

В. Э. ДЖАШИТОВ, В. М. ПАНКРАТОВ

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЭЛЕМЕНТАРНЫХ БАЛАНСОВ ДЛЯ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СИСТЕМЫ ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ НА МОДУЛЯХ ПЕЛЬТЬЕ ДЛЯ БИНС НА ВОГ

Работа посвящена анализу и синтезу реверсивной системы терморегулирования (СТР) волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) и бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) с этими гироскопами с использованием метода элементарных балансов. В СТР предложено и обосновано применение модулей Пельтье. Построены и исследованы математические модели динамических систем «ВОГ-СТР», «БИНС-СТР», разработано поддерживающее программное обеспечение, выбраны параметры СТР, получены оценки функционирования динамических систем при сложных температурных воздействиях.

Введение и постановка задач

Зачем нужна система терморегулирования (СТР) высокоточных волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) и бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС), содержащих эти датчики?

Теория и практика ВОГ достаточно хорошо разработана [1–10]. Анализ информации показал, что основные усилия разработчиков и исследователей ВОГ и БИНС с этими датчиками направлены на существенное повышение точности и эффективности их функционирования.

Для обеспечения точностей ВОГ 0, 1–0, 01 град/ч с успехом применяются пассивные способы борьбы [2, 3, 10, 19] с температурными воздействиями (термокомпенсация, специальные способы намотки волокна, тепловое шунтирование и корпусирование отдельных элементов, конструктивные усовершенствования катушки и других элементов датчика, применение новых материалов и др.)

Как показывает теория и практика [1–6, 10], для достижения инерциальных точностей ВОГ $< 0, 01$ град/ч применения только пассивных способов недостаточно. При таких точностях существенными оказываются термоупругие деформации в единицы и доли микрометра, изменения масштабного коэффициента (МК) и другие «тонкие» температурные факторы, которые заранее невозможно предусмотреть и промоделировать. Например, для достижения точности ВОГ $< 0, 01$ град/ч относительная погрешность МК [1–6], должна быть $< 0, 01\%$.

С другой стороны, современные высокоточные и надежные ВОГ должны функционировать [2, 4, 7–10] в условиях жестких температурных воздействий. Температуры окружающей среды могут меняться в диапазоне $(-60 \dots +60)^\circ\text{C}$ и

Джашитов Виктор Эмануилович. Доктор технических наук, профессор, зав. лабораторией Института проблем точной механики и управления РАН (г. Саратов). Действительный член Академии навигации и управления движением.

Панкратов Владимир Михайлович. Доктор технических наук, профессор, зам. директора по науке Института проблем точной механики и управления РАН. Действительный член Академии навигации и управления движением.

более по заданным циклограммам. Такие тепловые воздействия приводят, кроме уже известных, и к другим (часто неизвестным и неисследованным) изменениям характеристик ВОГ и БИНС и в конечном итоге к погрешностям и нарушениям нормальной работы прибора.

Для достижения в БИНС на ВОГ инерциальных точностей $<0,01$ град/ч *кардинальным решением*, на взгляд авторов, является, *применение активных методов*, заключающихся в разработке и создании многоконтурных реверсивных СТР отдельных ВОГ (внутренний или первый контур для стабилизации температуры его элементов, особенно в зоне волоконной бухты) и всей БИНС (второй контур).

Опыт разработки [7, 11] двухконтурных СТР имеется для высокоточных ($<0,001$ град/ч) поплавковых гироскопов. Качество стабилизации температуры гироскопов за счет работы обоих контуров достигает 0,005, т.е. влияние внешних перепадов температуры на температуру гироскопов ослабляется в 200 раз.

Применение систем термостабилизации температуры, например, микромеханических инерциальных датчиков позволяет существенно (в некоторых случаях более чем на порядок) повысить их точность [7, 12].

Опираясь на имеющийся опыт, авторы полагают, что предлагаемый активный метод регулирования температуры ВОГ и БИНС позволит существенно (на порядки) *уменьшить в принципе любые температурные погрешности* прибора.

Данная работа продолжает и развивает исследования [6–10], направленные на существенное повышение точности и эффективности функционирования волоконно-оптических гироскопов и БИНС на их основе, разрабатываемых, например, в НППК (г. Пермь), НПП «Антарес», «Оптолинк» (г. Саратов).

Вместе с тем вопросы, связанные с выбором типа СТР, определением ее параметров, выбором заданной температуры, обеспечением теплоизоляции и отвода тепла, анализом работы динамических систем «ВОГ–СТР», «БИНС–СТР» с заданными свойствами, минимизацией энергозатрат и др. в условиях сложных тепловых воздействий изучены в настоящее время совершенно недостаточно.

Объекты исследования. БИНС с ВОГ и акселерометрами Пермской НППК, [3, 10] и двухконтурная реверсивная СТР отдельных ВОГ и всей БИНС.

Цель работы. Анализ и синтез реверсивной (нагрев-охлаждение) СТР ВОГ (первый контур стабилизации температуры) и БИНС (второй контур) с применением термоэлектрических модулей Пельтье [7, 14] с использованием метода элементарных балансов.

Такая СТР должна обеспечить, при минимальном энергопотреблении, поддержание заданной температуры элементов ВОГ и БИНС в условиях сложных тепловых воздействий, существенно уменьшить температурный дрейф отдельных ВОГ и БИНС в целом и, в конечном итоге, значительно повысить эффективность функционирования прибора.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

- построение адекватных иерархических [7, 10] математических моделей динамических систем «ВОГ–СТР» и «БИНС–СТР»;
- проведение аналитического и численного исследования построенных моделей, выбор параметров СТР, получение оценок функционирования систем «ВОГ–СТР» и «БИНС–СТР» при сложных температурных воздействиях.

В процессе исследований создано поддерживающее алгоритмическое и программное обеспечение, позволяющее решать поставленные задачи.

1. Математическая модель тепловых процессов ВОГ с реверсивной СТР на термоэлектрических модулях Пельтье (первый контур)

В основе математической модели тепловых процессов, предназначенной для расчета нестационарных температурных полей ВОГ и других температурных характеристик и учитывающей применение реверсивной СТР на модулях Пельтье, заложен модифицированный метод элементарных балансов [7, 13]. В соответствии с методикой [7], ВОГ разбивается на конечные объемы, имеющие форму того или иного конструктивного элемента или его сегмента.

Тепловая модель системы «ВОГ-СТР» с основными элементами, разбиением и нумерацией объемов и основными тепловыми связями показана на рис. 1.

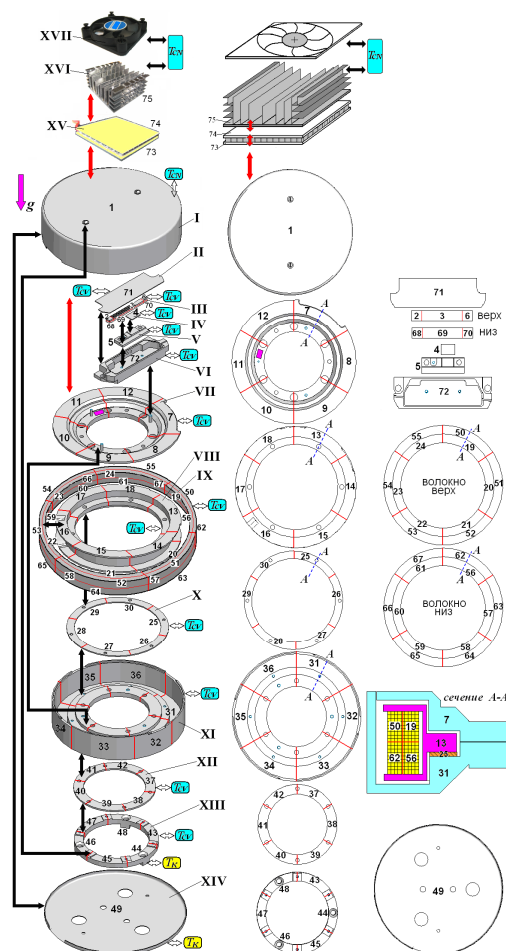


Рис. 1. Элементы и тепловая модель ВОГ с СТР: I (1) – крышка; МИОС: II (71) – крышка, III (2, 3, 6, 68, 69, 70) – модулятор, IV (4) – плата, V (5) – подставка, VI (72) – корпус; VII (7-12, 11-термодатчик) – внутренний корпус; VIII (13-18) – катушка для волокна; IX (19-24, 50-55, 56-61, 62-67) – волоконная бухта; X (25-30) – прокладка; XI (31-36) – внешний корпус; XII (37-42) – промежуточное кольцо; XIII (43-48) – посадочное кольцо; XIV (49) – дно; XV (73, 74) – рабочий и наружный спай) – модуль Пельтье; XVI (75) – радиатор; XVII – вентилятор;

T_{CN}, T_{CV}, T_K – температуры наружной и внутренней окружающей среды и корпуса для ЧЭ;

↔ – тепловые связи между объемами; ↔ – тепловые связи с окружающей средой

Важной особенностью рассматриваемой конструкции ВОГ является *отсутствие* в нем внутренних источников тепла. В многофункциональной интеграль-

ной оптической схеме (МИОС) мощность тепловыделения очень мала (микроватты), и этим тепловыделением пренебрегаем. Температура окружающей среды и основания (корпус БИНС для ЧЭ) может изменяться по заданному *ступенчатому, гармоническому* или другому закону с течением времени.

