

А. О. СИНЕЛЬНИКОВ, А. А. МЕДВЕДЕВ, Ю. Д. ГОЛЯЕВ, М. Е. ГРУШИН, Д. И. ЧЕКАЛОВ

РОЛЬ ТЕПЛОВЫХ ДРЕЙФОВ НУЛЯ В МАГНИТООПТИЧЕСКИХ ЗЕЕМАНОВСКИХ ЛАЗЕРНЫХ ГИРОСКОПАХ

В статье рассматривается проблема повышения эффективности работы магнитооптического зеемановского лазерного гироскопа при неблагоприятных воздействиях окружающей среды. Развитие и совершенствование технологии создания этого типа приборов позволяют существенно уменьшить источники их дрейфа нуля с сохранением остальных свойств и эксплуатационных характеристик. В частности, подтвержденная в ходе исследования возможность значительного снижения ключевых управляющих токов гироскопа, таких как токи накачки активной среды и управляющие токи частотной подставки, позволяет повысить измерительную точность как самих гироскопов, так и навигационных систем на их основе.

Ключевые слова: зеемановский лазерный гироскоп, лазерный датчик угловой скорости, ток накачки, дрейф нуля, тепловой дрейф лазерного гироскопа.

Введение

Тенденции развития средств транспорта и доставки свидетельствуют о все более возрастающей роли высокоманевренных и скоростных воздушных летательных аппаратов. Соответственно, в системах управления полетом этих летательных аппаратов должны применяться инерциальные блоки, способные устойчиво работать в жестких механико-климатических условиях эксплуатации с сохранением высоких точностных характеристик [1–5].

В этом смысле перспективными являются магнитооптические лазерные гироскопы (ЛГ) [6–12], обладающие высокой устойчивостью к неблагоприятному воздействию внешней среды.

На рис. 1 представлены ЛГ типа МТ-401М [13], разработанные и серийно выпускаемые АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха» и некоторыми другими заводами России, которые относятся к указанному классу приборов.

Синельников Антон Олегович. Кандидат технических наук, начальник участка, АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха» (Москва); доцент, Российский университет дружбы народов (Москва). ORCID 0000-0002-5579-3509.

Медведев Алексей Александрович. Инженер I категории, АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха». ORCID 0000-0002-7308-1839.

Голяев Юрий Дмитриевич. Доктор технических наук, начальник НПК-470 по лазерной гироскопии, старший научный сотрудник, АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха». Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Грушин Михаил Евгеньевич. Кандидат физико-математических наук, начальник отдела, АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха». ORCID 0000-0002-6177-9455.

Чекалов Дмитрий Игоревич. Начальник отдела, АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха». ORCID 0000-0001-7893-0919.

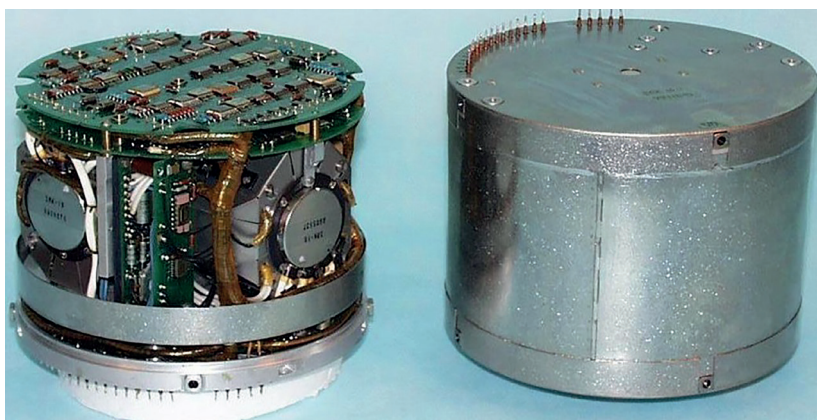


Рис. 1. Трехосный зеемановский ЛГ типа МТ-401М

Чувствительными элементами гироскопов МТ-401М являются лазерные датчики угловой скорости (ДУС) типа ЭК-104С (см. рис. 2) с магнитооптической частотной подставкой на эффекте Зеемана [14], реагирующие на повороты объекта в инерциальном пространстве относительно трех взаимно перпендикулярных осей.

