

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДРЕЙФА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА ПРИ ВНЕШНЕМ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

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

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, Пермь, Россия*

E-mail: Savin.MA@yandex.ru

Приведены результаты исследований, посвященных численному моделированию процесса возникновения фазовой невязанности (дрейфа), индуцированной внешними нестационарными механическими воздействиями на датчик чувствительности волоконно-оптического гироскопа (ВОГ). Исследования проводились с использованием разработанной авторами методики численного моделирования. Особенность ее заключается в том, что расчетная область построена на основании САД-модели датчика чувствительности ВОГ. Она включает не только катушку оптоволоконного контура, но и элементы конструкции. Оптоволоконный контур рассматривается как неоднородная среда с учетом собственной периодической микроструктуры без осреднения свойств материалов. Задача о нестационарном напряженно-деформированном состоянии решается для всей расчетной области, а затем с использованием определяющих соотношений пьезооптики рассчитываются время хода встречных лучей по оптическому контуру ВОГ и результирующий дрейф. Такой подход позволяет моделировать возникновение дрейфа в условиях как тепловых, так и механических внешних воздействий. Приведены результаты расчетов, направленных на исследование вида функции дрейфа при варьировании длительности ударного импульса, а также серии импульсов. Показано, в частности, что расчетный дрейф по форме коррелирует с первой производной функции силы по времени. Оценка расчетной амплитуды дрейфа в сравнении с данными стендовых испытаний датчика угловой скорости показывает хорошее согласование результатов.

Ключевые слова: *волоконно-оптический гироскоп, дрейф, фазовая невязанность, дилатационные волны, удар, импульс силы, фотоупругость, численное моделирование, оптоволоконный контур, микроструктура волокна*

Введение. Волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) [1] в силу своих очевидных преимуществ перед механическими и лазерными гироскопами на сегодняшний день наиболее востребован при создании современных навигационных приборов и систем управления. Вместе с тем многочисленные исследования и разработки показывают, что несмотря на относительную простоту окончательной схемы ВОГ остается достаточно сложным инструментом со многими источниками разнообразных погрешностей, которые необходимо понимать и контролировать. Эти погрешности вызывают паразитные дрейфы, искажающие полезный сигнал, а следовательно, снижающие точность измерений.

В современных прецизионных ВОГ многие погрешности минимизированы уже на стадии конструирования приборов. Основные проблемы чаще всего связаны с различного рода внешними воздействиями на датчик чувствительности (ДЧ) — оптоволоконный контур гироскопа.

Довольно подробно изучена проблема термически индуцированного дрейфа ВОГ, возникающего в условиях внешних нестационарных тепловых воздействий [2, 3] и приводящего к ошибкам в показаниях гироскопа. Существует несколько путей преодоления этой проблемы: разработка алгоритмов численной коррекции выходного сигнала гироскопа в реальном

масштабе времени [4, 5], прямое компьютерное моделирование отклика ВОГ на внешние воздействия с последующим анализом результатов и модернизацией конструкции изделия (изоляции, условий крепления ДЧ и пр.), а также разработка оптимальных схем укладки оптического волокна на каркас датчика чувствительности ВОГ с использованием новых высококачественных оптических волокон, менее подверженных температурному воздействию и т.д.

Другая причина возникновения „кажущейся“ угловой скорости связана с внешними механическими воздействиями: ударами и вибрацией. Дрейф ВОГ, вызванный ударным воздействием, принято считать возмущением малой длительности, но несмотря на это возмущения в результате удара имеют довольно большую амплитуду (сотни и даже тысячи градусов в час), что приводит к значительным искажениям полезного сигнала.

Любое механическое воздействие на гироскоп — удар, вибрация — отражается на напряженно-деформированном состоянии (НДС) волоконно-оптического массива. Причем изменение НДС происходит неравномерно по области и с высокой скоростью — скоростью распространения ударных волн в материале. При переходе через границу раздела тел с различными свойствами изменяются скорость, направление распространения и количество фронтов волн, что вызывает дополнительное искажение НДС. Столь быстрое (длительность ударных импульсов от 1 мкс до 10 мс, скорость распространения волн в материале от 2 до 5 км/с) и неоднородное изменение НДС по объему приводит за счет фотоупругих эффектов к изменению показателя преломления кварцевой жилы световода и как следствие — к возникновению дрейфа ВОГ (Ω).