На верхней поверхности крышки I ВОГ расположен модуль Пельтье XV, рабочая поверхность (спай) которого находится в тепловом контакте через теплопроводящую пасту с крышкой I и через нее с дном XIV, посадочным кольцом XIII и другими элементами ВОГ. На наружном спае модуля Пельтье установлен через пасту радиатор XVI с вытяжным вентилятором XVII для эффективного теплообмена между наружным спаем модуля Пельтье и средой.

Такая конструктивная схема расположения исполнительных элементов системы терморегулирования позволяет стабилизировать температуру крышки I и дна XIV. Основной тепловой поток от рабочего спая к внутренним элементам ВОГ идет через крышку I и посадочное кольцо XIII.

По сравнению с базовой конструкцией ВОГ [3, 10] предлагается внести усовершенствование пассивного характера. Для более равномерного распределения температур по внутренним элементам ВОГ надо установить тепловой шунт между крышкой I и внутренним корпусом VII. Например, вставить легкое теплопроводное кольцо в зазор между крышкой I и корпусом VII.

Основной алгоритм расчета температурных полей датчика или устройства, полученный на основе метода балансов, имеет вид [7]:

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

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} – теплопроводности между объемами i, j ; q_{ic} – теплопроводность между i -м объемом и окружающей средой; Q_i – мощность источников тепла или холодопроизводства; Δt – шаг расчета; M – количество объемов, имеющих тепловой контакт с i -м объемом; N – количество объемов; $i = 1, \dots, N$.

В коэффициентах теплопроводности q_{ij} учитывается теплообмен кондукцией, конвекцией и излучением [7, 10, 13]. Особенность применения алгоритма (1) в том, что в системе «ВОГ-СТР» имеются источники тепла и холодопроизводства с управляемыми мощностями Q_{73} , Q_{74} на рабочем и наружном спаях модуля Пельтье [7, 13, 14].

Нелинейная математическая модель [14, 7], описывающая функционирование модуля Пельтье и принятые законы регулирования температуры, имеет вид (рис. 2):

$$Q_{73} = \left[-\varepsilon_T J (T_{73} + 273) + \frac{J^2 R}{2} \right] nm, \quad Q_{74} = \left[\varepsilon_T J (T_{74} + 273) + \frac{J^2 R}{2} \right] nm, \quad (2)$$

$$J = \begin{cases} J_{\max}, & \text{если } T_d - T_z \geq T_L; \\ k(T_d - T_z - T_N), & \text{если } T_N \leq T_d - T_z \leq T_L; \\ 0, & \text{если } -T_N \leq T_d - T_z \leq T_N; \\ k(T_d - T_z + T_N), & \text{если } -T_L \leq T_d - T_z \leq -T_N; \\ -J_{\max}, & \text{если } T_d - T_z \leq -T_L. \end{cases} \quad (3)$$

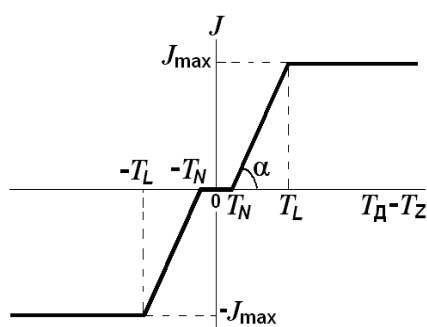


Рис. 2. Закон регулирования температуры в модуле Пельтье

В (2), (3): ε_T – коэффициент термоэлектродвижущей силы; J – ток через термоэлемент; R – электрическое сопротивление; n, m – количество термоэлементов в одном модуле Пельтье и количество модулей Пельтье; $J_{\max}$ – максимальный ток; T_L, T_N – зоны линейности и нечувствительности; T_{73}, T_{74} – температуры рабочего и наружного спаев; $k = \operatorname{tg} \alpha = J_{\max} / (T_L - T_N)$ – крутизна характеристики; T_Z – заданная температура термостабилизации; T_D – температура термодатчика.

В выражениях (2) первые слагаемые определяют тепловыделение и холодопроизводство Пельтье, вторые слагаемые определяют тепловыделение Джоуля.

Законы изменения температуры наружной и внутренней окружающей среды ВОГ и основания, приняты следующие:

$$T_C = T_{CN} = T_{CV} = T_{osn} = T_D \sin \omega t + T_{00} + T_R, \quad (4)$$

где T_D, ω, T_{00}, T_R – параметры детерминированных и случайных характеристик закона изменения температуры окружающей среды и основания.

Таким образом, алгоритмы и соотношения (1)–(4), составляют основу математической модели динамической системы «ВОГ-СТР». Эти соотношения реализованы в программном комплексе «TP-VOG-STR».

Рассмотрим основные свойства и особенности предложенной СТР.

1. В принципе СТР предназначена для создания комфортных температурных (и не зависящих от внешней температуры) условий для внутренних элементов ВОГ (катушка, волоконная бухта, элементы МИОС и др.). Эти условия создаются с помощью СТР на поверхности ВОГ (крышка I и дно XIV) путем автоматического поддержания заданного значения T_Z температуры. Температура внутренней среды T_{CV} , при этом будет изменяться определенным образом.

Как определить температуру внутренней среды T_{CV} при работе СТР?

Построим упрощенную математическую модель тепловых процессов. Пусть осуществляется теплообмен между воздушной массой внутренней среды с изменяющейся температурой $T_{CV} = T_1(t)$, внутренними элементами ВОГ с температурой $T_2(t)$ и поверхностными элементами, в которых поддерживается, с помощью СТР, заданная температура $T_Z = \text{const}$.

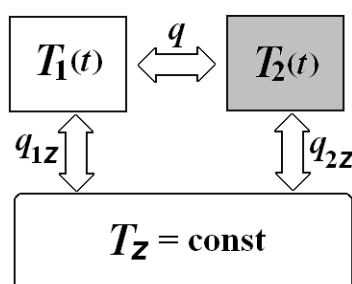


Рис. 3. Упрощенная тепловая модель

Эта модель для тепловой системы из двух объемов с возможным во втором объеме источником тепла $Q = \text{const}$ показана на рис. 3.

Система обыкновенных дифференциальных уравнений для этой модели, полученная методом тепловых балансов, имеет вид:

$$c_1 \dot{T}_1 + q(T_1 - T_2) + q_{1z}(T_1 - T_z) = 0, \quad (5)$$

$$c_2 \dot{T}_2 + q(T_2 - T_1) + q_{2z}(T_2 - T_z) = Q, \quad (6)$$

где $c_1 [\text{Дж}/^\circ\text{C}]$ – теплоемкость воздушной массы внутренней среды; $c_2 [\text{Дж}/^\circ\text{C}]$ – теплоемкость внутренних элементов ВОГ; $q, q_{1z}, q_{2z} [\text{Вт}/^\circ\text{C}]$ – термо-

проводимости.

Примем, что $c_1 \ll c_2$; $q \approx q_{1z} \ll q_{2z}$, отражающие реальную ситуацию.

Общее решение системы уравнений (5), (6):

$$T_1 = D_1 \exp(\lambda_1 t) + D_2 \exp(\lambda_2 t) + T_z + Q \frac{q}{qq_{1z} + qq_{2z} + q_{1z}q_{2z}}, \quad (7)$$

$$T_2 = \frac{c_1}{q} (D_1 \lambda_1 \exp(\lambda_1 t) + D_2 \lambda_2 \exp(\lambda_2 t)) + \frac{q + q_{1z}}{q} (D_1 \exp(\lambda_1 t) + D_2 \exp(\lambda_2 t)) + T_z + Q \frac{q}{qq_{1z} + qq_{2z} + q_{1z}q_{2z}} \left(1 + \frac{q_{1z}}{q} \right), \quad (8)$$

где D_1, D_2 – произвольные постоянные, определяемые из начальных условий.

Корни квадратного характеристического уравнения, полученного для (5), (6):

$$\lambda_{1,2} = - \left(\frac{q + q_{1z}}{c_1} + \frac{q + q_{2z}}{c_2} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{q + q_{1z}}{c_1} - \frac{q + q_{2z}}{c_2} \right)^2 + \frac{4q^2}{c_1 c_2}}. \quad (9)$$

Эти корни – действительные, отрицательные и различные. Следовательно, система устойчива, и в установившемся режиме, при $t \rightarrow \infty$, получим:

$$T_{CV} = T_1(\infty) = T_z + Q \frac{q}{qq_{1z} + qq_{2z} + q_{1z}q_{2z}}, \quad (10)$$

$$T_2(\infty) = T_z + Q \frac{q}{qq_{1z} + qq_{2z} + q_{1z}q_{2z}} \left(1 + \frac{q_{1z}}{q} \right). \quad (11)$$

В установившемся режиме температура внутренней среды принимает значение заданной температуры T_z , если нет внутренних источников тепла.

