениям показателя преломления, которые будут невязными, если свет расщепляется на неравные части [6]. Невязность, вызванная нелинейным эффектом Керра, может быть существенно снижена путем использования низкокогерентного источника излучения.

Магнитооптический эффект

Магнитооптический эффект Фарадея приводит к паразитному дрейфу гироскопа. Значительное уменьшение его влияния достигается путем использования волокна, сохраняющих поляризацию излучения, а также за счет использования оболочек из пермаллоя.

Для ВОГ с идеальными компонентами (идеальным расщепителем, без обратного рассеяния и т.д.) предел измерений зависит от дробового шума в пучке света при измерении фотодетектором [7]. Недостоверность $\delta\Omega_\pi$, создаваемая колебанием в пучке света, которое вызвано дробовым шумом, можно выразить как [8]

$$\delta\Omega_\pi = \frac{c}{L \cdot D} \frac{\lambda/2}{(n_p n_D \tau)^{1/2}},$$

где n_p – количество фотонов/с, попадающих на фотодетектор, n_D – квантовая эффективность детектора, а τ – среднее время.

Результаты испытаний прибора ОИУС-1000

Испытания ОИУС-1000 проводились в ЦНИИ «Электроприбор» в лабораторных условиях при нормальных климатических условиях и температуре $20 \pm 0.4^\circ \text{C}$ в температурной камере VT7004 фирмы Voetsch Industrietechnik. Для оценки характеристик смещения нуля прибора в одном пуске и его шумовых характеристик использовался поворотный стенд АС1120Е фирмы Асимгоніс. При этом записывалась реализация длиной не менее 10 ч [9].

Шумовые характеристики ВОГ рассчитывались с помощью метода вариаций Аллана.

Для определения зависимости коэффициента преобразования и смещения нуля прибора от температуры его показания записывались при плавном изменении температуры от минимального допустимого значения до максимально допустимого значения и обратно. Скорость изменения температуры выбрана $5^\circ \text{C}/\text{ч}$.

Коэффициент преобразования ВОГ определялся на стенде АС1120Е при вертикальной оси чувствительности путем поворота на фиксированный угол с постоянной угловой скоростью по часовой стрелке и против часовой стрелки. При этом коэффициент преобразования определялся как

$$K = \frac{4\pi}{U_+ - U_-},$$

где $U_+ = \frac{1}{n} \sum^n U_{+i} T$ - интеграл от выходного сигнала за время оборота T при вращении по часовой

стрелке, $U_- = \frac{1}{n} \sum^n U_{-i} T$ - интеграл от выходного сигнала за время оборота T при вращении против часовой стрелки.

Нелинейность выходной характеристики прибора определялась с помощью задания ряда угловых скоростей, определения выходных угловых скоростей, аппроксимации выходной характеристик линейной зависимостью и отношением максимального отклонения от нее к максимальной угловой скорости.

Для определения порога чувствительности ВОГ задавали ряд различных угловых скоростей в обе стороны. Минимальная задаваемая угловая скорость устанавливается меньшей априорного значения минимально обнаружимой угловой скорости. Та минимальная угловая скорость, ступенька на которой видна после сглаживания с постоянной времени 100 с фильтром первого порядка считалась порогом чувствительности ВОГ.

Стабильность смещения нуля и шумовые характеристики ВОГ проверялись при выключенном двигателе контроллера поворотного стола.

Частота съема данных составляла 100 Гц. Запись данных как с испытуемого ВОГ, так и с поворотного стенда производилась с помощью специальной пультовой программы на соответственно пультовом компьютере.

На рис.4 приведен график исходной реализации ОИУС-1000.

