

## МЕТОДИКА ЧИСЛЕННОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И КОРРЕКЦИИ ТЕПЛООВОГО ДРЕЙФА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Е. И. ВАХРАМЕЕВ, К. С. ГАЛЯГИН, М. А. ОШИВАЛОВ, М. А. САВИН

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
614990, Пермь, Россия, E-mail: rector@pstu.ru*

Предложена усовершенствованная методика численной компенсации теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа в реальном времени работы прибора, основная идея которой заключается в предположении о зависимости теплового дрейфа гироскопа от температуры, ее первой и второй производных по времени. Процедура коррекции проводится индивидуально для каждого оптоволоконного датчика на основании данных натурных испытаний. Описана процедура поиска необходимых тарировочных коэффициентов. Проведена модернизация итерационного алгоритма прогнозирования и компенсации теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа. Показано, что после применения процедуры коррекции удалось добиться существенного снижения теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа. Приведены результаты сравнительного анализа нового и прежнего алгоритмов компенсации дрейфа.

**Ключевые слова:** *волоконно-оптический гироскоп, тепловой дрейф, датчик чувствительности, прогноз, коррекция, расчет, термометрия*

В настоящее время волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) составляют успешную конкуренцию механическим приборам и способны заменить их в системах инерциальной навигации. С появлением высококачественных одномодовых оптических волокон с низкими потерями эксплуатационные характеристики приборов существенно улучшились. Этому способствовали также развитие технологии изготовления датчиков чувствительности ВОГ, оптимизация элементов конструкций с использованием современных композиционных материалов, совершенствование электронных блоков обработки сигналов в целях повышения чувствительности и снижения шумов и погрешностей. Особое внимание уделяется характеристикам волоконного контура, так как именно контур является основным источником погрешностей в ВОГ.

Несмотря на постоянное улучшение характеристик ВОГ фирмами-производителями, прецизионные волоконно-оптические гироскопы навигационного класса точности (0,01—0,001 °/ч) до настоящего времени остаются уникальными изделиями.

Одной из главных проблем при создании высокоточных ВОГ является их подверженность внешним долговременным нестационарным тепловым воздействиям, что приводит к возникновению паразитных дрейфов сигнала — термически индуцированной угловой скорости — и, как следствие, к уменьшению точности. Эта проблема известна давно [1—3], однако ее решение не потеряло своей актуальности.

Для исключения паразитных дрейфов необходимо, чтобы внешние возмущения, воспринимаемые световыми лучами, движущимися по оптоволоконному контуру в противоположных направлениях, были идентичны. В частности, распределение температуры должно быть симметричным относительно середины катушки, что обеспечит одинаковую длину оптических путей для обоих лучей. В реальных условиях нестационарных внешних тепловых воздействий это требование не выполняется точно и на выходе возникает разность фаз, искажающая показания гироскопа.

В предыдущих работах авторов настоящей статьи [4—7] предложены математические модели возникновения дрейфа ВОГ в условиях нестационарных внешних воздействий, основанные на численном решении системы уравнений термофотоупругости. Исследования, проведенные с использованием этих моделей для различных конструкций датчиков чувствительности ВОГ, показали, в частности, что добиться идеально симметричного теплового воздействия на оптоволоконный контур практически невозможно. Разнообразные конструкторские решения в условиях реальной работы прибора могут лишь уменьшить тепловой дрейф, но не исключить его полностью.

В целях предотвращения возникновения термически индуцированной угловой скорости могут быть рассмотрены варианты оптимизации конструкции датчика чувствительности (например, термостатирование оптоволоконного контура) или коррекция выходного сигнала ВОГ по вычисленному прогнозу теплового дрейфа в реальном масштабе времени [3]. В первом случае недостатками являются увеличение энергопотребления и габаритов прибора, а также времени его готовности. Второй способ свободен от этих недостатков, однако параметры компенсации должны быть индивидуальными для каждого оптоволоконного датчика чувствительности. Эти параметры определяются на основании обработки данных термоиспытаний неподвижного датчика с синхронной регистрацией дрейфа и температуры.