Если внутренние источники тепла имеются, то температура внутренней окружающей среды превышает заданную температуру T_z на величины, определяемые мощностью этих источников и тепловыми связями в (10), (11).

Оценим время переходных процессов во внутренней среде с учетом предположений $c_1 \ll c_2$ и $q \approx q_{1z} \ll q_{2z}$. Пусть $c_1 = 0,001 \text{ Дж/}^\circ\text{C}$; $c_2 = 1 \text{ Дж/}^\circ\text{C}$. Тепловые связи q, q_{1z} примем малыми, так что $q = q_{1z} = 0,001 \text{ Вт/}^\circ\text{C}$. Выберем в выражении (9) $(q + q_{1z})/c_1 - (q + q_{2z})/c_2 = 0$. Отсюда найдем $q_{2z} \approx 2 [\text{Вт/}^\circ\text{C}]$, т.е. выполняется принятое соотношение между тепловыми связями $q \approx q_{1z} \ll q_{2z}$.

Корни (9): $\lambda_{1,2} = -((q + q_{1z})/c_1 + (q + q_{2z})/c_2) \pm 2q/\sqrt{c_1 c_2} = -2 \pm 0,03 \text{ с}^{-1}$.

Температура воздушной массы внутренней среды (7) при $Q = 0$:

$$T_{CV}(t) = T_1(t) = D_1 \exp(-1,97t) + D_2 \exp(-2,03t) + T_z.$$

Как видим, переходные процессы достаточно быстрые (единицы секунд) и за малое время температура внутренней среды принимает значение T_z .

Отсюда вытекает *практическая рекомендация* по определению и последующему заданию T_{CV} на более полной тепловой модели ВОГ, содержащей не два объема, а десятки и имеющей сложную структуру тепловых связей (рис. 1).

Надо выбрать в качестве начальной температуры внутренней среды T_{CV} , например, температуру T_z при заданных температурах наружной среды и основания и при работающей СТР. Затем, путем нескольких последовательных расчетов (итераций) температурного поля по алгоритмам и соотношениям (1)–(4), добиться выполнения в установившемся режиме соотношения $T_{CV} \approx (T_1 + T_{49})/2$.

Это означает, что температура внутренней среды T_{CV} равна средней температуре на поверхности, которая с помощью СТР устанавливается около T_z . Для ВОГ эти поверхностные элементы – крышка I(1) и дно XIV(49).

2. Важным фактором при создании реверсивной СТР с минимальным энергопотреблением является выбор параметра T_Z – заданной (рабочей) температуры, когда внешняя температура изменяется в широком диапазоне $(-60 \dots +60)^\circ\text{C}$.

Как выбрать заданную температуру T_Z ?

Коэффициент полезного действия реверсивной СТР выше при ее работе на обогрев [14]. При этом тепло Джоуля «помогает», а при работе на охлаждение «препятствует» поддержанию заданной температуры.

Поэтому выбирать температуру T_Z следует как можно ближе к верхнему пределу $+T_{CN}$ диапазона температуры наружной среды. В частности, заданная температура может быть равна этому верхнему пределу $T_Z = +T_{CN} = +60^\circ\text{C}$.

При таком выборе T_Z СТР становится полностью нагревательной. Это упрощает закон регулирования (3), поскольку работает только его «правая часть» (см. рис. 2). С другой стороны, при низком пороге наружной температуры среды, например $T_{CN} = -60^\circ\text{C}$, имеют место большие перепады между заданной температурой и температурой среды, например $T_Z - T_{CN} = 120^\circ\text{C}$, потребуются значительные энергозатраты и нагревательная система может оказаться неэффективной.

Вообще, если диапазон наружной среды и основания сравнительно небольшой, например $T_{CN} = 0 \dots +60^\circ\text{C}$, то целесообразно использовать не модули Пельтье, а обычную нагревательную СТР с $T_Z = +T_{CN} = +60^\circ\text{C}$.

Если же диапазон температур наружной среды и основания изменяется значительно и захватывает область отрицательных температур, например, до минус 60°C , то целесообразно использовать реверсивную СТР на модулях Пельтье. В этом случае заданная температура T_Z может быть выбрана внутри диапазона изменения внешней температуры путем моделирования на построенной математической модели тепловых процессов или экспериментально. Критерий выбора, например, – минимизация потребляемой мощности.

3. Еще один важный фактор – это выбор местоположения термодатчика, измеряющего температуру T_d в приборе, по показаниям которого осуществляется стабилизация температуры в (3). Этот выбор осуществляется на модели тепловых процессов или (и) экспериментально, поскольку из-за многокомпонентности конструкции и сложности тепловых связей (см. рис. 1) оптимальное местоположение термодатчика предсказать очень трудно. Построенная тепловая модель ВОГ позволяет имитировать положение термодатчика в любом объеме.

4. Также на построенной модели или (и) экспериментально выбираются характеристики закона управления (3): $J_{\max}$, $k = \text{tg}\alpha$ и др.

5. Важная особенность реверсивной СТР – это применение радиатора и вытяжного вентилятора для обеспечения эффективного теплообмена между наружной поверхностью модуля Пельтье и окружающей средой.

Коэффициенты теплопроводимости от СТР в наружную среду при нормальной силе тяжести (объемы 73, 74, 75 на рис. 1, соответствующие внутреннему и наружному спаям модуля Пельтье и радиатору) [7, 13]:

- для боковых поверхностей модуля Пельтье

$$q_{C73} = q_{C74} = (\alpha_I + \alpha_{SK} \sqrt{D_N}) S_B, \quad (12)$$

где α_I , α_{SK} – коэффициенты теплоотдачи излучением и свободной конвекцией; D_N – давление в среде по отношению к нормальному; S_B – боковая площадь;

- для поверхности радиатора

$$q_{C75} = (\alpha_I + \alpha_{SK} \sqrt{D_N} + \alpha_{VENT} \sqrt{D_N}) S_{RAD}, \quad \alpha_{VENT} = 0,8 (\lambda_V / \sqrt{v_V}) \sqrt{V/L}, \quad (13)$$

где α_{VENT} – коэффициент теплоотдачи вынужденной конвекцией от вентилятора; S_{RAD} – площадь радиатора; λ_V, ν_V – теплопроводность и кинематическая вязкость воздуха; V – скорость воздушного потока; L – характерный размер радиатора.

Часть параметров и характеристик, входящих в (12), (13), задаются как исходные данные (например, λ_V, ν_V, S_B), другая часть (V, S_{RAD}) определяются в процессе компьютерных экспериментов на построенной модели.

6. Важный фактор – теплоизоляция крышки I(1) и дна XIV(49) ВОГ от внешней среды и теплоизоляция посадочного кольца XIII (44, 46, 48) от корпуса.

Термопроводимости от крышки I и дна XIV к наружной среде при нормальной силе тяжести и к корпусу (см. рис. 1), а также от посадочного кольца XIII к корпусу вычисляются в построенной модели по формулам [7, 13]:

$$q_{C1} = k_1(\alpha_I + \alpha_{SK} \sqrt{D_N}) S_{KR}, \quad q_{C49} = k_2 \beta_T S_{49K} + k_1(\alpha_I + \alpha_{SK} \sqrt{D_N}) S_{49}, \quad (14)$$

$$q_{C44} = q_{C46} = q_{C48} = k_2 \beta_T S_{44K} + k_1(\alpha_I + \alpha_{SK} \sqrt{D_V}) S_{44}, \quad (15)$$

где D_V – давление во внутренней среде по отношению к нормальному; β_T – плотность теплового потока от дна к корпусу крепления ВОГ; $S_{KR}, S_{49K}, S_{49}, S_{44K}, S_{44}$ – площади поверхностей теплоотдачи элементов; $k_1, k_2[0;1]$ – степень теплоотдачи элементов в наружную среду и к корпусу для крепления; 0 – полная теплоизоляция; 1 – теплоотдача в базовой конструкции ВОГ.

Теплоизоляция может быть обеспечена, например, созданием дополнительного внешнего корпуса с вакуумированным зазором (как в термосе).

7. Выбор начальной температуры T_0 – важный фактор, обуславливающий оптимальную работу приборов с СТР на модулях Пельтье.

В целях минимизации времени готовности и уменьшения экстремальных температур на наружном спае и радиаторе модуля Пельтье в переходных режимах следует выбирать начальную температуру T_0 по возможности как можно ближе к заданной температуре термостабилизации T_Z «снизу», т.е. $T_0 \leq T_Z$.

8. Известно [15], что в нелинейных возмущаемых динамических системах, при определенных сочетаниях их параметров, возможно возникновение феномена детерминированного хаоса.

Возможен ли детерминированный хаос в рассматриваемых нелинейных динамических системах «ВОГ-СТР», «БИНС-СТР» с модулями Пельтье?

В [16–18] показано, что возникновение детерминированного хаоса можно ожидать при релейных законах регулирования (3), когда крутизна характеристики велика $k > 100 \text{ A}^\circ\text{C}$ (см. рис. 2) и при заданной теплоизоляции прибора. Поэтому $J_{\max}, T_L, T_N$ надо выбирать так, чтобы $k = J_{\max}/(T_L - T_N) \ll 100 \text{ A}^\circ\text{C}$, т.е. линейная зона в (3) должна быть достаточно большой.

