

УДК 629.7.054\*882

## МОДЕЛЬ ПОГРЕШНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЕПЛОВЫХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

М.В. Антонова<sup>1</sup>, В.А. Матвеев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Филиал ФГУП “ЦЭНКИ” – “НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова”,  
Москва, Российская Федерация  
e-mail: antonova.mariya.v@gmail.com

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: 03@niipm.ru

*Погрешность традиционного гироскопа характеризуется средней угловой скоростью отклонения вектора кинетического момента в инерциальном пространстве, называемой скоростью дрейфа, скоростью ухода или собственной скоростью прецессии гироскопа. Модель погрешности волоконно-оптического гироскопа определена с использованием понятия “коэффициент влияния на скорость изменения температуры окружающей среды и напряженности внешнего магнитного поля”. Описана методика экспериментального нахождения этих коэффициентов. Установлено значительное влияние скорости изменения температуры окружающей среды и напряженности магнитного поля на точность гироскопа. Разработанная модель позволяет построить методику алгоритмической компенсации погрешностей гироскопа в процессе эксплуатации на основе информации, получаемой от термодатчиков и магнитометров.*

**Ключевые слова:** волоконно-оптический гироскоп, коэффициенты влияния, методика определения параметров модели, температура окружающей среды, напряженность магнитного поля, алгоритмическая компенсация погрешностей волоконно-оптического гироскопа.

## MODEL OF ERROR OF A FIBER-OPTIC GYRO EXPOSED TO THERMAL AND MAGNETIC FIELDS

M.V. Antonova<sup>1</sup>, V.A. Matveev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kuznetsov Research Institute of Applied Mechanics, Branch of Center of Operation of Ground-Based Space Infrastructure Facilities, Moscow, Russian Federation  
e-mail: antonova.mariya.v@gmail.com

<sup>2</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: 03@niipm.ru

*The error of a typical gyroscopic device is characterized by the mean angular rate of deviation of the angular momentum vector in the inertial space (called a drift rate or intrinsic precession rate of a gyro). A model of error of a fiber-optic gyro is defined using the notion of “coefficient of impact on the rate of variation in the ambient temperature and the external magnetic field strength”. A technique is described for finding these coefficients by experiments. A substantial influence of the rate of variation in the ambient temperature and the magnetic field strength on the gyro accuracy is established. The developed model makes it possible to build a technique of algorithmic compensation of gyro errors during the operation on the basis of data received from thermal transducers and magnetometers.*

**Keywords:** fiber-optic gyro, coefficient of impact, technique for determination of model parameters, ambient temperature, magnetic field strength, algorithmic compensation of fiber-optic gyro errors.

Применение термина “модель погрешности гироскопа” связано с разработкой унифицированного технического паспорта гироскопа, стандартной методики оценки погрешностей гироскопов на стадии изготовления и приемо-сдаточных испытаний, методики прогнозирования погрешности гироскопа и соответствующих методов алгоритмической компенсации погрешностей гироскопа в процессе его эксплуатации. Погрешности традиционного гироскопа характеризуются средней угловой скоростью отклонения его оси (вектора кинетического момента  $H$ ) в инерциальном пространстве, называемой скоростью дрейфа, скоростью ухода или собственной скоростью прецессии (ССП) гироскопа (град/ч, угл. мин/мин, угл. с/с) [1–3]. Для микромеханических, оптических, волновых твердотельных и других гироскопов величину, эквивалентную СПП, называют скоростью дрейфа нуля, или сдвигом нуля.

В зависимости от времени и условий эксплуатации (перегрузки, температуры, напряженности магнитного поля, давления окружающей среды, радиации и др.) удобно записывать модель погрешности гироскопа, используя понятие “удельная составляющая скорости дрейфа (СД) гироскопа”.

