

На правах рукописи

НЕ Выходит
НЕ Выходит

Абрамов Виктор Сергеевич

**МНОГОКОНТУРНАЯ СИСТЕМА ТЕРМОРЕГУЛИРОВАНИЯ
СФЕРИЧЕСКОЙ ПЛАВАЮЩЕЙ ГИРОПЛАТФОРМЫ**

Специальность 05.11.03 – Приборы навигации

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2005 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-исследовательском институте Прикладной механики имени академика В.И. Кузнецова»

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Мезенцев А. П.

Официальные оппоненты: доктор технических, профессор
Мельников Валерий Ефимович

кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник
Рублев Виктор Михайлович

Ведущая организация – Федеральное унитарное предприятие Научно-производственное объединение машиностроения, г. Реутов

Защита состоится 18 мая 2005 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.11 в Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э. Баумана по адресу:
г.Москва, 105005, 2-я Бауманская ул., 5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского Государственного Университета им. Н.Э. Баумана

Автореферат разослан 19 мая 2005г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д.т.н, профессор



Власов И.Б.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1732190
Абрамов В.С. Многоконтурна

899

Актуальность работы.

Сферическая плавающая гиросплатформа (СПГ) предназначена для применения в качестве командного прибора автономной системы управления ракетоносителями типа “Энергия”, “Протон” и т.п. Аналогом такого прибора является инерциальный блок AIRS (Advanced Inertial Reference Sphere), разработанный в лаборатории Ч. Дрейпера в 70-88г.г., США. Для решения задачи достижения минимальной погрешности автономного управления и навигации движущихся аппаратов (например, наведение космического объекта по баллистической траектории на поверхность Земли в квадрат со стороной порядка 200м), точность азимутальной выставки СПГ определена на уровне единиц угл. сек. Одним из перспективных путей решения такой задачи является применение СПГ (рис.1) с высокоточными поплавковыми двухстепенными гироскопами и интеграторами линейных ускорений, работающей в период предстартовой подготовки и полной точностной готовности к пуску в режиме непрерывной аналитической калибровки систематических составляющих погрешностей и аналитической азимутальной выставки гиросплатформы в условиях отсутствия прямой оптической связи с подвижной частью СПГ.

Требуемый уровень точности азимутальной выставки во многом определяется стабильностью взаимного углового положения осей чувствительности гироскопических чувствительных элементов (ГЧЭ) на уровне $(4\div 6) \cdot 10^{-2}$ угл.сек. за такт калибровки–выставки, которая в свою очередь зависит от температурной стабильности как непосредственно ГЧЭ, так и их установочных баз в корпусе сферической платформы (СП), в т.ч.: - по корпусной части ГЧЭ – не хуже $2 \cdot 10^{-3} ^\circ\text{C}$; -по градиентам температуры установочных баз ГЧЭ – не хуже $4 \cdot 10^{-2} ^\circ\text{C}$. Однако установлено, что в СП, в процессе ее вращения в режиме командной прецессии из-за неоднородности условий теплообмена с корпусной частью СПГ в зонах экваториального кольца и электродов, наблюдаются изменения температуры до $0,5^\circ\text{C}$, вариация которых носит случайный характер, плохо поддается систематическому учету и компенсации с помощью пассивных средств теплового обеспечения. В связи с этим большую значимость, актуальность и научный интерес представляет собой задача синтеза и исследования многоконтурной системы терморегулирования (СТР) СПГ с компенсацией перекрестных межканальных связей по возмущающим воздействиям в едином объекте регулирования.

Особую важность и актуальность имеет также и задача разработки математической модели тепловых режимов и СТР СПГ, которая позволяет на этапах проектирования конструкции смоделировать стационарные и динамические температурные режимы прибора, оценить динамику и качество системы терморегулирования, дать экспертную оценку вероятного поведения точностных параметров ГЧЭ в режимах и условиях работы изделия. С целью отработки конструктивных и схемных решений по обеспечению теплового обеспечения СПГ в целом и схмотехнических решений

контурной СТР актуальной является и задача создания натурной тепловой модели прибора и управляющего вычислительного комплекса, позволяющих уточнить математическую тепловую модель СПГ, структуру и параметры регуляторов СТР.

