
ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.372.82:621.383.8-752.4:536.7

Е. И. ВАХРАМЕЕВ, К. С. ГАЛЯГИН, А. С. ИВОНИН, М. А. ОШИВАЛОВ, Т. А. УЛЬРИХ
ТЕПЛОВОЙ ДРЕЙФ ВОЛОКОННОГО ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Рассматривается математическая модель возникновения „кажущейся“ (фиктивной) угловой скорости гироскопа, индуцированной нестабильностью теплового состояния. Модель базируется на численном решении краевой дифференциальной задачи термо- и фотоупругости.

Ключевые слова: волоконный оптический гироскоп, тепловая нестабильность, фазовая невязанность, термоупругость, пьезооптика.

Интерес к волоконному оптическому гироскопу (ВОГ) базируется на потенциальных возможностях его применения в системах навигации, управления и стабилизации. Вместе с тем при разработке конструкции ВОГ и доведении его до серийных образцов возникает ряд трудностей, связанных с чувствительностью прибора к различным внешним воздействиям, что приводит к паразитным дрейфам и, как следствие, к снижению точности измерений. Особое значение имеют возмущения, вызванные тепловыми изменениями. Практика испытаний гироскопа в условиях изменяющегося теплового состояния окружающей среды показывает, что даже относительно небольшие колебания температур способны порождать фиктивное изменение показаний прибора. Основную роль при этом играет датчик блока чувствительности, содержащий главный измерительный элемент гироскопа — оптоволоконный контур.

Проблема повышения точности ВОГ в условиях воздействия внешних факторов решается различными способами. Прежде всего, это совершенствование технологии изготовления узлов и элементов гироскопа: в частности, большое внимание уделяется конструкции чувствительного элемента — способам укладки волокна, используемым материалам, вариантам тепло-, вибро- и шумоизоляции. Другим подходом к решению проблемы является физическое и математическое моделирование поведения гироскопа в различных условиях в целях анализа основных закономерностей процесса, а также выработки алгоритмов прогноза и коррекции индуцированной внешними воздействиями фазовой невязанности.

Настоящая статья посвящена разработке и апробации математической модели, описывающей возникновение изменений показаний волоконного оптического гироскопа, вызванных тепловой нестабильностью датчика чувствительности.

Принцип измерения угловой скорости ВОГ основан на использовании эффекта Саньяка. Этот эффект заключается в определении разности оптических путей световых лучей, встречно распространяющихся по кольцевому оптоволоконному контуру. Если оптические характеристики светопроводящей жилы не изменяются во времени, то угловая скорость Ω контура относительно оси чувствительности определяется разностью фаз $\Delta\varphi$ лучей на выходе из световода:

$$\Omega = \frac{c}{4kS_B} \Delta\varphi, \quad (1)$$

где c — скорость света в вакууме; k — волновое число; S_B — суммарная площадь витков оптического контура.

В случае когда контур находится в условиях нестационарных тепловых воздействий (например, изменения температуры окружающей среды), разность фаз вследствие зависимости оптико-механических характеристик волокна от температуры возникает и при отсутствии вращения контура. Схема возникновения термически индуцированной („кажущейся“, фиктивной) угловой скорости контура достаточно проста и заключается в следующем. Один и тот же элемент по длине неподвижного оптического контура встречно распространяющиеся лучи проходят в различные моменты времени. Если показатель преломления кварцевого волокна изменяется, то рассматриваемый участок контура лучи проходят с различной скоростью, что приводит к разности оптических путей и фазовому набегу $\Delta\varphi$.

Показатель преломления волокна сам по себе является функцией температуры. Кроме того, он зависит от напряженно-деформированного состояния светопроводящей жилы, что выражается в виде так называемого фотоупругого (пьезооптического) эффекта, когда механически изотропная среда приобретает оптическую анизотропию. Это происходит в основном под действием термоупругих напряжений, вызванных несогласованным деформированием каркаса катушки и оптоволоконного контура. Вместе с этим удлинение волокна при его нагревании за счет конечного значения коэффициента линейного теплового расширения, в свою очередь, также приводит к разности оптических путей встречных лучей.

Таким образом, для определения величины термически индуцированного смещения гироскопа необходима информация о динамике изменения температурного поля и связанного с ним напряженно-деформированного состояния датчика чувствительности. Описанный выше механизм порождения теплового дрейфа ВОГ определяет стратегию построения математической модели этого явления.

