

## КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ПОГРЕШНОСТЕЙ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА ПРИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

К. С. ГАЛЯГИН, М. А. ОШИВАЛОВ, Ю. А. СЕЛЯНИНОВ, М. А. САВИН

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

Разработана компьютерная модель прогноза дрейфа волоконно-оптического гироскопа в условиях внешних тепловых и механических воздействий на датчик чувствительности. В модели учтены пьезооптические эффекты. При расчете напряженно-деформированного состояния конструкции выполняется подробная дискретизация каждого витка волокна в оптоволоконном контуре. Модель реализована с помощью программного комплекса STAR-CCM+, при построении модели использован постпроцессор, разработанный авторами.

**Ключевые слова:** *волоконно-оптический гироскоп, дрейф, фиктивная угловая скорость, компьютерная модель, термоупругость, пьезооптика.*

Волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) перспективно применять в навигационных системах. С появлением на рынке высококачественных оптических волокон с низким уровнем потерь и устойчивой поляризацией, совершенствованием технологии производства оптических компонентов класс точности прецизионных ВОГ существенно повысился. Достижимая точность современных ВОГ составляет  $\sim 10^{-3}$  град/ч, в настоящее время эти приборы успешно конкурируют с механическими и лазерными гироскопами.

Снижения вызванной внешними воздействиями фазовой невзаимности ВОГ добиваются с помощью различных алгоритмов прогноза и коррекции выходного сигнала в реальном масштабе времени работы прибора [1—5]. В этих алгоритмах используются результаты натурных испытаний ВОГ. Как показали исследования, проведенные на предприятии ПНППК, эффективность применения ВОГ существенно зависит от конструкции чувствительного элемента конкретного экземпляра прибора и качества его изготовления. В связи с этим оптимизация конструкции датчика чувствительности остается весьма актуальной задачей.

В работе [6] представлена математическая модель возникновения фиктивной угловой скорости ВОГ, вызванной внешними нестационарными тепловыми воздействиями на датчик чувствительности (тепловой дрейф). Численные эксперименты, в частности, позволили сделать вывод об определяющем влиянии на величину теплового дрейфа напряженно-деформированного состояния (НДС) оптоволоконного контура, и о том, что для снижения дрейфа необходимо минимизировать механические напряжения.

Методика расчета термостабилизированного НДС контура, изложенная в работе [6], трудоемка, в основном из-за того, что задачу следует решать в два этапа. Поскольку массив оптоволоконной структуры представляет собой структурно-неоднородную среду с периодическим расположением волокон (ячеек периодичности), на первом этапе решаются краевые задачи о простом деформировании ячейки (одноосное растяжение, сдвиг) с целью определения структурных напряжений и деформаций, а также макроскопических термомеханических свойств анизотропной среды. Расчеты выполнялись на программном комплексе ANSYS. На втором этапе задача расчета термостабилизированного НДС датчика чувствительности решалась с использованием разработанной авторами программы.

Такой подход позволяет оценить влияние внешних тепловых воздействий на НДС датчика чувствительности (а следовательно, и на величину дрейфа), однако оценка влияния механических воздействий при этом практически невозможна.

В настоящей работе предлагается новый подход к решению поставленной задачи. Его принципиальной особенностью является подробная дискретизация оптоволоконного массива в целом и отдельно каждого витка оптоволоконного массива. Такой подход позволяет отказаться от привычных моделей ортотропных либо полидисперсных сред, а рассматривать материалы в отдельности, учитывая их взаимодействие. Причем учитывается реальная геометрия как корпуса ВОГ, так и оптического волокна. Такой вариант постановки задачи и разработки соответствующей компьютерной модели стал возможным благодаря появлению новых современных программных комплексов и доступных высокопроизводительных вычислительных средств.

Для реализации модели использован пакет STAR-CCM+ компании CD-adapco, такой выбор для расчетов термоупругости обусловлен конечно-объемной идеологией пакета. Соотношения записываются в конечных разностях, а не в вариационной постановке, как у конечно-элементных пакетов (ANSYS, ABAQUS). Таким образом, решением становится единственная функция, а не семейство. Использование конечных объемов позволяет значительно увеличить размерность сеточной модели для более точного описания геометрии и получения более качественного решения, так как решение задачи ищется в зоне упругости, не требуется каких-либо специальных моделей для твердых тел, а стандартные изотропные упругие модели полностью поддерживаются выбранным для расчетов пакетом.

Компьютерная модель корпуса датчика чувствительности строится на основе САД-геометрии гироскопа. При этом в ходе подготовки модели удаляются различные крепежные детали, фаски, уклоны, не влияющие на качество решения, а лишь увеличивающие размерность расчетной сетки. В целях экономии вычислительных ресурсов решено было использовать осесимметричную модель с углом сектора  $0,2^\circ$ .