Отсутствие подвижных узлов как в самом ЛГ МТ-401М, так и в его чувствительных элементах обеспечивает потенциально более высокую устойчивость приборов данного класса к различным внешним воздействиям [15], что в совокупности с малым временем готовности выгодно отличает их от других аналогов, представленных на рынке [16, 17].

Вместе с тем, чтобы обеспечить высокую устойчивость приборов к внешнему воздействию, в их конструкции используются элементы, дающие заметное тепловыделение [18]. Таковыми в составе зеемановского ДУС являются активная среда, катушки невзаимного устройства (НУ), а в самом гироскопе – блок частотной подставки (БЧП) и вторичный источник питания (ВИП). Это приводит к возникновению ряда негативных эффектов, которые влекут за собой снижение точностных характеристик ЛГ. Данная проблема актуальна для всех бесплатформенных инерциальных навигационных систем, построенных на их основе [19, 20].

Целью настоящей работы является исследование возможности снижения саморазогрева зеемановских ДУС в процессе работы в составе трехосного ЛГ для повышения его точностных и эксплуатационных характеристик.

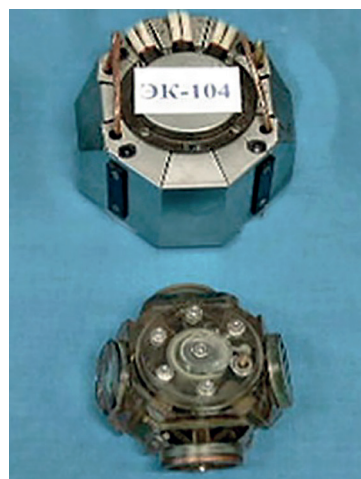


Рис. 2. Зеемановский ДУС типа ЭК-104С

Принцип работы и источники погрешности зеемановских датчиков и ЛГ

Для обеспечения функционирования зеемановских ДУС в ЛГ служат несколько электронных блоков:

- блок поджига газового разряда в датчиках, обеспечивающий первичный пробой активной среды в рабочих каналах кольцевого лазера (КЛ);

- блок стабилизаторов токов накачки (БСТ), обеспечивающий стабильное горение разряда газоразрядных промежутков (ГРП);
- БЧП, подающий знакопеременный ток в катушки невзаимного устройства;
- система регулировки периметра (СРП), обеспечивающая прецизионную стабилизацию периметра КЛ, питание которых осуществляется от ВИП, платы стабилизаторов и платы питания фотоприемников.

При вращении ДУС вокруг оси, перпендикулярной плоскости резонатора, возникает разность частот встречных волн, пропорциональная скорости вращения, которая описывается выражением

$$\Delta\nu = M \cdot \Omega_R, \quad (1)$$

где $\Delta\nu$ – разность частот встречных волн;

M – масштабный коэффициент;

Ω_R – реальная скорость вращения.

Полученная разность частот встречных волн $\Delta\nu$ преобразуется в последовательность прямоугольных импульсов (меандр), являющихся выходным сигналом ЛГ. Предварительная обработка выходной информации производится в цифровом блоке прибора для дальнейшей передачи бортовой навигационной системе, которая с использованием информации от акселерометров вычисляет угловые координаты объекта и рассчитывает навигационные параметры.

Тем не менее во всех лазерных ДУС возникает ряд эффектов, ухудшающих их точностные характеристики. Основные из них – это захват частот встречных волн, обусловленный наличием связи встречных волн через обратное рассеяние на зеркалах и других элементах датчика [13], и смещение нуля, вызываемое в частности дрейфом возбужденных атомов в газовом разряде (токовый дрейф) [21].