9. Какие требования должны предъявляться к характеристикам тепловых процессов для обеспечения минимального теплового дрейфа ВОГ?

Как показывает тепловой анализ [3, 10] БИНС с ВОГ и акселерометрами, для обеспечения точности на уровне $< 0,01$ град/ч необходима стабилизация:

- абсолютных температур в ВОГ около заданного значения T_Z не хуже $\approx 0,4^\circ\text{C}$;
- температурных перепадов в зоне волоконной бухты ВОГ не хуже $\approx 0,04^\circ\text{C}$;
- производных температур в зоне волоконной бухты ВОГ не хуже $\approx 1^\circ\text{C}/\text{ч}$.

Относительные погрешности акселерометра [10] $g/g_0 \leq 0,08\%$ в диапазоне изменения температур $-40 \dots +60^\circ\text{C}$, так что для его достаточно точной работы необходима стабилизация температур в единицы градусов Цельсия.

2. Математическая модель тепловых процессов БИНС с реверсивной СТР на термоэлектрических модулях Пельтье (второй контур)

Для чего нужен внешний (второй) контур реверсивной СТР БИНС?

Внутренняя среда в БИНС является наружной для ВОГ, акселерометров и других элементов, расположенных внутри БИНС. Поэтому для достижения более точной термостабилизации важно максимально уменьшить диапазон изменения температур этой среды, что можно сделать с помощью внешнего контура СТР. Кроме того, реальные исполнительные устройства СТР, термодатчики, теплоизоляция и т.д. имеют свои погрешности, что также сказывается на точности работы СТР. Для более точного поддержания заданной температуры в ВОГ предлагается создание второго контура стабилизации всей БИНС.

Тепловая модель системы «БИНС–СТР» с основными элементами, разбиением и нумерацией объемов и основными тепловыми связями показана на рис. 4.

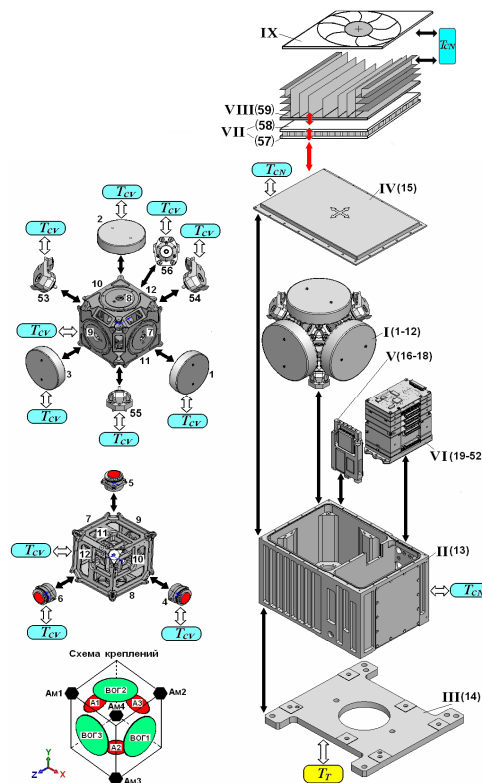


Рис. 4. Основные элементы, схема креплений и тепловая модель БИНС с разбиением на объемы:

I (1-12) – корпус с ЧЭ – ВОГ II (1, 2, 3), акселерометры (4, 5, 6), стороны корпуса с ЧЭ(7-12), амортизаторы (53, 54, 55, 56); II(13) – корпус; III(14) – дно; IV(15) – крышка;
V(16-18) – преобразователь напряжения; VI(19-52) – этажерная стойка с платами и деталями;
VII(57, 58 – рабочий и наружный спай) – модуль Пельтье; VIII(59) – радиатор; IX – вентилятор;
 T_{CV} , T_{CN} – температуры среды внутри и снаружи БИНС; T_T – температура термоплаты;
— — — — — тепловые связи между объемами; — — — — — тепловые связи с окружающей средой

На поверхности крышки IV БИНС расположен модуль Пельтье, рабочий спай которого находится в тепловом контакте через теплопроводящую пасту с крышкой IV и через нее с корпусом II, дном III, корпусом I с ЧЭ и др.

На наружном спае модуля Пельтье установлен через пасту радиатор с вытяжным вентилятором для обеспечения эффективного теплообмена между наружным спаем модуля Пельтье и средой.

Основной тепловой поток от рабочего спая к внутренним элементам БИНС (в т.ч. к корпусу I с ВОГ и акселерометрами) идет через крышку IV, корпус II и дно III. В БИНС имеются внутренние источники тепла [3, 10]. Это акселерометры, платы, расположенные на этажерной стойке VI, и др.

Суммарная мощность внутренних источников тепла < 11 Вт.

Как и для системы «ВОГ-СТР», алгоритмы и соотношения (1)–(4), составляют основу математической модели динамической системы «БИНС-СТР».

Они реализованы в программном комплексе «ТР-BINS-СТР».

Все положения, изложенные в пп.1-9 разд.1 статьи, соотношения, уравнения и формулы (5)–(15), полученные при качественном анализе построенной модели динамической системы «ВОГ-СТР» остаются справедливыми и для динамической системы «БИНС-СТР».

3. Компьютерные эксперименты с динамическими системами «ВОГ-СТР», «БИНС-СТР». Анализ результатов

3.1. Динамическая система «ВОГ-СТР», первый (внутренний) контур

Для проверки работоспособности модели и получения оценок функционирования системы «ВОГ-СТР», выполнены компьютерные эксперименты.

Основные исходные данные следующие.

Диапазон температур окружающей среды снаружи и внутри ВОГ и корпуса, к которому прикреплен гироскоп, $(-60...+60)$ °С. Наружная поверхность ВОГ теплоизолирована от наружной среды и от корпуса. Полагается, что установлен тепловой шунт между крышкой I и внутренним корпусом VII. Теплофизические, геометрические, массогабаритные и другие характеристики ВОГ используются те же, что и в [10]. Масса ВОГ ~ 700 г. Масса модуля Пельтье с вентилятором и радиатором ≤ 150 г. Температура T_{CV} внутренней среды ВОГ выбиралась в соответствии с анализом в п. 1 разд.1 статьи.

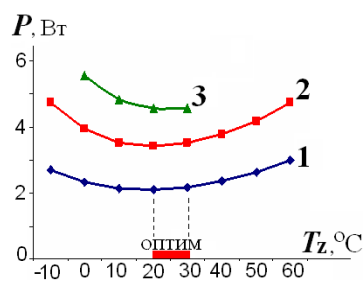


Рис. 5. Зависимости $P(T_z)$: 1 – полная теплоизоляция $k_1 = k_2 = 0$; 2 – $k_1 = k_2 = 0, 25$; 3 – $k_1 = k_2 = 0, 5$

По результатам компьютерных экспериментов на рис. 5 построены зависимости $P(T_z)$ средней потребляемой мощности СТР ВОГ от заданной температуры стабилизации при изменении температур наружной среды и корпуса в пределах $(-60...+60)$ °С и при различной степени теплоизоляции k_1, k_2 поверхностных элементов ВОГ (14)–(15) от наружной среды и основания. Эта мощность определяется как

$$P = (\varepsilon_T J |T_{73} - T_{74}| + J^2 R) nm.$$

Выбраны следующие основные параметры реверсивной СТР для ВОГ: $J_{\max} = 0, 1$ А; $\varepsilon_I = 0, 004$ В/°С; $R = 0, 1$ Ом; $T_L = 0, 2$ °С; $T_N = 0$ °С; $k = 0, 5$ А/°С; $n = 196$; $m = 1$.

Заданная температура стабилизации ВОГ принята равной верхнему значению $T_z = +30$ °С из оптимального диапазона $(+20...+30)$ °С, показанного на рис. 5.

В результате компьютерных экспериментов расположение термодатчика выбрано на внутреннем корпусе VII, объем 11 (рис. 1), то есть $T_D = T_{11}$.

Отношение площади радиатора (рис. 1), на наружном спае модуля Пельтье, к площади поверхности наружного спае должно быть $S_{РАД}/S_{П} \geq 10$.

Скорость воздушного потока вытяжного вентилятора должна быть $V \geq 5$ м/с.

Теплоизоляция наружных поверхностей ВОГ крышки I и дна XIV от наружной среды и корпуса желательно не хуже $k_1 = k_2 = 0,25$, т.е. теплоотдача с поверхности ВОГ должна быть хотя бы в 4 раза меньше, чем в базовом варианте ВОГ без СТР. В дальнейшем принято $k_1 = k_2 = 0,25$.

Для выбора желательной начальной температуры T_0 на рис. 6, по результатам компьютерных экспериментов, построены зависимости времени готовности от начальной температуры $\tau(T_0)$ при $T_Z = +30^\circ\text{C}$ и предельных значениях температуры $T_{CN} = T_K = \pm 60^\circ\text{C}$ наружной среды и корпуса, на котором крепится ВОГ.