Проиллюстрируем изложенное выше на примере модели погрешности традиционного гироскопа в условиях действия линейной перегрузки [2]:

$$\omega_{др}^{(n)} = \sum_{i=0}^{i=m} \omega_i(g^i)n^i, \quad (1)$$

где  $g$  — ускорение силы тяжести;  $\omega_i(g^i)$  — удельная составляющая скорости дрейфа гироскопа, пропорциональная ускорению  $g$  в степени  $i = 0, \dots, m$  (наиболее часто ограничиваются значением  $m = 2$ , однако известны модели с  $m \geq 8$ ).

Удельную составляющую скорости дрейфа традиционного гироскопа определяют по формуле

$$\omega_i(g^i) = \frac{M_i(g^i)}{H},$$

где  $M_i(g^i)$  — возмущающий момент, действующий на гироскоп;  $H$  — собственный кинетический момент гироскопа.

Значения составляющих  $\omega_i(g^i)$  рассчитывают на стадии проектирования гироскопа и определяют пути их уменьшения. После изготовления гироскопа для установившегося режима его работы значения  $\omega_i(g^i)$  находят с помощью соответствующих методик при испытаниях гироскопов на специальных стендах в заводских условиях или на стартовых позициях [2].

Аналогично модели (1) запишем модель погрешности гироскопа в зависимости от напряженности  $H_M$  магнитного поля:

$$\omega_{др}(H_M) = \sum_{i=0}^{i=m} \omega_i(H^i)H^i, \quad (2)$$

где  $\omega_i(H^i)$  — коэффициенты влияния магнитного поля на скорость дрейфа волоконно-оптического гироскопа (ВОГ). Как правило,  $m \leq 2$ , наиболее часто  $m = 0; 1$ .

Модель погрешности гироскопа в зависимости от температуры окружающей среды  $t$ , °С, запишем с учетом скорости изменения температуры  $\Delta V_\tau = \Delta t/\tau$ , °С/ч, за время  $\tau$ :

$$\omega_{др}(t) = \sum_{i=0}^{i=m} \omega_i \left[ (t)^i \right] (t)^i + \omega_{\Delta t} \Delta V_\tau, \quad (3)$$

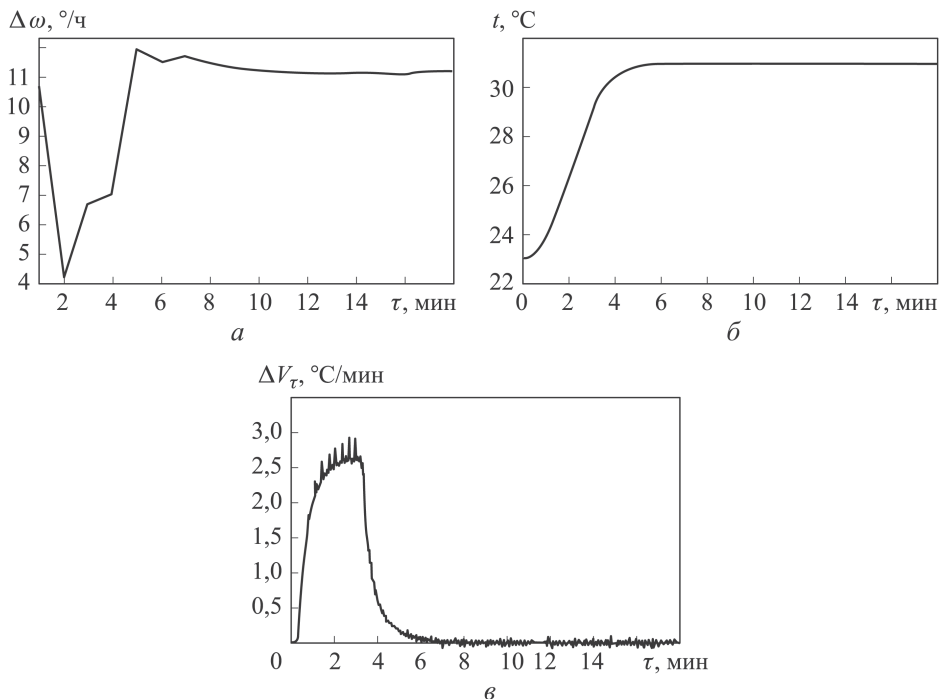
где  $\omega_i \left[ (t)^i \right]$  и  $\omega_{\Delta t}$  — коэффициенты влияния температуры в степени  $i$  и скорости изменения температуры на скорость дрейфа ВОГ.

