
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

УДК 53.091, 531.383
DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-11-982-988

ПОГРЕШНОСТЬ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА ПРИ УГЛОВЫХ КОЛЕБАНИЯХ

А. В. МИКЛЯШЕВ

*Пермская научно-производственная приборостроительная компания, 614990, Пермь, Россия
E-mail: antvalmik@gmail.com*

Рассматривается волоконно-оптический гироскоп с прямоугольной фазовой модуляцией и замкнутой обратной связью. Выведена формула погрешности этого датчика, возникающей вследствие известной нелинейности интерферометра. Показано, что погрешность гироскопа зависит от углового ускорения. Приведены результаты имитационного моделирования, позволяющие оценить допустимость упрощений, сделанных при выводе формулы. Экспериментальное подтверждение полученной зависимости приведено для двух модификаций волоконно-оптического гироскопа.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, нелинейность интерферометра, вибрация, угловые ускорения

Введение. Волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) широко используются в качестве чувствительных элементов бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) [1, 2], областью применения которых являются подвижные объекты морского, наземного, авиационного и ракетного типов.

Одна из важных задач — обеспечение устойчивости БИНС к вибрационным воздействиям. Эта задача решается с помощью комплекса мер по виброизоляции [3, 4], повышению автономной устойчивости датчиков либо построению комплексированных систем [5]. В настоящей статье рассматривается вопрос, касающийся автономной устойчивости ВОГ.

Актуальность разработки модели погрешности ВОГ обусловлена необходимостью снижения вибрационных погрешностей [6—10]. Причинами вибрационной погрешности ВОГ могут быть изменение интенсивности источника излучения [6], упругие деформации в контуре ВОГ [7], модуль перегрузки, действующей перпендикулярно оси чувствительности ВОГ [8], параметры настройки ПИД-регулятора в цепи обратной связи [9, 10].

Принято считать [11], что обратная связь обеспечивает линейность рабочей характеристики датчика, а учет нелинейности актуален только для датчика с открытым контуром. Однако остается открытым вопрос влияния нелинейности рабочей характеристики интерферометра на работу ВОГ с замкнутым контуром обратной связи. Именно этот вопрос составляет предмет исследования в настоящей статье.

Нелинейность интерферометра и ее влияние на погрешность ВОГ. Мощность светового сигнала P на фотоприемнике в зависимости от фазы Саньяка φ_s выражается формулой [11]

$$P = \frac{1}{2} P_0 (1 + \cos \varphi_s), \quad (1)$$

где P_0 — мощность полной засветки, возникающей при отсутствии вращения прибора и без модуляции; эту нелинейную зависимость будем называть характеристикой интерферометра.

При работе ВОГ с замкнутой обратной связью модулятор обеспечивает знакопеременное смещение фазы с амплитудой φ_0 . В этом случае интерферометр работает поочередно в двух рабочих точках в окрестности фазы интерферометра. Мощности светового сигнала в окрестностях фазовых смещений с амплитудой φ_0 обозначим как $P_{1,2}$ и представим их следующими выражениями, имея в виду, что $\varphi_0 > 0$:

$$P_1 = \frac{1}{2} P_0 (1 + \cos(\varphi_s - \varphi_0)),$$

$$P_2 = \frac{1}{2} P_0 (1 + \cos(\varphi_s + \varphi_0)).$$

Используя обратную связь, можно найти фазы интерферометра в малой окрестности рабочих точек, отклонение от которых обозначим как $\Delta\omega_{1,2}$ соответственно. Мощности $P_{1,2}$ вблизи фаз $\pm\varphi_0$ линеаризуются разложением в ряд Тейлора следующим образом:

$$P_1 = \frac{1}{2} P_0 \left(1 + \cos \varphi_0 + \sin \varphi_0 \cdot \Delta\varphi_1 - \frac{1}{2} \cos \varphi_0 \cdot \Delta\varphi_1^2 - \frac{1}{6} \sin \varphi_0 \cdot \Delta\varphi_1^3 + \dots \right), \quad (2)$$

$$P_2 = \frac{1}{2} P_0 \left(1 + \cos \varphi_0 - \sin \varphi_0 \cdot \Delta\varphi_2 - \frac{1}{2} \cos \varphi_0 \cdot \Delta\varphi_2^2 + \frac{1}{6} \sin \varphi_0 \cdot \Delta\varphi_2^3 + \dots \right). \quad (3)$$