В общем случае дрейф выходного сигнала датчика чувствительности ВОГ в условиях внешних нестационарных тепловых воздействий обусловлен самой температурой (дрейф „нуля“), а также скоростью ее изменения и температурными пространственными градиентами, величина которых определяется теплофизическими характеристиками оптоволоконного массива. В реальных условиях эксплуатации ВОГ температурный пространственный градиент невозможно оценить с использованием одного или нескольких датчиков температуры, расположенных, как правило, на внешней поверхности каркаса катушки датчика чувствительности. Однако при компенсации дрейфа в качестве информативного параметра могут быть использованы производные от температуры — скорость ее изменения, а также производные более высокого порядка, так как именно в динамике нагрева проявляются теплоинерционные свойства оптоволоконного контура.

Проблема численной компенсации решается с использованием различных методик, где исходными данными являются показания датчиков температуры в реальном времени работы прибора. В основном рассматриваются методики, базирующиеся на предположении о зависимости теплового дрейфа ВОГ от скорости изменения температуры [8—11]. Используются и более сложные модели, учитывающие, в частности, влияние второй производной от температуры (см., например, [12]). Причем прогнозирование и коррекция дрейфа осуществляются с использованием эмпирических тарировочных коэффициентов, получаемых, как правило, на основе статистического анализа показаний ВОГ по результатам термоиспытаний.

В работах [13, 14] предложена методика прогнозирования и компенсации теплового дрейфа ВОГ, основанная на понятии „единичного дрейфа“. Единичный дрейф понимается как тарировочная зависимость отклика неподвижного гироскопа на элементарное тепловое возмущение, которое представляет собой кратковременное тепловое воздействие на оптоволоконный датчик чувствительности при постоянной температуре, а следовательно, и при постоянной скорости нагрева. Реакция гироскопа (дрейф выходного сигнала) на такое воздействие может быть оценена на основании результатов термоиспытаний оптоволоконного датчика в диапазоне температуры эксплуатации с непрерывной синхронной регистрацией дрейфа и температуры каркаса катушки в месте установки датчика (или датчиков) температуры. По результатам измерений производится расчет тарировочной характеристики исследуемого оптоволоконного датчика. Очевидно, что при использовании результатов натуральных экспериментов должны быть учтены особенности изготовления конкретного экземпляра датчика чувствительности ВОГ. Основным недостатком этой методики является предположение

о корреляции возникающего дрейфа и скорости изменения температуры. В действительности же необходимо учитывать температурное смещение нуля, а также, как было отмечено выше, влияние пространственных температурных градиентов в оптоволоконном массиве. Кроме того, процедура получения тарифовочной характеристики на основе результатов термоиспытаний при компьютерной реализации оказалась слишком громоздкой и далеко не всегда корректной.

В настоящей статье предлагается новая методика численного прогнозирования и коррекции теплового дрейфа ВОГ. Как и предыдущая [14], она основана на использовании результатов экспериментальных термоиспытаний прибора, но принципиально отличается алгоритмом прогнозирования фиктивных показаний ВОГ. Расчетный прогноз  $\Omega_{\text{пр}}$  учитывает температурное смещение нуля, а также влияние на дрейф скорости изменения температуры и пространственных температурных градиентов. Принимается следующая модель расчета величины  $\Omega_{\text{пр}}$ :

$$\Omega_{\text{пр}} = K_0(T) + K_1^{\pm}(\dot{T})\dot{T} + K_2^{\pm}(\ddot{T})\ddot{T}, \quad (1)$$

где  $\dot{T}$  и  $\ddot{T}$  — первая и вторая производные от температуры по времени;  $K_0$ ,  $K_1$ ,  $K_2$  — функции тарифовочных коэффициентов.