Эффект искажения сигнала ВОГ при ударном воздействии на датчик чувствительности иллюстрирует рис. 1. На рисунке приведены результаты синхронной регистрации показаний акселерометра (1) и отклика образца датчика чувствительности (2) в виде индуцированного дрейфа (испытания проводились на стенде АО ПНППК для датчика с квадрупольной намоткой волокна по закрытой схеме обработки выходного сигнала ВОГ). Датчик чувствительности установлен на массивной стальной пластине, падающей с заданным ускорением на упругое основание. Результаты, представленные на рисунке, соответствуют длительности первого ударного импульса 5 мс с перегрузкой в момент удара в 80g. Как видно из графиков, после основного удара пластина совершила три отскока.

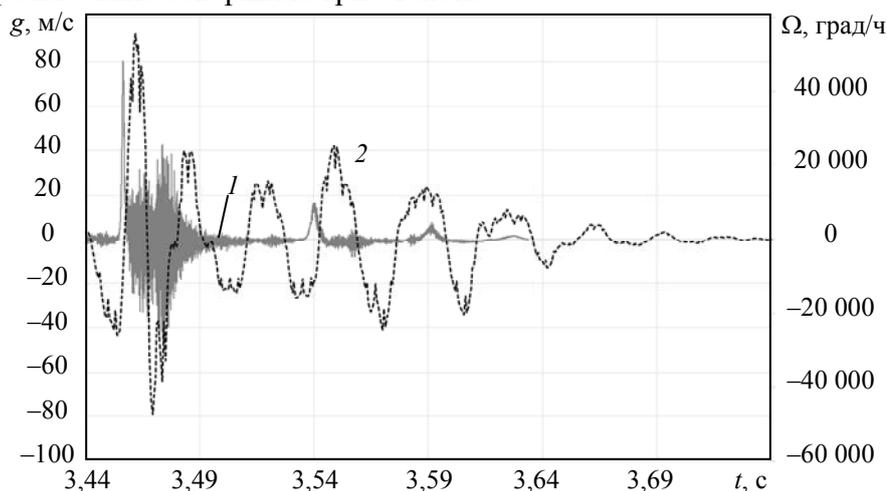


Рис. 1

Как видно из рисунка, амплитуда дрейфа при первом ударе $5,5 \cdot 10^4$ град/ч, а общее время дрейфа составляет порядка 0,3 с.

Анализ публикаций, посвященных исследованию поведения ВОГ в условиях внешних механических воздействий [6—10], свидетельствует об актуальности этой проблемы. Однако работы [6—10] ориентированы в основном на создание различных методик алгоритмической компенсации дрейфа ВОГ, возникающего в результате вибрации и ударной нагрузки.

Так, в работе [7] построена математическая модель возникновения дрейфа на основе анализа выходного сигнала ВОГ, которая может быть использована при построении алгоритма компенсации фазовой невязности. Другой подход подразумевает моделирование дрейфа, вызванного вибрацией, с помощью представления оптоволоконного контура в виде вязкоупругой среды (модель Кельвина—Фойгта) [8] с последующим разрешением дифференциальных уравнений движения.

В то же время изучение литературных источников показывает, что прямое численное моделирование паразитных дрейфов в результате механических воздействий на ВОГ с учетом динамики изменения напряженно-деформированного состояния ДЧ в исследованиях практически не применяется.

Целью настоящей работы является практическая апробация методики численного моделирования дрейфа ВОГ, возникающего вследствие внешней ударной нагрузки на датчик чувствительности с учетом его реальной конструкции.

Методика численного расчета. В предыдущих работах авторов [3, 11] изложены основные аспекты построения математической модели возникновения „кажущейся“ угловой скорости ВОГ, вызванной внешними нестационарными тепловыми воздействиями на оптоволоконный контур гироскопа (тепловой дрейф). Сопоставление расчетных данных с экспериментальными позволило сделать вывод об определяющем влиянии НДС контура и фотоупругих эффектов на величину теплового дрейфа. Разработанная методика дала возможность прогнозировать возникновение дрейфа в условиях внешних тепловых воздействий, однако применение ее для оценки влияния механических воздействий на датчик чувствительности гироскопа оказалось малоэффективным. В основном это вызвано тем, что используемое осреднение термомеханических свойств по массиву оптоволоконного контура на основе решения задачи о деформировании ячейки периодичности не позволяет адекватно описать волновые процессы в неоднородной среде.