Учитывая современную тенденцию к разработке универсальных образцов изделий относительно способов базирования и эксплуатации, актуальной является и задача создания конструктивной тепловой схемы СПГ, инвариантной к типам объектов применения и условиям эксплуатации, что придает ей высокие технико-экономические и эксплуатационные качества.

В связи с вышеизложенным, задачи разработки многоконтурной системы терморегулирования СПГ и создания тепловой конструктивной схемы прибора, инвариантной к различным типам изделий и условиям эксплуатации, являются актуальными.

Цель работы и задачи исследований.

Целью диссертационной работы является синтез и исследование многоконтурной зонной системы терморегулирования СПГ в связанной постановке и расчетно-экспериментальное обоснование инвариантности тепловой конструктивной схемы прибора к типу объекта применения и условиям его эксплуатации.

Задачи исследований:

1. Разработка методики математического моделирования динамики температурного поля СПГ в условиях эксплуатационных тепловых режимов.
2. Разработка методики синтеза и анализа многоканальной системы терморегулирования СПГ с компенсацией перекрестных межканальных связей по возмущающим воздействиям в едином объекте регулирования.
3. Обоснование требований к точностным параметрам СТР СПГ.
4. Обоснование выбора конструктивной тепловой схемы СПГ.
5. Разработка и исследование натурной тепловой модели СПГ с целью экспериментального определения параметров теплообмена, оценки динамики температурного поля СПГ, параметров и качества терморегулирования.
6. Разработка испытательного стенда экспериментальных исследований динамических температурных процессов в СПГ.
7. Исследование тепловой схемы СПГ с целью определения условий инвариантности СПГ к типу изделий и условиям эксплуатации.

Методы исследования. В соответствии с поставленными целями и задачами исследований в работе применены аналитические и экспериментальные методы исследования сложных систем:

- при разработке тепловой математической модели СТР СПГ применен метод поэтапного моделирования;
- при разработке вычислительных программ математических тепловых моделей СПГ применен метод численного интегрирования дифференциальных уравнений – метод Рунге-Кутты;
- при проведении синтеза и анализа многоконтурной СТР СПГ применен

метод частотного анализа, критерий устойчивости Рауса - Гурвица, метод D-разбиения и метод эквивалентных схем;

- при разработке математической и натурной тепловой модели СПГ применен метод параметрической идентификации, реализованный в виде разработанных методик расчета коэффициентов теплообмена, тепловых проводимостей по конструктивным уровням прибора, расходно-массовых характеристик и параметров теплоотдачи в сферических и плоских каналах сферической платформы. Для решения задач технического направления применен метод натурного моделирования тепловой схемы и СТР СПГ.

Научная новизна работы.

1. Разработана методика математического моделирования тепловых режимов СПГ, создана математическая тепловая модель СТР СПГ с программным обеспечением.
 2. Разработана методика и проведен синтез и анализ многоканальной СТР, разработана и исследована математическая модель зонной СТР СПГ с регуляторами, компенсирующими перекрестные межканальные связи.
 3. Разработана жидкостная система терморегулирования с центробежным насосом СГДП в качестве исполнительного органа СТР.
 4. Разработана, создана и испытана полномасштабная натурная тепло-гидравлическая модель СПГ, получены экспериментальные результаты по оценке качества работы многоконтурной СТР СПГ.
 5. Выбрана и экспериментально - расчетными исследованиями обоснована конструктивная схема СПГ инвариантная к объекту применения и условиям эксплуатации, с минимизированными тепловыделениями, обеспечивающая удовлетворительное качество работы СТР СПГ.
 6. Разработан и применен в технологии экспериментальных исследований высокопроизводительный управляющий вычислительный комплекс на базе РС IBM, магистрально-модульной технологии измерения и управления.
- Новизна работы подтверждается 7 авторскими свидетельствами ВНИИ ПЭ на изобретение.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Методика математического моделирования тепловых режимов СПГ, математическая тепловая модель СТР СПГ с программным обеспечением.
2. Методика синтеза и исследования многоконтурной СТР СПГ с компенсацией перекрестных связей в едином объекте регулирования.
3. Результаты синтеза и анализа многоконтурной СТР СПГ.
4. Конструктивная тепловая схема СПГ.
5. Тепло-гидравлическая модель СПГ и результаты экспериментальных исследований многоконтурной СТР в связанной постановке.
6. Управляющий вычислительный комплекс для исследований и отработки многоконтурной СТР СПГ.
7. Результаты расчетно-экспериментальных исследований тепловой схемы СПГ инвариантной к типу объекта и условиям эксплуатации.