Оптоволоконный массив в этом случае моделируется не однородным ортотропным телом, а составным упругим, имеющим регулярную микронеоднородную структуру. Структурный базовый элемент содержит один виток волокна, вписанный в правильный шестиугольник. На рис. 1 приведена схема базового элемента, включающая кварцевую оболочку с боросиликатными силовыми стержнями 2, два защитно-упрочняющих покрытия (ЗУП) и фрагмент компаундной пропитки 1 ( $D1$  — диаметр кварцевой оболочки;  $D2$ ,  $D3$  — диаметры ЗУП).

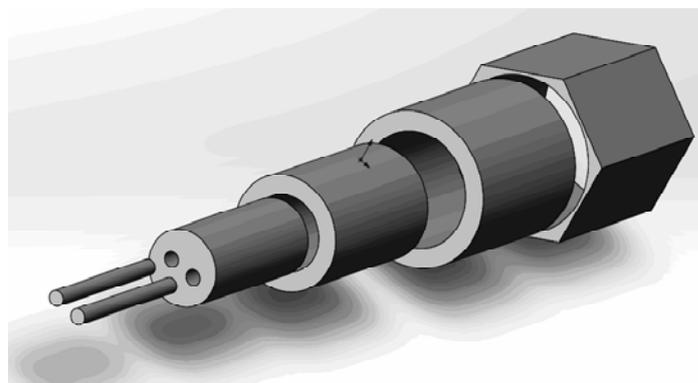
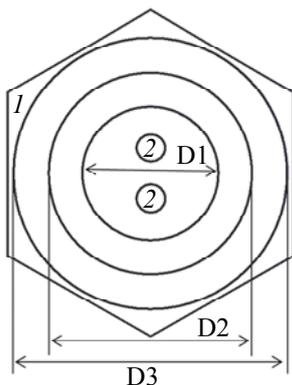


Рис. 1

Ввиду незначительного отличия механических свойств центрального кварцевого волновода от свойств кварцевой оболочки его моделирование не выполняется.

Для исключения погрешности численного решения, связанной с различными размерами и количеством конечных объемов в каждом базовом элементе, дискретизация оптоволокон-

ного массива проходит в несколько этапов. Сначала генерируется конечно-объемная сетка для каждого радиального базового элемента (рис. 2).

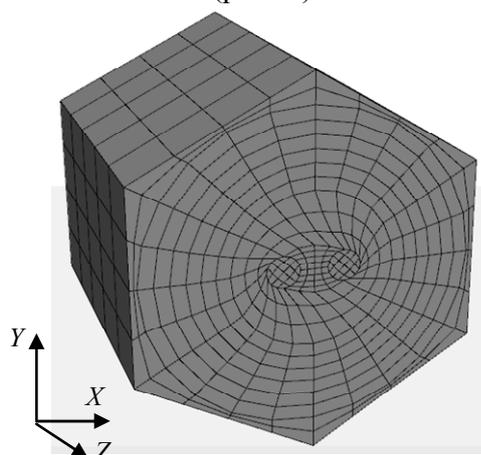


Рис. 2

Затем путем последовательного тиражирования базового элемента в аксиальном направлении создается слой оптического волокна. После создания необходимого числа слоев осуществляется их сшивка. В результате этой процедуры генерируется качественная абсолютно идентичная для каждого витка волокна сетка с гарантированным совпадением узлов по границам базовых элементов.

Вся процедура автоматизирована и может выполняться для любой конфигурации оптоволоконного массива (число слоев, витков в слое), включая нестандартную геометрию (например, трапецевидную).

Сетка для оставшегося объема датчика генерируется также в автоматическом режиме, но с использованием встроенного сеточного генератора пакета STAR-CCM+. Сетка на границах, соприкасающихся с сеткой оптоволоконного массива, измельчена до необходимого уровня для исключения погрешностей при передаче тепловых потоков и перемещений как от каркаса к оптоволоконному контуру, так и наоборот. Итоговый вариант сеточной модели в рамках осесимметричной постановки приведен на рис. 3 (1 — оптоволоконный контур; 2 — каркас катушки; 3 — основание; 4 — электромагнитный экран; 5 — воздух).