Для теоретического анализа принята расчетная схема (рис. 1), представляющая собой осевое сечение катушки оптоволоконного датчика. Вертикальная ось катушки совпадает с осью чувствительности гироскопа. Центральную часть расчетной области (см. рис. 1, а) занимает массив кварцевого оптического волокна 1, навитого на металлический каркас катушки 2 и залитого компаундом. Снаружи оптоволоконный контур закрыт защитным кольцом 3. Витки равномерно распределены по объему, образованному каркасом и защитным кольцом. По наружной поверхности вся конструкция покрыта теплоизолирующим слоем из пенополиуретана 4.

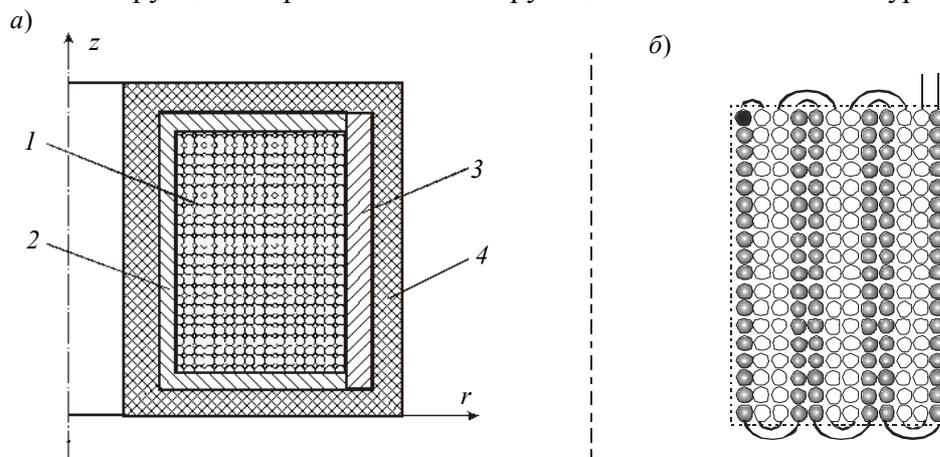


Рис. 1

Укладка волокон на катушку начинается от середины контура двумя ветвями в противоположных направлениях. Схемы укладки могут быть различными. На рис. 1, б приведена

двухслойная симметричная схема: черным цветом отмечен срединный по длине контура виток, от которого начинается укладка, одна ветвь волокна изображена белыми кружками, витки другой половины контура помечены серым цветом. При такой схеме укладки в случае четного количества витков выводы оптоволоконна располагаются на одном торце катушки, а при нечетном числе слоев — на противоположных торцах. Количество слоев волокна и число витков в каждом слое обусловлено их равномерным распределением по объему катушки.

Математическая модель возникновения теплового дрейфа гироскопа ориентирована на использование численных методов. Общая архитектура модели представляет собой достаточно громоздкий и разветвленный алгоритм, поэтому ограничимся схематичным его описанием. Поскольку рассматривается нестационарный процесс, расчет проводится в рамках пошаговой процедуры интегрирования по времени. На каждом шаге организуются вычисления, которые условно можно разделить на три последовательных этапа.

На первом этапе определяется тепловое состояние датчика чувствительности. С учетом канонической формы расчетной области используется нестационарное дифференциальное уравнение теплопроводности в цилиндрической системе координат $r - z$ [1]:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{1}{\rho c_p} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda r \frac{\partial t}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) \right], \quad (2)$$

где λ , ρ , c_p — соответственно теплопроводность, плотность и теплоемкость материала; τ — время процесса.

Уравнение (2) решается методом конечных разностей для всей расчетной области по схеме сквозного счета. При таком подходе на границах отдельных элементов контура автоматически создаются условия идеального контакта. Схема дискретизации позволяет учитывать зависимость теплофизических характеристик материалов от температуры. Оптоволоконный массив считается изотропной средой, теплофизические свойства которой определяются как средневзвешенные между свойствами кварцевой жилы, защитной оболочки световода и компаунда. Для внешнего контура расчетной области предусмотрена возможность задания граничных условий, соответствующих различным вариантам тепловой нагрузки. Решение уравнения (2) позволяет получить информацию о распределении температуры и темпе ее изменения (временных градиентов) в каждом элементе расчетной области.