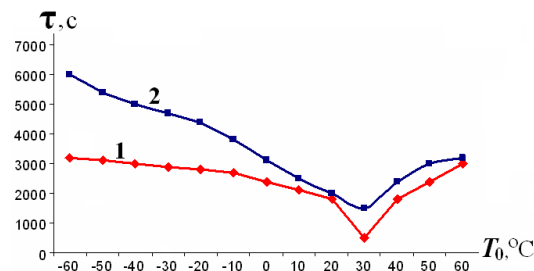


Рис. 6. Зависимости $\tau(T_0)$: 1 – $T_{CN} = T_K = +60^\circ\text{C}$; 2 – $T_{CN} = T_K = -60^\circ\text{C}$

Для оценок экстремальных температур на наружном (T_{74}) и рабочем спае (T_{73}) модуля Пельтье на рис. 7 построены зависимости этих температур от начальной температуры $T_{74}(T_0)$, $T_{73}(T_0)$ при $T_Z = +30^\circ\text{C}$ и $T_{CN} = T_K = \pm 60^\circ\text{C}$.

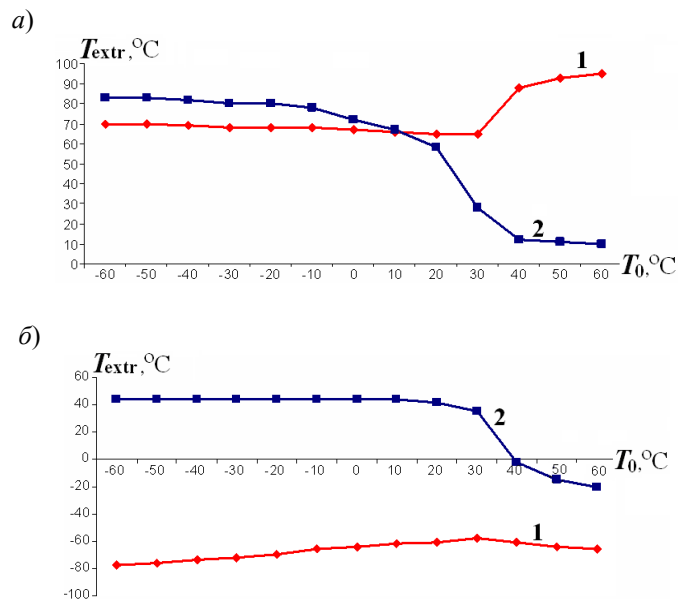


Рис. 7. Зависимости $T_{74}(T_0)$ и $T_{73}(T_0)$ для $T_{CN} = T_K = +60^\circ\text{C}$ (а) и $T_{CN} = T_K = -60^\circ\text{C}$ (б): 1 – наружный спай T_{74} ; 2 – рабочий спай T_{73}

Как видим, количественно подтверждается предположение п. 7 раздела 1.

При T_0 , близкой к заданной температуре T_Z «снизу», время готовности уменьшается в 2-6 раз в зависимости от температуры наружной среды и корпуса, достигая минимального значения 10 мин. При выборе T_0 близко к предельным значениям $T_{CN}=T_K=\pm 60^\circ\text{C}$ экстремальные температуры на наружном спае модуля Пельтье весьма значительные: $+95 \dots -80^\circ\text{C}$.

Результаты (см. рис. 6 и 7) в целом свидетельствуют о необходимости выбирать начальную температуру T_0 по возможности близко к заданной температуре термостабилизации T_Z «снизу», например $+20^\circ\text{C} \leq T_0 \leq T_Z = +30^\circ\text{C}$.

Для анализа нестационарных тепловых процессов на рис. 8 приведены температурные характеристики ВОГ с *выключенной* и *работающей* СТР при изменении внешней температуры по ступенчатой циклограмме $T_{CN}=T_K=\pm 60^\circ\text{C}$.

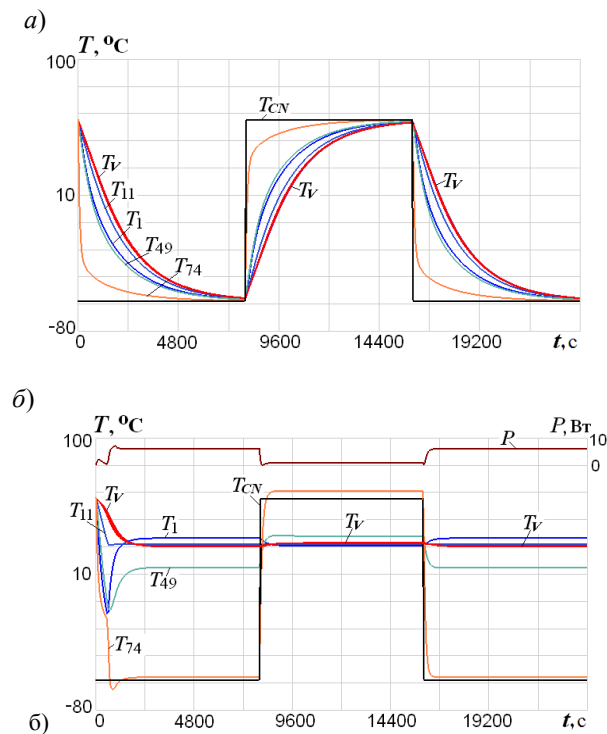


Рис. 8. Температурные характеристики «ВОГ-СТР» при выключенной (а) и работающей (б) СТР, $T_Z = 30^\circ\text{C}$: $T_{CN}=T_K$ – внешние температуры; P – потребляемая мощность; $T_1 \approx T_{73}$ – температуры крышки и рабочего спае модуля Пельтье; T_{74} – температура наружного спае; T_{11} – температура термодатчика; T_{49} – температура дна ВОГ; T_V – температуры в волоконной бухте

Как видим, при *выключенной* СТР тепловые процессы носят нерегулируемый характер, определяемый ступенчатыми изменениями внешней температуры (рис. 8, а). Температуры элементов с различными постоянными времени ≤ 8000 с «отслеживают» циклограмму изменения внешней температуры, принимая установившиеся значения $T_{CN}=T_K=\pm 60^\circ\text{C}$.

При *работающей* СТР процессы носят иной, управляемый характер.

При первом ступенчатом изменении температуры среды до -60°C (работа СТР в режиме подготовки, рис. 8, б, период 0–8000 с) происходит следующее.

Температуры в месте расположения термодатчика T_{11} и в волоконной бухте, T_V с постоянными времени ≤ 2000 с принимают с заданной точностью

температуру T_Z . Температура наружного спая T_{74} принимает установившееся значение, близкое к температуре внешней среды $T_{CN}=T_K$. Потребляемая мощность принимает установившееся значение в единицы ватт.

При последующих ступенчатых изменениях внешней температуры до $+60^\circ\text{C}$ и снова до -60°C (термостабилизация, рис. 8, б, период 8000–20000 с) температуры T_{11} , T_V незначительно изменяются около заданной температуры T_Z .

Время переходных процессов в режиме стабилизации заданной температуры ≤ 1000 с, т.е. уменьшилось в 8 раз по сравнению с ВОГ без СТР.

Применение реверсивной СТР также позволяет в режиме термостабилизации на порядок и более уменьшить максимальные выбросы и установившиеся значения других характеристики тепловых процессов.

Точность стабилизации температурных перепадов и температуры определим, как разность максимальной и минимальной температуры в волокне и отклонение средней температуры волокна от заданной: $\Delta T = T_{23} - T_{51}$, $\Delta T_Z = (T_{23} + T_{51})/2 - T_Z$.

Для оценок точности термостабилизации и энергетических затрат СТР построены зависимости $\Delta T(T_{CN})$, $\Delta T_Z(T_{CN})$ и установившейся потребляемой мощности $P(T_{CN})$ от внешней температуры $T_{CN} = T_K$, при $T_Z = 30^\circ\text{C}$ (рис. 9).

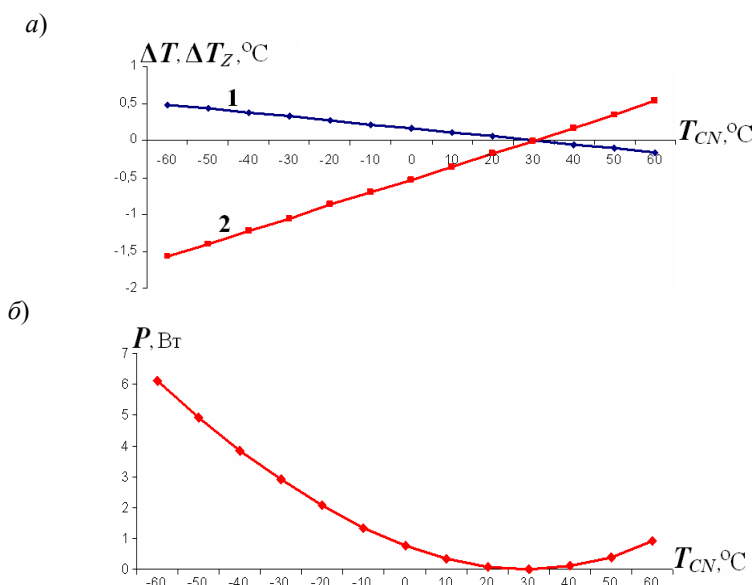


Рис. 9. Точность термостабилизации $\Delta T(T_{CN})$, $\Delta T_Z(T_{CN})$ (а) и энергетические затраты $P(T_{CN})$ (б) СТР ВОГ: 1 – $\Delta T(T_{CN})$; 2 – $\Delta T_Z(T_{CN})$

Как видим, температурные перепады в волокне $|\Delta T| \leq 0,5^\circ\text{C}$ и точность поддержания заданной температуры в волокне $|\Delta T_Z| \leq 1,6^\circ\text{C}$ при $T_{CN} = T_K = \pm 60^\circ\text{C}$.