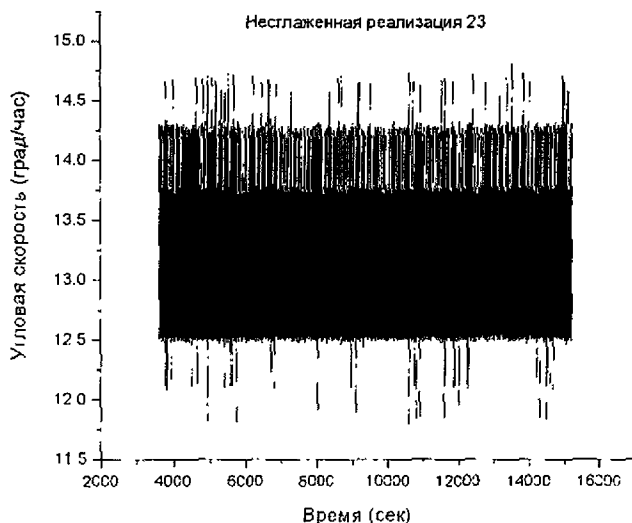


Рис. 4. Исходная реализация ОИУС-1000

Сглаженная реализация с помощью фильтра I-го порядка с постоянной времени 100 с приведена на рис. 5.

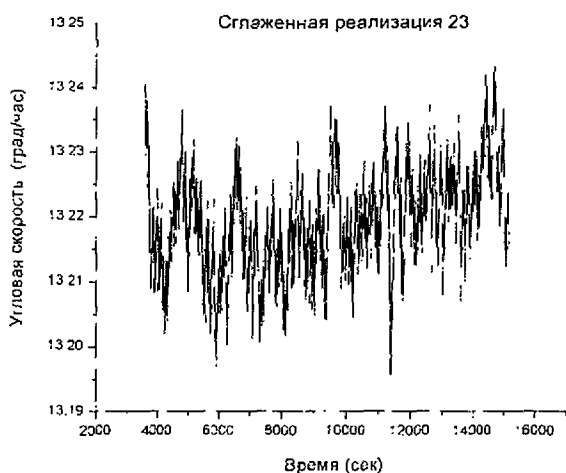


Рис. 5. Графики сглаженной угловой скорости (град/ч)

СКО сглаженной реализации угловой скорости, приведенной на рис. 5, составляет 0,0075 град/ч.

Для определения изменения смещения нуля прибора ОИУС-1000 от пуска к пуску было обработано 10 реализаций. По каждой было рассчитано среднее и СКО. Результаты сведены в таблицу.

Смещение нулевого сигнала от пуска к пуску

№	Среднее значение, град/ч	СКО, град/ч
1	13.184	0.00797
2	13.059	0.00698
3	13.106	0.00693
4	13.238	0.00735
5	13.180	0.00669
6	13.057	0.0082
7	13.055	0.00852
8	13.046	0.007
9	13.049	0.0071
10	13.044	0.00676
Среднее СКО	-	0.00735

Из данных, приведенных в таблице, видно, что нестабильность смещения нуля в одном пуске составляет величину $0,007 \pm 0,008$ град/ч, а нестабильность смещения нуля от пуска к пуску составляет величину 0,07185 град/ч. На рис. 6 и 7 приведены графики изменения средней угловой скорости и СКО по этим реализациям.