Второй этап посвящен расчету термоупругих напряжений в конструкции датчика чувствительности. С учетом того, что массив оптоволоконна представляет собой структурно-неоднородную среду с периодическим расположением однотипно ориентированных волокон, при решении задачи используется известный подход, основанный на численном определении физических характеристик среды путем решения краевой задачи механики для ячейки периодичности [2, 3]. В рассматриваемом случае ячейка представляет собой фрагмент оптоволоконного массива, содержащий один виток волокна в защитной оболочке, окруженный компаундом. Сначала решаются краевые задачи о простом деформировании ячейки в целях определения структурных напряжений и деформаций. На основе полученных данных рассчитываются макрохарактеристики и осредненные значения термомеханических характеристик анизотропной среды. Одновременно с этим определяется алгоритм восстановления компонентов тензора структурных напряжений в центре светопроводящей жилы с использованием значений средних по объему ячейки макроскопических напряжений, что потребуется в дальнейшем для расчета показателя преломления. При расчете напряженно-деформированного состояния оптоволоконного массива все это позволяет рассматривать его как однородную среду с анизотропными свойствами. Задача решается методом конечных элементов для всей расчетной области. На границах контакта отдельных элементов конструкции выполняются условия совместного деформирования.

На третьем заключительном этапе пошагового алгоритма рассчитываются фазовый набег и „кажущаяся“ угловая скорость ВОГ. Эта процедура выполняется следующим образом. Для центра каждого витка контура (светопроводящей жилы) с учетом его координат путем интерполяции сеточных функций определяются значения температур и макронапряжений. Эти данные трансформируются в одномерные зависимости по длине волокна в соответствии со схемой намотки. Далее восстанавливаются структурные компоненты и рассчитываются квазиглавные напряжения $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, на основе которых, а также температуры t_i волокна в данном витке определяется его показатель преломления [4]:

$$n_i = n_{0_i} \sqrt{1 + \frac{c_1 \sigma_1 + c_2 (\sigma_2 + \sigma_3)}{n_{0_i}^2}},$$

где c_1, c_2 — фотоупругие постоянные кварца; $n_{0_i} = n_0 (1 + \alpha t_i)$ — показатель преломления кварцевого волокна в данном витке; здесь n_0 — начальное значение показателя преломления; α — температурный коэффициент.

Эти данные образуют одномерную зависимость изменения показателя преломления светопроводящей жилы по длине всего оптического контура. При этом вследствие осевой симметрии задачи полагается линейный характер изменения показателя от витка к витку с учетом длины каждого из них:

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

где x — координата вдоль оптического контура; n' — скорость изменения n , определяемая численным дифференцированием по времени; τ^* — время прохождения луча через оптический контур.

Оптический путь и время прохождения контура для каждого из встречных лучей (τ_1^* и τ_2^*) с учетом их направления определяются с помощью численного интегрирования уравнения движения:

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

Согласно полученным данным с учетом длины волны излучения λ вычисляется фазовый набег

$$\Delta\varphi_{\tau} = \frac{2\pi c}{\lambda} (\tau_1^* - \tau_2^*)$$

и по формуле (1) фиктивная угловая скорость Ω_{τ} .

Для оценки корректности предлагаемой методики расчета дрейфа были проведены эксперименты по провокационному нагреву неподвижной катушки датчика с вертикально ориентированной осью чувствительности (см. рис. 1, а) при следующих основных параметрах контура: диаметр кварцевого волокна 100 мкм, наружный диаметр защитной оболочки 200 мкм, длина волокна в контуре 1100 м, число витков 4472. Датчик подвергался нагреву с термодатчиком контролем наружной поверхности теплоизолирующего покрытия.

На рис. 2 приведены результаты расчета теплового смещения гироскопа при нагреве сверху до температуры $T = 60$ °С в течение 50 мин в сравнении с натурной регистрацией дрейфа ВОГ. Видно, что расчетный и экспериментальный дрейф достаточно хорошо согласуются на качественном уровне: начало возникновения смещения, его продолжительность и характер изменения во времени совпадают. Максимальный дрейф гироскопа наблюдается в первые минуты нагрева, когда темп изменения температуры высок: он и определяет величину смещения. В дальнейшем временные градиенты температуры уменьшаются, но смещение продолжает оставаться большим за счет несогласованной деформации металлического каркаса катушки и оптоволоконного массива из-за различных значений коэффициента линейного теплового расширения. Наблюдаемое на графике количественное несовпадение результатов

можно объяснить как неточностью численных значений характеристик материалов (которые принимались на основе литературных данных), так и нарушениями идеальности укладки витков.

