
ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

УДК 536.2

Д. С. ГРОМОВ, А. В. ШАРКОВ

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ ГИРОСКОПИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ НА БАЗЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ

Представлены результаты исследований тепловых режимов гироскопических приборов на базе волоконно-оптических гироскопов с использованием современного программного обеспечения. Приведены рекомендации по оптимизации конструкций приборов и дальнейшим исследованиям в данном направлении.

Ключевые слова: гироскоп, тепловые режимы, метод конечных элементов.

Введение. Гироскопические приборы активно применяются во многих областях современной техники. Навигация, особенно высокоточная, — одна из тех сфер, в которых обойтись без гироскопов в настоящее время невозможно. Гироскопические приборы различаются по типу используемых чувствительных элементов, физическим принципам работы и соответственно по точности показаний и областям применения. Волоконно-оптический гироскоп (ВОГ), принцип действия которого основан на эффекте Саньяка, — один из наиболее активно развивающихся и перспективных типов гироскопов. Ожидается, что бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) на базе ВОГ в самое ближайшее время будут способны заменить более сложные и дорогие приборы в области среднеточной навигации в диапазоне 10^{-2} — 10^{-3} °/ч [1]. Для достижения данной точности требуется обеспечить стабильность температуры по волоконному контуру на уровне 0,01 К, что является сложной задачей [2, 3]. Расчет температурных состояний приборов с таким уровнем точности поддержания температуры также не является тривиальным.

В настоящей статье описаны результаты первого этапа исследований в данном направлении, задачей которых являлся расчет температурного состояния приборов в целом и определение перепадов температур в различных точках наиболее значимых элементов конструкций с точностью, не превышающей 0,1 К. В настоящее время подобные задачи принято решать на этапе проектирования в основном с использованием метода тепловых балансов или с помощью математического (компьютерного) моделирования [4, 5]. В связи с необходимостью учета всех особенностей и сложности конструкции приборов, теплообмена как теплопроводностью и конвекцией, так и излучением вышеперечисленные методы не кажутся оптимальными и не дают полного представления о тепловом режиме приборов. Рассматриваемый в настоящей статье метод конечных элементов, реализуемый с помощью современного программного обеспечения для тепловых и гидро- и газодинамических расчетов — CFDesign, обладает рядом преимуществ, в числе которых:

— возможность рассчитывать процессы теплообмена теплопроводностью, конвекцией и тепловым излучением;

- наглядная визуализация результатов вычислений для различных поверхностей и любых точек прибора;
- возможность расчета различных теплофизических процессов, в том числе с учетом вращения элементов в приборе;
- возможность быстрого сравнения результатов и оценивания степени влияния внесенных в модель изменений на процессы теплообмена.

Исследования, результаты которых представлены в данной статье, направлены на

- создание тепловых моделей БИНС на основе ВОГ;
- оценку динамики изменения во времени температуры на поверхностях ВОГ при переменных внешних воздействиях;
- разработку рекомендаций по оптимизации тепловых режимов БИНС.

Постановка задачи. Геометрические модели. Для расчета температурного состояния приборов были построены геометрические модели двух модификаций БИНС: бесплатформенного инерциального модуля (БИМ) и вращающегося инерциального модуля (ВИМ). Геометрические модели приборов были выполнены с помощью программы CAD Pro/Engineer. В соответствии с известными методиками из моделей исключены элементы крепежа, отверстия, фаски и прочие элементы, усложняющие генерацию сетки для конечно-элементного анализа и не оказывающие существенного влияния на тепловой режим приборов.

Наиболее значимыми со всех точек зрения элементами приборов являются волоконно-оптические генераторы интерферометрического типа (далее — ВОГ или интерферометры). На рис. 1 и 2 соответственно представлены упрощенные геометрические модели бесплатформенного и вращающегося инерциальных модулей. В первом случае интерферометры 1 закреплены на неподвижном основании (см. рис. 1), а во втором (рис. 2) — расположены на платформе, вращающейся с постоянной угловой скоростью. Именно определение распределения температур по поверхностям интерферометров являлось главной задачей исследований. Помимо ВОГ, в обоих БИНС основными тепловыделяющими элементами, влияющими на тепловой режим приборов в целом и распределение температур по интерферометрам в частности, являются акселерометры (поз. 2 на рис. 1; на рис. 2 расположены под платформой с интерферометрами) и платы электроники (на рис. 1 расположены в центре конструкции; на рис. 2 — поз. 3, 4). От окружающей среды внутренние элементы приборов отделены металлическими кожухами (на рис. 1 показан его фрагмент; на рис. 2 не показан).