При разработке моделей дрейфа нового поколения был предложен иной подход к постановке и решению задачи [11, 12]. Особенность численного моделирования здесь заключается в предельно подробной дискретизации расчетной области, построенной на основе САД-геометрии конструкции, включающей собственно оптоволоконный контур, а также каркас катушки и элементы конструкции ДЧ.

Оптоволоконный контур здесь представляется не анизотропным материалом с усредненными по объему свойствами, а неоднородной средой с собственной периодичной микроструктурой. В качестве структурного элемента рассматривается отдельный виток световода, включающий кварцевую оболочку, два защитно-упрочняющих покрытия, силовые нагрузочные стержни и фрагменты компаундной межвитковой заливки. Материал каждой части структурного элемента имеет соответствующие термомеханические свойства. Сам волновод (светопроводящая жила диаметром 10 мкм), расположенный в центре кварцевой оболочки, не моделируется ввиду ничтожного отличия его свойств от свойств кварцевой оболочки. Каждый структурный элемент покрывается конечно-объемной сеткой (рис. 2, 1 — компаунд, 2 — вторичное защитно-упрочняющее покрытие, 3 — первичное защитно-упрочняющее покрытие, 4 — кварцевая оболочка, 5 — боросиликатные силовые стержни, 6 — световодная жила). Затем с помощью специального генератора формируется сеточная модель массива оптоволоконного контура с учетом необходимого числа витков контура. Аналогичной сеточной дискретизации подвергаются и остальные элементы конструкции ДЧ.

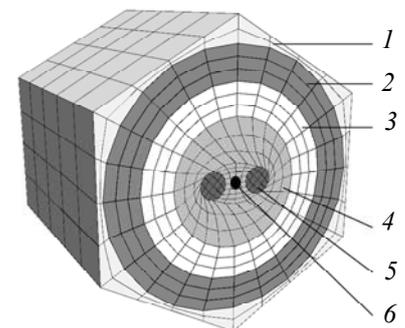


Рис. 2

Расчет НДС конструкции осуществляется с использованием пакета STAR-CCM+ в осесимметричной постановке, а затем на основе информации о динамике развития НДС световода с помощью авторского программного кода, содержание которого подробно изложено в статье [12], оценивается индуцированный внешними воздействиями дрейф ВОГ. При расчете фиктивной угловой скорости используется квадрупольная схема укладки волоконного контура на каркасе датчика.

Такой подход к решению задачи позволяет моделировать возникновение дрейфа в условиях как тепловых, так и механических внешних воздействий без какой-либо модернизации алгоритма.

Постановка задачи. Расчетная схема задачи моделирования дрейфа ВОГ в условиях осевой симметрии датчика чувствительности представлена на рис. 3. Серым цветом здесь обозначен металлический конструктив датчика, белым — воздушные зазоры, а штриховкой — массив волоконно-оптического контура, уложенного на каркасе. Вся конструкция зафиксирована по кольцевому выступу каркаса на внутреннем радиусе.

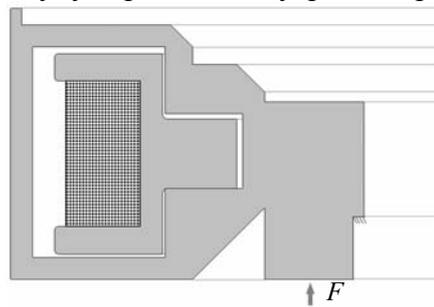


Рис. 3

Внешнее силовое воздействие моделируется импульсом силы, приложенным к основанию ДЧ. Импульс силы (I) представляется в виде гладкой функции, в данном случае составленной из трех последовательных парабол с максимальной амплитудой в 12 Н (рис. 4). На рисунке показана также первая производная от величины силы F по времени (2).