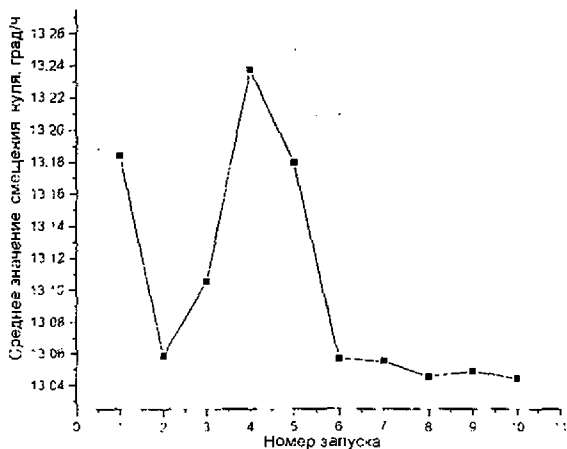


Рис. 6. График средней угловой скорости на выходе ВОГ от пуска к пуску

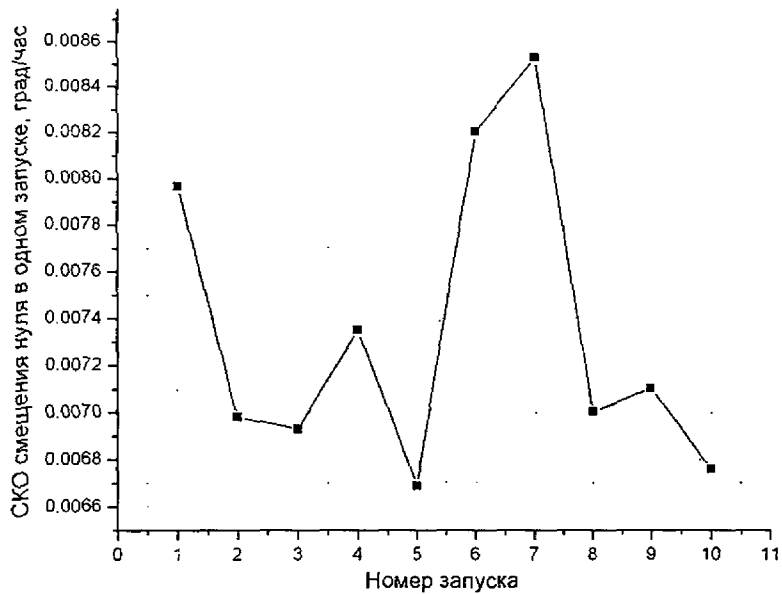


Рис. 7. График SKO от пуска к пуску

Из рис. 6 можно заметить, что средняя угловая скорость по последним 5 реализациям находится в диапазоне $\pm 0,01$ град/ч. Поскольку в этом случае поворотный стол гарантированно стоял в одном положении, то можно предположить, что остальной разброс был вызван различным положением стэнда при измерениях. Был проведен дополнительный эксперимент по измерению в неподвижном положении на румбах через 45° . График полученных измерений угловой скорости приведен на рис. 8. Разброс совпадает с разбросом на рис. 6. Отсюда следует, что реальная стабильность смещения нуля прибора ОИУС-1000 находится на уровне $0,01$ град/ч.

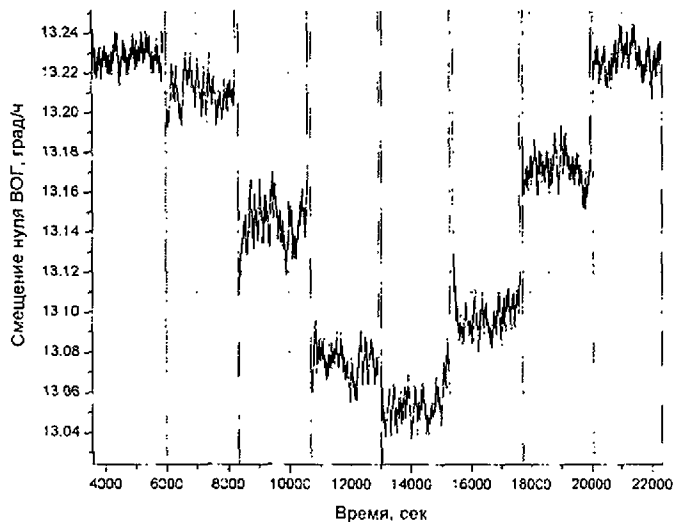


Рис. 8. График средней угловой скорости на выходе ВОГ на разных румбах

На рис. 9 приведена зависимость смещения нуля от температуры.

Получилось, что смещение нуля изменяется в пределах $\pm 0,15$ град/ч при изменении температуры в диапазоне от -20 до $+50^\circ\text{C}$.