В инженерной практике  $m \leq 2$ , для определения коэффициентов влияния  $\omega_i \left[ (t)^i \right]$  строят тепловую модель прибора [2, 4]. Для ВОГ [5–9] зависимость (1) исследована в работах [10, 11].

Рассмотрим методику экспериментального определения параметров моделей (2) и (3) для ВОГ. В качестве объектов испытаний были выбраны ВОГ фирмы ФГУП “ЦЭНКИ”, оснащенные системой термостатирования, работающей в режиме форсированного нагрева и в штатном режиме. Форсажные печатные нагревательные элементы в виде полуколец установлены на плоской верхней поверхности наружной катушки ( $R = 30 \pm 1,5$  Ом,  $N = 6$  Вт) и на нижней плоской поверхности наружной и внутренней катушек ( $R = 15 \pm 0,5$  Ом,  $N = 3$  Вт). Суммарная выделяемая мощность  $N = 12$  Вт. Для обеспечения штатного режима термостатирования печатный нагревательный элемент в виде кольца установлен на внутренней поверхности корпуса ( $R = 80 \pm 5$  Ом,  $N = 9$  Вт).

На несущем каркасе катушки размещены три термодатчика (ТД) — два рабочих и один контрольный.

Волоконно-оптический гироскоп помещается в алюминиевый кожух с пенопластом для обеспечения лучшей тепловой изоляции. Изменения выходного сигнала осуществляются после 40 мин работы ВОГ в диапазоне значений температуры термостатирования 31... 50 °С с шагом 5 °С; время осреднения выходного сигнала 60 с. В качестве примера на рис. 1 зависимости скорости дрейфа ВОГ при температуре термостатирования 31 °С (скорость пересчитана в град/ч), температуры окружающей среды при проведении испытаний и скорости изменения температуры от времени  $\tau$ .



**Рис. 1.** Зависимости скорости дрейфа ВОГ при температуре термостатирования 31 °С (а), температуры окружающей среды при проведении испытаний (б) и скорости изменения температуры (в) от времени  $\tau$

В соответствии с зависимостями максимальное изменение выходного сигнала (на несколько град/ч) имеет место при максимальной скорости изменения температуры ВОГ.

Отклонения среднего значения выходного сигнала ВОГ после нагрева до требуемой температуры от его значения в отсутствие нагрева (в лабораторных условиях  $t_0 = 21\text{ °C}$ ) и среднеквадратические отклонения (СКО) выходного сигнала от среднего значения ( $\sigma$ ) при различных значениях температуры термостатирования прибора приведены ниже:

Температура термостатирования, °С...	31	35	40	45	50	55
$\Delta\omega$ , °/ч.....	0,489	0,346	0,498	0,540	0,919	1,564
СКО $\sigma$ , °/ч.....	0,081	0,051	0,051	0,043	0,043	0,019

Введем относительное значение температуры  $t = t_\phi - t_0$ ,  $t_\phi$  — фактическое значение температуры;  $t_0 = 21\text{ °C}$  — начальное значение температуры при испытаниях в лабораторных условиях.