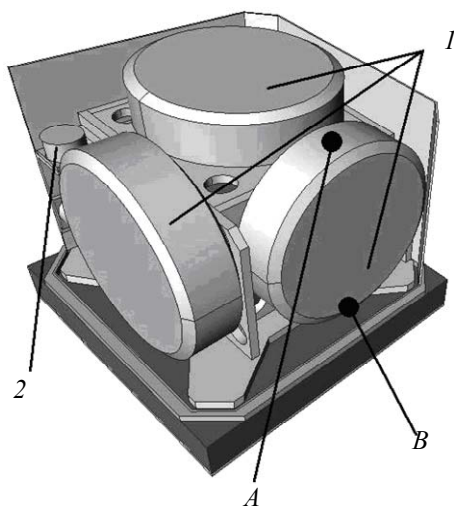


Рис. 1

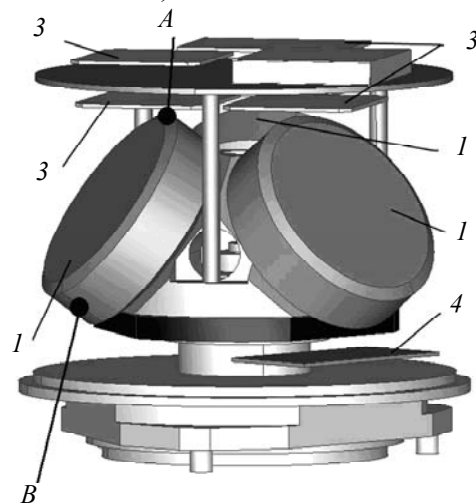


Рис. 2

Среди выбранных для расчета режимов работы наиболее значимым и сложным для анализа представляется режим, при котором БИНС прогревается от начальной температуры 15 °С до стационарного состояния, а далее функционирует при циклически изменяющейся

температуре окружающей среды. Кроме того, необходимо учесть, что основная часть ВИМ, включающая в себя массивное основание с закрепленными на нем акселерометрами, интерферометрами, платами и другими элементами, вращается вокруг вертикальной оси прибора с угловой скоростью $3 \text{ }^\circ/\text{с}$.

Для определения градиентов температур по волоконному контуру интерферометра предлагается использовать метод поэтапного моделирования. На первом этапе в первом приближении определяются распределения температур по внешним поверхностям интерферометров. Эти значения в дальнейшем используются как исходные данные для более детального расчета теплового режима интерферометра с последующим определением градиентов по оптическому волокну, навитому на катушку, которая расположена в интерферометре и занимает (вместе с волоконно-оптическим контуром) большую его часть. В ходе исследований было необходимо в результате расчета получить распределения температур по поверхностям интерферометров, а также построить графики изменения температуры в их верхних A и нижних B точках (см. рис. 1, 2) в зависимости от времени.

Тепловая модель. БИМ и ВИМ представляют собой системы тел (в тепловой модели каждого из приборов учтены 3 интерферометра, 3 акселерометра, несколько плат питания и управления, источник излучения, массивные основания, несущие элементы конструкции, защитный тонкостенный кожух), взаимодействующих между собой за счет процессов теплопроводности, конвекции и теплового излучения. В бесплатформенном инерционном модуле содержится 12 тепловыделяющих элементов, а во вращающемся — 13. Мощности тепловыделений этих элементов являются единственными внутренними возмущающими воздействиями в моделях: суммарные тепловыделения постоянны во времени и составляют 29,5 Вт в БИМ и 34,5 Вт — в ВИМ. Основания, несущие элементы конструкции и защитные кожухи учтены как пассивные элементы. Единственное внешнее возмущающее воздействие — температура окружающей среды, циклически изменяющаяся в пределах от 15 до 35 $^\circ\text{C}$, другие возмущающие воздействия в моделях отсутствуют [6].

На первом этапе расчетов интерферометры рассматриваются однородными элементами, тепловыделяющими равномерно по всему объему. При этом для большего соответствия модели реальному прибору отдельно были определены эффективные (усредненные) теплоемкость, теплопроводность и плотность материала интерферометров. Акселерометры считаются объемными, а печатные платы поверхностными источниками мощности, которые включаются мгновенно. Контакты между твердыми телами считаются идеальными, поэтому учет контактных тепловых сопротивлений можно пренебречь.

Теплообмен теплопроводностью, конвекцией и излучением во внутреннем объеме прибора рассчитывался непосредственно в программе. Конвективно-лучистый теплообмен во внешнюю среду задан граничным условием на соответствующих поверхностях. Коэффициент теплоотдачи в окружающую среду рассчитывался с помощью критериальных уравнений и известных законов теплообмена. Необходимые значения теплопроводности, удельной теплоемкости и коэффициентов черноты поверхностей элементов конструкции приборов найдены в соответствующих литературных источниках. Были рассмотрены несколько вариантов задания граничного условия на нижней (установочной) поверхности приборов. Оптимальным для реализации оказалось задание граничного условия 1-го рода (температура на поверхности).