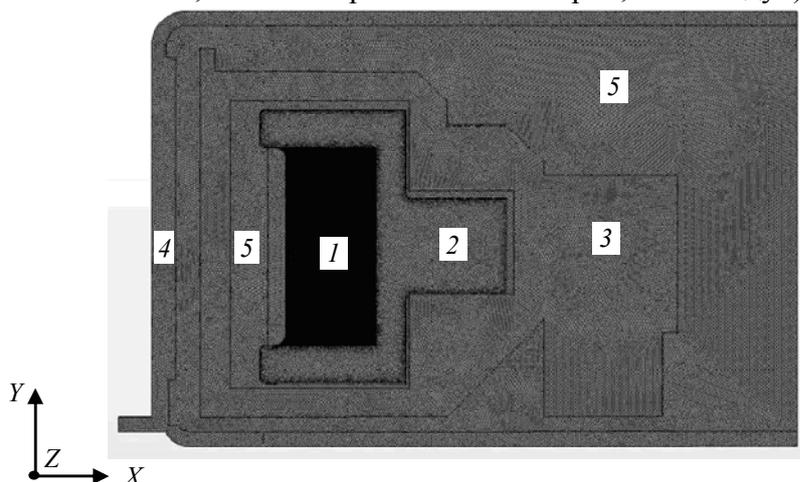


Рис. 3

Тепловое воздействие окружающей среды моделируется граничными условиями конвективного теплообмена по закону Ньютона—Рихмана с заданием коэффициента теплоотдачи на наружной поверхности электромагнитного экрана и температуры среды, изменяющейся по определенному закону.

Решение задачи представляет собой пошаговое интегрирование по времени с последовательным расчетом теплового и напряженно-деформированного состояния области на каждом временном шаге. Полученные расчетные данные обрабатываются в постпроцессоре и используются при решении задач пьезооптики, расчета фазового набегга и „кажущейся“ угловой скорости.

Основной расчет проводится под управлением макроса, автоматически экспортирующего необходимые данные (для расчета дрейфа в постпроцессоре — температура и главные напряжения в центре каждого витка оптического волокна) в определенное время. Перед непосредственным вычислением дрейфа выполняется преобразование исходных расчетных данных: массивы входных данных упорядочиваются в соответствии со схемой укладки волокна в катушке оптоволоконного контура (квадрупольной симметричной или несимметричной, дипольной и т.д.) [7]. Затем формируются одномерные массивы показателя преломления, скорости его изменения и изменения температуры по длине „размотанного“ волокна. При этом с учетом осевой симметрии задачи элементом дискретизации является один виток контура, в пределах которого показатель преломления  $n$  изменяется линейно:

$$n(x, \tau^*) = n(x, 0) + n'(x, 0)\tau^*, \quad (1)$$

где  $x$  — координата вдоль оптического контура;  $n'$  — скорость изменения  $n$ , определяемая численным дифференцированием по времени;  $\tau^*$  — время прохождения лучом оптического контура.

Оптический путь и время прохождения контура для двух встречно распространяющихся лучей  $\tau_1^*$  и  $\tau_2^*$  определяются с помощью численного интегрирования уравнения движения:

$$\frac{dx}{d\tau^*} = \frac{c}{n(x, \tau^*)}, \quad (2)$$

где  $c$  — скорость света в вакууме.

По полученным данным с учетом длины волны излучения  $\lambda$  вычисляются индуцированная внешними воздействиями фаза Саньяка

$$\Delta\varphi_T = \frac{2\pi c}{\lambda} (\tau_1^* - \tau_2^*) \quad (3)$$

и „кажущаяся“ угловая скорость  $\Omega_T$ .

Так, на рис. 4, а демонстрируется распределение коэффициента преломления по длине волокна  $l$  в некоторый промежуточный момент времени (2000 с). На рисунке прослеживается явная асимметрия, в большей степени на наружных витках, приводящая к дрейфу (рис. 4, б).

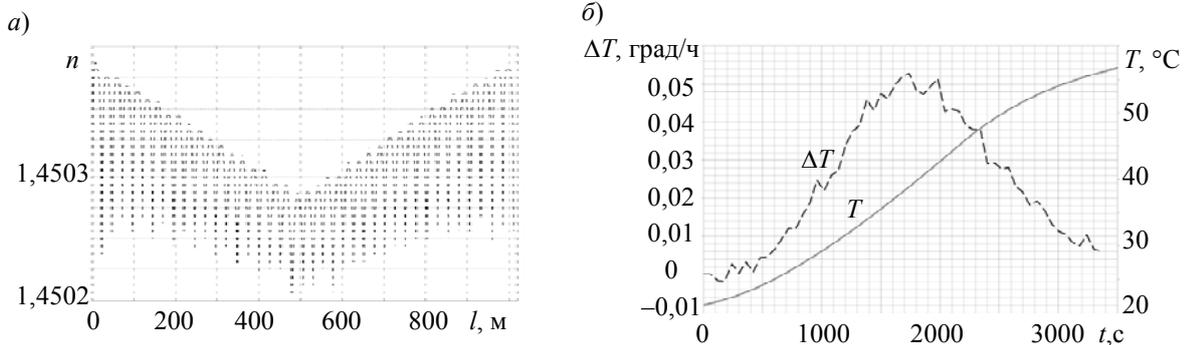


Рис. 4

Тепловой дрейф  $\Delta T$  рассчитан с учетом стандартного термоцикла, по которому проводятся термоиспытания реальных изделий в термокамере. Из всего термоцикла выбран участок нагрева с  $+20$  до  $+60$  °C со скоростью нагрева термокамеры  $1$  °C/мин. „Дребезг“ кривой дрейфа обусловлен численными погрешностями, так как значение разности фаз крайне мало (порядка  $10^{-21}$  с).

