



В.Э. Джашитов, В.М. Панкратов, А.В. Голиков

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В БЛОКАХ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ С ГИРОСКОПАМИ И С СИСТЕМАМИ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ НА МОДУЛЯХ ПЕЛЬТЬЕ

(Институт проблем точной механики управления РАН, г. Саратов)

Блоки измерителей угловых скоростей (БИУС) с волоконно-оптическими (ВОГ) или с микромеханическими (ММГ) гироскопами - это современные приборы разного уровня точности, применяющиеся в системах управления и навигации широкого класса наземных и космических подвижных объектов.

В настоящее время усилия разработчиков и исследователей направлены на существенное повышение точности этих сложных приборов [1-10].

Один из путей повышения точности – уменьшение влияния тепловых воздействий на приборы и минимизация их температурного дрейфа [4,5,6-9].

Современные БИУС с гироскопами, должны функционировать [1-10] в условиях жестких внешних и внутренних тепловых воздействий. Например, внешние температуры могут меняться в диапазоне  $(-10 \div +40)^{\circ}\text{C}$  для БИУС с ВОГ и  $(-65 \div +85)^{\circ}\text{C}$  в блоках с ММГ (БММГ) при наличии внутренних источников тепла в единицы Ватт.

Для повышения точности с успехом применяются пассивные методы борьбы [4-8] с тепловыми воздействиями (алгоритмическая термокомпенсация, тепловое шунтирование элементов, усовершенствования конструкции и др.). Однако для существенного (на порядки) повышения точности применения только пассивных способов недостаточно [9,10]. Для этого применяются активные методы, заключающихся в создании одно- или многоконтурных реверсивных систем терморегулирования (СТР) всего блока и отдельных гироскопов [9-11].

Активный метод регулирования температуры позволяет уменьшить в принципе все температурные погрешности приборов независимо от их конструкции и типа применяющихся в них гироскопов, т.к при активном методе управляющее воздействие производится на причину температурных погрешностей прибора и датчиков – их нестационарные неоднородные температурные поля.

В любом случае для реализации пассивных и активных методов обеспечения термоинвариантности инерциальных датчиков и приборов необходимо уметь моделировать тепловые процессы в этих многокомпонентных сложных устройствах с учетом возможного наличия систем терморегулирования.

**Объекты исследования.** Нестационарные тепловые процессы в БИУС с ВОГ НПП “Антарес”, г. Саратов [6] и БММГ, ОАО МИЭА, г. Москва [7] с учетом функционирования активных СТР для этих приборов.

**Цель работы.** Построение и анализ математических моделей объектов исследования и на его основе синтез реверсивных СТР с модулями Пельтье,



обеспечивающих, при минимальном энергопотреблении, поддержание заданной температуры чувствительных элементов прибора в условиях сложных температурных воздействий и существенное уменьшение его теплового дрейфа.

Для достижения цели **поставлены и решены** задачи:

- разработка математического, алгоритмического и программного обеспечения, реализующего построенные иерархические математические модели тепловых процессов динамических систем “БИУС-ВОГ-СТР”, “БММГ-СТР”;
- аналитическое и численное компьютерное моделирование, выбор параметров СТР, получение качественных и количественных оценок функционирования динамических систем при сложных температурных воздействиях.

В основе математической модели тепловых процессов, предназначенной для расчета и анализа температурных полей БИУС с ВОГ, БММГ и других температурных характеристик с учетом применения реверсивной СТР на модулях Пельтье, заложен модифицированный метод тепловых балансов [4,12].

*Основной алгоритм* расчета температурных полей устройства, состоящего из твердотельных объемов имеет следующий вид [4]:

$$T_i(t + \Delta t) = \left[ 1 - \frac{\Delta t}{c_i} \left( \sum_{j=1}^M q_{ij} + q_{ic} \right) \right] T_i + \frac{\Delta t}{c_i} \left( \sum_{j=1}^M q_{ij} T_j + q_{ic} T_c + Q_i \right), \quad (1)$$

где  $T_i(t), T_i(t + \Delta t)$  - температуры  $i$ -го объема в настоящий и последующий моменты времени;  $T_c$  - температура окружающей среды;  $c_i$  - теплоемкость  $i$ -го объема;  $q_{ij}$  - теплопроводимости между объемами  $i, j$ ;  $q_{ic}$  - теплопроводимость между  $i$ -м объемом и окружающей средой;  $Q_i$  - мощность источников тепла или холода;  $\Delta t$  - шаг расчета;  $M$  - количество объемов, имеющих тепловой контакт с  $i$ -м объемом;  $N$  - количество объемов;  $i = 1, \dots, N$ .