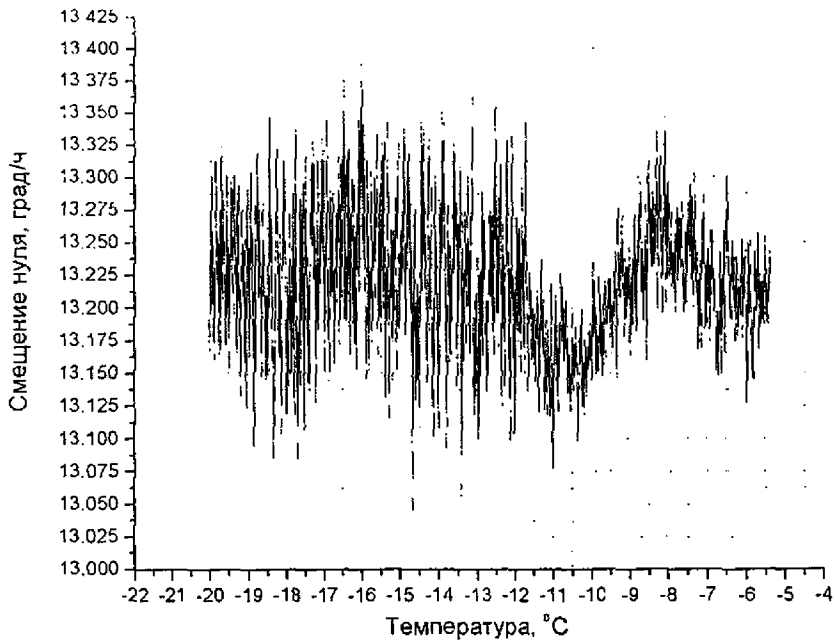


Рис. 9. Зависимость смещения нуля от температуры

Был рассчитан параметр нестабильности коэффициента преобразования ВОГ ОИУС-1000 и произведена оценка его температурной зависимости. График изменения коэффициента преобразования при постоянной заданной температуре по этой же реализации приведен на рис. 10.

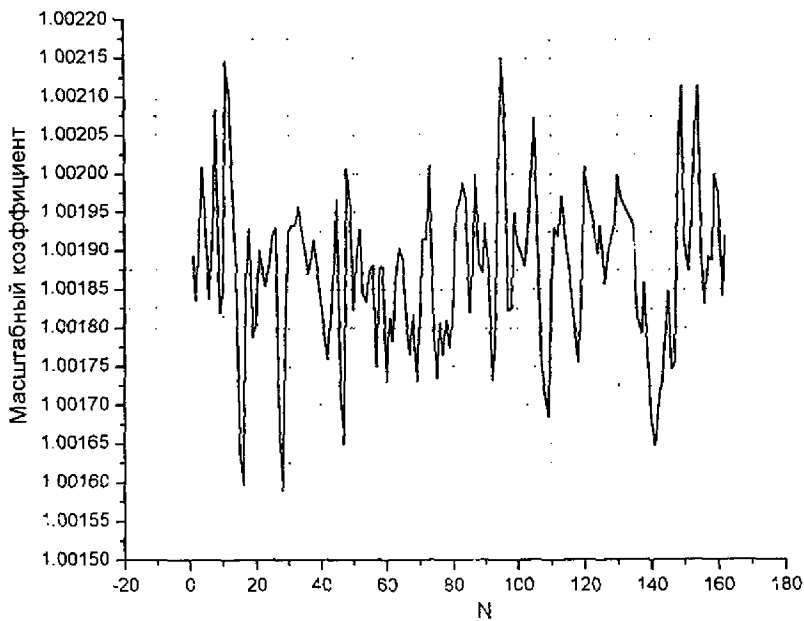


Рис. 10. График коэффициента преобразования от номера измерения

Нестабильность СКО коэффициента преобразования по графику на рис. 10 составила 0,01%.

Коэффициент преобразования зависит от температуры в диапазоне $-20 \dots -10^\circ\text{C}$ на уровне $0.0021 \text{ \%}/^\circ\text{C}$, а в диапазоне $+10 \dots +50^\circ\text{C}$ на уровне $6.03 \cdot 10^{-4} \text{ \%}/^\circ\text{C}$ (рис. 11).