В соответствии с моделью (3) и экспериментальными данными получаем зависимость вида

$$\Delta\omega(t) = \omega_0 + \omega_1(t)t + \omega_2[(t)^2](t)^2 + \omega_{\Delta t}\Delta V_\tau.$$

Для образца ВОГ, прошедшего испытания, определены следующие данные:

$$\omega_0 = 1,197^\circ/\text{ч}; |\omega_1(t)| = 0,108^\circ/(\text{ч}\cdot^\circ\text{C}); \omega_2[(t)^2] = 0,004^\circ/(\text{ч}\cdot^\circ\text{C}^2); |\omega_{\Delta t}| = 1,997^\circ/^\circ\text{C}.$$

Воздействие магнитного поля на ВОГ осуществляется с помощью вертикальной и горизонтальной пар колец Гельмгольца, задающих магнитные поля в двух направлениях. При испытаниях ось вертикальной пары колец ориентируется на север. Гироскоп устанавливается внутри колец на немагнитном основании. Пульт управления ВОГ находился вне зоны действия магнитного поля колец Гельмгольца. При каждом значении задаваемого магнитного поля измеряется выходной сигнал ВОГ в течение 180 с, находятся среднее значение измеренной угловой скорости и ее отклонение от начального значения, определенного в условиях компенсации внешних магнитных полей.

Испытания ВОГ при воздействии магнитных полей проводится в следующей последовательности:

– ВОГ устанавливается в кольцах Гельмгольца так, что ось  $OX$  направлена вертикально вверх, совпадая с осью горизонтальной пары колец; ось  $OY$  – на север; горизонтальная пара колец задает внешнее магнитное поле, проекция вектора напряженности которого на ось  $OX$  изменяется в диапазоне значений  $0 \dots 300$  мкТл с шагом 50 мкТл;  $300 \dots -300$  мкТл,  $-300 \dots 0$  мкТл с тем же шагом;

– с помощью вертикальной пары колец так же, как и в предыдущем случае, задается внешнее магнитное поле вдоль оси  $OY$ ;

– ВОГ разворачивается внутри колец Гельмгольца по азимуту на  $90^\circ$  ( $OZ$  направлена на север); с использованием вертикальной пары колец задается внешнее магнитное поле вдоль оси  $OZ$ .

При расчете модели погрешностей ВОГ введем коэффициенты оценки влияния магнитного поля на составляющие этой модели:

$$K_{H(OX,OY,OZ)} = \frac{\Delta\omega_{(OX,OY,OZ)}}{6},$$

где  $\Delta\omega_{(OX,OY,OZ)} = \left[ \begin{array}{c} \Delta\omega_{H_M=300} - \Delta\omega_{H_M=-300} \\ (OX,OY,OZ) \quad (OX,OY,OZ) \end{array} \right]$  – разность средних значений угловой скорости, измеренных при воздействии магнитного поля, проекция вектора напряженности которого на оси  $OX$ ,  $OY$  или  $OZ$  составляет 300 мкТл с изменением направления вектора напряженности магнитного поля на  $180^\circ$ .

В качестве характерного примера на рис. 2 приведена зависимость отклонения угловой скорости  $\Delta\omega(H_M)$  от ее значения при компенсации магнитных полей ( $H_M = 0$ ), измеренной в процессе повышения и снижения напряженности  $H_M$  при действии магнитного поля вдоль оси  $OZ$ .

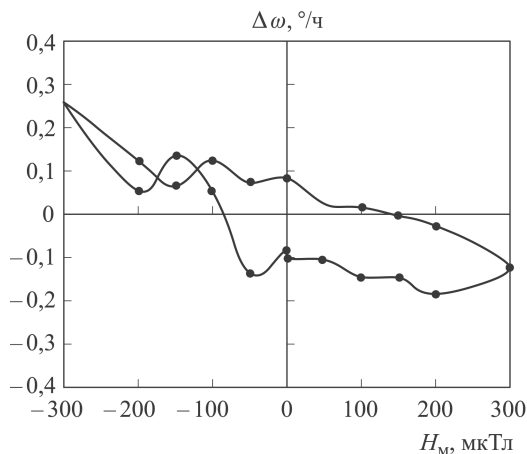


Рис. 2. Зависимость  $\Delta\omega(H_M)$  при действии магнитного поля вдоль оси  $OZ$