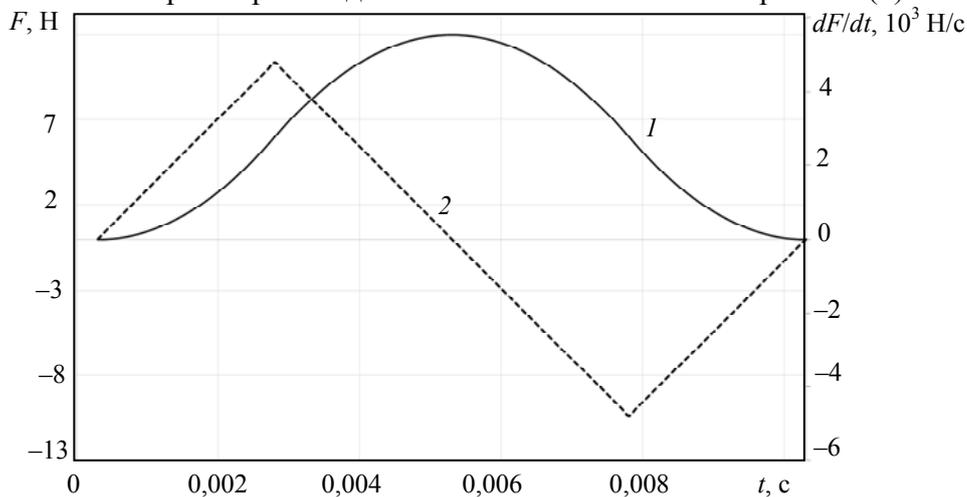


Рис. 4

Результаты численных экспериментов. На рис. 5 приведены результаты численного прогноза дрейфа (I) при воздействии силовых импульсов длительностью 1,75 (а) и 0,1 мс (б) при $F = 12$ Н.

Из анализа полученных расчетных данных можно сделать вывод, что в целом дрейф гироскопа согласуется с динамикой изменения силового воздействия на ДЧ (первая производная силы F по времени 2). При этом продолжительность ударного возмущения играет здесь вполне определенную роль. При относительно „длинных“ силовых импульсах (рис. 5, а) ам-

плитуда фиктивного всплеска угловой скорости составляет 3600 град/ч, который затухает практически после окончания действия импульса нагрузки.

С уменьшением длительности импульса силы до 0,1 мс (рис. 5, б) максимальная амплитуда дрейфа возрастает более чем в 35 раз и превышает 10^5 град/ч. При этом по окончании силового воздействия наблюдается постепенное затухание фиктивных показаний гироскопа в течение достаточно продолжительного времени. Колебания дрейфа объясняются волновой природой распространения механических возмущений. После приложения нагрузки в элементах конструкции возникают ударные дилатационные Р-волны и S-волны искажения [13—15], которые неоднократно отражаются от границ, интерферируют между собой и вызывают колебания витков оптического контура, порождающие дрейф.

На рис. 5, б отчетливо видна временная задержка возникновения фиктивных показаний гироскопа относительно момента начала действия силы, связанная с некоторым удалением точки удара от волоконно-оптического массива датчика чувствительности.

