

Е.И. Вахрамеев, К.С. Галягин, А.С. Ивонин, М.А. Ошивалов

Пермский государственный технический университет

ТЕРМОМЕТРИЯ БЛОКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ВОЛОКОННОГО ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА В УСЛОВИЯХ ТЕПЛОВОГО ДРЕЙФА

Рассматриваются методические аспекты и результаты натурных испытаний волоконно-оптического гироскопа в условиях теплового воздействия на блок чувствительности. Выполнена оценка точности термометрических измерений различными датчиками и неоднородности теплового состояния каркаса оптоволоконного массива в условиях теплового возмущения. По результатам обработки экспериментальных данных показана корреляция термически индуцированной кажущейся угловой скорости гироскопа с темпом изменения температуры оптического блока.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, датчик чувствительности, тепловой дрейф, термометрия, эксперимент.

Волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) – оптико-электронный прибор, создание которого стало возможным лишь при современном уровне развития элементной базы квантовой электроники. Этот прибор в ряде случаев может полностью заменить сложные и дорогостоящие электромеханические гироскопы и трехосные гиростабилизированные платформы, применяемые в навигации. К преимуществам ВОГ по сравнению с механическими гироскопами можно отнести:

- потенциально высокую чувствительность (точность) прибора;
- большой динамический диапазон измеряемых угловых скоростей (в частности, одним прибором можно измерять угловую скорость от $1 \cdot 10^{-4}$ град/ч до 500 град/с);
- малые габариты и массу конструкции;
- невысокую стоимость конструирования и производства при массовом изготовлении и относительную простоту технологии;
- отсутствие вращающихся механических элементов, что повышает надежность прибора и уменьшает время готовности к работе.

Принцип действия оптического гироскопа основан на «вихревом» эффекте Саньяка, открытым этим ученым в 1913 г. Сущность его заключается в следующем. Если в осесимметричном замкнутом оптическом контуре во встречных направлениях распространяются два свето-

вых луча, то при неподвижном контуре оптические пути обоих лучей, прошедших весь контур, будут одинаковыми. При вращении контура вокруг оси симметрии, нормальной к плоскости контура, в силу постоянства скорости света оптические пути встречно бегущих лучей будут неодинаковы, а их разность пропорциональна угловой скорости вращения контура. Информативным параметром является разность фаз лучей (фаза Саньяка). По величине информативного параметра могут быть вычислены угол поворота и угловая скорость вращения контура. Контур представляет собой многовитковую катушку оптоволокна, и чем больше длина волокна и меньше потери в нем, тем сильнее проявляется эффект Саньяка.

Возможность создания высокочувствительного ВОГ появилась лишь с промышленной разработкой высококачественных одномодовых кварцевых световодов с малым затуханием. Именно конструирование ВОГ с использованием таких световодов и определяет уникальные свойства прибора.

Основной проблемой, с которой приходится сталкиваться разработчикам ВОГ, является высокая чувствительность гироскопа к различным внешним и внутренним возмущениям и неустойчивостям, что приводит к паразитным дрейфам и, как следствие, к снижению точности прибора. К таким возмущениям относятся механические и акустические шумы и вибрации, тепловые воздействия, флуктуации электрических и магнитных полей, оптические нелинейные эффекты флуктуации интенсивности и поляризации излучения в световоде, дробовые шумы в фотодетекторе, тепловые шумы в электронных цепях и др.

Задача минимизации погрешностей ВОГ решается различными способами: совершенствуется технология производства элементов, теоретически и экспериментально исследуются физическая природа возмущений и неустойчивостей, создаются и испытываются различные схемные варианты ВОГ с компенсацией этих возмущений, разрабатываются фундаментальные вопросы использования интегральной оптики. В специальной научной и периодической литературе имеются публикации, посвященные проблемам ВОГ [1,2], однако их анализ свидетельствует о необходимости дальнейшего изучения вопросов улучшения метрологических характеристик приборов.