Для определения оценки приращения угловой скорости выполняется демодуляция путем вычисления вида $(P_1 - P_2) / 2$:

$$\frac{1}{2}(P_1 - P_2) = \frac{1}{2} P_0 \sin \varphi_0 \cdot \left(\frac{1}{2}(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2) - \frac{1}{4} \operatorname{ctg} \varphi_0 \cdot (\Delta\varphi_1^2 - \Delta\varphi_2^2) - \frac{1}{12}(\Delta\varphi_1^3 + \Delta\varphi_2^3) + \dots \right).$$

Как видно из последнего выражения, линейный член разложения обеспечивает оценку среднего приращения фазы Саньяка за один период модуляции, однако наряду с этим формируется и погрешность измерения из-за наличия степеней разложения выше первой.

Перейдем от выражений с изменением фазы интерферометра $\Delta\varphi_{1,2}$ к соответствующим изменениям угловой скорости $\Delta\omega_{1,2}$, используя масштабный коэффициент интерферометра

$$\frac{2\pi DL}{c\lambda} \quad [11]:$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}(P_1 - P_2) = \frac{1}{2} P_0 \sin \varphi_0 \cdot \frac{2\pi DL}{c\lambda} \left[\frac{1}{2}(\Delta\omega_1 + \Delta\omega_2) - \frac{1}{4} \operatorname{ctg} \varphi_0 \cdot \frac{2\pi DL}{c\lambda} (\Delta\omega_1^2 - \Delta\omega_2^2) - \right. \\ \left. - \frac{1}{12} \left(\frac{2\pi DL}{c\lambda} \right)^2 (\Delta\omega_1^3 + \Delta\omega_2^3) + \dots \right], \end{aligned}$$

где L — длина волокна, D — диаметр волоконного контура, λ — длина волны источника излучения, c — скорость света в вакууме.

Будем считать, что на шаге замыкания обратной связи действует фиксированное угловое ускорение ε . Тогда приращения угловых скоростей $\Delta\omega_1$ и $\Delta\omega_2$ можно представить как εt_1 и εt_2 соответственно. Интервал между моментами времени t_1 и t_2 определяется полупериодом модуляции и зависит от длины L . Получим выражение

$$\frac{1}{2}(P_1 - P_2) = \frac{1}{2}P_0 \sin \varphi_0 \cdot \frac{2\pi DL}{c\lambda} \left[\frac{1}{2}(\Delta\omega_1 + \Delta\omega_2) - \frac{1}{4} \operatorname{ctg} \varphi_0 \cdot \frac{2\pi DL}{c\lambda} \varepsilon^2 (t_1^2 - t_2^2) - \frac{1}{12} \left(\frac{2\pi DL}{c\lambda} \right)^2 \varepsilon^3 (t_1^3 + t_2^3) + \dots \right], \quad (4)$$

откуда следует, что знак погрешности измерения, возникающей из-за составляющей, пропорциональной ε^2 , не меняется при изменении знака углового ускорения, в отличие от составляющей, пропорциональной ε^3 . Следовательно, если рассмотреть сумму измерений при двух равных по модулю, но противоположных по знаку ускорениях ε , то сократятся все слагаемые, кроме тех, которые имеют четные степени по ε . Таким образом, при знакопеременных симметричных воздействиях нечетные степени нелинейности сокращаются, а четные суммируются, что приводит к смещению нуля прибора.

Обозначим эту погрешность как $\omega_{\text{др}}$:

$$\omega_{\text{др}} = -\frac{1}{4} \operatorname{ctg} \varphi_0 \cdot \frac{2\pi DL}{c\lambda} \varepsilon^2 (t_1^2 - t_2^2). \quad (5)$$

Формула (5) позволяет определить погрешность на одном периоде модуляции сигнала регулирования ВОГ, т.е. за время $\Delta t_{\text{м}} = 2(t_2 - t_1)$. В случае если одному периоду регулирования $\Delta t_{\text{р}}$, когда происходит замыкание обратной связи, соответствуют несколько периодов модуляции, то формула (5) преобразуется к виду

$$\omega_{\text{др}} = -\frac{1}{2k} \operatorname{ctg} \varphi_0 \cdot \frac{2\pi DL}{c\lambda} \varepsilon^2 (t_1^2 - t_2^2 + t_3^2 - t_4^2 + \dots + t_{k-1}^2 - t_k^2), \quad (6)$$

где k — количество полупериодов модуляции, укладываемых в период регулирования.