Практическая ценность работы.

1. Программная и натурная реализация задачи компенсации случайных температурных составляющих погрешности азимутальной выставки СПГ.
2. Конструктивная тепловая схема СПГ, инвариантная к типу и условиям эксплуатации объектов применения, внедрена в конструкторскую документацию на опытно-конструкторский образец прибора.
3. Созданный и внедренный в технологию экспериментальных исследований управляющий вычислительный комплекс, методика экспериментальных исследований СТР СПГ могут быть использованы при разработке широкого класса командных гироскопических приборов: гиросtabilизаторов карданных схем подвеса, бесплатформенных инерциальных навигационных систем.
4. Расчетно-аналитические и экспериментальные исследования динамики и качества терморегулирования гироплатформы показали принципиальную и практическую реализацию комфортных температурных условий работы ГЧЭ и возможность достижения минимального влияния температурных возмущений на точность азимутальной выставки СПГ.

Обоснованность и достоверность полученных научных и практических результатов. Полученные научные и практические результаты подтверждены результатами экспериментальных исследований с использованием современных измерительных и вычислительных средств. Достоверность полученных результатов подтверждена высокой сходимостью результатов математического моделирования и экспериментальных исследований СТР СПГ с помощью управляющего вычислительного комплекса.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

1. На Всесоюзном семинаре Сенсор-87 по электронным датчикам. г. Черновцы, 1987г.
2. На 2-м международном симпозиуме СССР-КНР по вопросам инерциальных навигационных технологий, С. Петербург, 1992г.
3. На первой научно-практической конференции памяти главного конструктора академика В.И. Кузнецова, г. Москва, 2003г.
4. На второй научно-практической конференции памяти главного конструктора академика В.И. Кузнецова, г. Москва, 2004г.

Публикации. Основные научные результаты по теме диссертационной работы изложены и опубликованы в 7 научных печатных работах, в научно-технических отчетах ФГУП НИИ ПМ имени академика В.И. Кузнецова и в 7 авторских свидетельствах на изобретение.

Реализация и внедрение результатов исследований

Основные научные результаты диссертационной работы внедрены в процессе проектирования и разработки приборов СПГ: КИ85-2-КТМ, КИ85-

ЗЭК, КИ85-ЗЭНИ (прибор для летных экспериментально-натурных испытаний), КИ85-3 ОКР (прибор опытно-конструкторской разработки), полномасштабных тепло-гидравлических макетов КИ85-2-КТМ/Т1, КИ85-2-КТМ/Т2, КИ85-3-КТМ/Т3 в ФГУП НИИ ПМ имени академика В.И. Кузнецова. при изготовлении перечисленных приборов на Московском заводе электромеханической аппаратуры (МЗЭМА), а также при проведении исследований СПГ в фирме “Конус”. Получено 3 акта внедрения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка используемой литературы, приложений и актов о внедрении. Объем диссертации составляет 158 печатных страниц, включая 50 рисунков, 24 таблиц. Список литературы содержит 77 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность научной работы, сформулированы цель и задачи исследований, приведены положения, выносимые на защиту, показана научная новизна и практическая ценность полученных результатов, а также приведены краткие сведения о структуре и содержании диссертации.

В первой главе приведены результаты сравнительного анализа базовой конструктивной тепловой схемы СПГ и прототипа - инерциального блока AIRS. На рис.1 приведена базовая конструктивная схема СПГ, аналогичная блоку AIRS.

