

УДК 536.2, 629.5

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ДВУХСТЕПЕННОГО ПОПЛАВКОВОГО ГИРОСКОПА

Д.С. Громов

Описаны результаты исследования теплового режима двухстепенного поплавкового гироскопа. Проведен расчет стационарного и нестационарного тепловых режимов прибора, представлена его тепловая модель, приведены рекомендации по оптимизации конструкции для уменьшения влияния температурных возмущений на точность показаний прибора. Предложено направление дальнейшей деятельности по развитию настоящего исследования.

Ключевые слова: поплавковый гироскоп, тепловая модель, тепловой режим, САД-система.

Введение

В современных гироскопических системах навигационного класса точности по-прежнему остается актуальным использование поплавковых гироскопов, следовательно, актуален вопрос увеличения их точности и стабильности показаний [1]. Существует несколько факторов, влияющих на это. Один из них – тепловой режим, а именно стабильность поддержания необходимого уровня температур с точностью не менее 0,1 К и минимизация температурных градиентов в определенных частях прибора, например, по поверхности его поплавковой камеры [2].

Главная особенность исследуемого в настоящей работе двухстепенного поплавкового гироскопа (ДПГ), с точки зрения теплового режима, состоит в том, что для поддержания требуемого уровня температур по поверхности его поплавковой камеры используется собственная система термостабилизации. Из других особенностей стоит отметить нелинейный режим включения и прогрева прибора при изменяющейся температуре окружающей среды, использование в конструкции специальных материалов с недостаточно изученными теплофизическими свойствами, заполнение внутренних полостей гироскопа газообразным гелием и демпфирующей жидкостью, малые размеры некоторых элементов и зазоров между ними. Это ведет к дополнительным сложностям, так как все вышеперечисленное необходимо учесть при выполнении расчета.

Обзор современной литературы показал, что ранее расчеты тепловых режимов подобных приборов и устройств проводились в основном аналитическими методами (они позволяют, как правило, исследовать систему лишь из нескольких тел) или методом тепловых балансов [2]. Кроме того, рассматривались лишь отдельные части конструкций, в то время как расчеты приборов в целом, позволяющие полноценно исследовать тепловой режим, не проводились. Такие расчеты в настоящее время принято выполнять с помощью современного программного обеспечения, основанного на методе конечных элементов (МКЭ) [3]. В настоящей работе использован программный пакет (САЕ-система) для тепловых и гидродинамических расчетов CFDesign, среди преимуществ которого стоит отметить возможность расчета различных теплофизических процессов, наглядную визуализацию результатов вычислений по различным поверхностям и в любых точках исследуемой конструкции, удобство и относительную (по сравнению с другими САЕ-системами) простоту в использовании [4].

Целями настоящей работы являются:

- исследование теплового режима ДПГ как в стационарном состоянии, так и при его включении и прогреве;
- определение возможностей оптимизации конструкции с целью уменьшения влияния температурных возмущений на точность показаний ДПГ;
- разработка предложений по дальнейшему развитию работы в данном направлении для определения методов повышения стабильности работы прибора в целом.

Постановка задачи

Геометрическая трехмерная модель ДПГ, выполненная с помощью системы автоматизированного проектирования – САД-системы Pro/Engineer, предоставлена разработчиками прибора. Модель, упрощенная для проведения расчета, представлена на рис. 1. Материалы каждой входящей в конструкцию детали обозначены непосредственно в модели. Вид сред, заполняющих внутренние объемы гироскопа, режим работы при его включении и прогреве, температура окружающей среды, информация по способу установки и существующие к настоящему времени результаты экспериментов также являются исходными данными для расчета.

Основными тепловыделяющими элементами в настоящей конструкции (рис. 1) являются нагреватель системы терморегулирования 1, выполненный в виде намотки на внешней поверхности поплавковой камеры прибора, гиросмотор 2, расположенный внутри поплавковой камеры, платы электроники 3 и дат-

чки угла 4. Изменения мощностей тепловыделений нагревателя, гиromотора и плат электроники при включении и прогреве представлены на рис. 2, мощность тепловыделений датчиков угла во времени не изменяется и составляет 0,1 Вт. В конструкции присутствует датчик температуры, выполненный по аналогии с нагревателем системы термостабилизации 1 (рис. 1) в виде намотки на внешней поверхности поплавковой камеры. Температура окружающей среды изменяется от начального состояния 20°C до 45°C в течение 2 ч и далее остается постоянной. За начальную температуру всех элементов ДПГ на момент его включения принято значение 20°C.