Используя формулы разложения разности квадратов и суммы арифметической прогрессии, учтем, что

$$\frac{2}{k} (t_1^2 - t_2^2 + t_3^2 - t_4^2 + \dots + t_{k-1}^2 - t_k^2) = -\frac{2}{k} \frac{\Delta t_{\text{м}}}{2} (t_1 + t_2 + \dots + t_k) \approx -\frac{1}{2} \Delta t_{\text{м}} \Delta t_{\text{р}}. \quad (7)$$

Тогда погрешность (6) может быть представлена следующим выражением:

$$\omega_{\text{др}} = -\frac{1}{8} \operatorname{ctg} \varphi_0 \cdot \frac{2\pi DL}{c\lambda} \varepsilon^2 \Delta t_{\text{м}} \Delta t_{\text{р}}. \quad (8)$$

Формула (8) определяет погрешность на одном периоде замыкания обратной связи схемы регулирования ВОГ. При выводе этой формулы предполагалось, что приращение угловой скорости на шаге регулирования начинается от нуля ($\Delta\omega_1 = \varepsilon t_1$), т.е. на предыдущем шаге регулирования приращение было скомпенсировано полностью. Однако в реальности это не так, поскольку на шаге регулирования оценивается среднее значение приращения. Для учета этого влияния рассмотрим параметры установившегося режима регулирования при действии постоянного углового ускорения ε . Угловая скорость на шаге регулирования i может быть представлена выражением

$$\Delta\omega_i(t) = \omega_0 + \varepsilon t, \quad (9)$$

где ω_0 — угловая скорость, оставшаяся некомпенсированной на предыдущем шаге.

Среднее значение угловой скорости на шаге регулирования i составит

$$\Delta\bar{\omega}_i = \omega_0 + \frac{1}{2} \varepsilon t_{\text{р}},$$

а на следующем шаге $i+1$ —

$$\Delta\omega_{i+1}(t) = \Delta\omega_i(t_{\text{р}}) - \Delta\bar{\omega}_i + \varepsilon t = \frac{1}{2} \varepsilon t_{\text{р}} + \varepsilon t. \quad (10)$$

В установившемся режиме правые части выражений (9) и (10) должны быть равны, что выполняется при условии

$$\omega_0 = \frac{1}{2} \varepsilon t_p.$$

Таким образом, выражение (10) является уравнением установившегося режима при любых i . Для этого случая при определении погрешности датчика необходимо заменить выражение для $\Delta\omega_1$ и $\Delta\omega_2$ в формуле (4) согласно формуле (10). Обозначим погрешность, учитывающую осреднение на шаге регулирования, как $\omega'_{др}$. Тогда формула (5) преобразуется к следующему виду:

$$\omega'_{др} = -\frac{1}{4} \operatorname{ctg} \varphi_0 \cdot \frac{2\pi DL}{c\lambda} \varepsilon^2 \left(t_1^2 - t_2^2 - \frac{1}{2} \Delta t_m \Delta t_p \right).$$

Проведя преобразования, аналогичные формулам (6), (7), окончательное выражение для зависящей от углового ускорения погрешности ВОГ на одном шаге регулирования можно записать следующим образом:

$$\omega'_{др} = -\frac{1}{4} \operatorname{ctg} \varphi_0 \cdot \frac{2\pi DL}{c\lambda} \varepsilon^2 \Delta t_m \Delta t_p. \quad (11)$$

Сравнение выражений (8) и (11) показывает, что за счет запаздывания в оценке текущей угловой скорости, вызванного осреднением в контуре обратной связи, погрешность увеличивается в 2 раза.