В структуре теплопроводимостей  $q_{ij}, q_{ic}$  учитывается теплообмен теплопроводностью, свободной и вынужденной конвекцией и излучением.

Возможен и иной подход [4,12] к составлению тепловых балансов в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$c_i \dot{T}_i + \sum_{j=1}^N q_{ij} (T_i - T_j) + q_{ic} (T_i - T_c) = Q_i, \quad i = 1, \dots, N. \quad (2)$$

Для управления температурными полями прибора с СТР предлагается использовать термоэлектрические исполнительные устройства (модули Пельтье), принцип действия которых основан на эффекте Пельтье [4,13].

Особенность применения алгоритма (1) или уравнений (2) в том, что в рассматриваемых динамических системах имеются источники тепла (холода) с автоматически изменяющимися в соответствии с законом регулирования мощностями  $Q_P, Q_H$  на рабочем и наружном спаях модуля Пельтье.

Математическая модель, описывающая функционирование модуля Пельтье, и принятые нелинейные пропорционально – релейные законы регулирования температуры имеет вид [4,13]:



$$Q_D = \left[ -\varepsilon_T J(T_D + 273) + \frac{J^2 R}{2} \right] nm, \quad Q_i = \left[ \varepsilon_T J(T_i + 273) + \frac{J^2 R}{2} \right] nm \quad (3)$$

$$J = \begin{cases} J_{\max}, & \text{àñèè } T_{\bar{a}} - T_z \geq T_L; \\ k(T_{\bar{a}} - T_z - T_N), & \text{àñèè } T_N \leq T_{\bar{a}} - T_z \leq T_L; \\ 0, & \text{àñèè } -T_N \leq T_{\bar{a}} - T_z \leq T_N; \\ k(T_{\bar{a}} - T_z + T_N), & \text{àñèè } -T_L \leq T_{\bar{a}} - T_z \leq -T_N; \\ -J_{\max}, & \text{àñèè } T_{\bar{a}} - T_z \leq -T_L; \end{cases} \quad (4)$$

где  $Q_P, Q_H$  - мощности источников тепла или холода на рабочем и наружном спае;  $\varepsilon_T$  - коэффициент термоэлектродвижущей силы;  $J$  - ток, протекающий через термоэлемент;  $R$  - электрическое сопротивление;  $n, m$  - количество термоэлементов в модуле Пельтье и количество модулей Пельтье;  $J_{\max}$  - максимальный ток;  $T_L, T_N$  - зоны линейности и нечувствительности;  $T_P, T_H$  - температуры рабочей и наружной поверхности (спая) модуля Пельтье;  $k = J_{\max} / (T_L - T_N)$  - крутизна характеристики закона регулирования;  $T_Z$  - заданная температура термостабилизации;  $T_d$  - температура термодатчика.

Законы изменения температуры наружной и внутренней окружающей среды устройства приняты в построенной модели следующие:

$$T_C = T_D \sin \omega t + T_{00} + T_R, \quad (5)$$

где  $T_D, \omega, T_{00}, T_R$  - параметры детерминированных (ступенчато или гармонически изменяющихся) и случайных характеристик.

Алгоритмы, уравнения и соотношения (1)-(5), составляют основу математических моделей тепловых процессов рассматриваемых динамических систем и реализованы в программных комплексах "TP-BIUS-STR", "TP-BMMG-STR" (рис.1, рис.2).

Для примера, на рис.3 показаны, полученные сравнительные результаты по моделированию тепловых процессов в БММГ в условиях ступенчатого изменения внешней температуры при отсутствии СТР и при работе синтезированной СТР с выбранными параметрами.