При расчете значения коэффициентов  $K_1^{\pm}$  и  $K_2^{\pm}$  различны на участках „теплового разгона“  $K^+$ , когда  $(\dot{T} \ddot{T}) > 0$ , и „теплового торможения“  $K^-$ , когда  $(\dot{T} \ddot{T}) < 0$ .

Для нахождения тарифовочных зависимостей необходимо проведение натуральных испытаний покоящегося гироскопа в термокамере, при этом параметры термоиспытаний должны удовлетворять определенным требованиям. Интервал изменения температуры в термокамере должен охватывать весь предполагаемый диапазон температуры эксплуатации. В ходе термоиспытания обязательно наличие нескольких (хотя бы двух) периодов термостабилизации при различных уровнях температуры с выдержкой до полной стабилизации теплового состояния датчика чувствительности. Проводится синхронная регистрация показаний угловой скорости  $\Omega_{\text{исх}}$  и данных термометрии по датчику, установленному на каркасе катушки в непосредственной близости от оптоволоконного массива. Результаты записи фиктивной угловой скорости подвергаются обработке скользящим цифровым фильтром. Отметим, что результаты тарифовки будут индивидуальными, т.е. применимыми только к данному экземпляру датчика чувствительности.

По результатам записи термоиспытаний проводится расчет тарифовочных зависимостей. Первое слагаемое в выражении (1) представляет собой статическое смещение нуля гироскопа. Температурная зависимость  $K_0(T)$  определяется на участках термостабилизации (с различной температурой), где автоматически отсутствуют обе производные  $\dot{T} = \ddot{T} = 0$ :

$$K_0(T) = \Omega_{\text{исх}}.$$

Второе и третье слагаемые в выражении (1) содержат производные от температуры по времени и характеризуют динамику изменения температурного поля, в основном определяемую теплоинерционными свойствами конструкции оптоволоконного датчика. Производные вычисляются для каждого момента регистрации температуры при испытании путем численного дифференцирования показаний температурного датчика ВОГ с использованием трехточечной разностной схемы:

$$\dot{T}_i = (3T_i - 4T_{i-1} + T_{i-2}) / 2 / H; \quad \ddot{T}_i = (3\dot{T}_i - 4\dot{T}_{i-1} + \dot{T}_{i-2}) / 2 / H,$$

где  $i$  — индекс текущего момента времени,  $H$  — временной интервал записи результатов в условиях испытания.

Для расчета коэффициентов функции (1) на этапе тарифовки используются следующие соотношения:

$$\begin{aligned}
 K_1^+(\dot{T}) &= (\Omega_{\text{исх}} - K_0(T)) / \dot{T} \quad \text{при } \dot{T}\ddot{T} > 0; \\
 K_1^-(\dot{T}) &= (\Omega_{\text{исх}} - K_0(T)) / \dot{T} \quad \text{при } \dot{T}\ddot{T} < 0; \\
 K_2^+(\ddot{T}) &= (\Omega_{\text{исх}} - K_0(T) - K_1^+(\dot{T})\dot{T}) / \ddot{T} \quad \text{при } \dot{T}\ddot{T} > 0, \\
 K_2^-(\ddot{T}) &= (\Omega_{\text{исх}} - K_0(T) - K_1^-(\dot{T})\dot{T}) / \ddot{T} \quad \text{при } \dot{T}\ddot{T} < 0.
 \end{aligned}$$

После выполнения тарировочных расчетов полученные значения коэффициентов аппроксимируются кусочно-линейной или параболической функцией, сплайнами. Далее численная коррекция исходных показаний гироскопа осуществляется по следующим соотношениям:

$$\Omega_{\text{кор}} = \Omega_{\text{исх}} - \Omega_{\text{пр}}, \tag{2}$$

где

$$\begin{aligned}
 \Omega_{\text{пр}} &= K_0(T) + K_1^+(\dot{T})\dot{T} + K_2^+(\ddot{T})\ddot{T} \quad \text{при } \dot{T}\ddot{T} > 0; \\
 \Omega_{\text{пр}} &= K_0(T) + K_1^-(\dot{T})\dot{T} + K_2^-(\ddot{T})\ddot{T} \quad \text{при } \dot{T}\ddot{T} < 0.
 \end{aligned} \tag{3}$$

При расчете прогноза  $\Omega_{\text{пр}}$  используются полученные при тарировке последовательно коэффициенты для каждого момента времени теплового испытания гироскопа.

