



DOI: 10.22363/2312-8143-2026-27-1-81-92

EDN: HNVBCJ

Научная статья / Research article

Исследование точностных параметров волоконно-оптического гироскопа для малогабаритного инерциального измерительного блока

А.В. Орешкин^a, А.С. Жульков^a, С.Н. Сидоров^a, Д.Ю. Поленов^b

^a Акционерное общество «Научно-производственное объединение измерительной техники», Королев, Российская Федерация

^b Мытищинский филиал Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана,

Мытищи, Российская Федерация

✉ oreshkins76@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 14 августа 2025 г.

Доработана: 20 октября 2025 г.

Принята к публикации: 30 октября 2025 г.

Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Аннотация. Рассмотрены ключевые вопросы создания волоконно-оптических гироскопов с большим диапазоном измерения угловой скорости для малогабаритного инерциального измерительного блока для широкого класса высокоманевренных объектов. Цель исследования — выходные характеристики волоконно-оптических гироскопов с диапазоном измерения угловой скорости более 300°/с, погрешность нулевого сигнала волоконно-оптических гироскопов от запуска к запуску, погрешность нулевого сигнала волоконно-оптических гироскопов при различной температуре для возможности применения в составе инерциального измерительного блока. Представлены результаты исследований выходной характеристики параметров волоконно-оптических гироскопов по диапазону измерения угловой скорости, температуры и от включения к включению для малогабаритного инерциального измерительного блока (ИИБ). Методология исследования строилась на принципе построения волоконно-оптического гироскопа без обратной связи с принципом прямого преобразования, принцип действия которого основан на эффекте Саньяка. Дополнительно исследована возможность применения волоконно-оптических гироскопов с рабочей длиной оптической волны 1,3 и 1,75 мкм и большим диапазоном измерения угловой скорости, что подтверждает целесообразность их использования в составе малогабаритного ИИБ.

Ключевые слова: эффект Саньяка, волоконно-оптический гироскоп, погрешность нулевого сигнала, погрешность от запуска к запуску, приборостроение

Вклад авторов

Орешкин А.В. — анализ научной литературы, выводы и рекомендации, разработка программ и методик испытаний, устранение ошибок в проектном решении, подготовка текста рукописи; Жульков А.С. — общая концепция исследования; Сидоров С.Н., Поленов Д.Ю. — методология проведения экспериментальных исследований для обеспечения заданных требований к малогабаритному ИИБ. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

Для цитирования

Орешкин А.В., Жульков А.С., Сидоров С.Н., Поленов Д.Ю. Исследование точностных параметров волоконно-оптического гироскопа для малогабаритного инерциального измерительного блока // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2026. Т. 27. № 1. С. 81–92. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-81-92> EDN: HNVBCJ

© Орешкин А.В., Жульков А.С., Сидоров С.Н., Поленов Д.Ю., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Investigation of the Accuracy Parameters of a Fiber-Optic Gyroscope for a Small-Sized Inertial Measuring Unit

Alexander V. Oreshkin^a, Alexander S. Zhulkov^a,
Sergey N. Sidorov^a, Dmitry Yu. Polenov^b

^a Joint-Stock Company Scientific and Production Association of Measuring Equipment, *Korolev, Russian Federation*

^b Mytitschi Branch of BMSTU, *Mytitschi, Russian Federation*

✉ oreshkins76@yandex.ru

Article history

Received: August 14, 2025

Revised: October 20, 2025

Accepted: October 30, 2025

Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

Abstract. The study addresses key issues in the development of fiber-optic gyroscopes with an extended angular velocity measurement range for a Small-Sized Inertial Measuring Unit intended for a wide class of highly maneuverable objects. The study focuses on the output characteristics of fiber-optic gyroscopes with an angular velocity range exceeding 300°/s, as well as on zero-bias error between successive power-on cycles and zero-bias error under varying temperature conditions, with a view to their integration into a Small-Sized Inertial Measuring Unit. The results of experimental investigations into the output characteristics of fiber-optic gyroscopes (FOG) are presented, including their performance over the angular velocity range, across temperature variations, and under repeated power-on conditions for a Small-Sized Inertial Measuring Unit (IMU). The research methodology is based on the design of an open-loop fiber-optic gyroscope employing direct conversion, with its operating principle derived from the Sagnac effect. In addition, the feasibility of using fiber-optic gyroscopes operating at optical wavelengths of 1.3 μm and 1.75 μm with an extended angular velocity range has been examined. The findings confirm the suitability of such gyroscopes for incorporation into a Small-Sized Inertial Measuring Unit.

Keywords: Sagnac effect, fiber-optic gyroscope, zero signal error, inertial measurement unit, error from launch to launch, instrumentation

Authors' contribution

Oreshkin A.V. — literature review, formulation of conclusions and recommendations, development of testing programs and procedures, correction of design errors, and manuscript preparation; *Zhulkov A.S.* — overall research concept; *Sidorov S.N., Polenov D.Yu.* — development of the experimental research methodology to ensure compliance with the specified requirements for the Small-Sized Inertial Measuring Unit. All authors read and approved the final version of the article.

For citation

Oreshkin AV, Zhulkov AS, Sidorov SN, Polenov DYu. Investigation of the accuracy parameters of a fiber-optic gyroscope for a small-sized inertial measuring unit. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2026;27(1):81–92. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2026-27-1-81-92> EDN: HNVBCJ

Введение

Передовой технологией в производстве инерциальных измерительных блоков (ИИБ) является технология волоконно-оптических гироскопов (ВОГ), принцип действия которых основан на эффекте Саньяка¹ [1]. ИИБ на базе

таких гироскопов не имеет подвижных частей, абсолютно бесшумна и не требует специального обслуживания и имеет хорошие показатели наработки на отказ (до 80 000 часов у некоторых моделей) и малое энергопотребление (десятки Ватт). Технологии ВОГ пришли на смену лазерно-кольцевым гироскопам (ЛКГ), имеющим

¹ *Матвеев В.В., Распопов В.Я.* Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем : учебное пособие для вузов. Санкт-Петербург : ЦНИИ «Электроприбор», 2009. 280 с. ISBN 978-5-900780-73-3 EDN: QNWJZT

подвижные части и требующим периодического обслуживания по калибровке и замене износившихся узлов и деталей, а также с относительно высоким уровнем энергопотребления [2; 3].

Фундаментальной задачей, частичные результаты которой представлены в данной статье, является удовлетворение требованиям технического задания на разработку ИИБ. Требования технического задания на разработку ИИБ

в части датчиков измерения угловой скорости представлены в таблице.