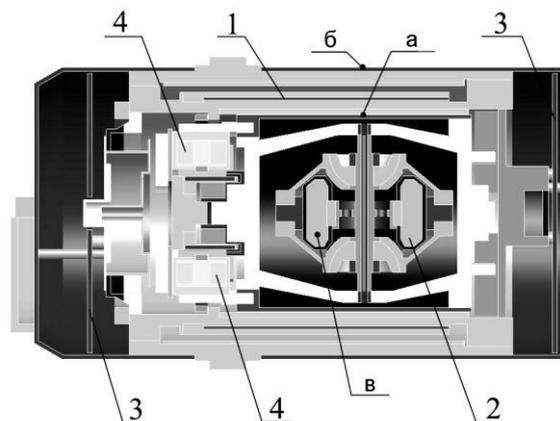


Рис. 1. Упрощенная геометрическая модель ДПГ: источники тепловыделений (1 – нагреватель системы термостабилизации; 2 – гиromотор; 3 – платы электроники; 4 – датчики угла) и точки для вывода графиков (а–в)

В результате расчетов требуется получить распределения температур по наиболее значимым поверхностям и сечениям гироскопа в установившемся тепловом режиме, а также графики изменения температуры во времени в некоторых точках (точки а–в на рис. 1) при его включении (переходный процесс, нестационарный тепловой режим).

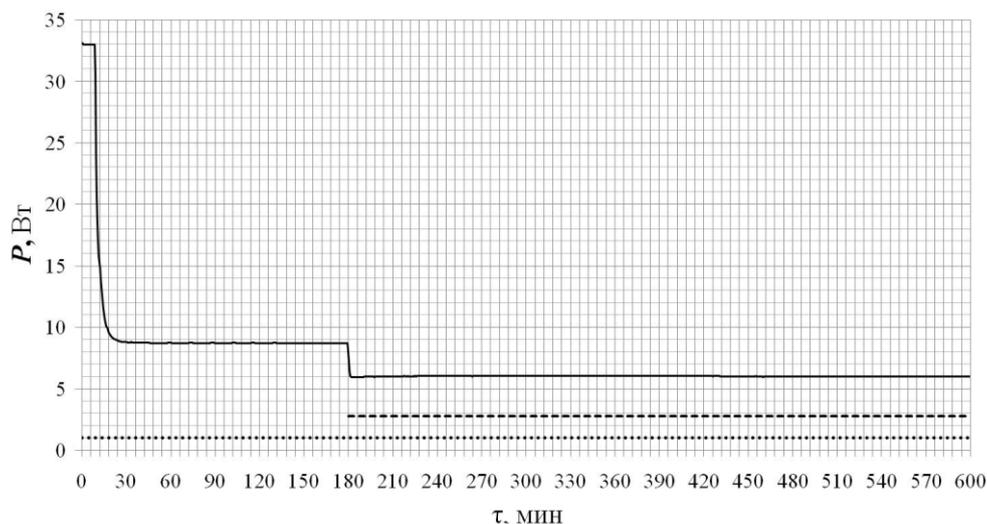


Рис. 2. Мощность тепловыделений системы термостабилизации ($P_{стс}$), гиromотора ($P_{гм}$) и плат электроники ($P_{пэ}$) во времени (τ): — $P_{стс}$, - - - $P_{гм}$, $P_{пэ}$

Тепловая модель

ДПГ представляет собой систему тел, которые взаимодействуют между собой в тепловом отношении за счет процессов теплопроводности, конвекции и теплового излучения. Геометрическая модель, созданная с помощью CAD-системы Pro/Engineer, была подготовлена для передачи в среду CFXDesign. Согласно известным методикам, из нее удалены элементы крепежа, отверстия, фаски и прочие элементы, усложняющие генерацию сетки для конечно-элементного анализа и не оказывающие серьезного влияния на тепловой режим. Ввиду сравнительно узкого диапазона изменения температур элементов прибора значения теплофизических свойств (теплопроводность и теплоемкость) принимаются независимыми от

температуры. Источники тепловыделений (рис. 1) считаются объемными, значения мощностей тепловыделений приведены ранее.

Теплообмен кондукцией и конвекцией во внутреннем объеме гироскопа рассчитывался непосредственно в программе, конвективно-лучистый теплообмен во внешнюю среду задан граничным условием на соответствующих поверхностях. Коэффициент теплоотдачи в окружающую среду рассчитан с помощью критериальных уравнений и известных законов теплообмена, кондуктивный отток тепла в местах крепления определен с помощью закона баланса мощности [5]. На момент начала нестационарного расчета температура всех элементов ДПГ принималась равной 20°C, температура окружающей среды с помощью внешнего теплового воздействия в течение 60 мин возрастает с 20°C до 45°C и далее остается постоянной. Экспериментальные значения температуры в стационарном тепловом режиме, снятые с единственного температурного датчика, использованы для верификации созданной тепловой модели с целью получения как можно более точных результатов расчета.