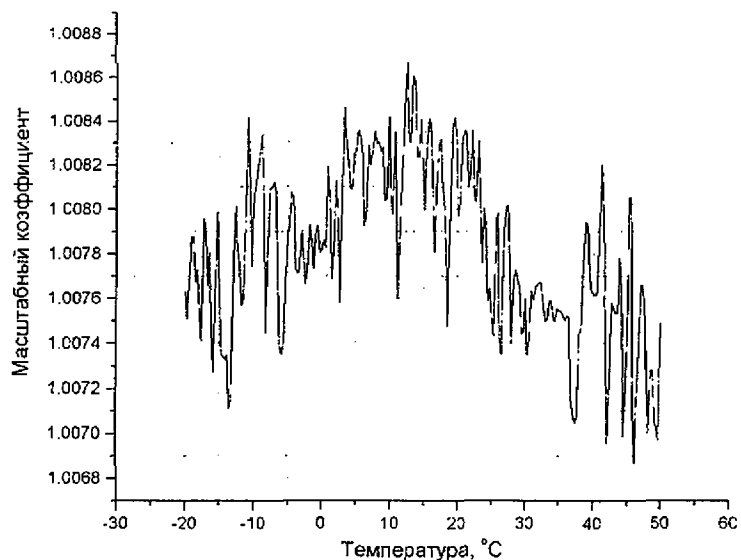


Рис. 11. График зависимости коэффициента преобразования от температуры.

Целинейность выходной характеристики

Для оценки нелинейности выходной характеристики ОИУС-1000 на поворотном столе задавались угловые скорости вращения в диапазоне от -20 до +20 град/с с шагом 1 град/с. График изменения средней выходной угловой скорости на каждой из «полочек» от заданной угловой скорости приведен на рис. 10.

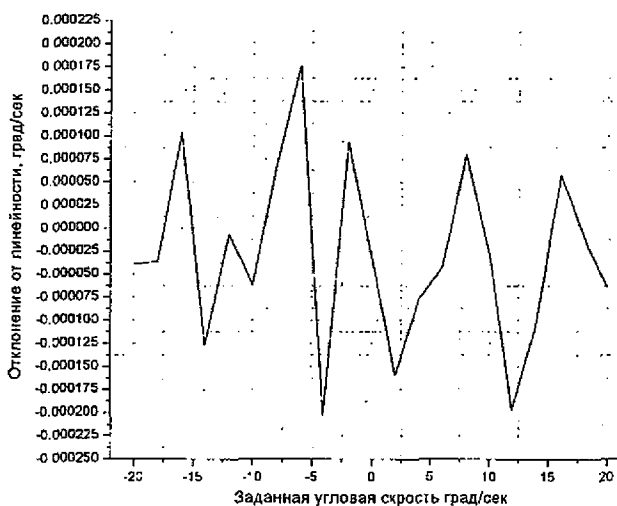


Рис. 10. График отклонения выходной характеристики ВОГ от линейности

Оценка нелинейности выходной характеристики ВОГ составляет 0,001%.

Влияние магнитного поля.

Измерение влияния постоянного магнитного поля производилось следующим образом. ВОГ помещался в постоянное магнитное поле так, чтобы вектор напряженности поля был параллелен каждой из трех осей гироскопа. Измерения показали, что чувствительность ОИУС-1000 к магнитному полю следующая:

для оси X (оси чувствительности гироскопа) не более 0,05 град/ч/Эрстед.

для осей Y и Z (плоскость катушки) не более 0,13 град/ч/Эрстед.