С учетом этих негативных факторов выходная характеристика зеемановского ДУС будет иметь следующий вид:

$$\Omega_{out} = \sqrt{(\Omega_R - \Omega_d)^2 - \Omega_L^2}, \quad (2)$$

где Ω_{out} – угловая скорость, которую выдает ДУС при измерении Ω_R ;

Ω_d – смещение нуля, обусловленное токовой [21] и магнитной [22] составляющими;

Ω_L – ширина статической зоны захвата.

В работах [23, 24] было теоретически и экспериментально показано, что применительно к зеемановским ДУС типа ЭК-104С уменьшение энергопотребления и температуры саморазогрева при снижении тока накачки позволяет заметно повысить их точность за счет уменьшения токовой составляющей смещения нуля Ω_T , которая для зеемановских ДУС с двумя ГРП описывается следующим выражением:

$$\Omega_T = \frac{k \cdot i}{U} \cdot mn\Delta i, \quad (3)$$

где Ω_T – токовая составляющая смещения нуля;

$i = 0,5 (i_1 + i_2)$ – средний ток накачки в первом и во втором ГРП;

$\Delta i = 0,5 (i_1 - i_2)$ – разница токов накачки в первом и во втором ГРП;

U – среднеквадратичная тепловая скорость активных атомов;
 k – константа, зависящая от параметров активной среды;
 m, n – коэффициенты пропорциональности.

Выражение (3) демонстрирует пропорциональную зависимость токовой составляющей смещения нуля Ω_z зеемановского ДУС от величин и разницы токов накачки i_1, i_2 в ГРП. Таким образом, снижение тока накачки датчиков при стабильной работе БСТ приводит к уменьшению среднего смещения нуля при незначительном уменьшении дрейфа нуля ЛГ [23, 24] и, как следствие, повышению точностных характеристик гироскопа в целом.

В качестве примера на рис. 3 приведены зависимости смещения нуля датчика ЭК-104С в нормальных климатических условиях для трех токов накачки: 0,7 мА, 1,0 мА и 1,2 мА.

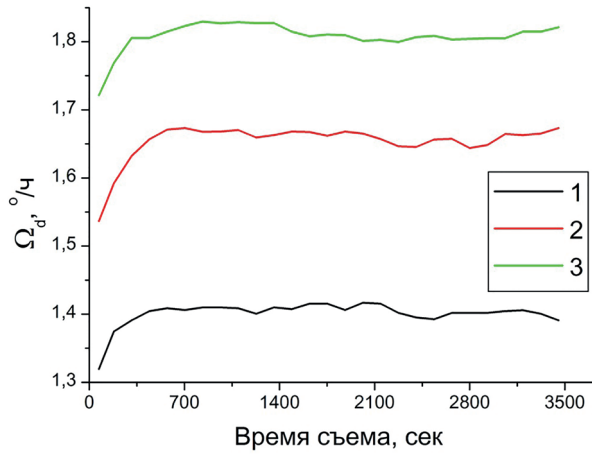


Рис. 3. Смещение нуля датчика ЭК-104С при 25°С для трех токов накачки:
 I – 0,7 мА; 2 – 1 мА; 3 – 1,2 мА

Из рис. 3 видно, что снижение тока накачки в датчике с 1,2 мА до 0,7 мА привело к уменьшению среднего смещения нуля с 1,8°/ч до 1,4°/ч и снижению температуры стенок рабочих каналов датчика на 3°С, что показано на рис. 4.

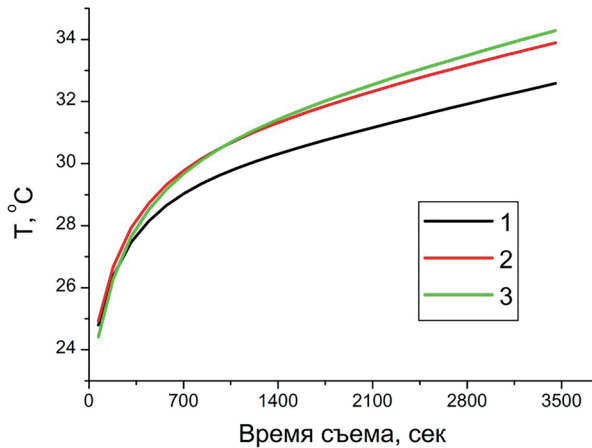


Рис. 4. Температура стенок рабочих каналов датчика ЭК-104С при 25°С
для трех токов накачки: I – 0,7 мА; 2 – 1 мА; 3 – 1,2 мА