Кроме того, при формировании тепловой модели были сделаны следующие допущения и приближения: нагревательный элемент системы термостабилизации представлен в виде тонкостенного цилиндра с объемным тепловыделением; расчет проведен для ориентации прибора, при которой его продольная ось и ось вращения гиromотора находятся в плоскости горизонта; тепловое расширение жидкости и вращение гиromотора не учитываются; теплообмен излучением внутри гироскопа не учитывается ввиду его незначительного вклада, что было определено в результате предварительных оценок.

Расчеты в среде CFX Design производятся посредством МКЭ. После подготовки геометрической модели, задания свойств материалов элементов, тепловых нагрузок, граничных и начальных условий, создания сетки конечных элементов и проведения тепловых расчетов программа позволяет проанализировать температурные поля по любым поверхностям и в различных сечениях, а также графики зависимости температуры от времени в любых точках конструкции [4].

Результаты моделирования

Все результаты проведения расчетов, оформленные в виде графической информации, слишком объемны для размещения их в рамках настоящей работы. На рис. 3, 4 представлены наиболее значимые из них. Сравнение результатов расчета с существующими на настоящий момент экспериментальными данными показано в таблице.

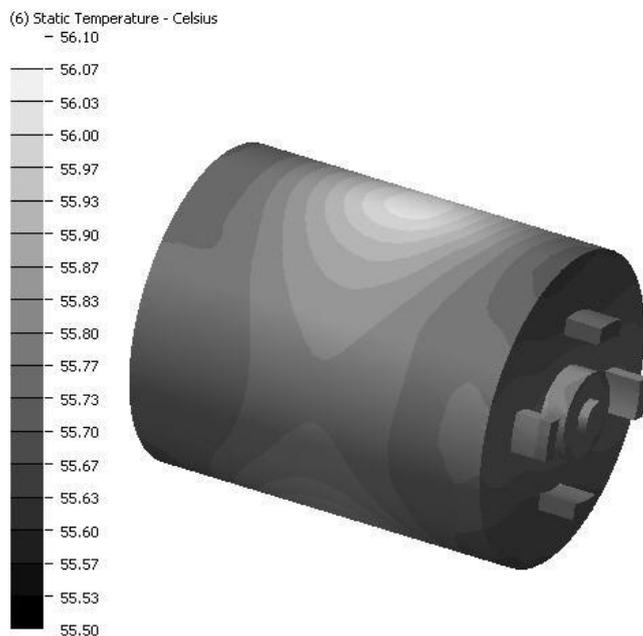


Рис. 3. Распределение температуры по поверхности поплавковой камеры ДПГ

На основании анализа результатов расчетов были сделаны следующие выводы:

- при включении и прогреве температурная стабильность прибора (стационарный тепловой режим) наступает через 6 ч (рис. 4);
- разница температур между гиromотором (график «в» на рис. 4) и внешней поверхностью поплавковой камеры (график «а» на рис. 4) весьма существенна и составляет 11 К;

- перепад температур по внешней поверхности поплавковой камеры составляет 0,4 К (рис. 3); после включения гиromотора мощность, выделяемая им, компенсируется системой термостабилизации, но происходит перераспределение температур в поплавковой камере;
- обнаружено существенное влияние на тепловой режим гироскопа платы электроники, расположенной справа;
- расчетное значение температуры нагревательного элемента системы термостабилизации отличается от экспериментального не более чем на 1%; это указывает на то, что созданная тепловая модель с должным уровнем точности верифицирована и соответствует исследуемому прибору;
- в силу того, что единственное экспериментально определенное значение температуры использовалось в качестве исходной информации для верификации созданной тепловой модели, независимо оценить погрешность определения температур на данном этапе исследований не представляется возможным;
- сравнение полученных в результате расчетов и экспериментов значений времени выхода ДПГ на стационарный тепловой режим (при первоначальном прогреве прибора до включения гиromотора) показывает, что относительная погрешность определения настоящего параметра не превышает 15%.

