

УДК 621.372.82:621.383.8-752.4:536.7

К.С. Галягин, М.А. Савин

K.S. Galyagin, M.A. Savin

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Perm National Research Polytechnic University

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

SIMULATION ERRORS OF FIBER OPTIC GYROSCOPE

Рассмотрены основные принципы работы волоконно-оптического гироскопа. Поставлена проблема исследований. Представлены предварительные результаты начального этапа работы.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, фаза Саньяка, сдвиг фаз, дрейф, численное моделирование, оптоволокно.

Basic principles of FOG's performance are considered. The research problem is posed. Preliminary results of Initial phase of work are presented.

Keywords: fiber optic gyroscope, Sagnac phase, phase difference, drift, numerical simulation, optical fiber.

Волоконно-оптические гироскопы (ВОГ) получили широкое распространение лишь после создания в середине 80-х гг. XX в. оптических волокон с малыми потерями по длине, и уже к концу 80-х появились первые приборы, регистрирующие угловую скорость с точностью $1^\circ/\text{ч}$.

Идея и принцип работы прототипа ВОГ – интерферометра Саньяка – были сформулированы Саньяком еще в 1913 г. и звучат следующим образом: два встречно распространяющихся световых луча обойдут вращающийся замкнутый оптический контур за разное время. Интерференция лучей, вызванная их слиянием на фотоприемнике, позволит с точки зрения Саньяка судить о скорости вращения контура. Иначе говоря, разность фаз постоянно распространяющихся в оптическом волокне встречных лучей прямо пропорциональна угловой скорости вращения контура. Эффект Саньяка можно объяснить тремя основными теориями: кинематической, доплеровской и релятивистской [1].

Наиболее просто он может быть объяснен кинематической теорией. Согласно ей оптический путь для луча, распространяющегося сонаправленно вращению, будет больше, чем оптический путь встречно распространяюще-

гося луча [2]. Разница обхода контура световыми лучами из-за малости величины выражается в разности фаз лучей (фазовый набег) или же в безразмерной фазе Саньяка.

Доплеровская теория также довольно просто объясняет эффект Саньяка, но требует некоторой абстракции. Эффект Доплера есть изменение длины волны и частоты источника излучения при его движении либо при движении приемника, регистрирующего длину (или частоту) источника. Абстракция в описании эффекта Саньяка эффектом Доплера заключается введением в рассмотрение некоторого вращающегося зеркала в находящийся в покое оптический контур. Лучи, встречно выпущенные из источника, будут отражаться от зеркала с разной длиной волны, пропорциональной скорости вращения зеркала. Так, длина волны встречного луча будет меньше длины волны луча, следующего за зеркалом. Выполнив несложные математические преобразования, легко получить искомую фазу Саньяка.

Наиболее сложно эффект Саньяка доказывается с привлечением теории относительности. Здесь толкование дается в терминах событий, имеющих четыре пространственных координаты – время и три координаты положения. Фаза Саньяка определяется из временной разности двух аналогичных событий для встречно распространяющегося луча и луча, сонаправленного вращению контура, а именно: посылка луча из источника и регистрация луча приемником.

Стоит отметить, что предположения о существовании описанного эффекта были высказаны многими учеными еще до Саньяка, но лишь последний смог не только теоретически, но и экспериментально его доказать.

ВОГ по своей сути – усовершенствованный интерферометр Саньяка (рис. 1). Основным чувствительным элементом ВОГ является намотанное на металлическую или полимерную катушку оптическое волокно, длина которого достигает 1000 м. Необходимость столь большой длины вызвана требованиями к точности показаний изделия.

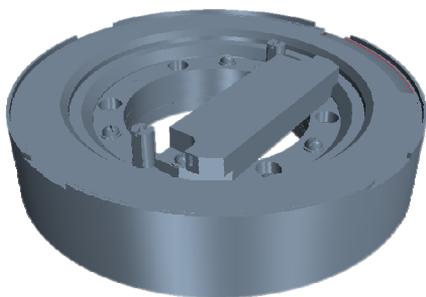


Рис. 1. CAD-геометрия ВОГ

Другими не менее важными элементами ВОГ, влияющими на его показания, являются источник света (суперлюминесцентный диод, He–Ne-лазеры или суперфлюоресцентные волоконные источники на активных волокнах), фотоприемник, а также светоделители, собиратели и другое вспомогательное оборудование, частично или полностью установленное на интегрально-оптической схеме.

Блок электроники обрабатывает получаемый фотоприемником сигнал, пересчитывая его в угловую скорость (как правило, в °/ч), а также сглаживая или компенсируя его в зависимости от алгоритмов, заложенных в микропроцессоре ВОГ.