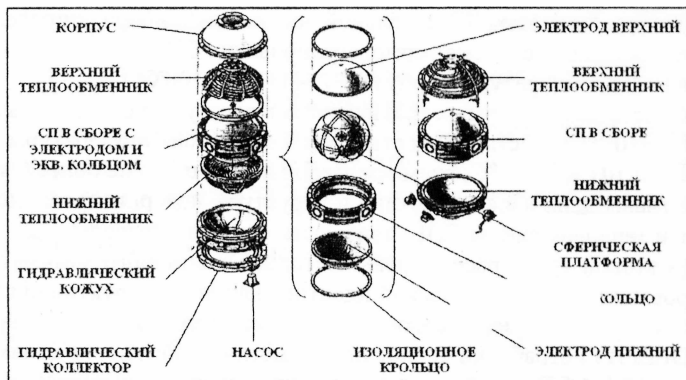


Рис.1. Конструктивная схема СПГ – AIRS

Анализ показал, что конструктивные принципы построения тепловой схемы приборов практически одинаковы и определяются идентичностью тактико-технических характеристик (ТТХ), условий эксплуатации, уровнем точностных характеристик ГЧЭ. Показано, что наряду с достижением теплового баланса на требуемом температурном уровне СПГ наблюдается недостаточный уровень термостабильности в зонах установки ГЧЭ в условиях квазистационарного теплового режима прибора при командной прецессии СП в процессе

аналитической калибровки-выставки, что не позволяет обеспечить требуемую точность азимутальной выставки СПГ. Причиной выявленной температурной нестабильности является ряд недостатков базовой конструкции СПГ, в т.ч.:

- высокий уровень тепловыделений – до 800 Вт;
- тепловая (до 50%) и гидравлическая (до 12%) несимметрия СП;
- анизотропность условий теплообмена между СП и хладагентом СОТ;
- влияние процессов свободной конвекции на стабильность межполостных градиентов температуры;
- неравномерность температуры по окружной координате сферического зазора в промежуточном контуре отвода тепла (до $5^{\circ}\text{C} \div 7^{\circ}\text{C}$);
- неравномерность температуры (до $5^{\circ}\text{C} \div 7^{\circ}\text{C}$) хладагента СОТ по поверхности сферического теплообменника. Указанные недостатки в целом определили основные направления модернизации конструкции с целью повышения эффективности тепловой схемы СПГ. На рисунке 2 и рисунке 3 показан общий вид базового и модернизированного прибора.

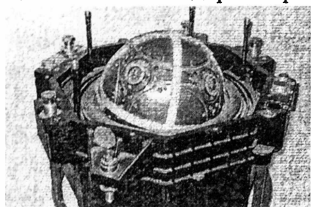


Рис. 2. Базовая конструкция СПГ

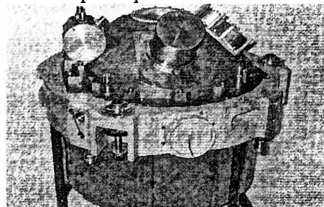


Рис. 3. Модернизированная конструкция СПГ

В соответствии с требованиями к ТТХ СПГ и уровнем параметров ГЧЭ, определяющих точность азимутальной выставки прибора, определены основные требования к системе терморегулирования СПГ:

- стабильность температуры корпуса ГЧЭ $(1 \div 2) \cdot 10^{-3}^{\circ}\text{C}$;
- стабильность межполостных градиентов температуры установочных баз ГЧЭ $(4 \div 6) \cdot 10^{-2}^{\circ}\text{C}$;
- стабильность среднеобъемной температуры рабочей жидкости СГДП $1,5 \cdot 10^{-1}^{\circ}\text{C}$, время переходного процесса не более 6 мин.

В конце главы дана характеристика и структура модернизированной конструктивной тепловой схемы СПГ, приведены основные выводы.

Во второй главе рассмотрены методика поэтапного математического моделирования и параметрической идентификации конструктивной тепловой схемы СПГ (Рис.4 и Рис.5), алгоритм и вычислительная программа (в среде языка DELPHY) отработки тепловой математической модели динамики тепловых режимов СПГ с 13 каналами автоматического регулирования температуры ГЧЭ, установочных баз ГЧЭ, СГДП и хладагента СОТ.