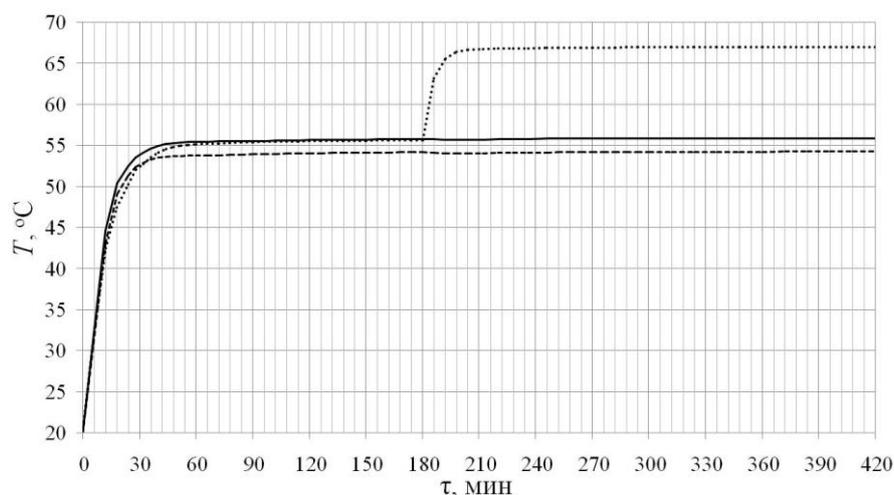


Рис. 4. Выход на стационарный тепловой режим в различных точках ДПГ: — а, - - - б, ····· в (расположение точек для построения графиков показано на рис. 1)

Параметр	Расчет	Эксперимент	Отклонение
Температура в месте расположения датчика T , °C	55,9	55,4	менее 1%
Время выхода прибора на стационарный тепловой режим при прогреве τ , мин	47	41	15%

Таблица. Сравнение рассчитанных и экспериментальных значений

Установлено, что в системе термостабилизации расположение датчика температуры и исполнительного элемента (нагревателя) в одной обмотке, как это выполнено в настоящей конструкции, не является оптимальным. Для достоверной оценки температурного состояния прибора при проведении испытаний было предложено рассмотреть возможность размещения датчика температуры, одного или нескольких, внутри поплавковой камеры. Кроме того, было определено, что использование материалов с высокой теплопроводностью (более 100 Вт/(м·К)) при изготовлении элементов, расположенных в поплавковой камере, позволит обеспечить в ней равномерность температурного поля не более 5 К и при этом снизить максимальные значения температур.

Заключение

В результате проведения работы исследован тепловой режим двухступенного поплавкового гироскопа, сделаны выводы и рекомендации по его усовершенствованию, проведено сопоставление полученных значений с экспериментальными данными. Анализ погрешности проведенных расчетов позволяет рекомендовать разработанную тепловую модель и методику для проведения инженерных расчетов и определения температуры с относительной погрешностью, не превышающей 20%. Эта оценка сделана автором на основании предыдущих подобных расчетов, изучения документации к использованному программному обеспечению, исследования литературы и работ других специалистов в данной области. Модель может найти применение при выборе параметров элементов конструкции, а также при разработке

рекомендаций по усовершенствованию теплового режима гироскопа и улучшению его технических характеристик.

Результаты проведенных расчетов могут быть использованы как начальные и граничные условия для исследования влияния температуры на дисбаланс поплавковой камеры прибора (сопряженная задача теплофизики и механики). Она является гораздо более сложной, но ее решение представляется возможным при переходе к более универсальному программному обеспечению (например, Ansys), что позволит расширить набор параметров (температурный коэффициент линейного расширения материалов, механические напряжения и деформации), влияющих на точность показания двухстепенного поплавкового гироскопа.

Описанные результаты и планы формируют цепочку исследований и расчетов, успешное выполнение которых способно привести к улучшению точностных характеристик и стабильности функционирования двухстепенного поплавкового гироскопа.

Литература

1. Пешехонов В.Г. Современное состояние и перспективы развития гироскопических систем // Гироскопия и навигация. – 2011. – № 1 (72). – С. 3–16.
2. Джашитов В.Э., Панкратов В.М. Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий. – СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор». – 2005. – 404 с.
3. Боголюбов Д.А., Кармановский Н.С. Исследование тепловых режимов различных радиоэлектронных конструктивов с помощью системы COSMOSWorks // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2007. – № 44. – С. 234–238.
4. CFDesign Customer Portal [Электронный ресурс] / владелец прав: компания Autodesk Co. – Режим доступа: <http://www.cfdesign.com/support/customerportal>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 17.01.2012).
5. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Высшая школа, 1984. – 247 с.

Громов Дмитрий Сергеевич – ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», инженер-конструктор, dmitrygromov17@gmail.com