

нальном технологическом нагреве бандажного колеса при сборке колесной пары тепловоза // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: Сб. научных трудов ХГПУ. – Вып. 7. Ч. 1. – 1999. – С. 240-243. 6. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. – Москва, Мир, 1975. – 541 с. 7. *Подгорный А.Н., Гонтаровский П.П., Киркач Б.Н.* и др. Задачи контактного взаимодействия элементов конструкций. – Киев: Наукова думка, 1989. – 232 с.

Надійшла до редколегії 25.04.2005

УДК 531:629

С.Ю.ПОГОРЕЛОВ, канд.техн.наук; ***К.Ю.СЧАСТЛИВЕЦ***

УТОЧНЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ КОЛЬЦЕВОГО ЛАЗЕРНОГО ГИРОСКОПА НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

У запропонованій роботі досліджено питання точності моделювання теплових процесів у кільцевому лазерному гіроскопі. Проведено експеримент з визначення теплових полів у реальному гіроскопі. Створено розрахункову модель, що відповідає умовам експерименту. Експериментальні та розрахункові температурні поля були порівняні між собою. Як наслідок, параметри розрахункової моделі були уточнені, а відповідність розрахункового температурного поля реальному полю температур стала більш повною.

In the proposed paper the analyze model accuracy of ring laser gyro has been researched. The temperature fields of real laser gyro have been determinate during the experiment. The analyze model of laser gyro corresponding experiment conditions was create. Difference between experimental and modeling results was analyzed. As result, the analyze model parameters of laser gyro has been adjust and adequacy between experimental and modeling heat processes became more full.

Описание проблемы. Для исследований, связанных с определением влияния тепловых воздействий на точностные характеристики кольцевого лазерного гироскопа (КЛГ), была создана его расчетная модель. Расчетная модель включает в себя 3-х мерную твердотельную модель КЛГ и конфигурацию источников теплового поля. Ценность модели определяется точностью, с которой она воспроизводит тепловые процессы в реальном объекте, и которая может быть оценена, в частности, на основе данных эксперимента. Источником погрешности расчетной модели являлось то, что не было точно известно, как распределена мощность между тепловыми источниками, а также, какая доля их мощности идет на нагрев КЛГ. Целью исследования было: постановка эксперимента по получению поля температур реального КЛГ, решение задачи теплопроводности на основе расчетной модели КЛГ, адаптированной под условия эксперимента, сравнение полученных расчетных и экспериментальных температурных полей и внесение уточнений в расчетную модель с целью достижения более точного соответствия данных эксперимента и расчета.

Описание объекта исследования. Основной деталью КЛГ является резонатор, который конструктивно представляет собой 3-х мерный объект сложной формы. Внутри резонатора выполнена четырехугольная полая трубка с ответвлениями. Два ответвления трубки заканчиваются анодами, а два других ответвления выходят во внутреннюю полость цилиндрической формы, где расположен катод. Цилиндрическая полость катода и трубка заполнена гелий-неоновой смесью под низким давлением. Во время работы КЛГ между анодами и катодом возникают два симметричных газовых разряда, являющимися источниками теплового поля. Тепловыделение также проходит и в полости катода. Кроме данного источника, на поверхности резонатора смонтированы электронные компоненты – резисторы, выделяемая которыми тепловая энергия частично шла на нагрев резонатора, а частично рассеивалась в пространство.

Экспериментальная часть. Для получения термографических данных был использован термограф с диафрагмой 38°, объективом диаметром 50 мм и фокусным расстоянием 50 мм, охлаждаемый жидким азотом. Размерность матрицы кадра составила 128x128 точек. Тарировка термографа производилась на основе контрольных замеров известных температур.

Программа эксперимента состояла в получении нескольких серии термографических снимков работающего КЛГ, начиная с момента включения из холодного состояния (температура КЛГ равна температуре окружающей среды). Каждая серия фиксировала динамический температурный процесс КЛГ, находящимся в определенном ракурсе: вид сверху, вид спереди, вид сбоку, вид снизу и промежуточный ракурс между видом спереди и видом сбоку. Периоды между снимками в серии были одинаковы, а от серии к серии изменялись 0,5 до 10 секунд, в зависимости от задачи серии.