Модель погрешностей ВОГ при наличии магнитного поля с напряженностью  $\overline{H}_M \{ \overline{H}_x, \overline{H}_y, \overline{H}_z \}$  запишем в виде

$$\Delta\omega(H_M) = \omega_0 + \omega_x(H_x) \frac{H_x}{H_E} + \omega_y(H_y) \frac{H_y}{H_E} + \omega_z(H_z) \frac{H_z}{H_E},$$

где  $\omega_0$  — составляющая скорости дрейфа, не зависящая от магнитного поля;  $H_x, H_y, H_z$  — проекции вектора напряженности магнитного поля  $H_M$  на оси  $OX, OY$  и  $OZ$  прибора;  $H_E = 100$  мкТл — нормирующий множитель, близкий к значению напряженности магнитного поля Земли;  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  — коэффициенты влияния магнитного поля на скорость дрейфа ВОГ (удельная составляющая скорости дрейфа).

Значения коэффициентов влияния магнитного поля на скорость дрейфа ВОГ, °/ч, при испытании 1 (числитель) и 2 (знаменатель)

Прибор:	$\omega_x$	$\omega_y$	$\omega_z$
1	-0,015/0,009	-0,008/0,006	-0,055/-0,041
2	-0,037/-0,043	-0,576/-0,375	-0,253/-0,145

Результаты эксперимента показывают значительное влияние магнитного поля на погрешность ВОГ (для образцов до  $0,6$  °/(ч·100 мкТл)).

Определение составляющих модели погрешностей ВОГ при воздействии тепловых и магнитных полей позволяет создать методику алгоритмической компенсации погрешностей ВОГ в процессе эксплуатации на основе информации, получаемой от термодатчиков и магнитометров.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Гироскопические системы* / под ред. Д.С. Пельпора. Ч. 3. М.: Высш. шк., 1991. 382 с.

2. *Матвеев В.А.* Гироскоп — это просто. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 191 с.
3. *Матвеев В.А., Липатников В.И., Алехин А.В.* Проектирование волнового твердотельного гироскопа. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. 168 с.
4. *Шереметьев А.Г.* Волоконный оптический гироскоп. М.: Радио и связь, 1987. 152 с.
5. *Пахомов И.И., Рожков О.В., Рождествин В.Н.* Оптико-электронные квантовые приборы. М.: Радио и связь, 1982. 456 с.
6. *Chesnoy J.* Picosecond gyrolaser // *Optic Letters*. 1989. Vol. 14. P. 990–992.
7. *Dennis M.L., Diels J.-C., Lai M.* Femtosecond ring dye laser: a potential new laser gyro // *Optic Letters*. 1991. Vol. 16. P. 529–531.
8. *Tausenev A.V., Obratsova E.D., Lobach A.S., Chernov A.J., Kotov V.J., Kryukov P.G., Konyachenko A.V., Dianov E.M.* 177 fs erbium-doped fiber laser mode locked with a cellulose polymer film containing single-wail carbon nanotubes // *Appl. Phys. Lett.* Vol. 92. 2008. P. 171113.
9. *Антонова М.В., Гусев А.П., Новиков Л.З.* Экспериментальное исследование зависимостей показаний волоконно-оптического гироскопа от его ориентации относительно вертикали // Научно-технический сборник “Ракетно-космическая техника”. Сер. XI. Системы управления ракетных комплексов. Вып. 2. Ч. I. 2010. С. 47–52.
10. *Антонова М.В., Гусев А.П., Новиков Л.З.* Работы по уточнению математической модели погрешностей волоконно-оптического гироскопа // Сборник докладов VIII научно-практической конференции молодых специалистов и студентов памяти главного конструктора академика В.И. Кузнецова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. С. 171–179.