Большинство указанных возмущений вызывает лишь кратковременные неустойчивости, чего нельзя сказать о внешних тепловых воз-

действиях – изменении температуры окружающей среды, приводящих к возникновению длительных дрейфов прибора в виде термически индуцированной («кажущейся») угловой скорости. Практически все узлы и элементы, входящие в состав измерительного гироскопического комплекса, реагируют на изменение их теплового состояния и вносят свой вклад в возникновение кажущейся угловой скорости. Однако наибольшую роль здесь играет датчик блока чувствительности, содержащий главный измерительный элемент гироскопа – оптоволоконный контур. Схема возникновения термически индуцированной угловой скорости заключается в следующем. Встречно распространяющиеся лучи проходят в различные моменты времени τ' и τ'' один и тот же элемент по длине неподвижного оптического контура. Если тепловое состояние датчика стабильно, то различие τ' и τ'' не приводит к негативным последствиям. В случае, когда температурное поле конструкции неоднородно и изменяется во времени, то в силу зависимости свойств оптоволокна от температуры к моменту прохождения одного и того же участка контура лучи будут иметь различную скорость распространения. Это приведет к отличию оптических путей, возникновению фиктивного фазового набегу и регистрации гироскопом в соответствии с фазой Саньяка кажущейся угловой скорости.

Из литературных источников известно, что тепловой дрейф зависит от скорости изменения температуры во времени – темпа нагрева (охлаждения), причем существенны даже очень малые его значения. Вместе с тем результаты математического моделирования прогноза термически индуцированной фазовой невзаимности [3] показывают, что в условиях нестационарных тепловых воздействий важную роль играют термоупругие напряжения в оптоволоконном контуре (который, как правило, пропитан компаундом), определяемые температурным полем конструкции датчика чувствительности и вызывающие фотоупругие эффекты. В связи с этим большой интерес представляет анализ взаимосвязи динамики теплового состояния датчика и возникающего дрейфа при синхронной регистрации этих параметров.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальной термометрии датчика чувствительности с одновременной записью теплового дрейфа для различных вариантов провокационного нагрева. Целью исследования являются выбор наиболее рациональной точки размещения датчика температуры на корпусе блока, а также оценка требуемой точности температурных измерений для компенсации теплового дрейфа [4].

На рис. 1 схематично представлен осесимметричный разрез испытуемого оптического блока ВОГ, представляющего собой катушку с оптоволоконном 1, которая намотана на металлический каркас 2 с пропиткой компаундом. Катушка размещена внутри массивного металлического корпуса 3, который на опорах установлен на горизонтальном основании 4. Наружный диаметр оптоволоконного массива составляет 120 мм при общей длине волокна 1000 м.

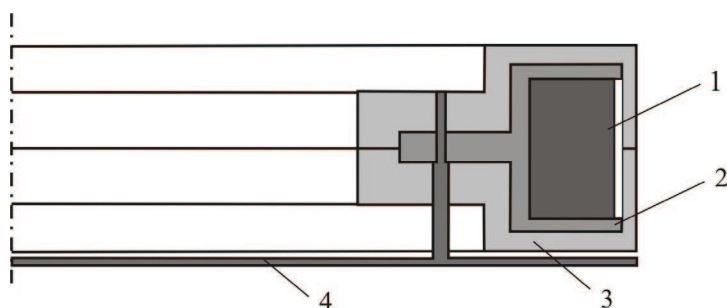


Рис. 1. Схема компоновки оптического блока

Для обработки показаний оптического блока и регистрации кажущейся угловой скорости использовался специальный электронный блок обработки сигналов гироскопа.

Для моделирования тепловых нагрузок в экспериментах использовалось термостатирующее устройство с цилиндрической камерой и тремя независимыми секциями нагревателей, позволяющее осуществлять нагрев оптического блока в разных режимах: сверху, снизу, по боковой цилиндрической поверхности и одновременно всеми нагревателями. С целью защиты от внешних электромагнитных полей при проведении испытаний оптический блок дополнительно укрывался внешним тонкостенным металлическим экраном и размещался внутри камеры термостата. Эксперименты проводились по заданному графику изменения температуры в камере, причем для сравнительной оценки результатов термоцикл в опытах был одинаковым:

- 10 мин выдержки без включения нагревателей для фиксации начального смещения гироскопа;
- нагрев до выхода на режим термостатирования ($+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ в камере);
- выдержка 30 мин в режиме термостатирования;
- последующее естественное охлаждение в термокамере с выключенными нагревателями.