При разработке ВОГ учитывались современные тенденции разработки ВОГ таких организаций, как АО «Физоптика» (группа ВГ 103), ООО НПК «Оптолинк» (гироскопы ОИУС200, ОИУС501) и АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», продукция которых удовлетворяет требованиям в заявленном техническом задании.

Требования технического задания на разработку ИИБ в части датчиков измерения угловой скорости
Requirements of the technical specification for the development of IMU in terms of sensors for measuring angular velocity

| Параметр / Parameter | Значение / Value |
|--|------------------|
| Диапазон измеряемых скоростей, °/с / The range of measured speeds, °/s | ± 300 |
| Погрешность масштабного коэффициента, % / The error of the scale factor, % | 0,05 |
| Рабочая полоса частот, Гц / Operating frequency band, Hz | (0...400) |
| Случайный дрейф нуля при термокомпенсации, ч / Random zero drift during thermal compensation, hour | < 0,15 |
| Спектральная плотность мощности шума, °√ч / Noise power spectral density, °√hour | 0,02 |
| Диапазон рабочих температур, °C / Operating temperature range, °C | (-60 ... + 60) |
| Напряжение питания, В / Supply voltage, V | (5±0,25) |
| Случайный дрейф нуля от запуска к запуску, °√ч / Random zero drift from launch to launch, °√hour | < 5 |
| Потребляемая мощность, Вт / Power consumption, W | < 7 |
| Выходной сигнал, с / Output signal, s | RS-422 |
| Время готовности / Readiness time | 3 |
| Допустимая влажность, % / Permissible humidity, % | (0...80) |
| Масса, кг / Mass, kg | < 0,15 |

Источники: выполнено А.В. Орешкиным, А.В. Жульковым, С.Н. Сидоровым, Д.Ю. Поленовым.
 Source: by A.V. Oreshkin, A.V. Zhulkov, S.N. Sidorov, D.Yu. Polenov.

При выборе направлений исследований по данному вопросу учитывался мировой опыт развития гироскопической техники, однако предпочтение было отдано реальному состоянию отечественной промышленности, учитывая потенциальную область применения ИИБ.

Существует два основных принципа построения волоконно-оптического гироскопа [4]:

- гироскоп с обратной связью с частотным выходом;
- гироскоп без обратной связи с принципом прямого преобразования.

Основным преимуществом первого варианта является линейный выход, отсутствие необходимости применять АЦП и большой диапазон измерения. В то же время достижение прием-

лемых характеристик требует применения сложной технологической базы, что приводит к удорожанию продукции. Кроме того, частотный выход требует проведения операции дифференцирования выходной информации при оценке угловой скорости, необходимой для стабилизации изделия относительно центра масс, что приводит к необходимости уменьшения цены импульса. В ряде случаев, даже для современных изделий, необходимо иметь аналоговый выход по угловой скорости, что еще более усложняет структурную схему прибора.

Решение указанных выше задач наиболее просто решается во второй схеме в особенности при использовании аналогового выхода. При этом также удается достичь минимальных габаритных характеристик.

ритно-весовых характеристик и энергопотребления. К числу основного недостатка данной схемы относится нелинейный выход, что требует решения достаточной сложной задачи линеаризации показаний прибора [5; 6]. Как показывает опыт разработки прототипов ИИБ такими организациями, как АО «Физоптика», ПАО «ЛНППК», ООО НПК «Оптолинк» и АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор» при использовании современных микропроцессоров и наземного оборудования для калибровки, данная задача может быть успешно решена. В связи с этим в качестве основного направления в части волоконно-оптического гироскопа для дальнейших исследований принимается оптико-физическая схема без обратной связи, основными критериями точностных характеристик которой являются:

- выходные характеристики параметров волоконно-оптических гироскопов по диапазону измерения угловой скорости;
- выходные характеристики параметров волоконно-оптических гироскопов от запуска к запуску;
- выходные характеристики параметров волоконно-оптических гироскопов при различной температуре.

1. Экспериментальные исследования выходной характеристики параметров волоконно-оптических гироскопов по диапазону измерения угловой скорости для малогабаритного ИИБ

Учитывая цели исследования, были рассмотрены следующие ключевые вопросы по возможности создания волоконно-оптических гироскопов с большим диапазоном измерения угловой скорости для малогабаритного инерциального измерительного блока для широкого класса высокоманевренных объектов:

- исследование выходной характеристики волоконно-оптических гироскопов с диапазоном измерения угловой скорости более 300 °/с;

- исследование погрешности нулевого сигнала ВОГ от запуска к запуску;
- исследование нулевого сигнала ВОГ при различной температуре.

Диапазон измерения угловой скорости волоконно-оптического гироскопа без обратной связи определяется следующими факторами:

- выбором размера и длины волокна в волоконной катушке гироскопа;
- рабочим диапазоном входного напряжения АЦП;
- диапазоном выходного напряжения ВОГ по постоянному току.

Интересной особенностью для применения ВОГ без обратной связи является чувствительность датчика, которая определяется наклоном кривой модуляции, также называемой индексом модуляции. В процессе исследований необходимо также учитывать такие параметры, как диапазон измерений и мощность подключения.

Чтобы повысить чувствительность ВОГ без обратной связи, была предложена многопроходная конфигурация. В этом случае свет передается обратно от первого принимающего волокна ко второму, параллельному передающему волокну, далее ко второму принимающему волокну и так далее, пока не будет выполнено несколько проходов через промежуток. Идея заключается в том, что многократное прохождение должно повысить чувствительность, просто увеличивая потери мощности при определенном поперечном смещении передающего волокна. Возможность реализации этого была проанализирована экспериментально и теоретически в рамках работы, лежащей в основе этого тезиса [7; 8].

Выходной сигнал ВОГ без обратной связи $U_{\text{вог}}$ пропорционален синусу измеряемой угловой скорости W^3 [7; 8]:

$$U_{\text{вог}} = K_{\text{вог}} J_1(M) \cdot \sin(T_{\text{вог}} \cdot W); \quad (1)$$

$$T_{\text{вог}} = (8 \cdot p \cdot S) / (1 \cdot C),$$

³ ГОСТ Р ИСО 5725-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Введ. 01.11.2002. Москва : ИПК Издательство стандартов, 2002.