Реализованная в такой постановке компьютерная модель позволяет оценить отклик датчика чувствительности ВОГ как на внешние тепловые, так и на механические воздействия (удар или вибрации). В настоящее время она успешно используется на стадии проектирования ВОГ для оценки и визуализации разнообразных конструкторских решений, направленных на снижение погрешностей прибора в условиях внешних воздействий.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Филатов Ю. В. Волоконно-оптический гироскоп. СПб: СПб ГЭТУ „ЛЭТИ“, 2003. 52 с.
2. Шереметьев А. Г. Волоконный оптический гироскоп. М.: Радио и связь, 1987. 152 с.
3. Джашитов В. Э., Панкратов В. М. Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем. СПб: ГНЦ-ЦНИИ „Электроприбор“, 2001. 152 с.
4. Драницына Е. В., Егоров Д. А. Исследование зависимости выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа от температуры в составе бескарданного инерциального измерительного модуля // Докл. XIV конф. молодых ученых „Навигация и управление движением“. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2012. С. 447—452.
5. Вахрамеев Е. И. и др. Прогноз и коррекция теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 5. С. 79—84.
6. Вахрамеев Е. И. и др. Тепловой дрейф волоконного оптического гироскопа // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 1. С. 32—37.
7. Lefevre H. C. Fiber-optic Gyroscopes. Boston: Artech House, 1993. 314 p.

**Сведения об авторах**

- Константин Спартакovich Галягин** — канд. техн. наук, доцент; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра сварочного производства и технологии конструкционных материалов; E-mail: abins@pstu.ru
- Михаил Анатольевич Ошивалов** — канд. техн. наук, доцент; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра сварочного производства и технологии конструкционных материалов; E-mail: abins@pstu.ru
- Юрий Анатольевич Селянинов** — канд. техн. наук, доцент; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра сварочного производства и технологии конструкционных материалов; E-mail: abins@pstu.ru
- Максим Анатольевич Савин** — аспирант; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра сварочного производства и технологии конструкционных материалов; E-mail: abins@pstu.ru

Рекомендована кафедрой сварочного производства и технологии конструкционных материалов ПНИПУ

Поступила в редакцию 22.06.15 г.

**Ссылка для цитирования:** Галягин К. С., Ошивалов М. А., Селянинов Ю. А., Савин М. А. Компьютерная модель погрешностей выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа при внешних воздействиях // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 12. С. 979—984.

**A COMPUTER MODEL OF OUTPUT SIGNAL ERRORS FOR FIBER OPTIC GYROSCOPE UNDER EXTERNAL INFLUENCE**

**K. S. Galyagin, M. A. Oshivalov, Yu. A. Selyaninov, M. A. Savin**  
Perm National Research Polytechnic University, 614990, Perm, Russia,  
E-mail: abins@pstu.ru

A computer model has been developed to predict temperature drift of sensing elements in fiber-optic gyroscope under external thermal and mechanical actions with the account for the piezo-optic effects.

A distinguishing feature of the model is that computation of the stress-strain state of the structure is based on detailed discretization of each turn of the optic fiber in the optic fiber loop. The model is implemented in the framework of the STAR-CCM + software used in combination with a post processor developed by the authors.

**Keywords:** fiber-optic gyroscope, drift, fictitious angular velocity, computer model, thermal elasticity, piezo-optics.

**Data on authors**

- Konstantin S. Galyagin** — PhD, Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, Department of Welding production technology and construction materials; E-mail: abins@pstu.ru
- Mihail A. Oshivalov** — PhD, Associate Professor, Perm National Research Polytechnic University, Department of Welding production technology and construction materials; E-mail: abins@pstu.ru
- Yurij A. Selyaninov** — 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; E-mail: abins@pstu.ru

**For citation:** Galyagin K. S., Oshivalov M. A., Selyaninov Ju. A., Savin M. A. A computer model of output signal errors for fiber optic gyroscope under external influence // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2015. Vol. 58, N 12. P. 979—984 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-12-979-984