Температурные измерения выполнялись с использованием шести хромель-копелевых термопар (диаметр провода 0,15 мм) и штатно используемого в составе гироскопа интегрального датчика температуры ДТ-1, размещенных в различных местах на наружной поверхности корпуса оптического блока. Схема расположения термодатчиков приведена на рис.2. Интегральный датчик укреплен на верхней части поверхности корпуса вблизи одной из опор. Термопары № 1 и 2 размещены на верхней и нижней поверхностях в зоне выводов оптоволоконна, термопары № 3, 4 и 5 – на внешней боковой цилиндрической части корпуса; термопара № 6 – непосредственно около датчика ДТ-1.

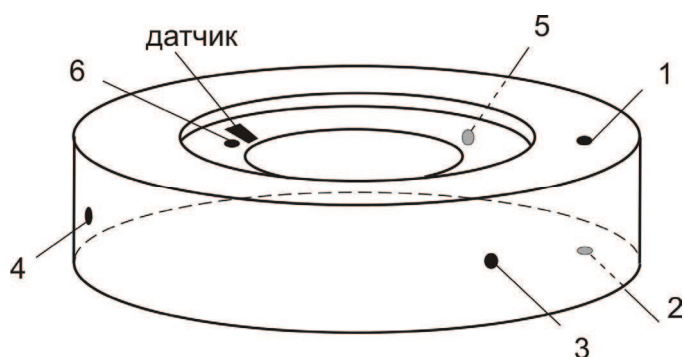


Рис. 2. Схема размещения датчиков температуры

Показания термодатчиков фиксировались и передавались в компьютер с помощью двух независимых программных пакетов. Один из них обрабатывал сигналы электронного блока с регистрацией показаний интегрального датчика температуры и одновременной записью возникающего теплового дрейфа. Другой пакет представляет собой многоканальную измерительную систему на основе платы АЦП L-780 фирмы L-Card, предназначенную для термопарных измерений. Работа компьютерных программ синхронизировалась во времени на протяжении всего эксперимента.

В ходе исследований проведено несколько серий экспериментов в различных условиях нагрева. На рис. 3 приведены результаты измерений температуры термопарой № 6 при нагреве верхним, нижним, боковым нагревателями, а также в условиях всестороннего нагрева под действием всех нагревателей. Комнатная температура в опытах различалась в пределах нескольких градусов, поэтому ре-

зультаты измерений представлены на рис. 3 в виде превышения температуры относительно начального уровня. Достижимые в опытах максимальные температуры различаются, что обусловлено разной мощностью секций нагревателей. Вследствие этого темпы нагрева и охлаждения и возникающий тепловой дрейф в разных опытах также неодинаковы.

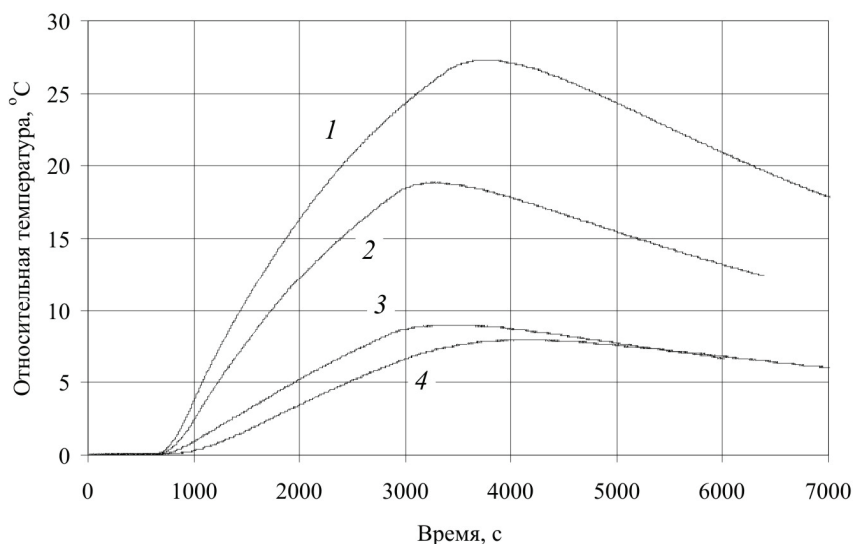


Рис. 3. Изменение температуры в различных вариантах нагрева:
 1 – всесторонний нагрев; 2 – боковой нагреватель;
 3 – нижний нагреватель; 4 – верхний нагреватель