В соответствии с конструктивной тепловой схемой СПГ разработана тепловая математическая модель прибора, которая представляет собой в общем виде систему дифференциальных уравнений (1), соответствующую числу тел разбиения прибора, описывающих динамику теплообмена между телами с сосредоточенными параметрами, хладагентом СОТ и окружающей средой. Система (1) дополнена уравнениями регуляторов СТР СПГ. С помощью ма-

математической тепловой модели проведен вычислительный эксперимент по моделированию и исследованию тепловых режимов прибора с имитацией условий эксплуатации и типовых возмущений, в т.ч. для трех вариантов СТР: жидкостной, зонной 3-канальной, зонной 4-канальной СТР - см. рис.6.

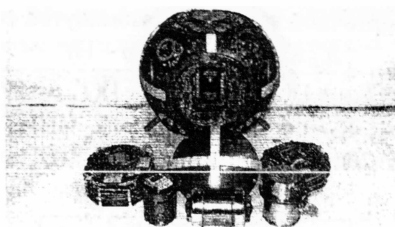


Рис. 4. Сферическая гиросплатформа блока СПГ

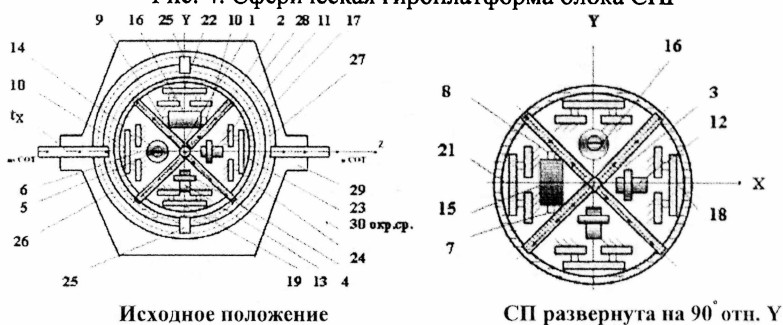


Рис.5. Расчетная конструктивная тепловая схема СПГ

Обозначения:

1 - НЦ; 2 – 10 установочные базы ГЧЭ; 11 – 16 - ГЧЭ; 17 - 22 - блоки встроенной электроники ; 23 - жидкость СГДП; 28 - корпус; 24 - сферический электрод; 25, 27 - хладагент СОТ; 29 - экваториальное кольцо.

$$m_i c_i \frac{dt}{dt} = \sum_{i=1}^i (P_i + \Delta P_i + \Delta P_n) + \sum_{i=l/j=1}^{ij} \sigma_{ij} (t_j - t_i), \text{ где} \quad (1)$$

$$\Delta P_n = K_{Pn} W_{Pn} [t_n^3 - (K_{Обн} W_{Обн} + \sum_{n=1}^n K_{Fn} W_{Fn})] - \text{уравнение регулятора;}$$

m_i – масса тела, кг; c_i – удельная теплоемкость материала, $\frac{Bm \cdot c}{K2 \cdot ^\circ C}$;

t_i, t_j – температура сосредоточенных тел, $^\circ C$; t_n^3 – заданное значение температуры в i -м канале регулирования, $^\circ C$; P_i – собственные тепловыделения в i -м теле, Вт; ΔP_n – приращение тепловыделений в нагревателе СТР, Вт; $K_{Pn} W_{Pn}$ – передаточная функция регулятора, $Вт/^\circ C$; $K_{Обн} W_{Обн}$ – передаточная функция объекта регулирования, $^\circ C/Вт$; $K_{Fn} W_{Fn}$ – передаточная функция объекта регулирования относительно возмущений, $^\circ C/Вт$; τ – время, сек;

i, j – номер тела разбиения. Анализ полученных данных вычислительного и натурального моделирования показал, что: - результаты математического и натурального моделирования СТР СПГ имеют высокую сходимость; - для варианта жидкостной СТР СПГ наиболее удовлетворительными статическими и динамическими характеристиками обладает вариант 4-х канальной СТР с ПИД регулятором с передаточной функцией разомкнутой системы:

$$W(p) = \frac{K_c K_n (T_4 p + 1)(T_5 p + 1)}{p(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_3 p + 1)(T_6 p + 1)}, \quad (2)$$

где: $K_n = 0,0027$ 1/сек; $K_c = 18 \div 22$; $T_1 = 1400$ с; $T_2 = 550$ с; $T_3 = 0,3$ с; $T_4 = 500$ с; $T_5 = 40$ с; $T_6 = 20$ с.