**Таким образом,** достигнута цель работы и решены поставленные задачи в полном объеме.

- Построенные модели вполне работоспособны.
- Моделирование показало, что влияние внешних перепадов температуры на температуру основных элементов БММЧЭ при применении СТР ослабилось в  $\approx 140$  раз.
- "Цена" за такое улучшение температурной ситуации в приборе - это установленная потребляемая мощность СТР  $< 5$ Вт при определенной степени теплоизоляции; увеличение массы и габаритных размеров за счет исполнительных элементов СТР и теплоизоляции примерно на 20÷40% по сравнению с базовым вариантом прибора без СТР.

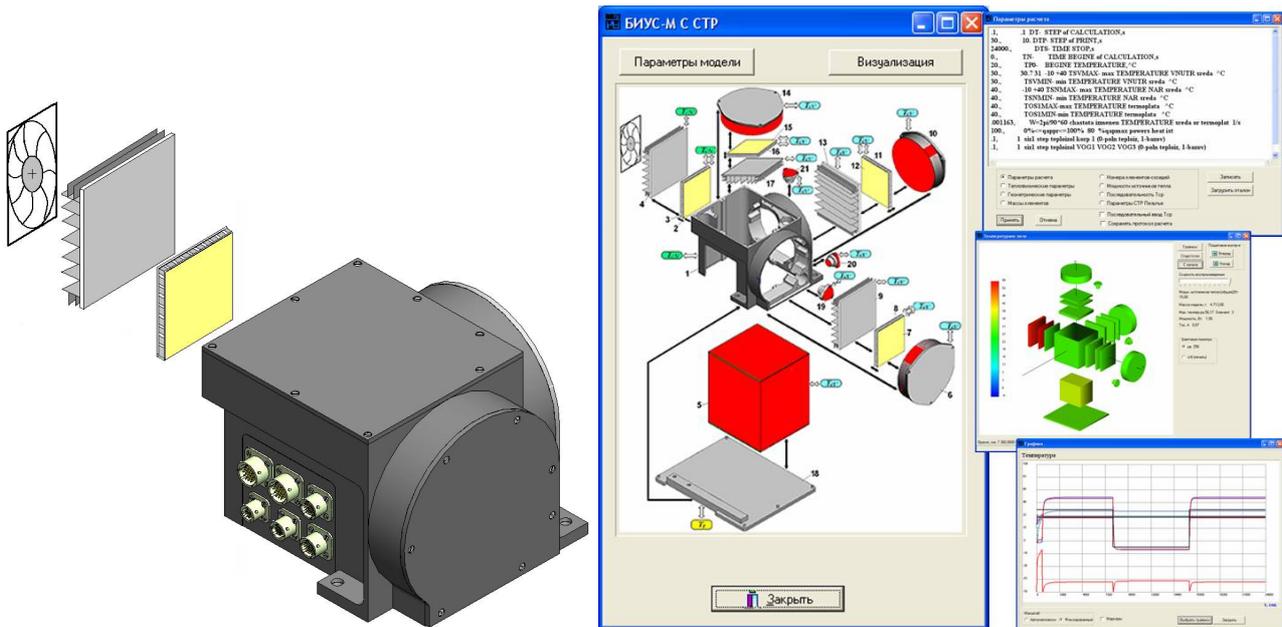


Рис. 1. Общий вид, диалоговые окна программного комплекса "TR-BIUS-STR" и визуализация расчетов температурных полей и тепловых процессов БИУС с ВОГ и СТР