Имитационное моделирование. В формуле (11), полученной на основе разложения рабочей характеристики интерферометра в ряд Тейлора, учитывается только нелинейность второй степени. Очевидно, что некоторый вклад в погрешность могут вносить и более высокие степени нелинейности. Для оценки влияния на погрешность ВОГ второй и более высоких степеней разложения (2—3) проведено моделирование работы датчика, учитывающее отдельно вторую степень согласно формуле (11) и суммарный нелинейный эффект согласно формуле (1).

Моделирование проводилось с использованием программного пакета MatLab. В качестве входного сигнала принят один период углового колебания с угловым ускорением от 100 до 50 000 $^\circ/\text{с}^2$ на частоте 60 Гц. Частота дискретизации при моделировании — 200 кГц. Параметры ВОГ заданы следующими: длина волокна $L=1000$ м, диаметр $D=100$ мм, амплитуда фазовой модуляции — $3/4\lambda$, частота замыкания обратной связи — 12 500 Гц.

Изменение угловой скорости согласно принципу работы прибора пропорционально мощности светового сигнала на фотоприемнике с учетом разного количества членов (2—3) разложения в ряд Тейлора.

На рис. 1 представлен результат моделирования погрешности ВОГ при $\varepsilon=5000$ $^\circ/\text{с}^2$ (при учете второй степени нелинейности — сплошная линия, полной нелинейности — штриховая линия).

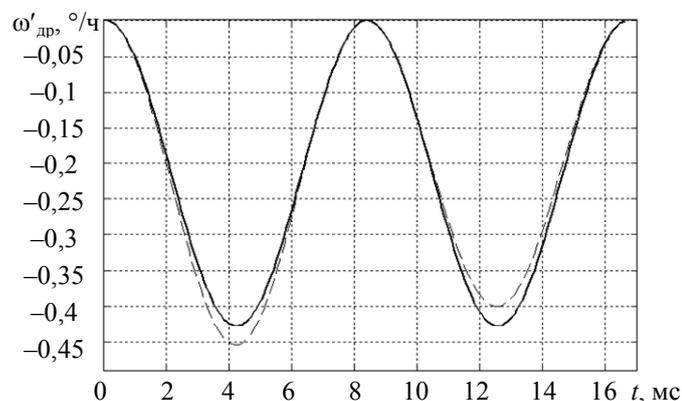


Рис. 1

Анализ графика показывает, что разница между полной погрешностью и ее составляющей, вызванной второй степенью нелинейности, незначительна. Для практики существенным является среднее значение погрешности за период колебания датчика. Для приведенного случая эти значения отличаются менее чем на 0,1 % и составляют 0,214 °/ч. Аналогичная ситуация наблюдается во всем диапазоне промоделированных угловых ускорений. Таким образом, погрешность ВОГ при угловых колебаниях и реально заданных параметрах сигнала практически полностью определяется второй степенью разложения (2—3) рабочей характеристики интерферометра, что подтверждает справедливость предложенной формулы (11).

Эксперимент. Для проверки справедливости полученной формулы проведены натурные испытания двух образцов ВОГ (производства ПАО „ПНППК“) с длиной волокна 1000 м. Прибор № 1 имеет глубину модуляции $3\pi/4$ и частоту обратной связи 12,5 кГц, а прибор № 2 — соответственно $7\pi/8$ и 6,25 кГц. Испытательная установка позволяет создать угловые ускорения до 100 000 °/с². Воздействие — угловые колебания на фиксированной частоте 60 Гц в течение 3—5 мин — позволяет оценить дрейф с достаточной точностью. Полученные результаты, взятые с обратным знаком, для этих приборов представлены на рис. 2.