По результатам термометрии была проведена оценка неоднородности теплового состояния корпуса оптического блока в динамике процесса нагрева. Графики (рис. 4) иллюстрируют полученные данные на примере режима всестороннего нагрева. Здесь приведены показания интегрального датчика температуры, а также термопар № 5 и 6. Показания термопар № 1 и 2, расположенных на верхней и нижней поверхностях корпуса, практически не отличались от показаний термопары № 6, поэтому их графики не приведены. Все термопары, расположенные на боковой цилиндрической части поверхности корпуса, регистрировали практически одинаковые температуры, совпадающие с результатами измерений термопарой № 5 (зависимость 1 на рис. 4).

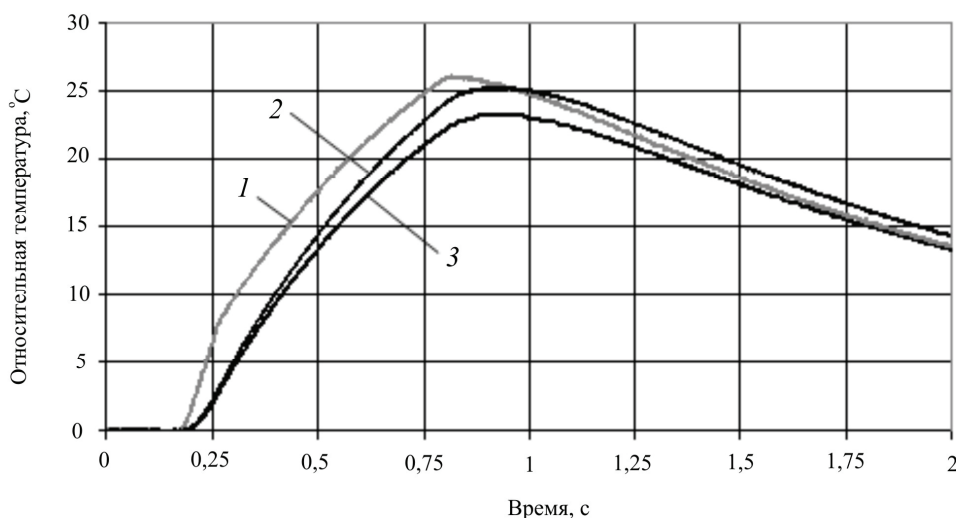


Рис. 4. Изменение температуры при всестороннем нагреве по показаниям: 1 – т/п № 5, 2 – т/п № 6, 3 – датчика

На графике отчетливо видно, что характер изменения температуры боковой поверхности корпуса существенно отличается от температуры в других точках ее измерения. Это объясняется наличием воздушного зазора между оптоволоконным массивом и вертикальной стенкой корпуса (см. рис. 1). Термическое сопротивление этой прослойки затрудняет отвод теплоты внутрь оптоволоконного массива, что обуславливает повышение температуры на этом участке. По этой же причине боковые термопары раньше начинают реагировать на тепловое воздействие нагревателей. Кроме того, на графике показаний 5-й термопары (см. рис. 4) отчетливо виден перегиб в момент времени 0,25 ч, соответствующий выходу термокамеры на режим термостатирования.

Следует отметить также, что температуры, регистрируемые интегральным датчиком и расположенной в этом же месте термопарой № 6, качественно согласуются. В пределах интервала нагрева отличие их показаний незначительно, но монотонно возрастает до величины порядка 2 °C к моменту достижения максимальной температуры корпуса. Вероятнее всего, это связано с погрешностями тарировки датчика и его достаточно большими по сравнению с термопарами габаритами.