где $K_{\text{об}}$ — коэффициент передачи электронного блока ВОГ; J_1 — функция Бесселя первого порядка; M — индекс модуляции; S — площадь, охватываемая оптическим контуром; l — длина оптической волны; C — скорость света.

Для обеспечения однозначности значений выходного сигнала ВОГ в рабочем диапазоне угловой скорости необходимо обеспечить следующее соотношение [9]:

$$T_{\text{вог}} \cdot W_{\text{max}} < p / 2. \quad (2)$$

Для формирования требования к длине оптического волокна в оптическом контуре ВОГ в выражение (2) подставляется формула для параметра $T_{\text{вог}}$ [10]:

$$(8 \cdot \pi \cdot L \cdot S_k) / (C \cdot \lambda \cdot P) \Omega_{\text{max}} < \pi / 2, \quad (3)$$

где L — длина волоконного контура ВОГ; S_k — площадь катушки ВОГ; P — периметр катушки ВОГ.

Для применяемых в ИИБ АЦП типа сигма-дельта с учетом их схемы включения рабочий диапазон входного напряжения не превышает $\pm 1,25$ В, а диапазон выходного напряжения ВОГ по постоянному току составляет $\pm 1,20$ В.

Целью исследования выходных характеристик волоконно-оптических гироскопов с

диапазоном измерения угловой скорости более $300^\circ/\text{с}$ является проверка соответствия выходного сигнала ВОГ по напряжению при максимальной угловой скорости диапазону входного напряжения АЦП и проверка соответствия выходного сигнала ВОГ по напряжению при различной угловой скорости функции.

Исследования проводились на трех волоконно-оптических гироскопах, два из которых с рабочей длиной оптической волны $0,82$ мкм имели величину постоянной времени $T_{\text{вог}} \sim 0,235$ с, а один гироскоп с рабочей длиной волны $1,3$ мкм имел постоянную времени $T_{\text{вог}} \sim 0,135$ с. Соответственно, ожидаемая максимальная измеряемая угловая скорость в первом случае составляла $382^\circ/\text{с}$, а во втором — $670^\circ/\text{с}$.

На рис. 1 и 2 приведены фотографии испытываемых макетов ВОГ.

Испытание ВОГ проводилось на вращающемся основании с применением поворотного стенда. На рис. 3 приведена схема проведения испытаний. Испытания проводились с использованием следующей аппаратуры: а) поворотный стенд АССДНПУ МФУ.426441.001 ТО; б) мультиметр АРРА-109; в) ПК; г) лабораторный пульт настройки ВОГ; д) источник питания GPS-3030DD.

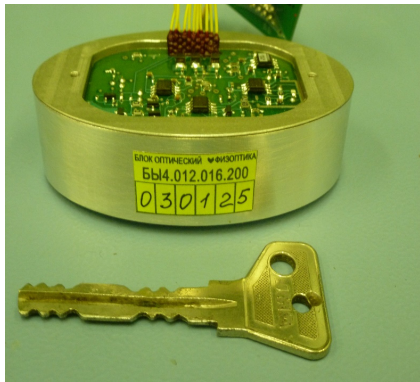


Рис. 1. ВОГ (№ 1) с рабочей длиной волны $1,3$ мкм
Источник: выполнено А.В. Орешкиным, А.В. Жульковым, С.Н. Сидоровым, Д.Ю. Поленовым.
Figure 1. Fiber-optic gyroscope (No. 1) with an operating wavelength of 1.3 microns
Source: by A.V. Oreshkin, A.V. Zhulkov, S.N. Sidorov, D.Yu. Polenov.

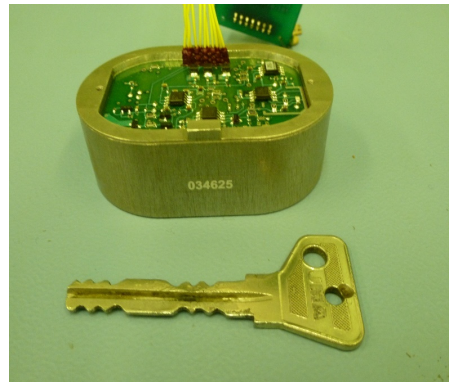


Рис. 2. ВОГ (№ 2) с рабочей длиной волны $0,82$ мкм
Источник: выполнено А.В. Орешкиным, А.В. Жульковым, С.Н. Сидоровым, Д.Ю. Поленовым.
Figure 2. Fiber-optic gyroscope (No. 2) with an operating wavelength of 0.82 microns
Source: by A.V. Oreshkin, A.V. Zhulkov, S.N. Sidorov, D.Yu. Polenov.

⁴ Степанов О.А. Методы обработки навигационной измерительной информации: учебное пособие. Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2021. 196 с.

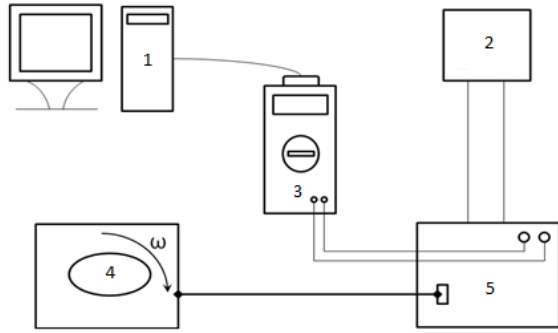


Рис. 3. Схема проведения испытаний на стенде:
 1 — ПК; 2 — источник питания;
 3 — мультиметр; 4 — ВОГ; 5 — пульт
 Источники: выполнено А.В. Орешкиным,
 А.В. Жульковым, С.Н. Сидоровым, Д.Ю. Поленовым.

Figure 3. The scheme of conducting tests on the stand:
 1 — PC; 2 — power supply; 3 — multimeter;
 4 — VOG; 5 — remote control
 Source: by A.V. Oreshkin,
 A.V. Zhulkov, S.N. Sidorov, D.Yu. Polenov.

Измерялось значение выходного напряжения ВОГ при различной задаваемой угловой скорости от 13,5 до 243°/с. Время измерения при каждой угловой скорости составляло 2 мин.