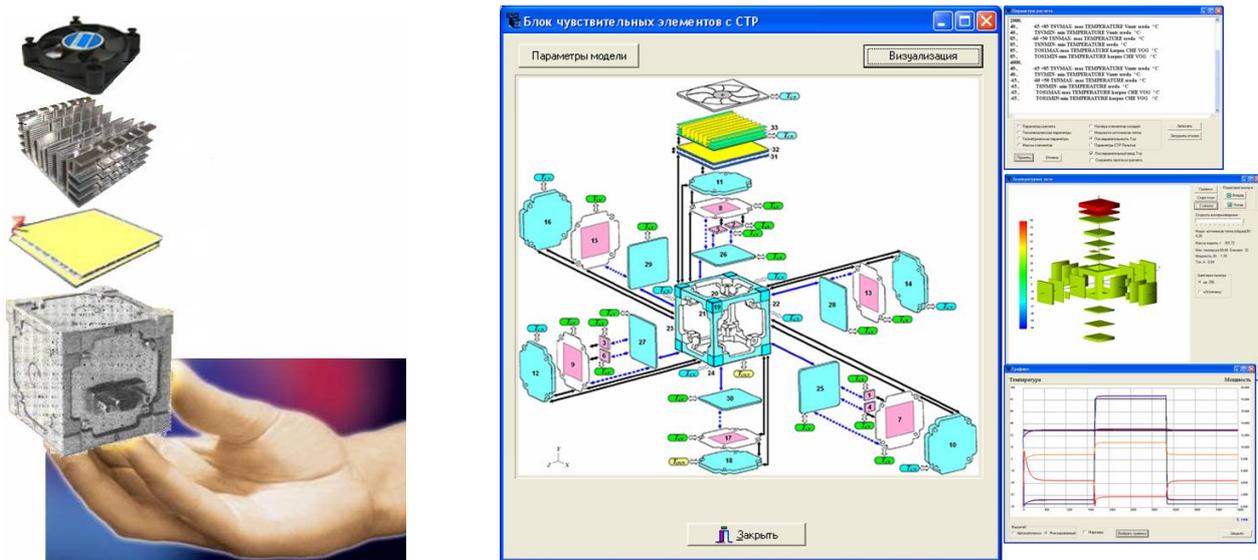


Рис.2.Общий вид, диалоговые окна программного комплекса "TR-BMMG-STR" и визуализация расчетов температурных полей и тепловых процессов БММГ с СТР

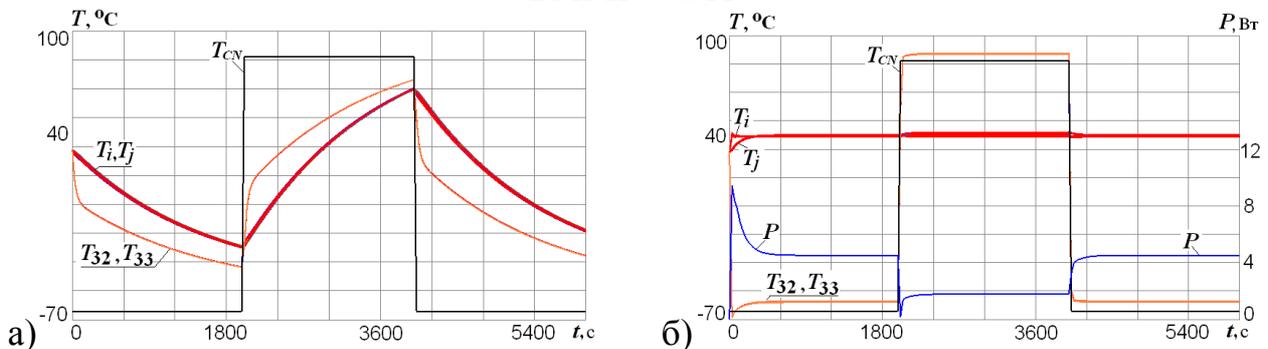


Рис.3. Температурные характеристики БММГ при выключенной (а) и работающей (б) СТР (см. следующую страницу)



К рис. 3:  $P$  – потребляемая мощность при теплоизоляции 0,1 от базовой;  $T_{CN}$  - внешняя температура;  $T_i, T_j, T_{32}, T_{33}$  – температуры элементов; наружного спая модуля Пельтье и радиатора.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ по проекту 13-08-00355а.*