Для практической реализации предложенного метода коррекции теплового дрейфа был создан программный комплекс обработки результатов термоиспытаний.

На рис. 1 приведены результаты синхронной регистрации температуры и термоиндуцированной угловой скорости в ходе многочасового циклического термоиспытания образца оптоволоконного датчика в диапазоне  $-50 \dots 60 \text{ }^\circ\text{C}$  со скоростью изменения  $1 \text{ }^\circ\text{C}/\text{мин}$  (испытания проводились в АО „Пермская научно-производственная приборостроительная компания“). Исходный сигнал регистрации угловой скорости сильно зашумлен, поэтому на его фоне показан отфильтрованный сигнал, полученный с осреднением по 100 временным интервалам записи. Амплитуда изменения показаний неподвижного гироскопа составила порядка  $1,0 \text{ }^\circ/\text{ч}$ .

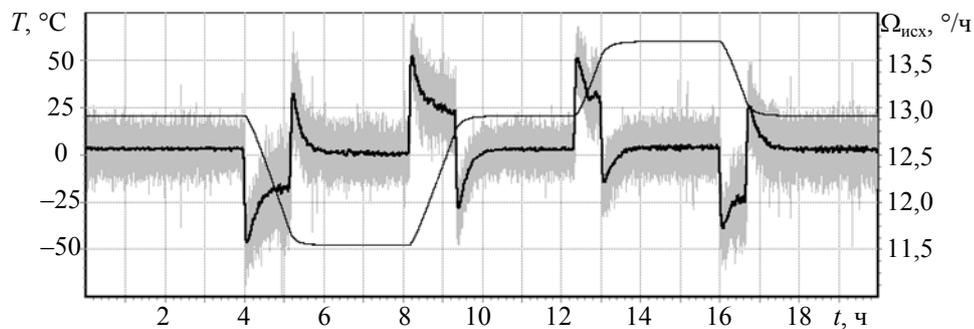


Рис. 1

Зависимость  $K_0(T)$ , отвечающая за статическое смещение нуля прибора, определена по уровню дрейфа на участках термостабилизации при температурах  $60, 20, -50 \text{ }^\circ\text{C}$  при параболической аппроксимации. Результаты этой процедуры показаны на рис. 2.

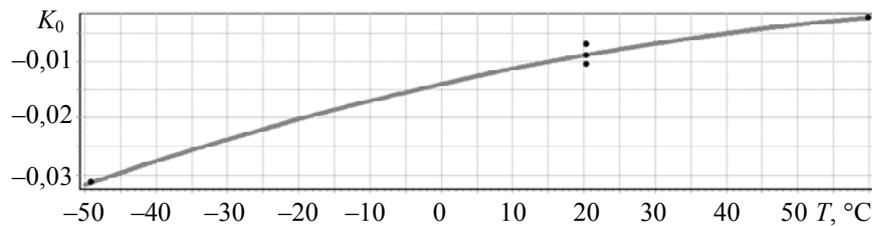


Рис. 2

На рис. 3 приведены результаты аппроксимации тарировочных коэффициентов  $K_1^+(\dot{T})$  и  $K_1^-(\dot{T})$  в зависимости от скорости изменения температуры, а на рис. 4, а, б — результаты аппроксимации коэффициентов  $K_2^+(\ddot{T})$  и  $K_2^-(\ddot{T})$ .