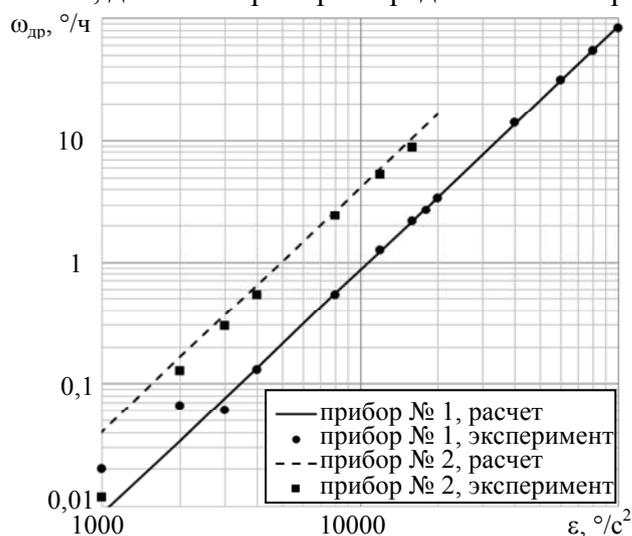


Рис. 2

Как видно, зарегистрированные зависимости дрейфов ВОГ от амплитуды угловых ускорений практически совпадают с расчетными значениями.

Заключение. Разработана математическая модель погрешности ВОГ с замкнутой обратной связью при воздействии угловых ускорений. Показано, что погрешность вызвана второй степенью разложения нелинейной характеристики интерферометра в ряд Тейлора. Работа ВОГ с замкнутой обратной связью не устраняет данную погрешность.

Экспериментальным путем получены зависимости погрешности ВОГ от угловых ускорений, подтверждающие расчетные зависимости для нескольких вариантов конструкций ВОГ.

Для повышения точности ВОГ в условиях интенсивных угловых колебаний необходимо алгоритмически учитывать квадратичную составляющую нелинейности при обработке показаний датчика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колеватов А. П., Николаев С. Г., Андреев А. Г., Ермаков В. С., Струк В. К., Парфенов А. С., Нестеров И. И. Успехи в разработке платформенных инерциальных навигационных систем на базе волоконно-оптических гироскопов // XVI Санкт-Петербургская междунар. конф. по интегрированным навигационным системам: Сб. материалов. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2009. С. 13—20.

2. Коркишко Ю. Н., Федоров В. А., Прилуцкий В. Е., Пономарев В. Г., Морев И. В., Скрипников С. Ф., Хмелевская М. И., Буравлев А. С., Кострицкий С. М., Федоров И. В., Зуев А. И., Варнаков В. К. Бесплатформенные инерциальные навигационные системы на основе волоконно-оптических гироскопов // Гироскопия и навигация. 2014. № 1 (84). С. 14—25.
3. Елисеев Д. П. Обзор средств защиты инерциальных чувствительных элементов от инерционных воздействий // Навигация и управление движением: Материалы докл. XIV конф. молодых ученых / Под общ. ред. В. Г. Пешехонова. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2012. С. 464—470.
4. Антонова М. В., Корнюхин А. В. Виброиспытания бесплатформенного инерциального блока на базе волоконно-оптических гироскопов // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 3 (3). С. 43.
5. Колеватов А. П., Ульяновская Т. А., Зобачев Д. Ю., Федоров И. В. Способ повышения стойкости прецизионной бесплатформенной инерциальной навигационной системы на базе волоконно-оптических гироскопов к экстремальным ударным воздействиям // Материалы XXXI конф. памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н. Н. Острякова. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2018. С. 87—94.
6. Курбатов А. М., Курбатов Р. А. Вибрационная ошибка угловой скорости волоконно-оптического гироскопа и методы ее подавления // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58, № 8. С. 842—849.
7. Есипенко И. А., Лыков Д. А. Метод верификации упругих деформаций в контуре волоконно-оптического гироскопа // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 8. С. 728—733.
8. Антонова М. В., Матвеев В. А. Модель погрешности волоконно-оптического гироскопа при воздействии тепловых и магнитных полей // Вестн. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2014. № 3 (96). С. 73—80.
9. Погорелая Д. А., Смоловик М. А., Волковский С. А., Михеев М. А., Алейник А. С., Стригалева В. Е. Особенности настройки ПИД-регулятора в цепи обратной связи волоконно-оптического гироскопа // Гироскопия и навигация. 2017. № 1 (96). С. 119—127.
10. Li H., Cui L., Lin Z., Zhang C. Analysis and optimization of dynamic measurement precision of fiber optic gyroscope // Mathematical Problems in Engineering. 2013. N 3. P. 1—9. DOI: 10.1155/2013/265895.
11. Lefevre H. C. Fiber Optic Gyroscope. London: Artech House, 2014.