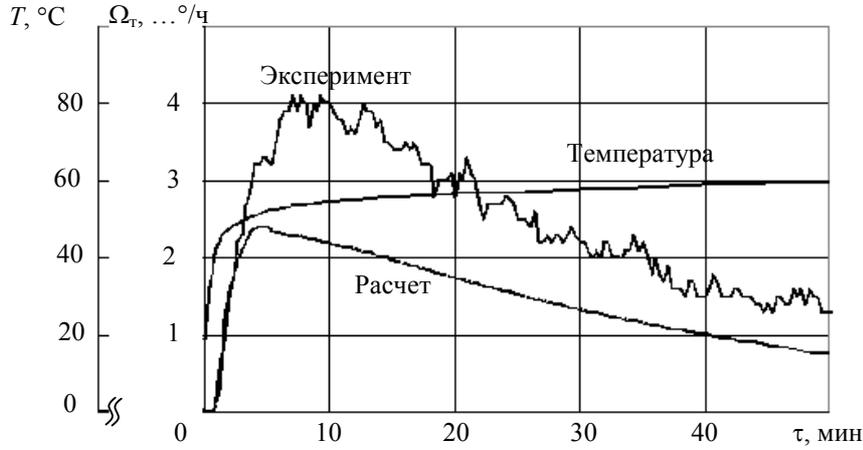


Рис. 2

Механизм возникновения фазовой невязки проиллюстрирован на рис. 3, где представлена информация о характеристиках состояния датчика чувствительности в виде одномерных функций температуры, темпа нагрева ($\partial T/\partial \tau$) и главных напряжений в зависимости от длины волокна (l) в порядке укладки витков контура в момент времени, соответствующий максимальному значению дрейфа.

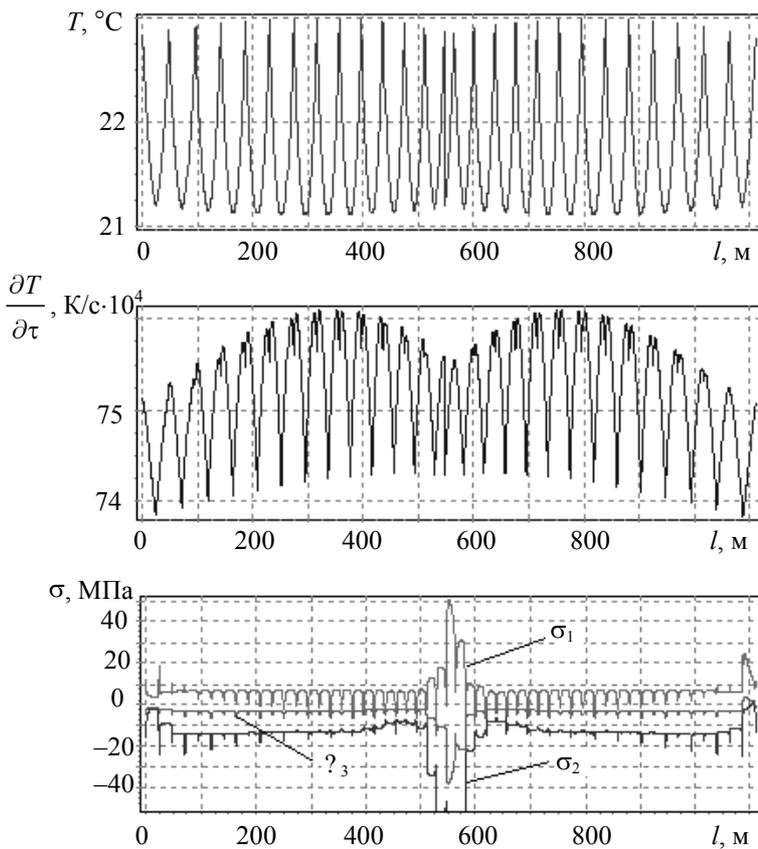


Рис. 3

от длины волокна (l) в порядке укладки витков контура в момент времени, соответствующий максимальному значению дрейфа. Как видно из графиков, все характеристики, а следовательно, и условия поляризации существенно неоднородны по длине волокна. Это приводит к возникновению невязки фазового сдвига, график которого представлен на рис. 4. Фазовый набег приведен здесь по абсолютной величине. На самом деле в правой и левой половине контура он имеет противоположные знаки, а в середине равен нулю. Результирующее значение дрейфа гироскопа, вызванного изменением теплового состояния контура во времени, определяется асимметрией графика и количественно равно интегралу фазового набегу по виткам с учетом его знака.