Вторым эффективным способом уменьшения нестабильности дрейфа нуля, связанного с тепловыделением, и соответствующего повышения точности зеэмановских ДУС является снижение тока в катушках НУ, который в ЛГ регулируется с помощью БЧП.

На рис. 5 показано, как изменяется смещение нуля датчика ЭК-104С для двух токов БЧП – 0,5 А и 0,35 А – при трех температурах окружающей среды (-55°C , $+75^{\circ}\text{C}$ и $+25^{\circ}\text{C}$). Видно, что снижение тока в катушках НУ приводит к уменьшению начального выбега дрейфа нуля примерно в 3 раза во всем температурном диапазоне.

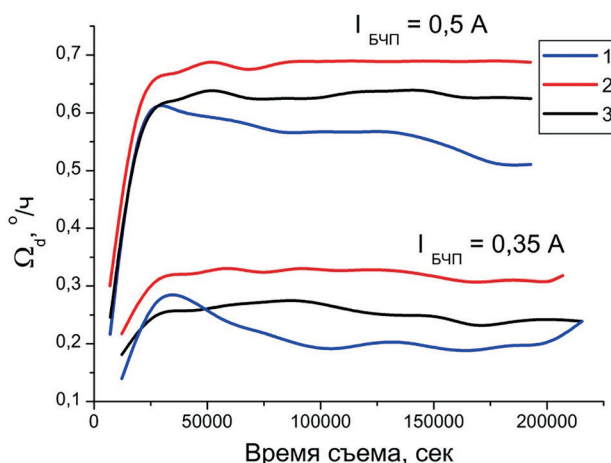


Рис. 5. Смещение нуля датчика ЭК-104С для двух токов БЧП при трех температурах окружающей среды: 1 – минус 55°C ; 2 – $+75^{\circ}\text{C}$; 3 – $+25^{\circ}\text{C}$

Снижение тока накачки и тока в катушках НУ, помимо значительного повышения стабильности дрейфа нуля, увеличивает время непрерывной работы прибора в одномодовом режиме, что также приводит к повышению точности гироскопа. Уменьшение тока в катушках НУ влечет за собой уменьшение ухода периметра вследствие разогрева резонатора от тепловыделения с катушек НУ. В свою очередь, снижение тока накачки уменьшает температуру разогрева активной среды. Это облегчает работу активной СРП, которая настраивает и стабилизирует периметр датчика по контуру контура усиления.

Исполнительными элементами СРП обычно являются подвижные зеркала, снабженные пьезокерамическими приводами (пьезокорректорами) [25], работа которых определяется подаваемым от СРП рабочим напряжением в диапазоне от 0 до 200 В. В процессе работы зеэмановского ДУС происходит деформация корпуса резонатора в зависимости от внешней температуры и, как следствие, изменение длины периметра лазерного резонатора.

На рис. 6 представлена динамика изменения рабочего напряжения пьезокорректоров и температуры стенок рабочих каналов (рис. 7) датчика ЭК-104С для двух токов БЧП: 0,5 и 0,35 А.

Из рис. 6 хорошо видно, что при уменьшении тока БЧП от 0,5 до 0,35 А была достигнута стабилизация изменения рабочего напряжения пьезокорректоров после 30 мин работы датчика, при этом само изменение снизилось примерно в 2 раза благодаря снижению температуры рабочих каналов.