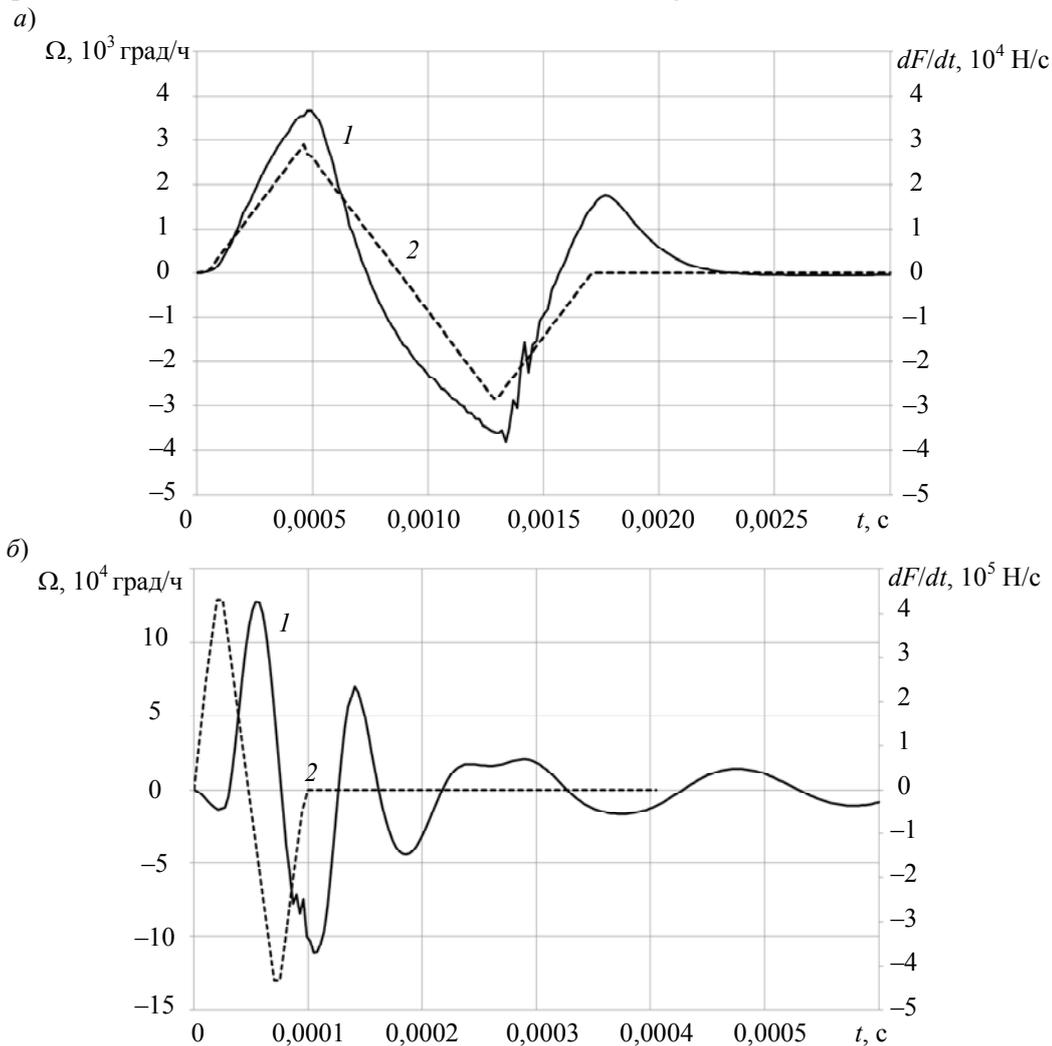


Рис. 5

Более сложная картина дрейфа возникает при воздействии серии коротких силовых импульсов. На рис. 6 нагрузка имитирована двумя короткими последовательными импульсами с интервалом 0,25 мс. Длительность импульсов 0,1 мс, амплитуда первого 12 Н, второго — 6 Н.

Из графиков видно, что во время действия нагрузки (1) функция дрейфа (2) представляет собой колебательный процесс, а по окончании дрейф продолжается еще в течение ≈ 2 мс в виде периодически затухающих колебаний. Приведенные результаты позволяют прогнозировать, что воздействие серии даже коротких аperiodических импульсов с различной амплитудой

вызывает большие и достаточно длительные искажения полезного сигнала ВОГ, приводящие к ошибкам в определении угловой скорости.

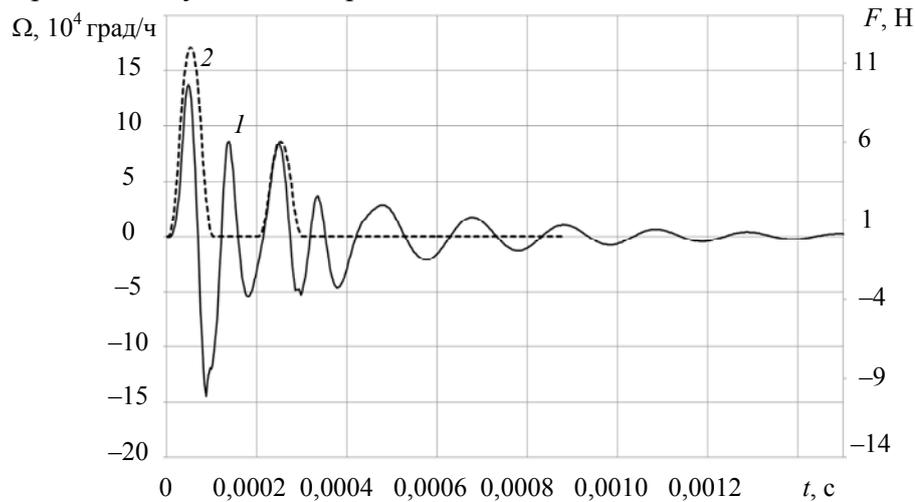


Рис. 6

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных. В ходе проведения расчетов полученные результаты сравнивались с данными стендовых испытаний образцов ДЧ. Так, на рис. 7 приведены результаты численного моделирования ударного воздействия на ДЧ, где в качестве нагрузки рассмотрен импульсы силы (1), по амплитуде и продолжительности соответствующий первому импульсу в условиях проведения эксперимента (см. рис. 1). Согласно показаниям акселерометра, его амплитуда соответствует перегрузке 80 g, длительность импульсов 5 мс. Импульс силы, как и прежде, моделируется параболическими функциями (см. рис. 4).