Чувствительность прибора ОИУС-1000 измерялась путем задания ряда угловых скоростей в диапазоне от $\pm 0,001$ до ± 10 град/ч используя проекцию угловой скорости Земли. Время усреднения -- 100 с. При этом ось чувствительности ОИУС-1000 выставлялась перпендикулярно оси вращения стенда и перпендикулярно плоскости меридиана. Задавая небольшие отклонения от перпендикуляра к плоскости меридиана в обе стороны, можно измерять малые угловые скорости. График реализации ОИУС-1000 приведен на рис. 11. Видно, что отчетливо видны угловые скорости до 0,01 град/ч.

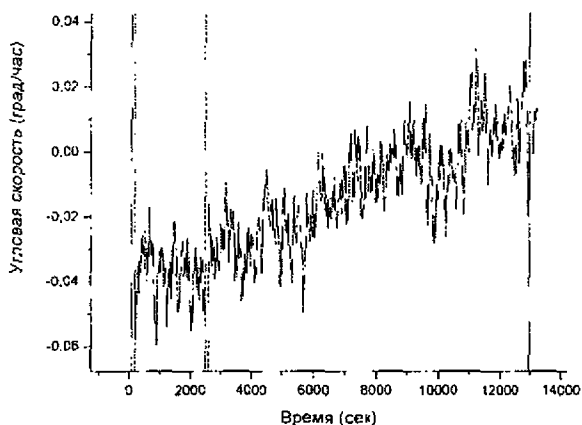


Рис. 11. График реализации для оценки чувствительности ВОГ с использованием проекции угловой скорости Земли от -0,04 до 0,01 град/ч

Заключение

1. При стабилизированной внешней температуре с точностью $\pm 0,2^\circ\text{C}$ СКО смещения нуля ВОГ ОИУС-1000 в одном пуске составило $0,007 \div 0,008$ град/ч, а от пуска к пуску 0,01 град/ч.
2. Стабильность коэффициента преобразования ВОГ составила величину 0,01% при скорости вращения 2 град/с;
3. Температурные изменения коэффициента преобразования ВОГ не превысили 0,2% в температурном диапазоне $-20 \div +50^\circ\text{C}$;
4. Температурные изменения смещения нуля ВОГ составили величину $\pm 0,15$ град/ч в температурном диапазоне $-20 \div +50^\circ\text{C}$;
5. Нелинейность выходной характеристики ВОГ составляет величину порядка 0,001%.
6. Чувствительность ВОГ ОИУС-1000 не хуже 0,01 град/ч.

Литература

1. Lefevre H. The Fiber – Optic Gyroscope, Artech House, 1993.
2. Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е. и др. Высокоточный волоконно-оптический гироскоп с линейным цифровым // Гироскопия и навигация. - 2004. - N 1. - С.69-82.
3. Прилуцкий В.Е., Пономарев В.Г., Марчук В.Г. и др. Интерферометрические волоконно-оптические гироскопы с линейным выходом // Гироскопия и навигация. - 2004. - N3. - С.62-72.
4. Korkishko Yu.N., Fedorov V.A., Feoktistova O.Y., LiNbO₃ Optical Waveguide Fabrication by High-Temperature Proton Exchange // J. Lightwave Technology, 2000. Vol.18 - P.562-568.
5. Korkishko Yu.N., Fedorov V.A., Kostritskii S.M., Alkaev A.N., Paderin E.M., Maslennikov E.I., Apraksin D.V., Multifunctional integrated optical chip for fiber optical gyroscope fabricated by high temperature proton exchange // in Integrated Optical Devices: Fabrication and Testing, G.C. Righini, Editor, Proc. SPIE, 2003. V.4944 - P.262-267.
6. Frigo N.J., Taylor H.F., Goldberg L., Weller J.F., Rashleigh S.C., Opt.Lett. 1983, V.8 – P.119.
7. Lin S., Giallorenzi T.G. Appl.Optics 1979, V.18 – P.915.
8. Davis J.L., Ezekiel S., 1978, Proc.SPIE, V.157 - P.131.
9. Программа и методика исследования характеристик волоконно-оптических датчиков вращения. Проект ЦНИИ «Электроприбор, 2004.