На рис. 4–6 маркерами показаны полученные значения выходного сигнала для трех

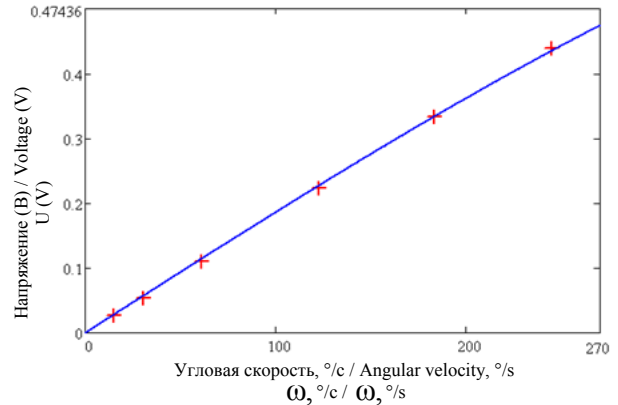


Рис. 4. Результаты измерения при различной угловой скорости сигнала ВОГ № 1 с рабочей длиной оптической волны 1,3 мкм
 Источники: выполнено А.В. Орешкиным,
 А.В. Жульковым, С.Н. Сидоровым, Д.Ю. Поленовым.

Figure 4. Measurement results at different angular velocities of the FOGNo. 1 signal with an operating optical wavelength of 1.3 microns
 Source: by A.V. Oreshkin,
 A.V. Zhulkov, S.N. Sidorov, D.Yu. Polenov.

испытываемых ВОГ при различных угловых скоростях вращения. На этих же рисунках в виде непрерывного графика приведена расчетная зависимость выходного сигнала гироскопа от измеряемой угловой скорости согласно формуле (1).

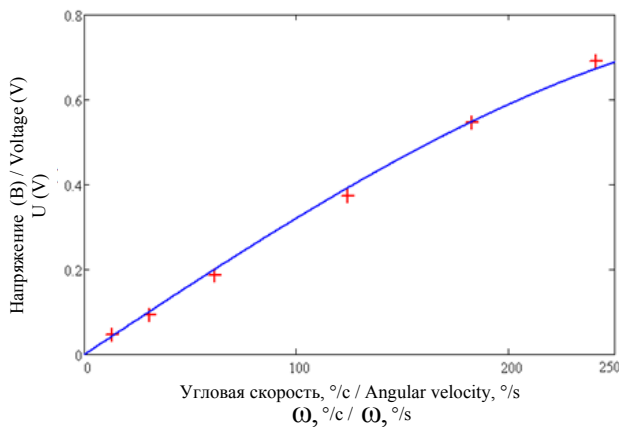


Рис. 5. Результаты измерения при различной угловой скорости сигнала ВОГ № 2 с рабочей длиной оптической волны 0,82 мкм
 Источники: выполнено А.В. Орешкиным,
 А.В. Жульковым, С.Н. Сидоровым, Д.Ю. Поленовым.

Figure 5. Measurement results at different angular velocities of the FOGNo. 2 signal with an operating optical wavelength of 0.82 microns
 Source: by A.V. Oreshkin,
 A.V. Zhulkov, S.N. Sidorov, D.Yu. Polenov.

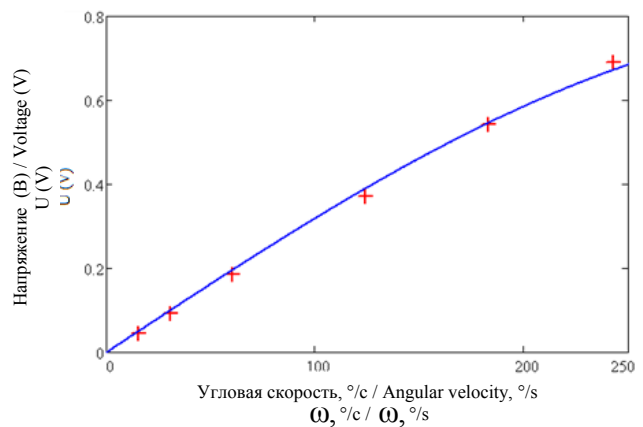


Рис. 6. Результаты измерения при различной угловой скорости сигнала ВОГ № 3 с рабочей длиной оптической волны 0,82 мкм
 Источники: выполнено А.В. Орешкиным,
 А.В. Жульковым, С.Н. Сидоровым, Д.Ю. Поленовым.

Figure 6. Measurement results at different angular velocities of the FOGNo. 3 signal with an operating optical wavelength of 0.82 microns
 Source: by A.V. Oreshkin,
 A.V. Zhulkov, S.N. Sidorov, D.Yu. Polenov.

Как видно из графиков, зависимость выходных сигналов всех трех ВОГ от угловой скорости близка к соответствующим теоретическим функциям. Одновременно использование расчетных функций позволяет экстраполировать экспериментальные данные по выходному сигналу для гироскопа с рабочей длиной волны на 1,3 мкм ($T_{\text{вог}} \sim 0,135$ с). Выходное напряжение данных ВОГ по постоянному току при угловой скорости $300^\circ/\text{с}$ не превысит 0,8 В, что не превышает допустимую величину входного напряжения сигма-дельта АЦП.

2. Экспериментальные исследования выходной характеристики параметров волоконно-оптических гироскопов от запуска к запуску для малогабаритного ИИБ

Целью исследования погрешности нулевого сигнала ВОГ от запуска к запуску было определение при предварительных экспериментальных исследованиях возможности обеспечения заданного уровня погрешности нулевого по каналу ДУСов сигнала от запуска к запуску ($5^\circ/\text{ч}$).

Исследование погрешности нулевого сигнала ВОГ от запуска к запуску проводилось в нормальных температурных условиях.

Так же как и при измерении выходных характеристик волоконно-оптических гироскопов, исследования проводились на трех волоконно-оптических гироскопах, два из которых с рабочей длиной оптической волны 0,82 мкм имели величину постоянной времени $T_{\text{вог}} \sim 0,235$ с, а один гироскоп с рабочей длиной волны 1,3 мкм имел постоянную времени $T_{\text{вог}} \sim 0,135$ с.

Гироскопы находились на неподвижном основании, их оси чувствительности были ориентированы вертикально вверх.

Погрешность нулевого сигнала гироскопов определялась как случайное отклонение их средних значений в кратковременном запуске. Было выполнено 10 включений (запусков). Измерения проводились без применения алгорит-

мической компенсации температурной погрешности нулевого сигнала гироскопов.