В целом, диапазон изменения температуры в зоне волоконной бухты составил $(-1, 6 \dots 0, 6)^\circ\text{C}$ при изменениях $T_{CN} = T_K = (-60 \dots +60)^\circ\text{C}$, т.е. уменьшился в 55 раз.

Максимальное значение установившейся потребляемой мощности ~ 6 Вт имеет место при $T_{CN} = T_K = -60^\circ\text{C}$ и принятой теплоизоляции ВОГ $k_1 = k_2 = 0,25$.

Кроме ступенчатых внешних температурных воздействий практически важными являются гармонические и случайные изменения внешних температур.

Гармоническое изменение температуры наружной среды ВОГ и корпуса:

$$T_{CN} = T_K = 0,5(T_{CN\max} - T_{CN\min}) \sin \omega t + 0,5(T_{CN\max} + T_{CN\min}),$$

где $T_{CN\max} = 60^\circ\text{C}$; $T_{CN\min} = -60^\circ\text{C}$; $\omega = 0,001163 \text{ c}^{-1}$.

Гармоническое изменение температуры внутренней среды ВОГ:

$$T_{CV} = 0,5(T_{CV\max} - T_{CV\min}) \sin \omega t + 0,5(T_{CV\max} + T_{CV\min}),$$

где при выключенной СТР $T_{CV\max} = 60^\circ\text{C}$; $T_{CV\min} = -60^\circ\text{C}$;

при работающей СТР $T_{CV\max} = 32^\circ\text{C}$; $T_{CV\min} = 24,2^\circ\text{C}$.

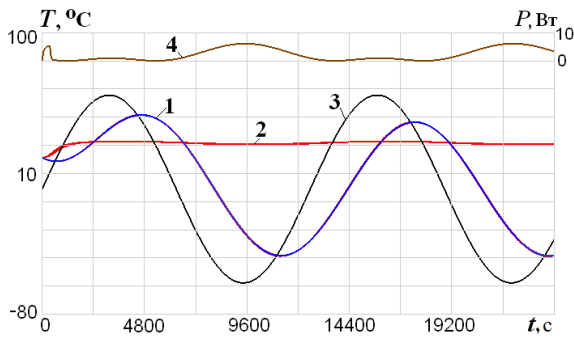


Рис. 10. Температурные характеристики системы «ВОГ-СТР» при гармоническом изменении внешних температур, $T_z = +30^\circ\text{C}$: 1, 2 – температуры в волоконной бухте при выключенной и работающей СТР; 3 – температуры наружной среды и корпуса; 4 – потребляемая мощность СТР

На рис. 10 представлены температурные характеристики ВОГ, при выключенной и работающей реверсивной СТР в условиях заданного гармонического изменения внешней температуры.

Как видим, точность поддержания заданной температуры при гармоническом изменении внешней температуры не хуже и потребляемая мощность СТР не больше, чем при ступенчатых температурных воздействиях. По производным температур, перепадам и другим температурным характеристикам результаты при гармонических температурных

воздействиях также не хуже, чем при ступенчатых.

Исследовано влияние и случайного изменения внешней температуры на температуру ВОГ. При этом использовалась модель «прямоугольной волны». В этой модели амплитуда и время температурного воздействия изменяются случайным образом. Приняты характеристики такого воздействия: по температуре – математическое ожидание $M(T) = 30^\circ\text{C}$, среднеквадратическое отклонение $\sigma(T) = 20^\circ\text{C}$; по времени – $M(t) = 2400 \text{ c}$, $\sigma(t) = 0$.

На рис. 11 приведены температуры в ВОГ при выключенной и работающей СТР и потребляемая мощность в условиях случайной внешней температуры.

Точность поддержания заданной температуры и потребляемая мощность не хуже, чем при ступенчатых и гармонических температурных воздействиях.

Таким образом, применение реверсивной СТР для отдельного ВОГ существенно улучшило в нем температурную ситуацию.

В 8 раз уменьшилось время переходных процессов в режиме стабилизации заданной температуры по сравнению с переходными процессами при выключенной СТР (см. рис. 8). Диапазон изменения температуры в зоне волоконной бухты составил $\sim 2,2^\circ\text{C}$ при диапазоне изменения температуры среды и корпуса 120°C , т.е. коэффициент качества стабилизации температуры ВОГ за счет работы первого контура СТР составил $2,2/120 \approx 0,02$ (рис. 8–11).

Цена за такое улучшение температурной ситуации – это имеющая место потребляемая мощность СТР $\leq 6 \text{ Вт}$ в установившемся режиме при принятой степени теплоизоляции $k_1 = k_2 = 0,25$, увеличение массы и габаритных размеров за счет исполнительных элементов СТР и применения теплоизоляции примерно на 20–40% по сравнению с базовым вариантом ВОГ без СТР.

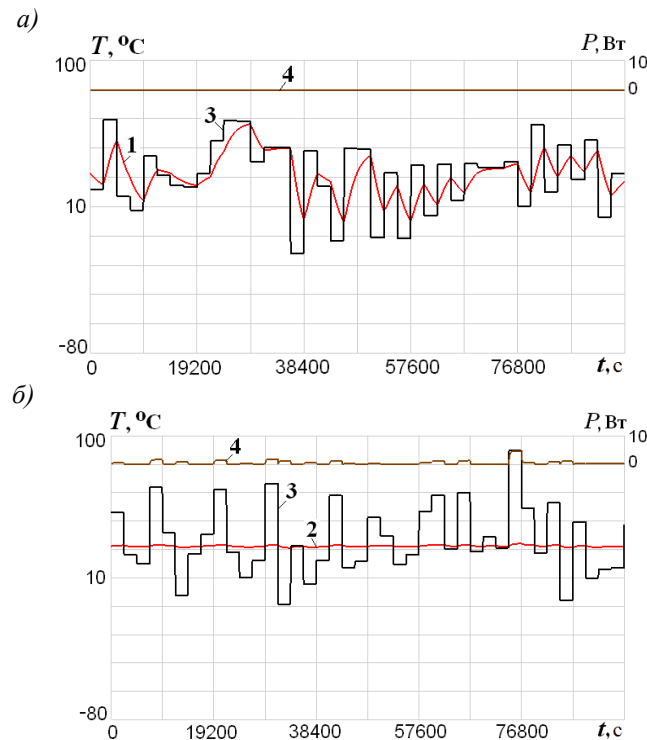


Рис. 11. Температурные характеристики системы «ВОГ-СТР» при случайном изменении внешних температур, $T_z = +30^\circ\text{C}$: 1, 2 – температуры в волоконной бухте при выключенной (а) и работающей (б) СТР; 3 – температуры наружной среды и корпуса; 4 – потребляемая мощность СТР

Замечание. Полученные результаты справедливы для случая идеальной точности термодатчика, идеальных исполнительных устройств СТР и принятой степени теплоизоляции. Если же термодатчик измеряет температуру не идеально, а, например, с точностью до $\pm 1^\circ\text{C}$, то диапазон изменения стабилизируемой температуры в зоне волоконной бухты может увеличиться до $\sim 4, 2^\circ\text{C}$. В этом случае влияние внешних перепадов температуры на температуру в волоконной бухте ослабится в 30 раз, т.е. коэффициент качества стабилизации температуры ВОГ первым контуром СТР ухудшится (станет $\sim 0, 03$ вместо $\sim 0, 02$).

Полученных результатов по построению первого контура СТР для отдельных ВОГ может оказаться недостаточно для достижения инерциальных точностей, см п.9 раздела 1. Например, точность стабилизации температуры в зоне волоконной бухты желательно повысить хотя бы еще в 5 и более раз.

Дальнейшее улучшение температурной ситуации в ВОГ и других элементах БИНС следует ожидать при построении второго (наружного) контура стабилизации температуры всего БИНС.

3.2. Динамическая система «БИНС-СТР», второй (наружный) контур

Для проверки работоспособности модели и получения оценок функционирования системы «БИНС-СТР» выполнены компьютерные эксперименты.

Теплофизические, геометрические, массогабаритные и другие характеристики БИНС и его элементов используются те же, что и в [10]. Масса БИНС ~ 11000 г. Масса модуля Пельтье с вентилятором и радиатором ≤ 150 г.

Важным фактором при создании реверсивной СТР с минимальным энергопотреблением для БИНС (как это было и для отдельного ВОГ) является выбор параметра T_Z – заданной температуры стабилизации.