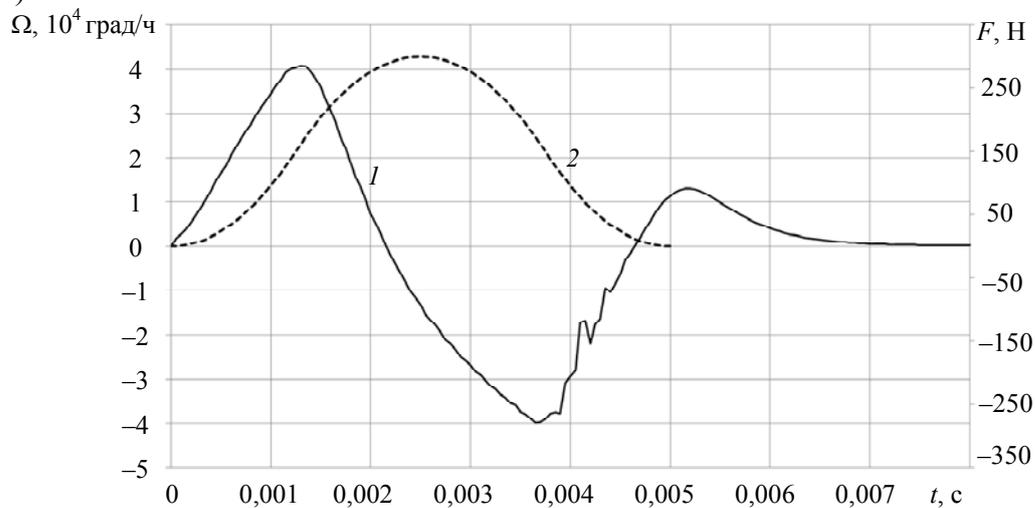


Рис. 7

Анализируя результаты, можно отметить, что амплитуда расчетного дрейфа $4 \cdot 10^4$ град/ч вполне удовлетворительно согласуется с экспериментом, где она составила $5,5 \cdot 10^4$ град/ч.

В то же время „экспериментальный“ дрейф продолжается значительно дольше расчетного. В основном это объясняется как условиями проведения испытаний (удар об упругое основание, отсутствие контроля плоскопараллельности падения стальной пластины с ДЧ), так и допущениями концептуальной постановки задачи моделирования (осесимметричность, отсутствие дефектов намотки и др.). В частности, при решении задачи в осесимметричной постановке расчетная схема (см. рис. 3) упрощена за счет исключения некоторых элементов реальной конструкции ДЧ. Нужно отметить, что адекватность численного моделирования во многом определяется достоверностью задания свойств материалов. Так, механические свой-

ства полимерных материалов в массиве оптоволоконного контура (защитно-упрочняющие покрытия, компаунд), а также некоторых элементов каркаса известны лишь приближенно.