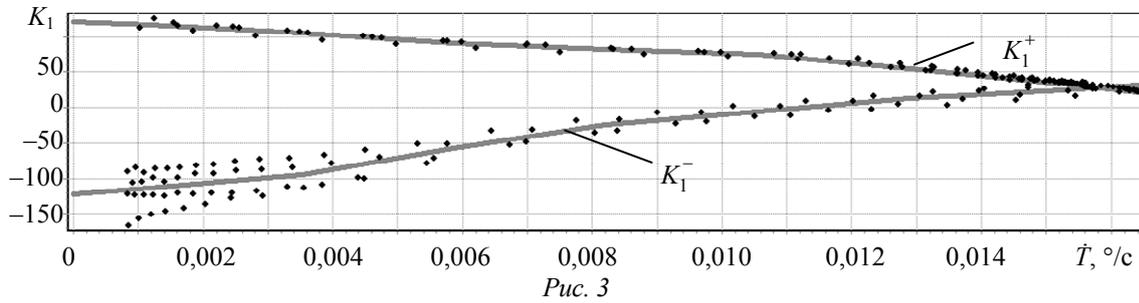


Рис. 3

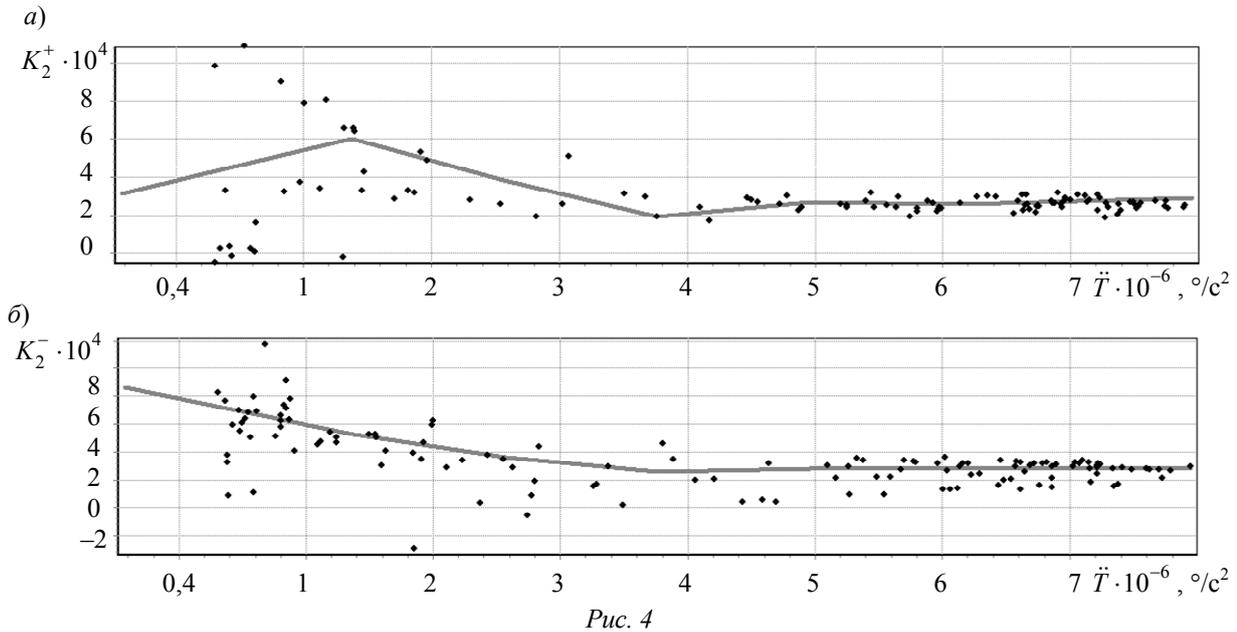


Рис. 4

Эффективность применения разработанной методики иллюстрирует рис. 5, где показаны исходный дрейф, соответствующий рис. 1, и дрейф, скомпенсированный по предлагаемой методике ( $\Omega_{\text{кор}}$ ).