По результатам компьютерных экспериментов построены зависимости $P(T_Z)$ средней потребляемой мощности СТР БИНС от заданной температуры T_Z при изменении внешней температуры в пределах $(-60...+60)^\circ\text{C}$ и при различной степени теплоизоляции k_1, k_2 поверхностных элементов от наружной среды и термоплаты (рис. 12). Эта мощность СТР БИНС определяется как $P = (\varepsilon_T J |T_{57} - T_{58}| + J^2 R) nm$.

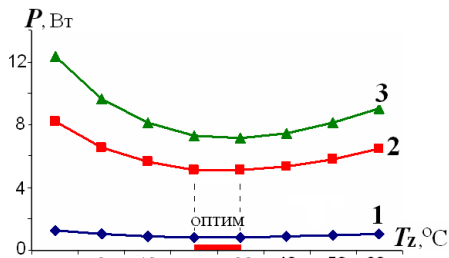


Рис. 12. Зависимости $P(T_Z)$: 1 – теплоизоляция $k_1 = k_2 = 0, 1$; 2 – $k_1 = k_2 = 0, 25$; 3 – $k_1 = k_2 = 0, 3$

Заданная температура стабилизации БИНС принята равной верхнему значению $T_Z = 30^\circ\text{C}$ из оптимального диапазона $(+20 \div +30)^\circ\text{C}$, показанного на рис. 12.

Выбраны следующие основные параметры реверсивной СТР для БИНС: $J_{\max} = 0, 3 \text{ А}$; $\varepsilon_T = 0, 004 \text{ В}/^\circ\text{C}$; $R = 0, 1 \text{ Ом}$; $T_L = 0, 6^\circ\text{C}$; $T_N = 0^\circ\text{C}$; $k = 0, 5 \text{ А}/^\circ\text{C}$; $n = 196$; $m = 1$.

Значения некоторых параметров СТР БИНС отличаются от аналогичных параметров, полученных для СТР ВОГ. Например, $J_{\max}$ и T_L в 3 раза больше для СТР БИНС. Полученные данные объясняются тем, что БИНС существенно тяжелее и габаритнее ВОГ.

В результате компьютерных экспериментов, расположение термодатчика выбрано на корпусе П(13) БИНС (рис. 4), то есть $T_d = T_{13}$.

Отношение площади радиатора на наружном спае модуля Пельтье к площади поверхности наружного спае должно быть $S_{\text{РАД}}/S_{\Pi} \geq 15$, что в 1,5 раза больше, чем для СТР ВОГ. Скорость воздушного потока вытяжного вентилятора, расположенного на радиаторе модуля Пельтье $V \geq 5 \text{ м/с}$ (как в СТР ВОГ). Теплоотдача с поверхности БИНС должна быть хотя бы в 4 раза меньше, чем в базовом варианте без СТР, т.е. принято $k_1 = k_2 = 0, 25$.

Полученные результаты по выбору желательных начальных температур БИНС с реверсивной СТР в целом совпадают с результатами для ВОГ с СТР. Например, при T_0 в диапазоне $20^\circ\text{C} \leq T_0 \leq T_Z = 30^\circ\text{C}$, время готовности уменьшается (максимально в 6 раз для БИНС и ВОГ) по сравнению с отсутствием СТР.

При выборе T_0 близко к предельным значениям внешней температуры $T_{CN} = T_T = \pm 60^\circ\text{C}$ экстремальные температуры на наружном спае модуля Пельтье весьма значительны: $+125... - 40^\circ\text{C}$ (для ВОГ было $+95... - 80^\circ\text{C}$).

Для анализа нестационарных тепловых процессов на рис. 13 приведены температурные характеристики БИНС с *выключенной* и *работающей* СТР при изменении внешней температуры по ступенчатой циклограмме $T_{CN} = T_T = \pm 60^\circ\text{C}$.

При *выключенной* СТР тепловые процессы элементов БИНС носят нерегулируемый характер (рис. 13, а). Температуры элементов с различными постоянными времени $\leq 16000 \text{ с}$ (в ВОГ было $\leq 8000 \text{ с}$) «отслеживают» циклограмму ступенчатого изменения температуры среды и термоплаты $\pm 60^\circ\text{C}$ с перегревами, определяемыми внутренними источниками тепла.

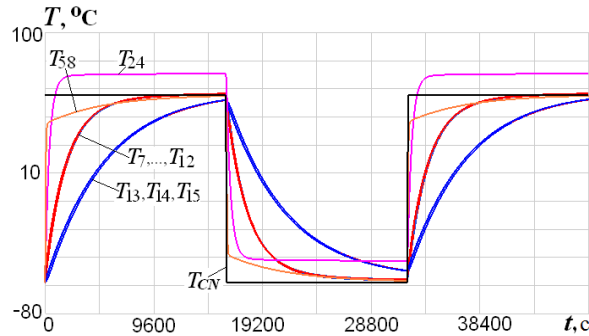
При *работающей* СТР тепловые процессы в БИНС носят управляемый характер (аналогично тому, как это было и в ВОГ). В режиме термостабилизации (рис. 13, б, 16000–48000 с) температуры корпуса, крышки, дна БИНС и

корпуса I и внутренней среды стабилизированы около заданной температуры T_Z .

Время переходных процессов в режиме стабилизации ≤ 1000 с, т.е. уменьшилось в 16 раз по сравнению с БИНС при выключенной СТР.

Точность стабилизации температуры на корпусе I для крепления гироскопов и акселерометров определим как отклонение максимальной температуры этого корпуса от заданной температуры: $\Delta T_Z = T_{11} - T_Z$. Точность стабилизации температуры внутренней среды БИНС: $\Delta T_{CV} = (T_{13} + T_{14} + T_{15})/3 - T_Z$.

а)



б)

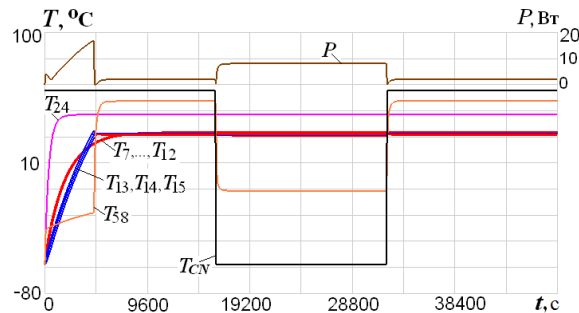


Рис. 13. Температурные характеристики «БИНС-СТР» при выключенной (а) и работающей (б) СТР, $T_Z = 30^\circ\text{C}$: $T_{CN} = T_T$ – внешние температуры; P – потребляемая мощность; $T_7, \dots, T_{12}$ – температуры корпуса I; T_{13} температура термодатчика; T_{14}, T_{15} – температуры дна и крышки; T_{24} – температура наиболее нагретой платы; T_{58} – температура наружного спая модуля Пельтье

По результатам компьютерных экспериментов для БИНС с СТР оказалось, что эти отклонения от T_Z составили $\Delta T_Z < 2^\circ\text{C}$ и $\Delta T_{CV} < 1^\circ\text{C}$, при диапазоне внешних температур $T_{CN} = T_T = \pm 60^\circ\text{C}$, т.е. суммарно уменьшились в 40 раз.

Максимальное значение установившейся потребляемой мощности ~ 8 Вт имеет место при $T_{CN} = T_T = -60^\circ\text{C}$ и принятой теплоизоляции наружных поверхностей БИНС $k_1 = k_2 = 0,25$.

Таким образом, применение реверсивной СТР для всей БИНС существенно улучшило во всех элементах БИНС температурную ситуацию.

В 16 раз уменьшилось время переходных процессов в режиме стабилизации заданной температуры по сравнению с временем установления температуры при выключенной СТР.

Диапазон изменения температуры на корпусе для крепления ЧЭ и температуры внутренней среды БИНС составил $\sim 3^\circ\text{C}$ при диапазоне изменения температуры среды и термоплаты 120°C , т.е. коэффициент качества стабилизации температуры БИНС за счет работы второго контура СТР составил $3/120 = 0,025$.

Цена за такое улучшение температурной ситуации в БИНС – это имеющая место потребляемая мощность $СТР \leq 8$ Вт в установившемся режиме при принятой степени теплоизоляции $k_1 = k_2 = 0,25$; увеличение массы и габаритных размеров за счет исполнительных элементов СТР и применения теплоизоляции примерно на 20÷40% по сравнению с базовым вариантом БИНС без СТР.

Замечание. Как и для ВОГ, полученные результаты справедливы для случая идеальной точности термодатчика, идеальных исполнительных устройств СТР и принятой степени теплоизоляции БИНС. Если же, например, термодатчик измеряет температуру не идеально, а, например, с точностью до $\pm 1^\circ\text{C}$, то диапазон изменения стабилизируемой температуры в волокне увеличится до $\sim 5^\circ\text{C}$.

В этом случае влияние внешних перепадов температуры на температуру на корпусе для крепления ВОГ и акселерометров и на температуру внутренней среды БИНС ослабевает в 24 раза, т.е. коэффициент качества стабилизации температуры за счет второго контура СТР ухудшится (0,042 вместо 0,025).