Заключение. Таким образом, даже с учетом принятых допущений рассматриваемая методика численного прогноза дрейфа ВОГ позволяет достаточно адекватно анализировать основные закономерности возникновения фиктивных показаний прибора в условиях механических возмущений. Использование этой методики в форме вариантных расчетов может быть полезно для поиска путей повышения точности и надежности прибора на стадии разработки конструкции датчика чувствительности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шереметьев А. Г.* Волоконный оптический гироскоп. М.: Радио и связь, 1987. 152 с.
2. *Джашитов В. Э., Панкратов В. М.* Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем. СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ „Электроприбор“, 2001. 150 с.
3. *Вахрамеев Е. И., Галягин К. С., Ивонин А. С., Ошивалов М. А., Ульрих Т. А.* Тепловой дрейф волоконно-оптического гироскопа // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 1. С. 32—37.
4. *Вахрамеев Е. И., Галягин К. С., Ивонин А. С., Ошивалов М. А.* Прогноз и коррекция теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 5. С. 79—84.
5. *Рупасов А. В.* Исследование метода локального температурного воздействия и его применение для компенсации дрейфа волоконно-оптического гироскопа: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. СПб, 2014.
6. *Zhang Zhuomin, Hu Wenbin, Liu Fang, Gan Weibing, Yang Yan.* Vibration Error Research of Fiber Optic Gyroscope in Engineering Surveying // TELKOMNIKA. 2013. Vol. 11, N 4. P. 1948—1955.
7. *Kurbatov M., Kurbatov R. A.* The Vibration Error of the Fiber-Optic Gyroscope Rotation Rate and Methods of Its Suppression // J. of Communications Technology and Electronics. 2013. Vol. 58, N 8. P. 840—846.
8. *Zhongxing Gao, Yonggang Zhang, Yunhao Zhang.* Modeling for IFOG Vibration Error Based on the Strain Distribution of Quadrupolar Fiber Coil // Sensors. 2016. Vol. 16. DOI:10.3390/s16071131.
9. *Pan Xiong, Zhang Chun-Sheng, Wang Xi-Chen, Wang Xia-Xiao.* Vibration error suppression technique for a fiber optic gyroscope based on partial demodulation and feedback in advance // J. of Vibration and Shock. 2015. Vol. 34, N 15. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2015.15.012.
10. *Волковский С. А.* Создание и исследование алгоритмических методов повышения точностных и эксплуатационных характеристик волоконно-оптического гироскопа: Дис. ... канд. тех. наук. СПб, 2016.
11. *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. 7—11.
12. *Галягин К. С., Ошивалов М. А., Савин М. А.* Учет пьезооптических эффектов при моделировании теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа // Вестник ПНИПУ. Механика. 2015. № 4. С. 55—71.
13. *Kinslow R.* High velocity impact phenomena. NY; London: Academic Press, 1970.
14. *Пановко Я. Г.* Основы прикладной теории колебаний и удара. Л.: Машиностроение, 1976.
15. *Кильчевский Н. А.* Теория соударения твердых тел. Киев: Наукова думка, 1969.

Сведения об авторах

- Константин Спартакович Галягин** — канд. техн. наук, доцент; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра сварочного производства, метрологии и технологии материалов; E-mail: abins@pstu.ru
- Михаил Анатольевич Ошивалов** — канд. техн. наук, доцент; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра сварочного производства, метрологии и технологии материалов; E-mail: abins@pstu.ru
- Максим Анатольевич Савин** — аспирант; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра сварочного производства, метрологии и технологии материалов; старший преподаватель; E-mail: Savin.MA@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
сварочного производства, метрологии
и технологии материалов

Поступила в редакцию
27.06.17 г.

Ссылка для цитирования: Галягин К. С., Ошивалов М. А., Савин М. А. Численное моделирование дрейфа волоконно-оптического гироскопа при внешнем ударном воздействии // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 12. С. 1169—1176.

NUMERICAL MODELING OF THE DRIFT OF A FIBER-OPTIC GYROSCOPE WITH EXTERNAL SHOCK EXPOSURE

K. S. Galyagin, M. A. Oshivalov, M. A. Savin

Perm National Research Polytechnic University,
614990, Perm, Russia
E-mail: Savin.MA@yandex.ru

Results of numerical investigation of phase nonreciprocity (phase drift) induced by external nonstationary mechanical forces on sensitive element of the fiber-optic gyroscope (FOG) are presented. The basis of the approach is the numerical modeling technique developed by the authors in a previous work. The specific feature of this method is that computational domain is constructed using a CAD-model of sensitive device of the FOG. Along with the fiber coil of the fiber-optic path, the model also includes the elements of the gyroscope structure. The fiber-optic path is considered as a nonhomogeneous medium with unaveraged properties with the account for its inherent periodic microstructure. The problem of nonstationary stress-strain state is solved for the entire computational domain. Then, the time of counter-propagating beam travel along the optical path and the resulting drift are calculated, using the constitutive relations of piezooptics. The approach allows to model the nonreciprocity of phases under the action of both thermal and mechanical loads. Results of calculation of the shape of drift function for varying duration of the shock pulse, as well as for a series of pulses are demonstrated. The calculated drift shape is shown to correlate with the first derivative of the force function with respect to time. The calculated drift amplitude values are demonstrated to agree well with data of angular rate sensor tests.

Keywords: fiber-optic gyro, drift, nonreciprocity of phases, dilatation waves, shock, impulse of force, photo-elasticity, numerical modelling, fiber-optic path, microstructure of fiber

Data on authors

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

For citation: Galyagin K. S., Oshivalov M. A., Savin M. A. Numerical modeling of the drift of a fiber-optic gyroscope with external shock exposure. *Journal of Instrument Engineering*. 2017. Vol. 60, N 12. P. 1169—1176 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-12-1169-1176