Сведения об авторе

Антон Валентинович Микляшев — канд. техн. наук; Пермская научно-производственная приборостроительная компания, научно-технический центр; начальник бюро;
E-mail: antvalmik@gmail.com

Поступила в редакцию
17.06.19 г.

Ссылка для цитирования: Микляшев А. В. Погрешность волоконно-оптического гироскопа при угловых колебаниях // Изв. вузов. Приборостроение. 2019. Т. 62, № 11. С. 982—988.

ERROR OF FIBER-OPTIC GYROSCOPE AT ANGULAR OSCILLATIONS

A. V. Miklyashev

Perm Scientific and Production Instrument-Making Company, 614990, Perm, Russia
E-mail: antvalmik@gmail.com

A fiber-optic gyroscope with rectangular phase modulation and closed feedback is considered. An error formula of this sensor, arising due to the known nonlinearity of the interferometer, is derived. It is shown that the gyroscope error depends on the angular acceleration. Results of simulation modeling are presented, allowing to estimate the admissibility of simplifications made in the derivation of the formula. Experimental confirmation of the obtained dependence is presented for two modifications of the fiber-optic gyroscope.

Keywords: fiber-optic gyroscope, nonlinearity of the interferometer, vibration, angular acceleration

REFERENCES

1. Kolevatov A.P., Nikolayev S.G., Andreyev A.G., Ermakov V.S., Struk V.K., Parfenov A.S., Nesterov I.I. *XVI Sankt-Peterburgskaya mezhdunarodnaya konferentsiya po integrirovannym navigatsionnym sistemam* (XVI St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems), Proceedings, St. Petersburg, 2009, pp. 13–20. (in Russ.)
2. Korkishko Y.N., Fedorov V.A., Prilutskii V.E., Ponomarev V.G., Morev I.V., Skripnikov S.F., Khmelevskaya M.I., Buravlev A.S., Kostritskii S.M., Fedorov I.V., Zuev A.I., Varnakov V.K. *Gyroscopy and Navigation*, 2014, no. 4(5), pp. 195–204.
3. Eliseyev D.P. *Navigatsiya i upravleniye dvizheniyem* (Navigation and Traffic Control), Materials of the XIV Conference of Young Scientists, St. Petersburg, 2012, pp. 464–470. (in Russ.)
4. Antonova M.V., Korniyukhin A.V. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2012, no. 3(3), pp. 43. (in Russ.)
5. Kolevatov A.P., Ul'yanovskaya T.A., Zobachev D.Yu., Fedorov I.V. *Materialy XXXI konferentsii pamyati vydayushchegosya konstruktora giroskopicheskikh priborov N.N. Ostryakova* (Materials of the XXXI Conference in Memory of the Outstanding Designer of Gyroscopic Instruments N.N. Ostryakov), St. Petersburg, 2018, pp. 87–94. (in Russ.)
6. Kurbatov A.M., Kurbatov R.A. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2013, no. 8(58), pp. 840–846.
7. Esipenko I.A., Lykov D.A. *Journal of Instrument Engineering*, 2017, no. 8(60), pp. 728–733. (in Russ.)
8. Antonova M.V., Matveev V.A. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2014, no. 3(96), pp. 73–80. (in Russ.)
9. Pogorelaya D.A., Smolovik M.A., Volkovskiy S.A., Mikheev M.A., Aleynik A.S., Strigalev V.E. *Gyroscopy and Navigation*, 2017, no. 3(8), pp. 235–239.
10. Li H., Cui L., Lin Z., Zhang C. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, no. 3, pp. 1–9.
11. Lefevre H.C. *Fiber Optic Gyroscope*, London, Artech House, 2014.

Data on author

Anton V. Miklyashev — PhD; Perm Scientific and Production Instrument-Making Company, Scientific-Technical Center; Head of Bureau;
E-mail: antvalmik@gmail.com

For citation: Miklyashev A. V. Error of fiber-optic gyroscope at angular oscillations. *Journal of Instrument Engineering*. 2019. Vol. 62, N 11. P. 982–988 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-11-982-988