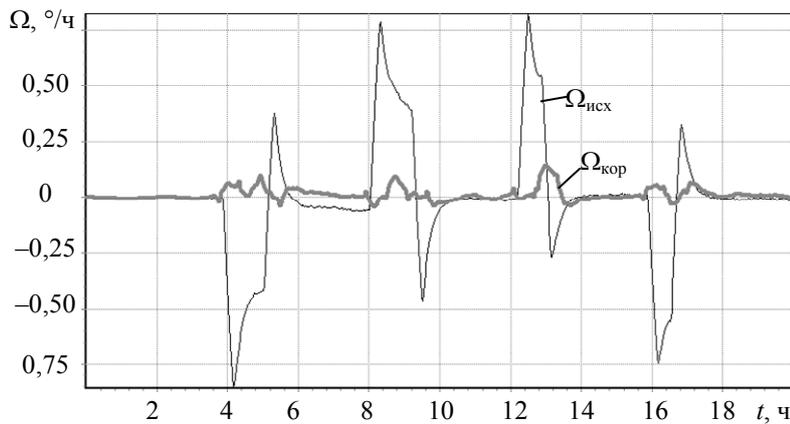


Рис. 5

Таким образом, предложенная методика численной коррекции позволяет существенно снизить фиктивную термоиндуцированную угловую скорость ВОГ. Так, размах исходного дрейфа, который составлял  $1,68 \text{ }^\circ/\text{ч}$  (см. рис. 1), был снижен почти в 10 раз и после коррекции показаний гироскопа не превышал  $0,19 \text{ }^\circ/\text{ч}$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шереметьев А. Г. Волоконный оптический гироскоп. М.: Радио и связь, 1987. 152 с.
2. Джашишов В. Э., Панкратов В. М. Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2001. 150 с.
3. Драницына Е. В., Егоров Д. А. Исследование зависимости выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа от температуры в составе бескарданного инерциального измерительного модуля // Навигация и управление движением: Материалы XIV конф. молодых ученых. СПб, 2012. С. 447—452.
4. Программный комплекс расчета теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа / К. С. Галягин, М. А. Ошивалов, Е. И. Вахрамеев, Т. А. Ульрих // Вестн. ПГТУ. Аэрокосмическая техника. 2005. № 21. С. 23—28.
5. Тепловой дрейф волоконного оптического гироскопа / Е. И. Вахрамеев, К. С. Галягин, А. С. Ивонин, М. А. Ошивалов, Т. А. Ульрих // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 1. С. 32—37.
6. Компьютерная модель погрешностей выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа при внешних воздействиях / К. С. Галягин, М. А. Ошивалов, Ю. А. Селянинов, М. А. Савин // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 12. С. 979—984.
7. Учет пьезооптических эффектов при моделировании теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа / К. С. Галягин, М. А. Ошивалов, М. А. Савин // Вестн. ПНИПУ. Механика. 2015. № 4. С. 55—71.
8. Рупасов А. В. Исследование метода локального температурного воздействия и его применение для компенсации дрейфа волоконно-оптического гироскопа: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб, 2014.
9. Поляков Д. В., Лукин К. Г., Петров М. Н. Разработка модели волоконно-оптического гироскопа в среде Simulink // Вестн. Новгород. гос. ун-та. 2012. № 68. С. 106—109.
10. Павлов Д. В., Петров М. Н., Лукин К. Г. Разработка динамической модели волоконно-оптического гироскопа // Вестн. Новгород. гос. ун-та. 2013. Т. 1, № 75. С. 85—87.
11. Кузнецов Ю. А., Олейник С. В., Успенский В. Б., Хацько Н. Е. Исследование температурной зависимости дрейфа ВОГ // Радиоелектроніка, інформатика, управління. 2012. № 2. С. 152—156.
12. Song R., Chen X., Shen Ch., Zhang H. Modeling FOG drift using back-propagation neural network optimized by artificial fish swarm algorithm // J. of Sensors. Hindawi Publ. Corp. 2014. DOI: 10.1155/2014/273043.
13. Расчетный прогноз теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа / К. С. Галягин, М. А. Ошивалов, Е. И. Вахрамеев, А. С. Ивонин // Вестн. ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2012. № 32. С. 127—140.
14. Прогноз и коррекция теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа / Е. И. Вахрамеев, К. С. Галягин, А. С. Ивонин, М. А. Ошивалов // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 5. С. 79—84.