Результативность компенсации теплового дрейфа в основном зависит от точности определения мгновенных значений темпа изменения температуры [4]. Поскольку темп определяется как производная по

времени от температуры, его величина существенным образом зависит от зашумленности сигнала температуры. На рис. 5 приведен фрагмент записи температуры с интервалом в 1 с по данным интегрального датчика и термопары № 6. Хотя их показания отличаются не более чем на 0,1 °С, но дискретность измерения температуры у датчика существенно выше. Его показания (°С) регистрировались в опытах с точностью до второго десятичного знака после запятой, однако фактически дискретность измерений составляла порядка 0,06 °С. Ошибка регистрации температуры при термопарных измерениях определялась точностью преобразования платы АЦП L-780, которая с учетом предварительного усиления сигнала не превышала 0,015 °С.

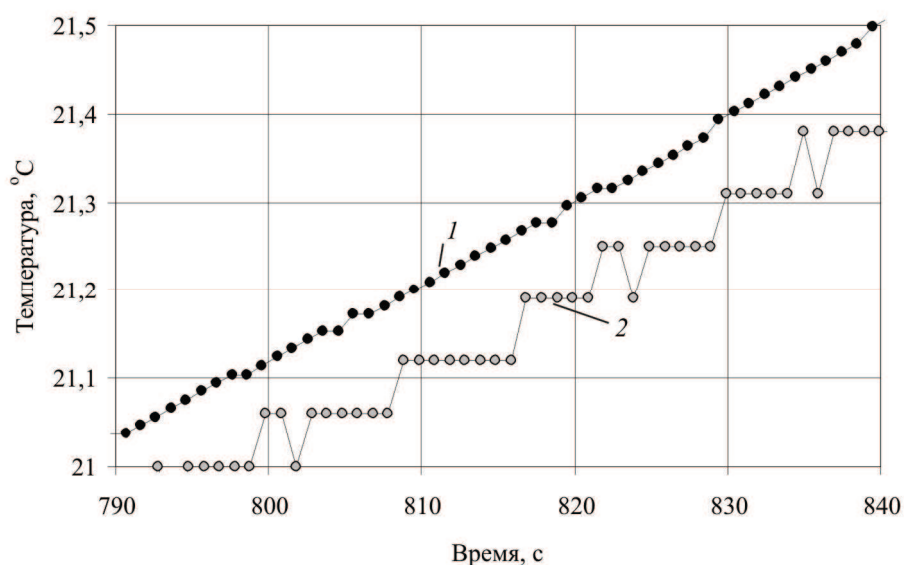


Рис. 5. Результаты измерения температуры с помощью:
1 — термопары № 6, 2 — датчика

Темп изменения температуры вычислялся программно по результатам ее измерения термодатчиками путем численного дифференцирования по времени. Дискретность исходного сигнала при использовании этой процедуры естественным образом приводит к увеличению зашумленности получаемых значений темпа. На рис. 6 представлены результаты расчета темпа изменения температуры по показаниям: 1 — термопары № 5, 2 — термопары № 6 и 3 — датчика ДТ-1. Фрагмент записи на рисунке соответствует стадии нагрева оптического блока в

термокамере и выдержке в режиме термостатирования. Как видно из приведенных графиков, расчетные темпы, определенные по показаниям датчика и термопары № 6, в целом повторяют друг друга. Однако разброс в показаниях датчика, отмеченный выше (см. рис. 6), создает эффект «шубы» 3, размах которой составляет порядка 0,007 К/с. В то же время термопарные измерения 2 обеспечивают значительно более качественные результаты.