### Литература

1. Пешехонов В.Г. Ключевые задачи современной автономной навигации //Гироскопия и навигация - 1996.- № 1(12).- С.48-55.
2. Коркишко Ю.Н., Федоров В.А., Прилуцкий В.Е. и др. Волоконно-оптический гироскоп навигационного класса точности. //XIV С.-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам. С.-Петербург, ГНЦ РФ “ЦНИИ “Электроприбор” 2007. С.141-150.
3. Колеватов А.П., Николаев С.Г., Андреев А.Г., Ермаков В.С. и др. Успехи в разработке БИНС на базе волоконно-оптических гироскопов. //XVI С.-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам. С.-Петербург, ГНЦ РФ “ЦНИИ “Электроприбор” 2009. С.13-20.
4. Джашизов В.Э., Панкратов В.М. Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий. / Под общей редакцией академика РАН В.Г. Пешехонова. С.-Петербург: ГНЦ РФ ЦНИИ “Электроприбор”, 2005. -404с.
5. Джашизов В.Э., Панкратов В.М., Голиков А.В., Николаев С.Г., Колеватов А.П., Плотников А.Д., Коффер К.В. Иерархические тепловые модели бесплатформенной инерциальной навигационной системы с волоконно-оптическими гироскопами и акселерометрами //Гироскопия и Навигация, с.-Петербург, №1(80), 2013, с.49 -63.
6. Джашизов В.Э., Панкратов В.М., Голиков А.В., Губанов А.Г., Ефремов М.В. Обеспечение термоинвариантности волоконно-оптического гироскопа //Гироскопия и навигация", изд-во ГНЦ РФ ОАО ”Концерн ”ЦНИИ ”Электроприбор", №4 (75), 2011. С. 42-56.
7. Кузнецов А.Г., Галкин В.И., Молчанов А.В., Портнов Б.И., Якубович А.М. Результаты разработки и летных испытаний микромеханического блока //XIX С.-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам. С.-Петербург, ГНЦ РФ ОАО “Концерн “ЦНИИ “Электроприбор” 2012. С.16-26.
8. Джашизов В.Э., Панкратов В.М., Лестев А.М., Попова И.В. Расчет температурных и технологических погрешностей микромеханических гироскопов /в кн. «Нано - и микросистемная техника. От исследований к разработкам», Сб. статей под редакцией д.т.н., профессора П.П. Мальцева (наиболее цитируемые статьи из журнала “Нано- и микросистемная техника” за 5 лет), М., Техносфера, 2005. – 592с. (с.342-357).



9. Barbour N., Madden P., Socha M. Development of a micromechanical gyro package with GPS for small pointing Satellites //Gyroscopy and Navigation - 1996.- № 2(13).- С.7-15.

10. Джашитов В.Э., Панкратов В.М. Применение метода элементарных балансов для анализа и синтеза системы терморегулирования на модулях Пельтье для БИНС на ВОГ //Гироскопия и навигация", изд-во ГНЦ РФ ОАО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", №2 (81), 2013. с. 84-103.

11. Барулина М.А., Джашитов В.Э., Панкратов В.М. Математические модели систем терморегулирования микромеханических гироскопов //Гироскопия и навигация", изд-во ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", №3, 2002. с. 46-58.

12. Дульнев Г.Н., Парфенов В.Г., Сигалов А.В. Методы расчета теплового режима приборов. М.: Радио и связь, 1990. -312 с.

13. Ингберман М.И., Фромберг Э.М., Грабой Л.П. Термостатирование в технике связи. М.: Связь, 1979. 144с.

Д.И. Завершинский, Н.Е. Молевич

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГЕНЕРАЦИИ СЕРИИ АВТОВОЛНОВЫХ ИМПУЛЬСОВ В ТЕПЛОЫДЕЛЯЮЩЕЙ ПЛАЗМЕННОЙ СРЕДЕ

(Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика  
С.П. Королёва (национальный исследовательский университет),  
Самарский филиал Учреждения Российской академии наук  
Физического института им. П.Н. Лебедева РАН)

Процессы, происходящие в плазме, находящейся в магнитном поле, вызывают активный интерес в связи с большим количеством фундаментальных и прикладных приложений. Среды такого типа естественным образом возникают в межзвездном пространстве и звездных атмосферах, а также являются рабочими средами перспективных образцов термоядерных реакторов, в которых нагрев и удержание плазмы осуществляется магнитным полем. В подобных средах возможно распространение следующих типов волн: альфвеновских, быстрой и медленной магнитоакустических. В альфвеновских волнах давление, плотность и продольная компонента скорости остаются неизменными, а возмущение претерпевают поперечные составляющие скорости и напряженности магнитного поля. В магнитоакустических волнах наряду с поперечными компонентами поля и скорости изменение претерпевают также плотность, давление и продольная компонента скорости. Продольная же составляющая вектора напряженности магнитного поля остаётся постоянной. В [1-3] показано, что в тепловыделяющей плазме альфвеновские волны устойчивы, а магнитоакустические волны могут стать неустойчивыми. Акустическая неустойчивость магнитоакустических волн была подробно рассмотрена в работе [4], также было показано, что эта неустойчивость приводит к формированию сильно асиммет-