Во время эксперимента КЛГ находился на картонной подложке в условиях естественного конвекционного теплообмена с окружающей средой, температура которой составляла примерно 18,5°C. Кадр с температурным полем для КЛГ в промежуточном ракурсе представлен на рис. 1.

Расчетная модель. В общем виде уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q}{c_v \rho},$$

где: a – изохорическая теплопроводность, $a = \frac{\lambda}{c_v \rho}$, q – удельная мощность внутренних источников, c_v – теплоемкость, ρ – плотность, λ – теплопроводность.

Для соответствия расчетной модели условиям эксперимента были приняты следующие допущения. Рассматривается нестационарный тепловой

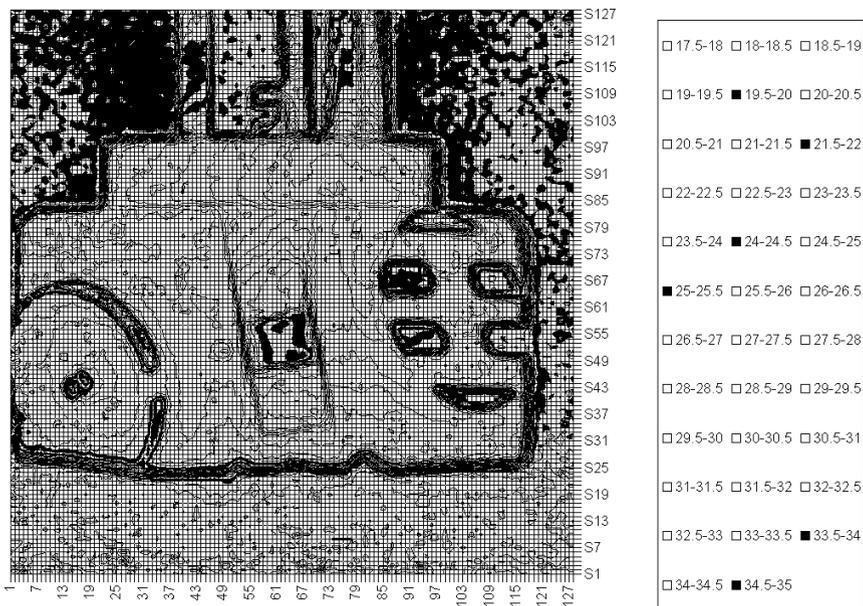


Рисунок 1 – Термография. Промежуточный ракурс. 2200 секунда

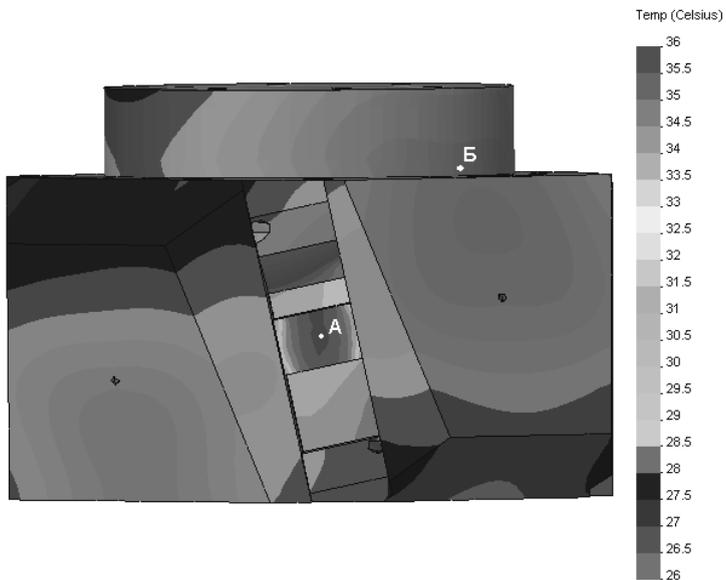


Рисунок 2 – Расчет. Промежуточный ракурс. 2200 секунда

процесс. Теплообмен с окружающей средой происходил двумя способами – естественной конвекцией с боковых и верхних граней резонатора и путем теплопроводности через картонную подложку на нижней грани.