Результаты расчетов. Расчет производился методом конечных элементов с использованием программного обеспечения CFDesign, позволяющего строить графики зависимостей температуры от времени в любой точке прибора и анализировать температурные поля для любых поверхностей и сечений [7]. Объем графической информации, отражающей основные результаты расчетов, слишком велик для размещения в рамках данной статьи. Поэтому здесь представлены некоторые наиболее значимые из результатов. Так, на рис. 3 приведен график

изменения во времени разности температур ΔT в верхней A и нижней B точках интерферометра БИМ (см. рис. 1) при изменяющейся температуре окружающей среды $T_{\text{ср}}$.

Графики изменения во времени температуры в точках A и B (T_A , T_B) интерферометра ВИМ (см. рис. 2) при изменяющемся значении температуры окружающей среды $T_{\text{ср}}$ и при вращении прибора со скоростью 3 °/с представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

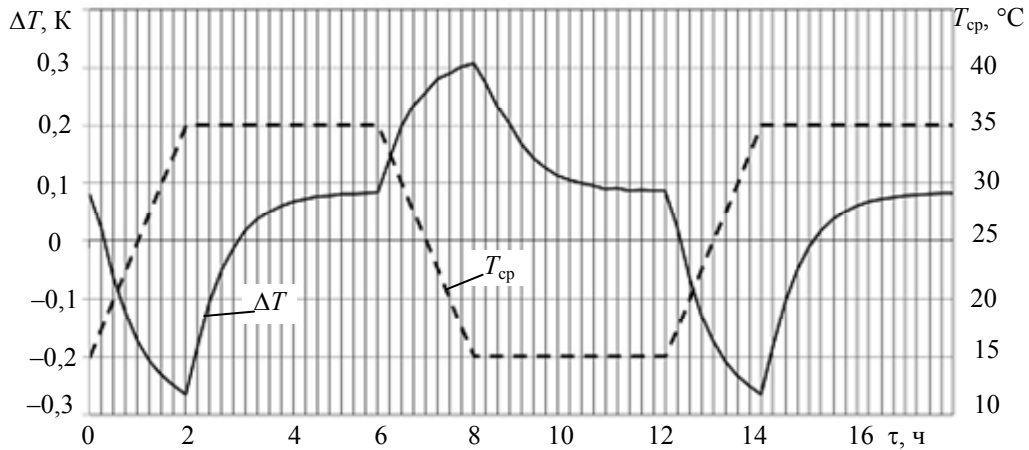


Рис. 3

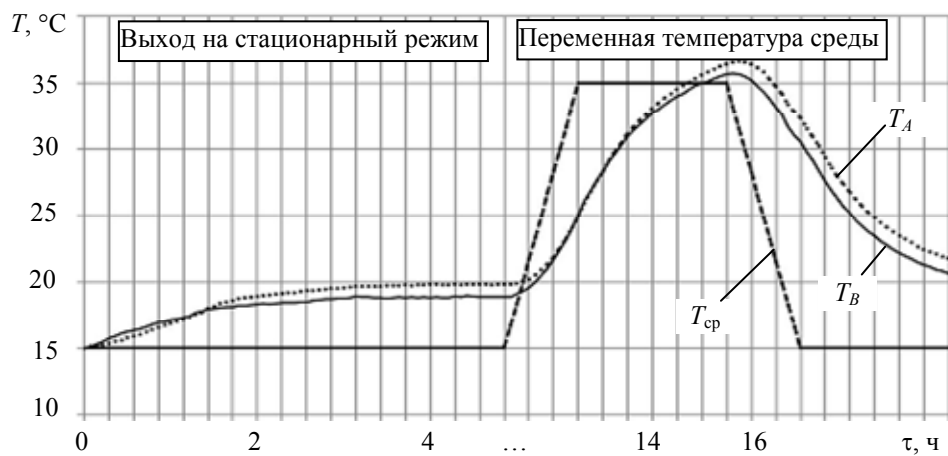


Рис. 4

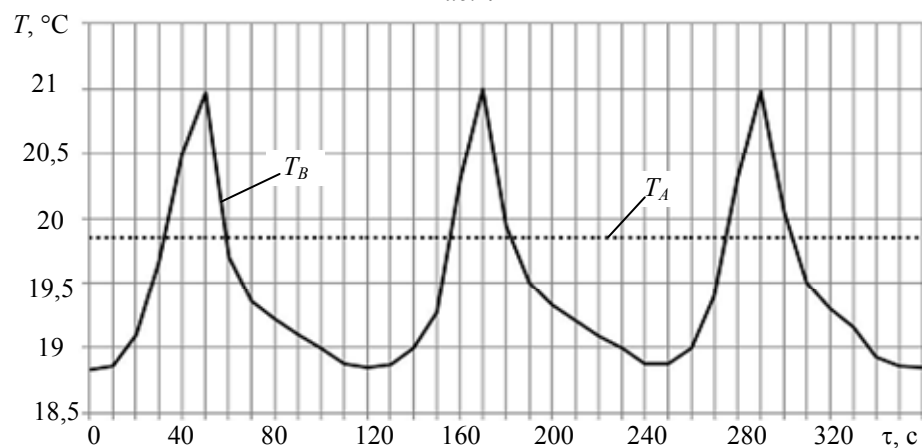


Рис. 5

Выводы и рекомендации. Анализ полученных в ходе исследований результатов позволяет сделать следующие выводы:

— наибольшее тепловое воздействие на волоконно-оптический гироскоп оказывают платы электроники и триады акселерометров;

— БИМ выходит на стационарный режим в течение 4 ч при $T_{cp} = \text{const}$, ВИМ — в течение 5 ч (см. рис. 3, 4);

— градиенты температур по поверхностям интерферометров в обоих приборах существенно зависят от изменения температуры окружающей среды; предложенные методы расчетов позволяют определять степень этой зависимости и принимать меры по ее уменьшению (см. рис. 3, 4).

— максимальные перепады температур по поверхностям интерферометров могут превышать 1 К, что негативно сказывается на распределении температур по волоконному контуру и требует принятия мер по их снижению (см. рис. 5).

— вращение основной части ВИМ не влияет существенно на тепловой режим прибора в целом, но при прохождении интерферометров над вычислителем (см. рис. 2, поз. 4) во время вращения основания значительны возмущения, вызванные изменением температуры (см. рис. 5).

По итогам анализа результатов был предложен ряд рекомендаций по изменению конструктивных параметров БИНС для улучшения их характеристик. В частности, было принято решение отделить интерферометры экранами и теплоизоляцией от остальных тепловыделяющих элементов, изменить расположение в системе нескольких плат электроники в целях уменьшения их теплового влияния на волоконно-оптические гироскопы и рассмотреть возможность теплоизоляции и термостатирования всего объема БИНС.