Рассматриваемые изделия находят применение повсеместно, начиная от беспилотных машин (сельскохозяйственных комбайнов и пр.) и заканчивая летательными аппаратами (самолеты, беспилотники). Гироскопы используются в том числе и для контроля положения бура при разработке скважин, прокладке тоннелей, будучи установленными непосредственно на буровом оборудовании или инклинометрах [3]. Без волоконно-оптических гироскопов не обходятся и подвижные части некоторых роботов, в особенности тех, которые используются в агрессивных внешних условиях.

Несмотря на то что данные гироскопы производят с различной длиной оптического волокна в катушке (от 500 м и менее), цена устройства остается довольно высокой, и там, где не требуется высокой точности, применяют микроэлектромеханические системы (MEMS).

Еще одним серьезным минусом ВОГ является дрейф полезного сигнала. Дрейф, уход, сдвиг фаз – отклонение от нуля полезного сигнала изделия в состоянии покоя последнего. Возникает дрейф вследствие различных внешних возмущений: нестационарных неравномерных температурных, электромагнитных, акустических полей и напряженно-деформированного состояния (НДС). Воздействуя на кварцевый световод оптического волокна, названные возмущения изменяют его НДС (а температурные возмущения изменяют и длину из-за расширения волокна), и вследствие возникновения фотоупругих эффектов неравномерно изменяется показатель преломления кварцевой жилы. В результате лучи, которые в состоянии покоя без влияния внешних факторов обходят контур за одно и то же время, обойдут контур за разное время, что и вызовет фиктивную угловую скорость, регистрируемую прибором.

Если с электромагнитным возмущением успешно справляются, применяя электромагнитные экраны, то с температурными полями все намного сложнее. Для снижения температурного паразитного дрейфа применяют методы компенсации и прогнозирования, основанные на регистрации темпа изменения температуры датчиком ВОГ. Данное решение весьма успешно корректирует показания изделия, но не ликвидирует эффект полностью.

Для понимания процессов, протекающих в оптоволоконном датчике ВОГ при нестационарном нагреве, а также для успешного корректирования его конструкции, позволяющего существенно снизить дрейф и без компенсации, разумно применить численное моделирование.

Чтобы исключить зависимость численных результатов от реальных экспериментов, как, например, при моделировании показаний ВОГ с использо-

ванием полуэмпирических соотношений, основанных на множестве экспериментальных данных конкретного изделия, проводится прямое моделирование термоНДС ВОГ и эффектов фотоупругости.

За основу расчетной модели (рис. 2) принимается CAD-геометрия ВОГ. Причем процедура расчета строится таким образом, что геометрия может быть при необходимости заменена на любую другую довольно быстро.

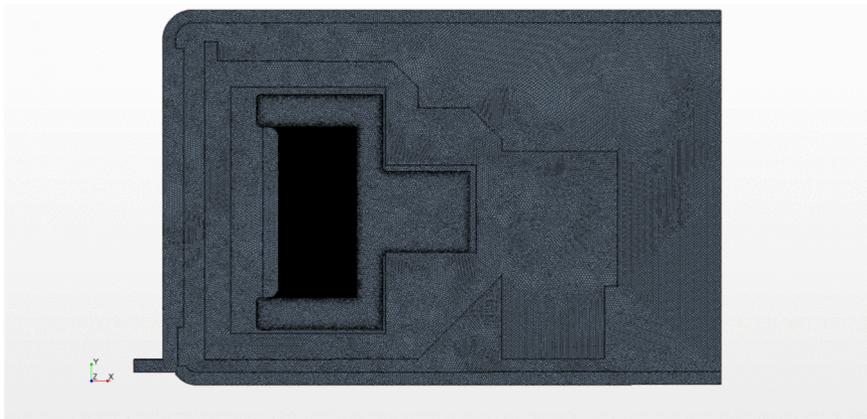


Рис. 2. Расчетная модель

Основное внимание уделено оптоволоконному массиву волоконно-оптического гироскопа. Дискретизация массива подробно описывает каждое волокно с учетом защитно-упрочняющих покрытий, нагрузочных стержней и кварцевой оболочки (рис. 3). Ввиду того, что при таком подходе сеточная модель получается довольно «тяжелой», задача рассматривается как осесимметричная. К тому же тепловой поток с модулятора, расположенного на крышке каркаса ВОГ, ничтожно мал, что позволяет совсем исключить модулятор из расчетной области.