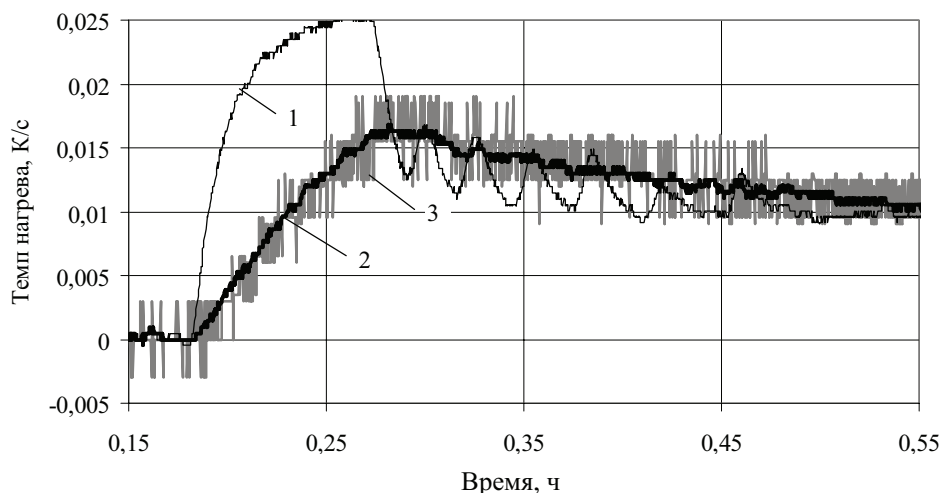


Рис. 6. Результаты расчета темпа изменения температуры по показаниям: 1 – т/п № 5, 2 – т/п № 6, 3 – датчика

Для сравнения на рисунке приведены результаты расчета темпа изменения температуры 1 по показаниям термопары № 5, расположенной на боковой цилиндрической части корпуса оптического блока. Как уже было отмечено, влияние воздушной прослойки между оптоволоконным массивом и корпусом вызывает быструю реакцию термопары на изменение температуры в камере. На рисунке видно, что она практически сразу начинает реагировать на включение нагревателей. Этим объясняются и более высокие темпы изменения температуры на стадии нагрева по сравнению с другими датчиками. Максимальный темп достигает 0,025 К/с, что почти в полтора раза больше, чем у датчика. В момент выхода установки на режим термостатирования темп резко уменьшается (излом на зависимости 1, см. рис.4). Продолжающийся пилообразный характер его изменения определяется периодическим включением секций нагревателей в режиме термостатирования. Как

показали дальнейшие исследования, связанные с оценкой прогноза и компенсации теплового дрейфа, размещение датчиков температуры на боковой поверхности корпуса крайне неэффективно.

На последующих рис. 7–9 приведены результаты записи теплового дрейфа – отклика волоконно-оптического гироскопа на внешнее тепловое воздействие в условиях различных вариантов провокационного нагрева неподвижного оптического блока. Вместе с дрейфом на графиках приведены расчетные значения темпа изменения температуры в соответствующем опыте, рассчитанные по показаниям датчика ДТ-1. Для подавления шума, которым сопровождается как регистрация угловой скорости ВОГ, так и численный расчет темпа нагрева в силу дискретности показаний датчика температуры, используется простейший числовой фильтр со скользящим интервалом осреднения. Поскольку темп и дрейф имеют разные размерности и различны по величине, на рисунках для удобства анализа их значения приведены к одной шкале. С этой целью численные значения теплового дрейфа уменьшены в 30 раз.

На рис. 7 изображены зависимости темпа изменения температуры и регистрируемого гироскопом дрейфа при нагреве оптического блока боковой цилиндрической секцией нагревателя. В течение эксперимента расчетный темп нагрева изменялся в пределах 0,015 К/с, а соответствующий диапазон значений дрейфа составил порядка 0,5 град/ч. Из сравнения результатов видно, что зависимости темпа изменения температуры во времени и возникающей фазовой невзаимности по форме совпадают, но несколько сдвинуты друг относительно друга по времени. Очевидно, что датчик начинает реагировать на изменение температуры раньше, чем возникает тепловой дрейф. Величина временного сдвига определяется различными факторами: свойствами материалов, размерами оптического блока, интенсивностью и характером теплового воздействия, местом расположения датчика температуры и т.д. В частности, важную роль играют теплопроводящие свойства материалов конструкции оптического блока.

На рис. 7 хорошо прослеживаются последовательные стадии проведения эксперимента. Во время начальной десятиминутной выдержки при комнатной температуре дрейф отсутствует. Через некоторое время после включения нагревателя датчик начинает регистрировать изменение температуры, а затем возникает дрейф. Его величина монотонно возрастает и достигает максимума, когда установка выходит на режим

термостатирования. На этой стадии температура в камере не изменяется, однако дрейф остается большим за счет продолжающегося прогрева элементов конструкции оптического блока и волоконного контура. После выключения нагревателя температура в камере уменьшается, и в какой-то момент времени она становится меньше, чем температура оптического блока. На этой стадии дрейф уменьшается, а когда начинает остывать оптоволоконный контур, величина дрейфа становится отрицательной.