Следует отметить высокую вычислительную трудоемкость процедуры расчета. Вместе с тем попытки упрощения модели за счет исключения фотоупругих эффектов, т.е. учет лишь температурной зависимости показателя преломления [5, 6], привели к негативным результатам. Расчетное значение дрейфа в этом случае не имело ничего общего с экспериментом.

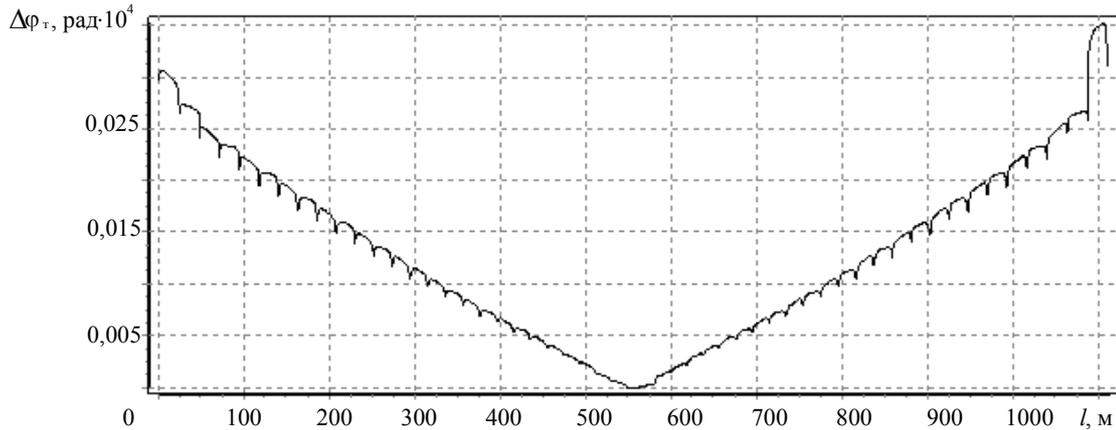


Рис. 4

Разработанная компьютерная модель использовалась в численных экспериментах по оценке конструкторских решений, направленных на снижение теплового дрейфа волоконного оптического гироскопа, и зарекомендовала себя как эффективный инструмент анализа условий возникновения термически индуцированной фазовой невязки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981.
2. Соколкин Ю. В., Ташкинов А. А. Механика деформирования и разрушения структурно-неоднородных тел. М.: Наука, 1984.
3. Свисткова Л. А. О вычислении коэффициентов теплового расширения композитных материалов // Механика деформируемых неоднородных структур: Сб. науч. трудов. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. С. 60—67.
4. Александров А. Я., Ахметзянов М. Х. Поляризационно-оптические методы механики деформируемого тела. М.: Наука, 1973.
5. Шереметьев А. Г. Волоконный оптический гироскоп. М.: Радио и связь, 1987.
6. Джашишов В. Э., Панкратов В. М. Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2001.

Сведения об авторах

- Евгений Иванович Вахрамеев** — канд. техн. наук, доцент; Пермский государственный технический университет, кафедра теплотехники; E-mail: abins@pstu.ru
- Константин Спартакович Галягин** — канд. техн. наук, доцент; Пермский государственный технический университет, кафедра теплотехники; зав. кафедрой; E-mail: abins@pstu.ru
- Александр Сергеевич Ивонин** — ОАО „Пермская научно-производственная приборостроительная компания“, инженер-исследователь; E-mail: alex_sambist@mail.ru
- Михаил Анатольевич Ошивалов** — канд. техн. наук, доцент; Пермский государственный технический университет, кафедра теплотехники; E-mail: abins@pstu.ru
- Татьяна Александровна Ульрих** — канд. техн. наук, доцент; Пермский государственный технический университет, кафедра теплотехники; E-mail: uta@pstu.ru

Рекомендована кафедрой
теплотехники ПГТУ

Поступила в редакцию
01.03.10 г.