В целом применение двух контуров регулирования температуры (отдельных ВОГ и всего БИНС) позволит, по результатам проведенных исследований, существенно (приблизительно в 1000–2000 раз) уменьшить влияние внешних перепадов температуры на температурные характеристики в волоконной бухте ВОГ т.е. суммарный коэффициент качества стабилизации температуры в ВОГ за счет одновременной работы двух контуров реверсивной СТР составит $\sim 0,0005$ – $0,001$.

Физический смысл полученных результатов заключается в следующем.

Применение второго контура стабилизации температуры обеспечивает стабилизацию температуры корпуса, на котором крепятся гироскопы и акселерометры, и стабилизацию температуры внутренней среды БИНС.

Но стабилизированная по температуре внутренняя среда БИНС является одновременно наружной средой для всех ВОГ и акселерометров, как и корпус для крепления ЧЭ. Поэтому диапазон внешних температурных возмущений для ВОГ и акселерометров существенно (по крайней мере в 1000 раз) уменьшается по сравнению с исходным диапазоном $\pm 60^\circ\text{C}$.

Полученные точностные характеристики стабилизации температурных возмущений двухконтурной системой терморегулирования должны обеспечить требования по инерциальной точности на уровне $< 0,01$ град/ч (п. 9 раздела 1).

Например, при перепадах в 120°C внешней температуры БИНС точность стабилизации заданной температуры в волокне при работе двух контуров СТР, по данным моделирования, не хуже $0,12^\circ\text{C}$ (должно быть не хуже $0,4^\circ\text{C}$ для точности $< 0,01$ град/ч).

Суммарная установившаяся потребляемая мощность СТР (три ВОГ и БИНС) < 30 Вт при принятой теплоизоляции наружных поверхностей ВОГ и БИНС.

Заключение

1. Исследованы теоретические и прикладные аспекты анализа и синтеза реверсивной (нагрев-охлаждение) двухконтурной СТР отдельных ВОГ и всей БИНС с применением термоэлектрических модулей Пельтье.

2. Построены и исследованы математические модели динамических систем «ВОГ-СТР» и «БИНС-СТР».

3. Выявлено, что оптимальными, по минимизации потребляемой мощности СТР являются значения заданной температуры на уровне $(20-30)^\circ\text{C}$ при изменениях температуры среды и основания в диапазоне $(-60...+60)^\circ\text{C}$.

4. Показана возможность поддержания первым контуром реверсивной СТР отдельного ВОГ заданной температуры волоконной бухты с точностью не хуже $\sim 4^\circ\text{C}$ при ступенчатых изменениях внешней температуры в диапазоне $\pm 60^\circ\text{C}$ и при заданной степени теплоизоляции наружной поверхности ВОГ не хуже $k_1 = k_2 = 0,25$. При этом, установившаяся потребляемая мощность СТР ≤ 6 Вт.

5. При реализации второго контура реверсивной СТР всей БИНС температурная ситуация в ВОГ и других элементах БИНС значительно улучшится.

Применение двух контуров регулирования температуры (ВОГ и БИНС) позволит *существенно* (примерно в 1000 и более раз) уменьшить влияние внешних перепадов температуры на температурные характеристики в волоконной бухте ВОГ.

Точность стабилизации заданной температуры в волоконной бухте ВОГ будет не хуже $0,12^\circ\text{C}$ при работе двух контуров реверсивной СТР, при диапазоне изменения внешней температуры $\pm 60^\circ\text{C}$ и при степени теплоизоляции наружной поверхности ВОГ и БИНС не хуже $k_1 = k_2 = 0,25$.

«Цена» за такое улучшение – это суммарная установившаяся потребляемая мощность СТР (три ВОГ и БИНС) < 30 Вт и увеличение массы и габаритных размеров примерно на 20-40% по сравнению с базовым вариантом ВОГ и БИНС без СТР.

6. Уменьшение диапазона изменения температур в зоне волоконной бухты ВОГ, за счет термостабилизации, более чем в 1000 раз, согласно результатам [1, 3, 7, 10] исследования теплового дрейфа ВОГ, позволит существенно (как минимум на два порядка) повысить точность и эффективность работы прибора, т.е. выйти на уровни точности $< 0,01$ град/ч.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. **Волоконно-оптические датчики.** Вводный курс для инженеров и научных работников / Под ред. Э. Удда. – М.: Техносфера, 2008. – 500 с. ISBN 978-5-94836-191-8.
2. **Волоконно-оптический гироскоп** навигационного класса точности / Ю.Н. Коркишко [и др.] //XIV Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2007. – С.141-150.
3. **Успехи** в разработке БИНС на базе волоконно-оптических гироскопов / А.П. Колеватов [и др.] //XVI Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам. – СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2009. – С.13-20.
4. **Трехосный волоконно-оптический гироскоп.** Результаты разработки / И.К. Мешковский. [и др.] //XVIII Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам.- СПб.:ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2011. С.8-14.
5. **Лефевр Э.К.** Волоконно-оптический гироскоп: достижения и перспективы //Гироскопия и навигация. – 2012. – №4(79). – С.3-9.
6. Снижение влияния изменения температуры на выходной сигнал волоконно-оптического гироскопа / Е.В.Драницына [и др.] //Гироскопия и навигация. – 2012. – №4(79). – С.10-20.
7. **Джашитов, В.Э.** Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий / В.Э. Джашитов, В.М Панкратов. / Под общей редакцией академика РАН В.Г. Пешехонова. – СПб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2005. – 404 с.
8. **Джашитов, В.Э.** Общая и прикладная теория гироскопов с применением компьютерных технологий / В.Э. Джашитов, В.М. Панкратов, А.В. Голиков / Под общей редакцией академика РАН В.Г. Пешехонова. – СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2010. – 154 с.
9. **Обеспечение термoinвариантности** волоконно-оптического гироскопа / В.Э. Джашитов [и др.] //Гироскопия и навигация». – 2011. – №4 (75). – С. 42-56.

10. **Иерархические тепловые модели** бесплатформенной инерциальной навигационной системы с волоконно-оптическими гироскопами и акселерометрами / В.Э. Джашизов [и др.] // Гироскопия и навигация. - 2013. - №1(80). - С. 49-63.
11. **Опыт** создания высокоточных поплавковых гироскопов, применяемых в системах угловой ориентации и стабилизации космических аппаратов и станций / А.А. Волынец и др.. //X Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам. - Спб.: ЦНИИ «Электроприбор», 2003. - С.226-234.
12. **Barbure N., Connelly I., Gilmore I., Greiff P., Kourepenis A., Weinberg M.** Micro-electromechanical instrument and systems development at Draper laboratory // III St.-Petersburg International conference on gyroscopic technology and navigation. - Spb.: CSRI Elektropribor, 1996. - P. 3-10.
13. **Дульнев, Г.Н.** Методы расчета теплового режима приборов / Г.Н. Дульнев, В.Г. Парфенов, А.В. Сигалов. - М.: Радио и связь, 1990. - 312 с.
14. **Ингберман, М.И.** Термостатирование в технике связи / М.И. Ингберман, Э.М. Фромберг, Л.П. Грабой. - М.: Связь, 1979. - 144с.
15. **Шустер, Г.** Детерминированный хаос: Введение / Пер. с англ. - М.: Мир, 1998. 240 с.
16. **Джашизов, В.Э.** О возможности возникновения детерминированного хаоса в температурно-возмущенных волоконно-оптических гироскопах / В.Э. Джашизов, В.М. Панкратов // Гироскопия и навигация. - 1997. - №2(17). - С.7-17.
17. **Dzhashitov, V.E.** Bifurcations and Deterministic Chaos in Thermal Drift of Fiber-Optical Gyros V.E. Dzhashitov, V.M. Pankratov // V St.-Petersburg International Conference on integrated navigation systems, - SPb.: CSRI «Elektroopribor», 1998. - P.19-26.
18. **Dzhashitov, V. E.** Deterministic chaos in disturbed by temperature fiber-optical inertial sensors. V. E. Dzhashitov, V. M. Pankratov // Proceedings of SPIE. - 1998. - Vol. 3726. - P. 101-111.
19. **Джашизов, В.Э.** Математические модели термоупругого напряженно-деформированного состояния и погрешности масштабного коэффициента волоконно-оптического гироскопического датчика / В.Э. Джашизов, В.М. Панкратов, М.А. Барулина //Проблемы машиностроения и надежности машин. - 2013. - №2. - С.43-52.

Abstract. The research problem of theoretical and applied aspects of the analysis and synthesis of the reversible Thermal Control System (TCS) Fiber-Optical Gyroscopes (FOG) and Strapdown Inertial Navigation System (SINS) with these gyroscopes, fig.1-4, is delivered and solved.

The purpose is essential increase of accuracy FOG and SINS.

Application of Peltier's modules in the thermal control system is offered and proved Mathematical models of dynamic systems "FOG-TCS", "SINS-TCS", formulas (1)-(15) are constructed and researched.

Supporting algorithmic and the software is developed.

Parameters of the Thermal Control System are chosen.

Estimations of functioning of dynamic systems are received at difficult temperature effects, fig 5-13.

Key words: strapdown inertial navigation system, fiber-optical gyroscope, mathematical models, thermal models, reversible thermal control system, Peltier's module, temperature effects, accuracy.

Материал поступил 4.03.13