Обработка результатов измерений осуществлялась по следующему алгоритму⁵ [11]:

$$\omega m_{\text{д}} = \varphi m_{\text{дср}} / \tau_{\text{изм}}; \quad (4)$$

$$\Omega_{\text{дср}} = (\sum \omega m_{\text{д}}) / 10; \quad (5)$$

$$\Delta \omega m_{\text{д}} = \omega m_{\text{д}} - \Omega_{\text{дср}}; \quad (6)$$

$$\delta \omega_{\text{д}} = \sqrt{\frac{\sum m (\Delta \omega m_{\text{д}})^2}{9}}; \quad (7)$$

$$D = D_x, D_y, D_z,$$

где $\varphi m_{\text{д}}$ — мгновенное значение угловой скорости при m -м включении; $\varphi m_{\text{дср}}$ — среднее значение угловой скорости за одно включение; m — номер включения; $\omega m_{\text{д}}$ — среднее значение измеренной угловой скорости при m -м включении; $\Omega_{\text{дср}}$ — среднее значение измеренной угловой скорости за 10 включений; $\Delta \omega m_{\text{д}}$ — отклонение среднего значения измеренной угловой скорости в m -м включении относительно среднего значения измеренной угловой скорости за 10 включений; $\delta \omega_{\text{д}}$ — среднеквадратическое отклонение измеренных значений угловой скорости за 10 включений.

На рис. 7–9 приведены графики значения отклонений среднего значения измеренной угловой скорости в различных включениях относительно среднего значения измеренной угловой скорости за 10 включений.

Случайная погрешность сигнала по результатам измерений (3σ) составила:

- для ВОГ № 1 с рабочей длиной оптической волны 0,82 мкм — $\pm 1,62^\circ/\text{ч}$;
- для ВОГ № 2 с рабочей длиной оптической волны 0,82 мкм — $\pm 2,97^\circ/\text{ч}$;
- для ВОГ № 3 с рабочей длиной оптической волны 1,3 мкм — $\pm 1,34^\circ/\text{ч}$.

Применение алгоритмической компенсации температурной погрешности нулевого сигнала гироскопов уменьшит значения случайной погрешности на 20–30 %.

⁵ Физоптика. Группа ВГ 091Б. Волоконно-оптические гироскопы. URL: <https://www.fizoptika.ru/> (дата обращения: 27.07.2025).

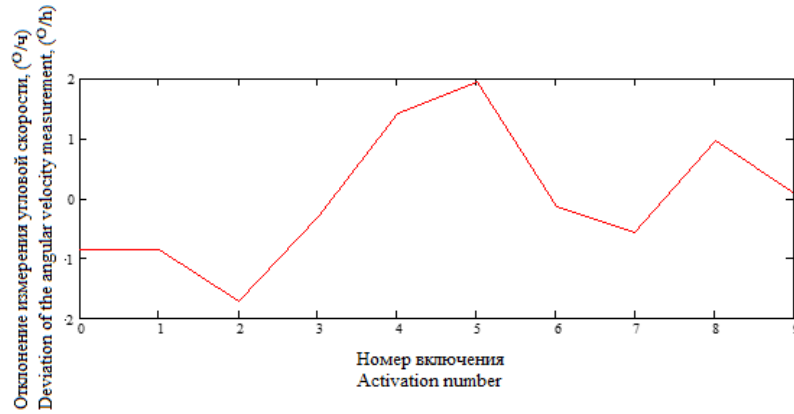


Рис. 7. Результаты измерения сигнала ВОГ № 1 с рабочей длиной оптической волны 0,82 мкм
Источник: выполнено А.В. Орешкиным, А.В. Жульковым, С.Н. Сидоровым, Д.Ю. Поленовым.

Figure 7. Measurement results of the FOG No. 1 signal with an optical wavelength of 0.82 microns
Source: by A.V. Oreshkin, A.V. Zhulkov, S.N. Sidorov, D.Yu. Polenov.

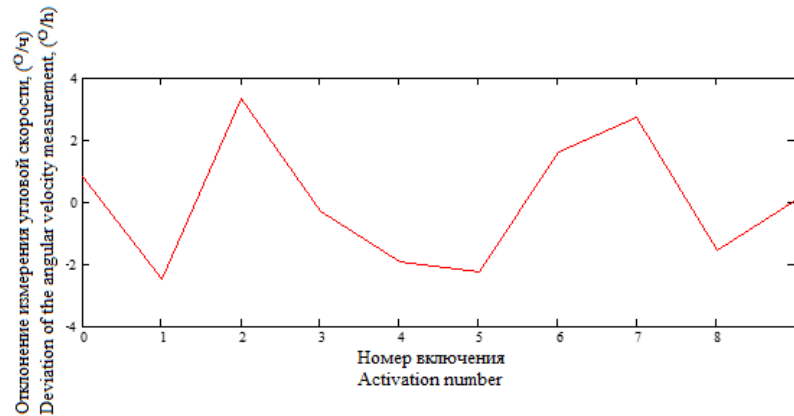


Рис. 8. Результаты измерения сигнала ВОГ № 2 с рабочей длиной оптической волны 0,82 мкм
Источник: выполнено А.В. Орешкиным, А.В. Жульковым, С.Н. Сидоровым, Д.Ю. Поленовым.

Figure 8. Measurement results of the FOG No. 2 signal with an optical wavelength of 0.82 microns
Source: by A.V. Oreshkin, A.V. Zhulkov, S.N. Sidorov, D.Yu. Polenov.

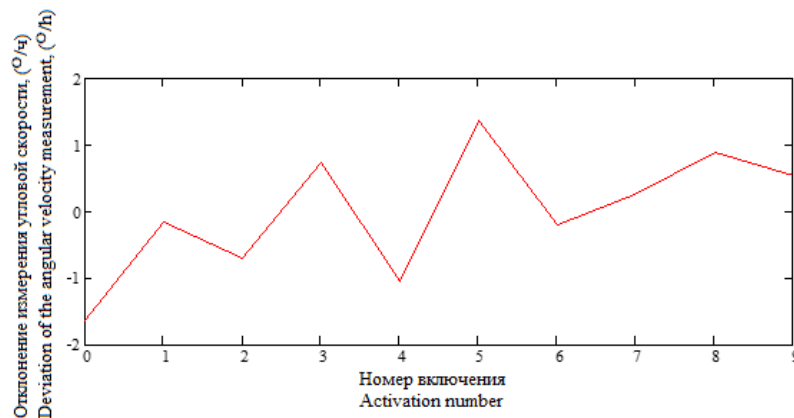


Рис. 9. Результаты измерения сигнала ВОГ № 3 с рабочей длиной оптической волны 1,3 мкм
Источник: выполнено А.В. Орешкиным, А.В. Жульковым, С.Н. Сидоровым, Д.Ю. Поленовым.