## REFERENCES

- [1] Pel’por D.S. *Гироскопические системы*. Ч. 3 [Gyroscopic systems. Part 3]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1991. 382 p.
- [2] Matveev V.A. *Гироскоп — это просто* [Gyro — it’s just]. Moscow, MG TU im. N.E. Bauman Publ., 2013. 191 p.
- [3] Matveev V.A., Lipatnikov V.I., Alekhin A.V. *Проектирование волнового твердотельного гироскопа* [Designing a hemispherical resonator gyro]. Moscow, MG TU im. N.E. Bauman Publ., 1997. 168 p.
- [4] Sheremet’ev A.G. *Волоконный оптический гироскоп* [Fiber optical gyroscope]. Moscow, Radio i Svyaz’ Publ., 1987. 152 p.
- [5] Pakhomov I.I., Rozhkov O.V., Rozhdestvin V.N. *Оптико-электронные квантовые приборы* [Electro-optical quantum devices]. Moscow, Radio i Svyaz’ Publ., 1982. 456 p.
- [6] Chesnoy J. Picosecond gyrolaser. *Optic Letters*, 1989, vol. 14, pp. 990–992.
- [7] Dennis M.L., Diels J.-C., Lai M. Femtosecond ring dye laser: a potential new laser gyro. *Optic Letters*, 1991, vol. 16, pp. 529–531.
- [8] Tausenev A.V., Obratsova E.D., Lobach A.S., Chernov A.J., Kotov V.J., Kryukov P.G., Konyachenko A.V., Dianov E.M. 177 fs erbium-doped fiber laser mode locked with a cellulose polymer film containing single-wail carbon nanotubes. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, vol. 92: 171113.
- [9] Antonova M.V., Gusev A.P., Novikov L.Z. Experimental investigation of the registration dependence of the fiber-optic gyroscope vs its orientation relative to vertical. *Nauch.-tekhn. sb. “Raketno-kosmicheskaya tekhnika”. Ser. XI. Sist. upravleniya raketnykh kompleksov* [Sc.-Eng. Collect. Pap. “Rocket Space Engineering”. Ser. XI. Control system of missile systems], 2010, iss. 2, part I (in Russ.).

- [10] Antonova M.V., Gusev A.P., Novikov L.Z. Work to refine the mathematical model of the errors of fiber-optic gyroscope. Sb. dokladov VIII Nauch.-Prakt. Konf. molodykh spetsialistov i studentov pamyati glavnogo konstr. ak. V.I.Kuznetsova [Proc. VIII Sc.-Pract. Conf. of students and young professionals memory Ch. Designer Acad. V.I. Kuznetsova]. Moscow, MGTU im. N.E. Baumana, 2010 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 27.02.2014

Мария Вячеславовна Антонова — аспирантка кафедры “Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации” МГТУ им. Н.Э. Баумана, специалист филиала ФГУП “ЦЭНКИ”—“НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова”. Автор 11 научных работ в области волоконно-оптических гироскопов и приборов на их основе. Филиал ФГУП “ЦЭНКИ”—“НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова”, Российская Федерация, 111123, Москва, ул. Авиамоторная, д. 55.

M.V. Antonova — post-graduate of “Devices and Systems of Orientation, Stabilization and Navigation” department of the Bauman Moscow State Technical University, specialist of the Kuznetsov Research Institute of Applied Mechanics, Branch of Center of Operation of Ground-Based Space Infrastructure Facilities. Author of 11 publications in the field of fiber-optic gyros and devices based on them. Kuznetsov Research Institute of Applied Mechanics, Branch of Center of Operation of Ground-Based Space Infrastructure Facilities, Aviamotornaya ul. 55, Moscow, 111123 Russian Federation.

Валерий Александрович Матвеев — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой “Информационная безопасность” МГТУ им. Н.Э. Баумана, руководитель НУК “Информатика и системы управления” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 200 научных работ и 23 патентов в области информатики, систем управления и навигации. МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

V.A. Matveev — Dr. Sci. (Eng.), professor, head of “Information Security” department of the Bauman Moscow State Technical University, chief of the Scientific and Educational Complex for Information Technologies and Control Systems of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 200 publications and 23 patents in the field of information technologies, systems of control and navigation. Bauman Moscow State Technical University, Vtoraya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.