Для моделирования теплообмена через теплопроводность для грани резонатора Γ_i справедливо следующее граничное условие:

$$q_t|_{\Gamma_i} = \frac{\lambda}{\delta}(t_1 - t_2),$$

где: q_t – удельная мощность теплового потока через подложку, t_2 принято равным температуре окружающей среды, а значение на внутренней границе подложки было взято на основании данных эксперимента.

Для моделирования теплообмена через естественную конвекцию было применено следующее граничное условие (формула Ньютона):

$$q_c|_{\Gamma_i} = \alpha_k(t_b - t_s),$$

где: q_c – удельная мощность теплового потока, α_k – коэффициент теплоотдачи, t_b – температура теплоносителя, t_s – температура грани.

Коэффициент теплоотдачи отражает характер движения окружающей среды и определяется для вертикальных граней и горизонтальных граней, обращенных нагретой стороной вверх *законом 1/4 степени*, соответственно:

$$\alpha_k = A_2 \left(\frac{t_s - t_b}{h} \right)^{1/4}, \quad \alpha_k = 1.3 A_2 \left(\frac{t_s - t_b}{L} \right)^{1/4}$$

где h – высота вертикальной поверхности, L – наименьшая сторона горизонтальной поверхности, A_2 – коэффициент, характеризующий физические параметры среды, значения которого табулированы и находятся в диапазоне $A_2 = 1,40 - 1,245$ при $0,5(t_s + t_b) = 10 - 150$ °C.

На основании чертежа резонатора была создана 3-мерная твердотельная модель резонатора КЛГ. Для решения поставленной задачи методом МКЭ была создана конечноэлементная модель ЛГ, состоящая из 177590 четырехугольных тетраэдров.

Материал модели – СО115М «астроситалл» со следующими характеристиками: теплопроводность $KX = 1,18$ W/(m · K), теплоемкость $c_v = 20$ J/(kg · K), плотность $\rho = 2457$ kg/m³. Теплопроводность картонной подложки $\lambda = 0,063$ J/(m² · °C · sec/m)

Для достижения адекватности результатов моделирования и данных эксперимента варьировались следующие параметры расчетной модели: распределение мощности между катодом и газовым разрядом, мощность резисторов, идущая на нагрев модели. Первоначальные значения варьируемых параметров модели были приняты следующие: катод 1,0 Вт, газовый разряд 1,5 Вт, тепловыделение резисторов составляет 0,2 Вт каждый.

Сравнение температурных полей. Температурные поля, полученные в результате эксперимента и моделирования, сравнивались по значениям тем-

ператур в контрольных точках во время динамического температурного процесса (рис. 3). Контрольные точки сравнения можно сгруппировать в два типа: точки, где преобладающим является влияние одного теплового источника (точка А), промежуточные точки между источниками (точка Б).

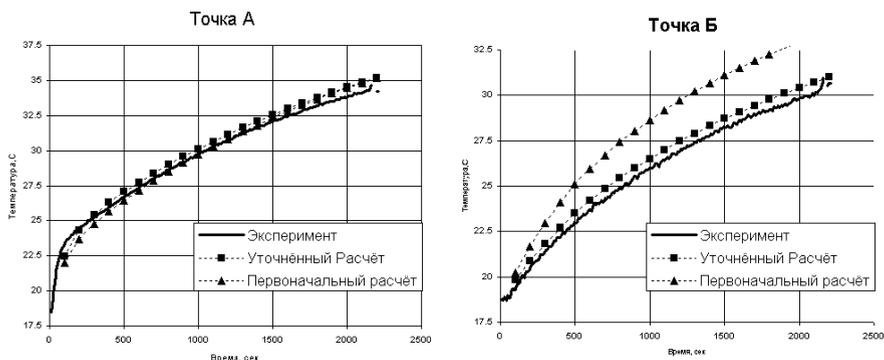


Рисунок 3 – Сравнение температурного тренда в контролируемых точках

Из приведенного рисунка видно, что в первоначальном варианте модели точка Б имела сильный перегрев. Путем изменения мощности тепловыделения резисторов и перераспределения мощности между катодом и газовым разрядом, данное несоответствие было устранено.