Figure 9. Measurement results of the FOG No. 3 signal with an optical wavelength of 1.3 microns
Source: by A.V. Oreshkin, A.V. Zhulkov, S.N. Sidorov, D.Yu. Polenov.

Полученные предварительные результаты испытаний с хорошим запасом подтверждают возможность обеспечения необходимого уровня погрешности нулевого сигнала по каналу ДУСов от запуска к запуску ($5^\circ/\text{ч}$).

3. Экспериментальные исследования выходной характеристики параметров волоконно-оптических гироскопов при различной температуре для малогабаритного ИИБ

Целью исследования погрешности нулевого сигнала ВОГ при различной температуре было определение при предварительных экспериментальных исследованиях величины изменения нулевого сигнала ВОГ при различной рабочей температуре.

Исследование погрешности нулевого сигнала ВОГ при различной температуре проводилось в диапазоне температур от 0 до 50°C .

Исследование изменения нулевых сигналов волоконно-оптических гироскопов при различной температуре проводилось на двух волоконно-оптических гироскопах с рабочей длиной оптической волны $0,82\ \mu\text{м}$, имеющих величину постоянной времени $T_{\text{вог}} \sim 0,235\ \text{с}$. Для сравнения было проведено измерение нулевого сигнала другого ВОГ с рабочей длиной оптической волны $0,82\ \mu\text{м}$, имеющего величину постоянной времени $T_{\text{вог}} \sim 0,135\ \text{с}$.

Гироскопы находились на неподвижном основании внутри климатической камеры, их оси чувствительности были ориентированы вертикально вверх. Изменение температуры в климатической камере задавалось по линейной функции от 0 до 50°C в течение 4 ч. Измерение началось после выдерживания выключенных гироскопов при 0°C в течение 2 ч.

Обработка результатов измерений проводилась по следующему алгоритму [11–15]:

$$\varphi m_{\text{дср}} = \left(\sum \varphi m_{\text{д}i} \right) / n; \quad (8)$$

$$\omega m_{\text{д}} = \varphi m_{\text{дср}} / \tau_{\text{изм}}; \quad (9)$$

$$D = D_x, D_y, D_z,$$

где $\varphi m_{\text{д}i}$ — мгновенное значение приращения угла при m -м включении; $\varphi m_{\text{дср}}$ — среднее значение приращения угла за один замер; m — номер замера; $\omega m_{\text{д}}$ — среднее значение измеренной угловой скорости при i -м замере.

На рис. 10 и 11 представлены графики изменения выходных сигналов двух ВОГ с рабочей длиной оптической волны $0,82\ \mu\text{м}$ с постоянной времени $T_{\text{вог}} \sim 0,35\ \text{с}$ при различной температуре. На рис. 12 приведен график изменения выходного сигнала одного ВОГ с рабочей длиной оптической волны $1,3\ \mu\text{м}$ (с постоянной времени $T_{\text{вог}} \sim 0,71\ \text{с}$) при различной температуре.

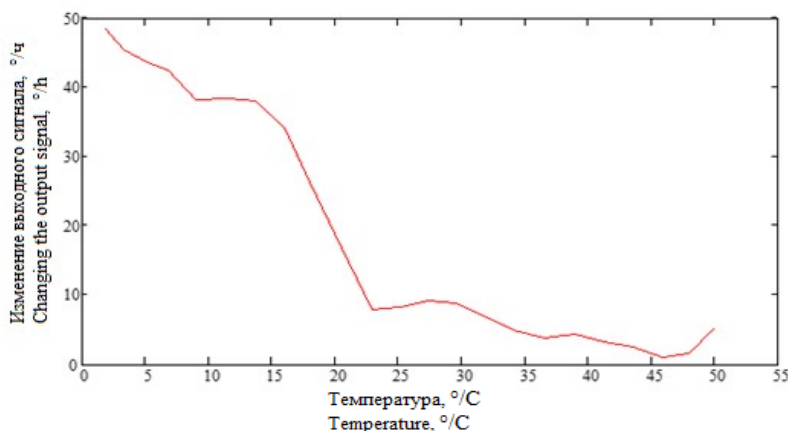


Рис. 10. Результаты измерения сигнала ВОГ № 1 с $T_{\text{вог}} \sim 0,235\ \text{с}$

Источник: выполнено А.В. Орешкиным, А.В. Жульковым, С.Н. Сидоровым, Д.Ю. Поленовым.

Figure 10. Measurement results of the FOG signal No. 1 with $T_{\text{FOG}} \sim 0.235\ \text{s}$

Source: by A.V. Oreshkin, A.V. Zhulkov, S.N. Sidorov, D.Yu. Polenov.

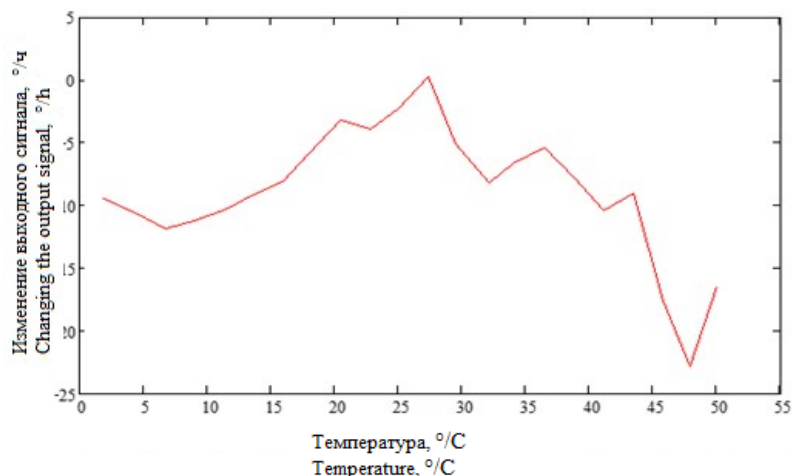


Рис. 11. Результаты измерения сигнала ВОГ № 2 с $T_{\text{вог}} \sim 0,235$ с

Источники: выполнено А.В. Орешкиным, А.В. Жульковым, С.Н. Сидоровым, Д.Ю. Поленовым.

Figure 11. Measurement results of the FOG signal No. 2 with $T_{\text{FOG}} \sim 0.235$ s
Source: by A.V. Oreshkin, A.V. Zhulkov, S.N. Sidorov, D.Yu. Polenov.