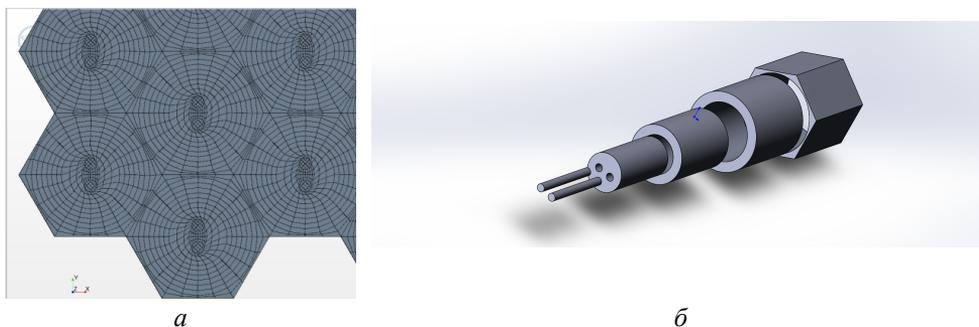


Рис. 3. Дискретизация оптоволоконна:
a – сеточная модель оптоволоконна; *б* – CAD-геометрия оптоволоконна

Предварительно задача и вся методика расчета в целом отлаживалась на модели с упрощенной геометрией оптического волокна. Оптоволокно было заменено однородным блоком с усредненными свойствами. Сеточная модель блока максимально была приближена к сеточной модели оптического волокна по количеству конечных объемов.

На упрощенной модели проведена серия из четырех расчетов, отличающихся граничными условиями на поверхности ВОГ. Стоит отметить, что натурные термоиспытания изделия проводятся в термокамере по заданной программе. Поскольку внутри термокамеры создается искусственная конвекция, граничные условия в расчетной модели задаются с учетом коэффициента теплоотдачи и температуры среды. Коэффициент теплоотдачи определялся с помощью численных экспериментов, в которых температура среды изменялась по одному и тому же закону, а коэффициент теплоотдачи варьировался от 5 до 24 Вт/м²/К. Расчетная температура в месте установки температурного датчика сравнивалась с экспериментальной.

Результаты предварительных расчетов представлены на рис. 4. В ходе расчета изменению подвергались граничные условия: имитировался всесторонний нагрев (синий), нагрев только верхней и радиальной границ (серый), только радиальный нагрев (черный) и нагрев только нижней части (желтый). Очевидно, что полученный дрейф довольно неплохо коррелирует с дрейфом (зеленый), полученным в результате натуральных испытаний. Основным для сравнения является результат, полученный при нагреве, исключаящем основание корпуса (серый), так как в термокамере изделие устанавливается на массивную металлическую опору. Темп нагрева соответствует натурному эксперименту и равен 1 °С/мин (температура – красная штриховая линия).

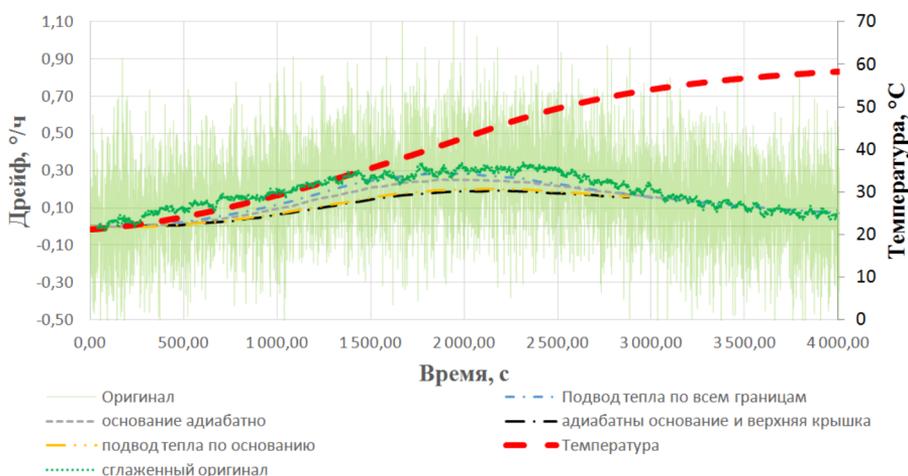


Рис. 4. Результаты расчета теплового дрейфа ВОГ

Подчеркивая успешность расчетов по упрощенной модели, стоит отметить, что максимальные значения расчетных результатов дрейфа приходится на момент наибольшего темпа изменения температуры, что соответствует данным различных источников [2, 4]. Важным является и тот факт, что расчетный и физический дрейф практически совпадают по амплитуде и фазе.

Список литературы

1. Малыкин Г.Б., Андропова И.А. Физические проблемы волоконной гироскопии на эффекте Саньяка // Успехи физических наук. – 2002. Т. 172. – № 8. – С. 849–873.
2. Шереметьев А.Г. Волоконный оптический гироскоп. – М.: Радио и связь, 1987. – 152 с.
3. Терешин В.Г., Иванова Г.А. Перспективы использования волоконно-оптических гироскопов в инклинометрической технике // Весник УГАТУ. – 2011. – Т. 15, № 1 (41). – С. 148–152.
4. 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.

Получено 10.04.2015

Галягин Константин Спартакович – кандидат технических наук, доцент, ПНИПУ, МТФ, e-mail: abins@pstu.ru.

Савин Максим Анатольевич – аспирант, ПНИПУ, МТФ, e-mail: savin.ma@yandex.ru.