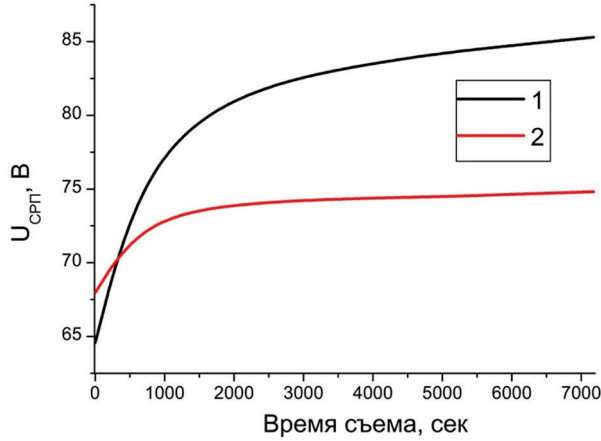


Рис. 6. Динамика изменения рабочего напряжения пьезокорректоров датчика ЭК-104С при 25°C для двух токов БЧП: 1 – 0,5 А; 2 – 0,35 А

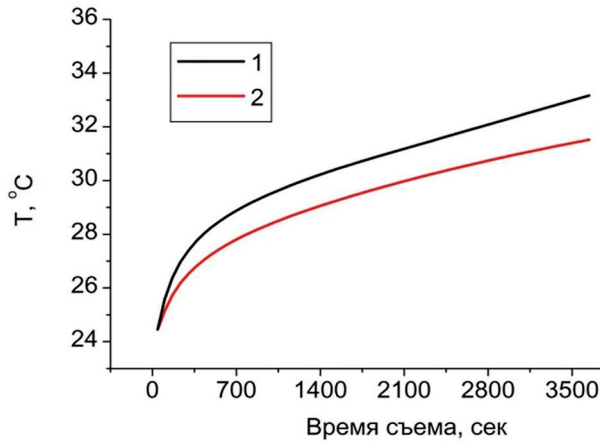


Рис. 7. Динамика температуры стенок рабочих каналов датчика ЭК-104С при 25°C для двух токов БЧП: 1 – 0,5 А; 2 – 0,35 А

Приведенные результаты показывают, что нагрев корпуса резонатора лазера и его отдельных частей за счет тока плазменного разряда в рабочих каналах и тока частотной подставки, протекающего по катушкам невзаимного устройства вокруг каналов, оказывает существенное влияние на ключевые параметры датчика – дрейф нуля и нестабильность длины периметра резонатора [23]. Чем меньше величина нагрева (т.е. чем меньше токи, вызывающие нагрев), тем стабильнее периметр резонатора и меньше дрейф нуля и, в конечном итоге, выше точность датчика в целом.

В данной работе нами были приведены оценки минимального тока разряда лазера и тока в невзаимном устройстве с учетом требований, предъявляемых к датчикам ЭК-104С по основным выходным параметрам. К этим параметрам относятся амплитуды выходных сигналов АВ, которые должны быть не менее 1,0 В, и частотной подставки $\Delta\nu_p$, которая должна быть не меньше 40кГц, чтобы обеспечить работу датчика на достаточном удалении от зоны захвата [20].

На рис. 8 представлена экспериментальная зависимость усиления G от тока накачки датчика ЭК-104С.

Как видно из рис. 8, зависимость усиления G от тока накачки носит линейный характер в области токов 0,6–1,8 мА и для $i = 1,0$ мА составляет 0,42–0,45%. Этого достаточно для получения превышения усиления над потерями ($G/S_{00} - 1 \geq 0,6$) и амплитуды выходных сигналов $AB \geq 1,0$ В при суммарных потерях в резонаторе $S_{00} = 0,2\text{--}0,25\%$, как показано на рис. 9.