**Сведения об авторах**

- Евгений Иванович Вахрамеев** — канд. техн. наук, доцент; ПНИПУ, кафедра сварочного производства и технологии конструкционных материалов; E-mail: abins@pstu.ru
- Константин Спартакович Галягин** — канд. техн. наук, доцент; ПНИПУ, кафедра сварочного производства и технологии конструкционных материалов; E-mail: abins@pstu.ru
- Михаил Анатольевич Ошивалов** — канд. техн. наук, доцент; ПНИПУ, кафедра сварочного производства и технологии конструкционных материалов; E-mail: abins@pstu.ru
- Максим Анатольевич Савин** — аспирант; ПНИПУ, кафедра сварочного производства и технологии конструкционных материалов; ассистент; E-mail: Savin.MA@yandex.ru, abins@pstu.ru

Рекомендована кафедрой  
сварочного производства и технологии  
конструкционных материалов

Поступила в редакцию  
31.08.16 г.

**Ссылка для цитирования:** Вахрамеев Е. И., Галягин К. С., Ошивалов М. А., Савин М. А. Методика численного прогнозирования и коррекции теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 1. С. 32—38.

**METHOD OF NUMERICAL PREDICTION AND CORRECTION OF THERMAL DRIFT OF THE FIBER-OPTIC GYRO****E. I. Vahrameev, K. S. Galyagin, M. A. Oshivalov, M. A. Savin***Perm National Research Polytechnic University,  
614990, Perm, Russia, E-mail: rector@pstu.ru*

An improved procedure for numerical compensation of thermal drift for fiber-optic gyroscope in real-time operation of the device is developed. The main idea of the proposed approach lies in the assumption of dependence of the thermal drift of the gyroscope on temperature, its first and second derivatives with respect to time. The correction procedure is performed individually for each fiber-optic sensor based on the data of field tests. The procedure of search of the necessary calibration coefficients is described, modernization of the iterative prediction algorithm and compensation of thermal drift of fiber-optic gyroscope is carried out. It is shown that application of the correction procedure makes it possible to achieve an essential reduction in thermal drift of fiber-optic gyroscope. The results of the comparative analysis of the new and the old algorithms to compensate for drift are presented.

**Keywords:** fiber-optic gyroscope, thermal drift, sensitivity element, prediction, correction, calculation, thermometry

**Data on authors**

- Evgeny I. Vahrameev** — PhD, Associate Professor; Perm National Research Polytechnic University, Department of Welding Production Technology and Construction Materials; E-mail: abins@pstu.ru
- Konstantin S. Galyagin** — PhD, Associate Professor; Perm National Research Polytechnic University, Department of Welding Production Technology and Construction Materials; E-mail: abins@pstu.ru
- Mikhail A. Oshivalov** — PhD, Associate Professor; Perm National Research Polytechnic University, Department of Welding Production Technology and Construction Materials; E-mail: abins@pstu.ru
- Maxim A. Savin** — Post-Graduate Student; Perm National Research Polytechnic University, Department of Welding Production Technology and Construction Materials; Assistant; E-mail: abins@pstu.ru

**For citation:** *Vahrameev E. I., Galyagin K. S., Oshivalov M. A., Savin M. A. Method of numerical prediction and correction of thermal drift of the fiber-optic gyro // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2017. Vol. 60, N 1. P. 32—38 (in Russian).*

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-1-32-38