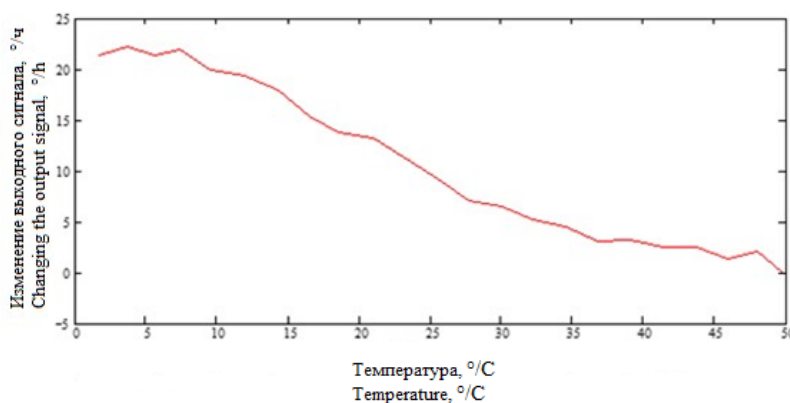


Рис. 12. Результаты измерения сигнала ВОГ № 3 с $T_{\text{вог}} \sim 0,135$ с

Источники: выполнено А.В. Орешкиным, А.В. Жульковым, С.Н. Сидоровым, Д.Ю. Поленовым.

Figure 12. Measurement results of the FOG signal No. 3 with $T_{\text{FOG}} \sim 0.135$ s
Source: by A.V. Oreshkin, A.V. Zhulkov, S.N. Sidorov, D.Yu. Polenov.

Сравнение графиков показывает, что величины изменений сигналов близки по значениям, однако формы графиков имеют существенные отличия. В АО «НПО ИТ» имеется значительный опыт разработки аппроксимирующих функций для компенсации погрешности нулевого сигнала с уровнем погрешности компенсации $(0,5–1)^\circ/\text{ч}$.

Соответственно по результатам полученных экспериментальных данных можно спрогнозировать возможность разработки аппроксимирующих функций для компенсации погреш-

ности нулевого сигнала ВОГ для разрабатываемой ИИБ ($T_{\text{вог}} \sim 0,135$ с) с таким же уровнем погрешности компенсации.

Заключение

Авторами в результате проведенных исследований сделан ряд выводов.

1. Проведенные исследования волоконно-оптических гироскопов с рабочей длиной оптической волны 1,3 и 1,75 мкм подтвердили возможность их применения для малогабаритного инерциального измерительного блока, с учетом

технического задания, по следующим параметрам:

- диапазону измерения угловой скорости $\pm 300^\circ/\text{с}$;
- погрешности нулевого сигнала от запуска к запуску $< 1^\circ/\text{ч}$;
- изменению величины нулевого сигнала от температуры $< 0,5\text{--}1^\circ/\text{ч}$.

2. Спрогнозирована возможность разработки аппроксимирующих функций для компенсации погрешности нулевого сигнала ВОГ для разрабатываемой ИИБ ($T_{\text{вог}} \sim 0,135 \text{ с}$) с таким же уровнем погрешности компенсации.

3. Полученные результаты имеют сопоставимые характеристики с флагманами отечественного приборостроения волоконно-оптических гироскопов, таких как АО «Физоптика», ПАО «ПНППК», ООО НПК «Оптолинк» и АО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор», а по некоторым характеристикам опережают конкурентов (масса исследуемые ВОГ не более 50 г, отрицательный предел температурного диапазона составляет минус $60^\circ/\text{с}$, полностью отечественная электронная элементная база и материалы).

Проведенные исследования точностных характеристик волоконно-оптических гироскопов подтверждают возможность применения в составе разрабатываемого малогабаритного инерциального измерительного блока, а также имеют все основания применения в широчайшей сфере гражданской, военной и космической промышленности.

Список литературы

1. Салычев О.С. Прикладная инерциальная навигация: проблемы и решения. Москва : BMSTU press, 2004. 302 с. ISBN 5-7038-2395-1
2. Лукьянов Д.П., Распов В.Я., Филатов Ю.В. Прикладная теория гироскопов. Санкт-Петербург : ЦНИИ «Электроприбор», 2021. 316 с. ISBN 978-5-91995-036-3
3. Гилев Д.Г. Оценка динамического диапазона датчика угловой скорости на основе волоконно-оптического резонатора // Прикладная фотоника. 2023. Т. 10. № 1. С. 116–130. <https://doi.org/10.15593/2411-4375/2023.1.07> EDN: UIJWQS
4. Патюрель И., Онтас И., Лефевр Э., Наполитано Ф. Бесплатформенная инерциальная навигационная система на основе ВОГ с уходом одна морская

миля в месяц: Мечта уже достижима? // Гироскопия и навигация. 2013. № 3 (82). С. 3–13. EDN: RCLGDP

5. Пешехонов В.Г. Перспективы развития гироскопии // Гироскопия и навигация. 2021. Т. 28. № 2. С. 3–10. EDN: VDBYAV

6. Унтилов А.А., Егоров Д.А., Рупасов А.В., Новиков Р.Л., Нефоросный С.Т., Азбелева М.П., Драницына Е.В. Результаты испытаний волоконно-оптического гироскопа // Гироскопия и навигация 2017. Т. 25. № 3. С. 78–85. <https://doi.org/10.17285/0869-7035.2017.25.3.078-085> EDN: ZMJAJT

7. Драницына Е.В. Калибровка измерительного модуля прецизионной БИНС на волоконно-оптических гироскопах : дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2016. 89 с. EDN: ELTBLD

8. Анучин О.Н. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов / под общей ред. академика РАН В.Г. Пешехонова. Изд. 2-е, перераб. и доп. Санкт-Петербург : ЦНИИ «Электроприбор», 2003. 390 с. ISBN 5-900780-47-3 EDN: QNRBVL

9. Сирая Т.Н. Вариация Аллана как оценка погрешности измерения // Гироскопия и навигация. 2010. Т. 69. № 2. С. 29–36. EDN: NTPIRR

10. Deppe O., Dorner G., König S., Martin T., Voigt S., Zimmermann S. MEMS and FOG Technologies for Tactical and Navigation Grade Inertial Sensors — Recent Improvements and Comparison // Sensors. 2017. Vol. 17. No. 3. Article no. 567. <https://doi.org/10.3390/s17030567>

11. Beller J. OTDRs and backscatter measurements // Fiber Optic Test and Measurement / D. Derickson (Ed.). New Jersey : Prentice-Hall PTR, 1998. ISBN 0-13-534330-5

12. Lefevre H.C. The Fiber-Optic Gyroscope: Achievement and Perspective // Gyroscopy and Navigation. 2012. Vol. 3. P. 223–226. <https://doi.org/10.1134/S2075108712040062>

13. Удд Э. Волоконно-оптические датчики : вводный курс для инженеров и научных работников. Москва : Техносфера, 2008. 520 с. ISBN 978-5-94836-191-8

14. Markley F.L., Crassidis J.L. Fundamentals of spacecraft attitude determination and control : Space technology library. New York : Springer, 2014. Vol. 33. 486 p. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4939-0802-8> (accessed: 21.04.2025).