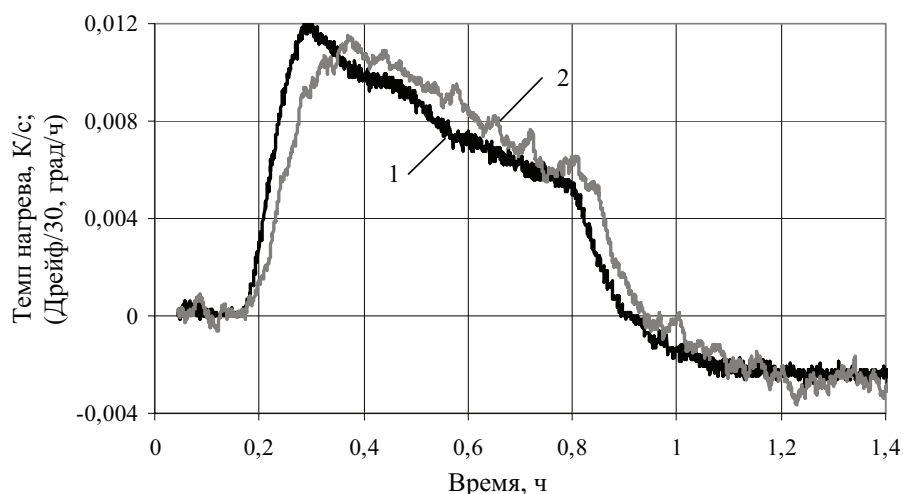


Рис. 7. Изменение темпа нагрева 1 и дрейфа 2 при боковом нагреве оптического блока

На рис. 8 проиллюстрирована реакция гироскопа на нагрев оптического блока нижней секцией нагревателя. Эта секция имеет меньшую мощность, чем боковой нагреватель, поэтому величины темпа изменения температуры и возникающего дрейфа также значительно меньше. Достаточно большая шумовая составляющая приведенных зависимостей по сравнению с предыдущим вариантом нагрева объясняется малыми диапазонами изменения параметров. В течение данного эксперимента темп нагрева изменялся в пределах 0,006 К/с, а соответствующий диапазон значений кажущейся угловой скорости составил порядка 0,2 град/ч. В целом характер изменения во времени приведенных зависимостей аналогичен предыдущему случаю. Несколько больший временной сдвиг между темпом и дрейфом вполне объясним медленной скоростью прогрева оптического блока.

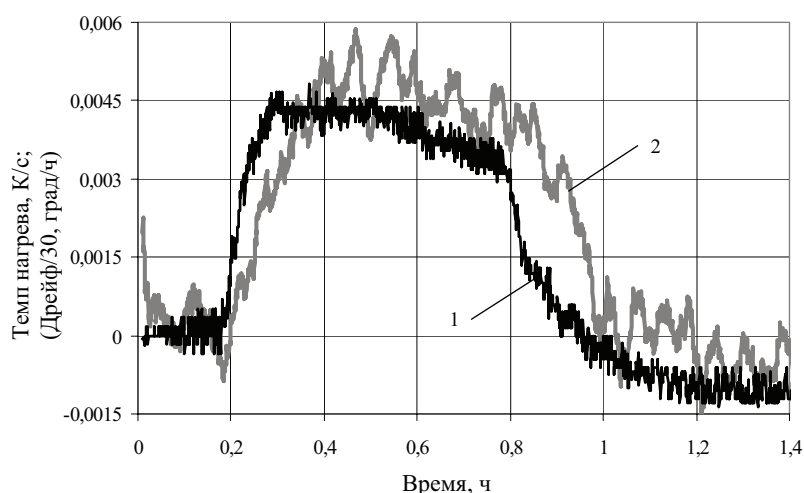


Рис. 8. Изменение темпа нагрева 1 и дрейфа 2 при нижнем нагреве оптического блока

Результаты испытаний оптического блока в условиях всестороннего нагрева представлены на рис. 9. В этой серии экспериментов нагрев термокамеры осуществлялся одновременно всеми секциями нагревателей от начальной температуры $+22\text{ }^{\circ}\text{C}$ с выходом на режим термостатирования при температуре $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Температуры в точках размещения термопар на корпусе оптического блока можно оценить по графикам (рис. 3, 4).