Заключение. В результате проведенных исследований проанализированы распределения температур в БИНС на основе ВОГ с неподвижным (БИМ) и вращающимся (ВИМ) основанием, определены перепады температур по поверхностям наиболее значимых элементов конструкций — интерферометров. В перспективе планируются дальнейшие исследования по данной тематике: усовершенствование тепловых моделей БИНС, подробный анализ тепловых режимов интерферометров, оценка эффективности новых способов снижения градиентов температур по поверхностям интерферометров и влияния возмущений, вызванных изменением температуры, на точность показаний гироскопического прибора в целом. Сравнительный анализ значений температур по поверхностям интерферометров БИМ, рассчитанных с помощью предложенных методов, и экспериментальных данных, полученных для отдельных частей и макетов приборов, показывает расхождение не более чем на 15 %. Это позволяет рассмотренные методы и тепловые модели использовать для расчетов и обеспечения тепловых режимов приборов и устройств, представляющих собой систему тел в внутренних источниках тепловыделений и находящихся в среде с изменяющейся температурой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пешехонов В. Г. Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. 2011. № 1(72). С. 3—16.
2. Филатов Ю. В. Волоконно-оптический гироскоп. СПб: Изд-во СПбГЭТУ, 2003. 52 с.
3. Джашитов В. Э., Панкратов В. М. Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2005. 404 с.
4. Голиков А. В., Джашитов В. Э. Температурные погрешности волоконно-оптических гироскопов // Гироскопия и навигация. 2001. № 2(33). С. 3—17.
5. Галактионов А. А. Косвенная термостабилизация гироскопов и гиросtabilизируемых платформ. Способы повышения точности // Там же. 2003. № 1(40). С. 5—12.
6. Кондратьев Г. М., Дульнев Г. Н., Платунов Е. С., Ярышев Н. А. Прикладная физика: Теплообмен в приборостроении. СПб: СПбГУ ИТМО. 2003. 560 с.
7. CFDesign Customer Portal [Электронный ресурс]: <<http://www.cfdesign.com/support/customerportal>>.

Сведения об авторах

Дмитрий Сергеевич Громов

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: dmitrygromov17@gmail.com

Александр Васильевич Шарков

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: Sharkov@grv.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
компьютерной теплофизики и
энергофизического мониторинга

Поступила в редакцию
17.02.12 г.