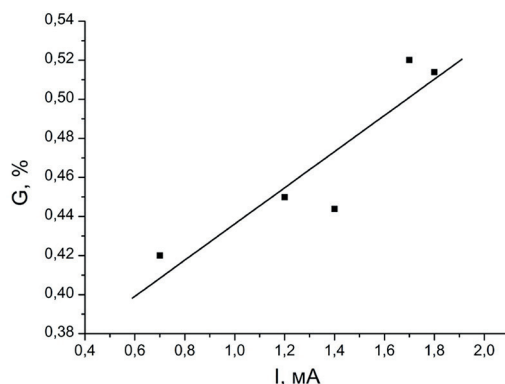


Рис. 8. Зависимость усиления от тока накачки датчика ЭК-104

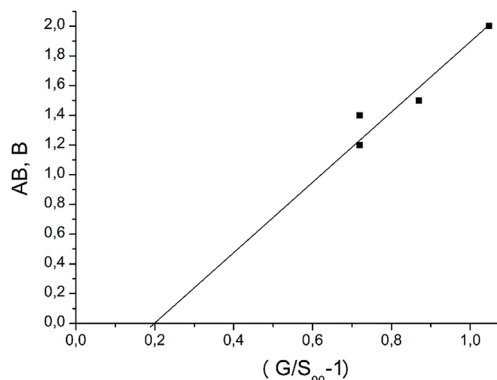


Рис. 9. Зависимость амплитуды выходных сигналов датчика ЭК-104 от превышения усиления над потерями

Из рис. 8 и 9 следует, что для обеспечения требуемых амплитуд выходных сигналов в 1,0 В ток накачки должен быть в диапазоне $1,0 \pm 0,1$ мА. При фиксированном токе накачки 1,0 мА амплитуда частотной подставки $\Delta\nu_p$ будет определяться током БЧП. Для обеспечения требуемых значений $\Delta\nu_p \geq 40$ кГц для прибора МТ-401М ток БЧП должен быть не меньше 0,35 А.

На базе этих оценок был создан экспериментальный образец модифицированного датчика со сниженными значениями этих рабочих токов, а соответственно, и со сниженным тепловыделением в разрядных каналах лазера и в невзаимном устройстве вокруг каналов.

Были проведены экспериментальные исследования этого модифицированного датчика, его основные параметры в сравнении с базовой моделью приведены в таблице.

Т а б л и ц а

Основные параметры ЛГ МТ-401М

Параметр, единица измерения	Старая модификация	Новые модификации
Ток накачки в каждом ГРП датчика, мА	1,6	1,0
Ток невзаимного устройства, А	0,5	0,35
Дрейф нуля гироскопа по всем осям, °/ч	1,5	0,7
Нестабильность масштабного коэффициента гироскопа, отн. ед.	2×10^{-4}	1×10^{-4}
Время работы в одномодовом режиме, ч	0,5	0,5–4,5

Как видно из таблицы, даже относительно небольшое снижение токов разряда и невзаимного устройства (примерно в 1,5 раза) привело к заметному повышению ос-

новых параметров лазерного гироскопа – в 1,5-2 раза, что подтверждает ключевую значимость тепловых характеристик лазерного датчика в обеспечении точностных и временных параметров гироскопа.

Дополнительно к результатам, приведенным в таблице, был значительно увеличен ресурс гироскопа МТ-401М – до 2500 часов, а также время его непрерывной работы – до 4,5 часов. Подробнее об этом см. в работах [26, 27].

Обсуждение результатов и выводы

Полученные в ходе описанного исследования экспериментальные результаты показывают существенную роль тепловых воздействий в магнитооптических зеемановских лазерных гироскопах. Снижение этого источника дрейфа нуля позволяет значительно повысить точность гироскопа в целом, что, в свою очередь, демонстрирует наличие больших возможностей для улучшения ключевых точностных и временных характеристик зеемановских лазерных гироскопов типа МТ-401М, прежде всего за счет снижения теплового нагрева главного элемента гироскопа – лазерного датчика.

Другим путем повышения точности датчиков ЭК-104С является уменьшение зоны захвата, что позволит снизить амплитуду частотной подставки и, как следствие, ток в катушках невзаимного устройства. Здесь, безусловно, необходимы дополнительные расчеты и эксперименты, в том числе в следующих направлениях:

- снижение суммарных потерь излучения в лазерном резонаторе за счет реализации потенциала зеркал лазера в части повышения их качества для уменьшения обратного рассеяния;
- снижение обратного рассеяния лазерного излучения в резонаторе за счет повышения качества сборки и расширения диаметра рабочих каналов и диафрагмы.