Заключение. В результате проведенного анализа была уточнены следующие параметры расчетной модели:

Мощность тепловыделения	Первоначальное значение (Вт)	Уточненное значение (Вт)
Резистора	0,2	0,1
Катода	1	0,75
Газового разряда	1,5	1,75

В уточненной расчетной модели погрешность воспроизведения динамических тепловых процессов составила в 25 контролируемых точках на ракурс не более одного градуса, что составило менее 6% от температурного диапазона.

Таким образом, после уточнения параметров расчетной модели на основе данных эксперимента по получению температурного поля резонатора КЛГ, расчетная модель стала адекватно воспроизводить тепловые процессы, происходящие в реальном гироскопе, и может быть использована для изучения влияния тепловых воздействий на точностные характеристики КЛГ.

Список литературы: 1. Джашишов В.Э., Панкратов В.М. Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем. – СПб.: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2001. – 150 с. 2. Джашишов В.Э., Панкратов В.М. и др. Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий. – СПб.: ГНЦ

РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 2005. – 404 с. 3. Мухачев Г.А., Щукин В.К. Термодинамика и теплопередача. – М.: Высш.шк., 1991. – 480 с. 4. Мясников В.И., Мальцев В.П. и др. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: Справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 520 с. 5. Smythsonian Physical Tables. Ninth Revised Edition. – New York, Norwich: Knovel, 2003. – 792 p.

Поступила в редколлегию 25.04.2005

УДК 539.3

Э.А.СИМСОН, докт.техн.наук; **С.А.НАЗАРЕНКО**, канд.техн.наук;
А.Ю.ЗЮЗИН, НТУ «ХПИ»

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И ОПТИМИЗАЦИЯ КВАРЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ

У статті пропонуються методи аналізу чутливості та оптимізації скінченоелементних моделей кварцевих резонаторів з високим ступенем геометричної і фізичної інформативності; орієнтовані на високі розмірності векторів перемінних стану і проектування. Розглянуто області застосування розробленого математичного апарата.

Complicated finite-element models of quartz resonators with high geometric and physical self-descriptiveness sensitivity analysis and optimization methods are given in this article. The methods have guiding to orientate on high dimensions of state and design variables. The developed mathematical apparatus application domains are examined.

Кварцевые резонаторы (фильтры, стабилизаторы частоты) являются базовым элементом многих устройств радиоэлектронной, микропроцессорной и измерительной техники. Основными требованиями на стадии проектирования к ним являются: обеспечение заданной резонансной частоты, максимально возможная отстройка от паразитных резонансов, минимальный уровень потерь в пьезоэлементе и системе крепления (максимизация добротности), слабая температурно-частотная зависимость, удовлетворение габаритным, компоновочным, конструктивным ограничениям и т.д. [1,2]. Часть этих требований может быть сформулирована в виде функциональных и геометрических ограничений, другие носят экстремальный характер.

Проектирование кварцевого резонатора связано с выбором геометрической формы пьезоэлемента и электродов. При этом первой задачей, возникающей при проектировании, является определение резонансных частот и форм колебаний. Для расчета спектра разработано несколько теорий, дающих решение для пьезоэлементов простой формы [3]. Изменение геометрической формы в широких пределах, необходимость вычисления функциональных производных делает трудоемким применение аналитических методов и накладывает жесткие требования к эффективности реализации конечноэлементного алгоритма. Большинство колебательных систем в зоне рабочих частот