15. Моторин А.В. Идентификация моделей погрешностей навигационных датчиков и средств коррекции методами нелинейной фильтрации : дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2023. 135 с.

References

1. Salychev OS. *Applied inertial navigation: problems and solutions*. Moscow: BMSTU Publ.; 2004. (In Russ.) ISBN 5-7038-2395-1.
2. Lukyanov DP, Raspopov VYa, Filatov YuV. *Applied theory of gyroscopes*. St. Petersburg: Concern Central

Research Institute Electropribor Publ.; 2021. (In Russ.) ISBN 978-5-91995-036-3

3. Gilev DG. Estimation of the dynamic range of the angular velocity sensor based on a fiber-optic resonator. *Applied Photonics*. 2023;10(1):116–130. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/2411-4375/2023.1.07> EDN: UIJWQS

4. Paturel Y, Honthaas J, Lefevre H, Napolitano F. One nautical mile per month FOG based strapdown inertial navigation system: A dream already within reach? *Gyroscopy and Navigation*. 2013;3(82):3–13. (In Russ.) EDN: RCLGDP

5. Peshekhonorov VG. The author of precision gyroscope. *Gyroscopy and Navigation*. 2020;11(2):188–192. <https://doi.org/10.1134/S2075108720020042> EDN: SQRNQO

6. Untilov AA, Egorov DA, Rupasov AV, Novikov RL, Neforosny ST, Azbeleva MP, Dranitsyna EV. Results of fiber-optic gyro testing. *Gyroscopy and Navigation*. 2017;25(3):78–85. (In Russ.) EDN: ZMJAJT

7. Dranitsyna EV. *Calibration of the measurement unit of a high-precision strapdown inertial navigation system using fiber-optic gyroscopes*. St Petersburg; 2016. (In Russ.) EDN: ELTBLD

8. Anuchin ON. *Integrated orientation and navigation systems for marine vehicles*. 2nd ed. St. Petersburg; Central Research Institute Electropribor Publ.; 2003. (In Russ.) ISBN 5-900780-47-3 EDN: QNRBVL

9. Siraya TN. Allan variation as an estimate of measurement error. *Gyroscopy and Navigation*. 2010;2:29–36. (In Russ.) EDN: NTPIRR

10. Deppe O, Dorner G, König S, Martin T, Voigt S, Zimmermann S. MEMS and FOG Technologies for Tactical and Navigation Grade Inertial Sensors — Recent Improvements and Comparison. *Sensors*. 2017;17(3):567. <https://doi.org/10.3390/s17030567>

11. Beller J. OTDR and backscatter measurements. *Fiber Optic Test and Measurement*. New Jersey: Prentice-Hall PTR; 1998. ISBN 0-13-534330-5

12. Lefevre HC. The fiber-optic gyroscope: Achievement and perspective. *Gyroscopy and Navigation*. 2012;3:223–226. <https://doi.org/10.1134/S2075108712040062>

13. Udd E. *Fiber-optic sensors*. Introductory course for engineers and researchers. Moscow: Technosphere Publ.; 2008. (In Russ.) ISBN 978-5-94836-191-8

14. Markley FL, Crassidis JL. *Fundamentals of spacecraft attitude determination and control*. New York: Springer Publ.; 2014. Part of the book series: Space Technology Library. Available from: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4939-0802-8> (accessed: 21.04.2025)

15. Motorin AV. *Identification of navigation sensor error models and aiding sources via nonlinear filtering*. St. Petersburg Publ.; 2023. (In Russ.)

Сведения об авторах

Орешкин Александр Владимирович, заместитель главного конструктора производства, Акционерное общество «Научно-производственное объединение измерительной техники», Российская Федерация, Московская обл., г. Королев, ул. Пионерская, д. 2; eLIBRARY SPIN-код: 9804-7286, ORCID: 0009-0004-5981-0769; e-mail: oreshkins76@yandex.ru

Жульков Александр Сергеевич, начальник отдела, Акционерное общество «Научно-производственное объединение измерительной техники», Российская Федерация, Московская обл., г. Королев, ул. Пионерская, д. 2; ORCID: 0009-0009-9954-1117; e-mail: 17082000.sg@gmail.ru

Сидоров Сергей Николаевич, главный специалист отдела, Акционерное общество «Научно-производственное объединение измерительной техники», Российская Федерация, Московская обл., г. Королев, ул. Пионерская, д. 2; ORCID: 0009-0000-5826-7638; e-mail: sid_nik@mail.ru

Поленов Дмитрий Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматического управления», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Мытищинский филиал, Российская Федерация, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1; eLIBRARY SPIN-код: 1191-7623; ORCID: 0000-0003-2227-5630; e-mail: Polenov@bmstu.ru

About the authors

Alexander V. Oreshkin, Deputy Chief Production Designer of the Joint-Stock Company Scientific and Production Association of Measuring Equipment, 2 Pionerskaya St, Korolev, Moscow Region, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 9804-7286, ORCID: 0009-0004-5981-0769; e-mail: oreshkins76@yandex.ru

Alexander S. Zhulkov, Head of the Department of the Joint-Stock Company Scientific and Production Association of Measuring Equipment, 2 Pionerskaya St, Korolev, Moscow Region, Russian Federation; ORCID: 0009-0009-9954-1117; e-mail: 17082000.sg@gmail.ru

Sergey N. Sidorov, Chief Specialist of the Department of the Joint-Stock Company Scientific and Production Association of Measuring Equipment, 2 Pionerskaya St, Korolev, Moscow Region, Russian Federation; ORCID: 0009-0000-5826-7638; e-mail: sid_nik@mail.ru

Dmitry Yu. Polenov, PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Mytishchi Branch of the Bauman Moscow State Technical University, 5 2-nd Baumanskaya, Moscow, 105005, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 1191-7623; ORCID: 0000-0003-2227-5630; e-mail: Polenov@bmstu.ru