Кроме того, необходимо исследовать и возможность снижения смещения и дрейфа нуля гироскопа за счет минимизации его магнитной составляющей [22].

ЛИТЕРАТУРА

1. Гончаров В.М., Зайцев А.В., Лупанчук В.Ю. Совершенствование методов координатометрии беспилотного летательного аппарата в условиях аномальности (искажения) спутниковых сигналов // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. №4. С. 206–221. DOI: 10.34759/vst-2020-4-206-221.
2. Погосян М.А., Верейкин А.А. Управление положением и движением летательных аппаратов в системах автоматической посадки: Аналитический обзор // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 27. № 3. С. 7–22. DOI: 10.34759/vst-2020-3-7-22.
3. Матвеев В.В., Распопов В.Я. Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем. СПб.: ГНЦ РФ ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», 2009. 280 с.
4. Баженов Н.Г., Филина О.А., Озерова Е.Ю. Использование одноосного гиросtabilизатора для системы гироскопической стабилизации в автономных системах управления // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. №4. С. 202.
5. Gibson, C., Flueckiger, K., Hopkins, R., Barbour, N., Demonstrating practical inertial navigation: The beginnings and beyond, *AIAA Guidance, Navigation, and Control (GNC) Conference*, 2013.
6. Lukyanov, D., Filatov, Yu., Golyaev, Yu., Schreiber, K.-U., Perlmutter, M. 50th anniversary of the laser gyro, *20th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, Proceedings, 2013, pp. 36–49.
7. Aronowitz, F., The laser gyro-tutorial review, *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 1978, 157, pp. 2–6.