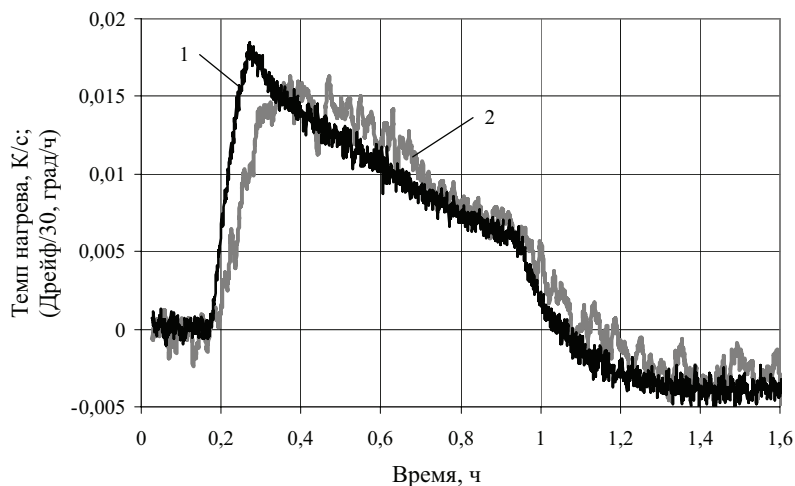


Рис. 9. Изменение темпа нагрева 1 и дрейфа 2 при всестороннем нагреве оптического блока

В последнем опыте зафиксированы максимальные из всех серий значения темпа изменения температуры – до 0,018 К/с. Диапазон изменения термически индуцированной угловой скорости в этой записи составил более 0,6 град/ч.

Полученные в экспериментах данные наглядно свидетельствуют, что даже малые скорости изменения температуры во времени приводят к возникновению существенной фазовой невзаимности. В частности, дрейф гироскопа продолжается даже тогда, когда темп составляет тысячные доли К/с.

Анализ результатов натурных испытаний ВОГ позволяет сделать некоторые практические выводы относительно размещения термодатчиков в оптическом блоке и точности регистрации температуры. Наилучший вариант установки датчика – непосредственно на оптоволоконном контуре. В этом случае будет соблюдаться корреляция между началом теплового воздействия и возникновением дрейфа. Если датчик температуры предполагается размещать на наружной поверхности корпуса оптического блока, то место его расположения следует выбирать там, где обеспечивается надежный тепловой контакт между корпусом, каркасом катушки и оптоволоконным контуром. Кроме этого при выборе материала корпуса необходимо учитывать его теплопроводность. Теплопроводные материалы обеспечивают более однородное распределение температуры и, как показывают исследования, способствуют уменьшению теплового дрейфа. Наилучшую точность измерения температуры обеспечивают термопары. Но при практической реализации термопарного контроля возникают некоторые проблемы, связанные с оцифровкой сигнала, а также с необходимостью компенсации температуры холодного спая (если измеряется значение температуры, а не темпа). В этом смысле оправдано применение микросхемных датчиков температуры, тарировка которых известна. Однако желательно, чтобы такой датчик имел как можно меньшие габариты и обеспечивал дискретность вывода значений не хуже 0,01...0,02 °С.

Приведенные в данной работе результаты исследований использовались в дальнейшем для разработки алгоритмов компенсации термически индуцированной фазовой невзаимности ВОГ.

Библиографический список

1. Шереметьев А.Г. Волоконный оптический гироскоп. – М.: Радио и связь, 1987. – 152 с.
2. Джашитов В.Э. Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем. – СПб: Электроприбор, 2001. – 150 с.
3. Тепловой дрейф волоконного оптического гироскопа / Е.И. Вахрамеев [и др.] // Известия вузов. Сер. Приборостроение. – 2011. – Т.54. – № 1. – С. 32–37.
4. Методика коррекции теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа / К.С. Галягин [и др.] // Фотон-экспресс. – 2009. – № 6(78). – С. 96–97.

Получено 1.12.2010