8. Barbour, N., Schmidt, G., Inertial sensor technology trends, *Sensors*, 2001, 1(4), pp. 332–339.
9. Merzlikin, A.M., Puzko, R.S., Mode locking suppression in a magneto-optical gyro, *Scientific Reports*, 2020, 10(1), 19490.
10. Jie Zheng, Xinyong Dong, Peng Zu, Junhua Ji, Haibin Su, and Perry Ping Shum, Intensity-modulated magnetic field sensor based on magnetic fluid and optical fiber gratings, *Applied Physics Letters*, 2013, vol. 103, issue 18, id. 183511 (4 pages).
11. Peng Zu, Chi Chiu Chan, Tianxun Gong, Yongxing Jin, Wei Chang Wong, and Xinyong Dong, Magneto-optical fiber sensor based on bandgap effect of photonic crystal fiber infiltrated with magnetic fluid, *Applied Physics Letters*, 2012, vol. 101, issue 24, id. 241118 (4 pages).
12. Guerrero, H., Pérez del Real, R., Fernández de Caleyá, R., and Rosa, G., Magnetic field biasing in Faraday effect sensors, *Applied Physics Letters*, 1999, vol. 74, issue 24, id. 3702.
13. Азарова В.В., Голяев Ю.Д., Савельев И.И. Зеемановские лазерные гироскопы // Квантовая Электроника, 2015. Т. 45. № 2. С. 171–179.
14. Belov, A.V., Solovieva, T.I., Intellectual Ring Laser Quality Control System – Key Component of Ring Lasers Science-Based Production, *Procedia Computer Science*, 2016, 96, pp. 456–464.
15. Kuznetsov, E., Golyaev, Y., Kolbas, Y., Soloveva, T., Kurdybanskaia, A., The method of intelligent computer simulation of laser gyros behavior under vibrations to ensure their reliability and cost-effective development and production, *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*, 2020, 11523, 115230B.
16. Wu F., Zhang M.-H., Fu X., Guo X., Wang J.-L., Wang J.-X., Design of ac laser frequency stabilization system for space three-axis mechanical dithering laser gyro // *Zhongguo Guanxing Jishu Xuebao*. 2017. Т. 25. № 2. С. 265–268.
17. Passaro, V.M.N., Cuccovillo, A., Vaiani, L., De Carlo, M., Campanella, C.E., Gyroscope Technology and Applications: A Review in the Industrial Perspective, *Sensors*, 2017, 17(10), 2284; <https://doi.org/10.3390/s17102284>.
18. Kuznetsov, E., Kolbas, Y., Kofanov, Y., Kuznetsov, N., Soloveva, T., Method of Computer Simulation of Thermal Processes to Ensure the Laser Gyros Stable Operation, *Mechanisms and Machine Science*, 2020, 75, pp. 295–299.
19. Jun Weng, Xiaoyun Bian, Ke Kou, Tianhong Lian, Optimization of Ring Laser Gyroscope Bias Compensation Algorithm in Variable Temperature Environment, *Sensors*, 2020, 20(2), 377; <https://doi.org/10.3390/s20020377>.
20. Chen Yang, Yuanwen Cai, Chaojun Xin, Meiling Shi, Research on temperature error compensation method of vehicle-mounted laser gyro SINS, *Journal of Physics Conference Series*, 2021, 1885(4):042020, doi:10.1088/1742-6596/1885/4/042020.
21. Колбас Ю.Ю., Грушин М.Е., Горшков В.Н. Немагнитная составляющая смещения нуля зеемановского лазерного гироскопа // Квантовая электроника, 2018. Т. 48. № 3. С. 283–289.
22. Колбас Ю.Ю., Савельев И.И., Хохлов Н.И. Влияние внешних и внутренних магнитных полей на стабильность смещения нуля зеемановского лазерного гироскопа // Квантовая электроника, 2015. Т. 45. №6. С. 573–581.
23. Savelyev, I., Sinel'nikov, A., The influence of the pumping current on the zeeman laser rotation sensors output parameters, *22nd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, Proceedings, 2015, pp. 421–424.
24. Синельников А.О., Савельев И.И., Медведев А.А. Снижение тока накачки в зеемановских лазерных датчиках угловой скорости // Физическое образование в вузах. 2018. Т. 24. №1. С. 228–230.
25. Golyaev, Y.D., Zapotylo, N.R., Nedzvetskaya, A.A., Sinelnikov, A.O., Tikhmenev, N.V., Laser gyros with increased time of continuous operation, *18th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems*, Proceedings, 2011, p. 53.
26. Голяев Ю.Д., Запотылко Н.Р., Недзвецкая, А.А., Синельников А.О., Тихменев Н.В. Термостабильные оптические резонаторы для зеемановских лазерных гироскопов // Оптика и спектроскопия. 2012. Т. 113. № 2. С. 253–255.
27. Голубев В.Д., Мерзликина Н.Е., Синельников А.О., Грушин М.Е., Сухов Е.В. Ресурсные испытания зеемановских лазерных датчиков угловых скоростей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. №1. С. 78–83.

Sinel'nikov, A.O., Medvedev, A.A., Golyaev, Yu.D., Grushin, M.E., and Chekalov, D.I. (M.F. Stelmakh POLYUS Research and Development Institute, Moscow, Russia)

Thermal Zero Drifts in Magneto-Optical Zeeman Laser Gyroscopes, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2021, vol. 29, no. 4 (115), pp. 46–55.

Abstract. The paper is devoted to the current problem of gyroscopy in general and its magneto-optical laser branch in particular: further increase in the accuracy of gyroscopes while maintaining their stable operation in real operating conditions. The problem is considered and studied by the example of the magneto-optical Zeeman laser gyroscope, which is one of the effective types of laser gyroscope. The development and improvement of the technology for creating this type of gyroscopes makes it possible to significantly reduce the sources of the gyroscope zero drift and yet, retain the other properties and performance parameters. The study and validation of the possibility of a significant reduction in the gyroscope key control currents, such as the pumping currents of the active medium and the control currents of frequency bias, will increase the measuring accuracy of the gyroscope, and, accordingly, the accuracy of navigation systems based on them.

Key words: Zeeman laser gyroscope, laser angular rate sensor, pumping current, zero drift, laser gyroscope thermal drift.

Материал поступил 12.10.2021