ЛАФЧХ СТР приведены на рисунке 7.

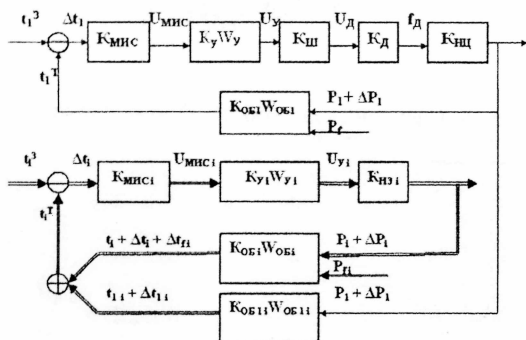


Рис. 6. Структурная схема 4-х канальной СТР СПГ

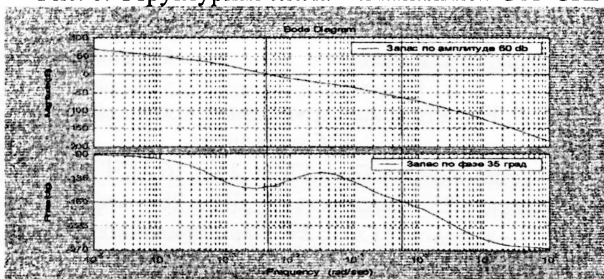


Рис. 7. ЛАФЧХ СТР СПГ с ПИД - регулятором

В конце главы приведены основные выводы.

Третья глава посвящена результатам разработки методики синтеза и исследований зонной многоканальной СТР с однотипными каналами регулирования в связанной постановке, т.е. с учетом межканальных связей по возмущению и регулируемому воздействию. Задачей исследований является нахождение условий сепаратности каналов регулирования, проведения расчетной и экспериментальной оценки устойчивости и динамической точности регулирования с регуляторами индивидуальной настройки. Для решения поставленной задачи применен метод эквивалентных схем, суть которого состоит в переходе к более простым эквивалентным уравнениям объекта регу-

лирования, проведении вычислений над эквивалентными уравнениями с последующим применением результатов расчета для формирования регуляторов индивидуальной настройки, обеспечивающих компенсацию перекрестных связей в объекте регулирования исходной системы. Исходная система уравнений, описывающая объект регулирования применительно к трехканальной системе регулирования, записывается как система уравнений (3), отражающих взаимосвязь регулируемых параметров Y_i и регулирующих воздействий U_i с учетом перекрестных связей в объекте регулирования:

$$\begin{aligned} Y_1 &= U_1 K_{11} W_{11} + U_2 K_{12} W_{12} + U_3 K_{13} W_{13} \\ Y_2 &= U_1 K_{21} W_{21} + U_2 K_{22} W_{22} + U_3 K_{23} W_{23} \\ Y_3 &= U_1 K_{31} W_{31} + U_2 K_{32} W_{32} + U_3 K_{33} W_{33} \end{aligned} \quad (3)$$

В матричном виде система (3) имеет вид (4):

$$Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{11} \\ W_{22} \\ W_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} \\ K_{22} \\ K_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & \frac{K_{12}W_{12}}{K_{11}W_{11}} & \frac{K_{13}W_{13}}{K_{11}W_{11}} \\ \frac{K_{21}W_{21}}{K_{22}W_{22}} & 1 & \frac{K_{23}W_{23}}{K_{22}W_{22}} \\ \frac{K_{31}W_{31}}{K_{33}W_{33}} & \frac{K_{32}W_{32}}{K_{33}W_{33}} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

W_{11}, W_{22}, W_{33} – передаточные функции объекта регулирования;

W_{ij} – передаточные ф-ции объекта регулирования по перекрестным каналам;

K_{11}, K_{22}, K_{33} – коэффициенты передачи объекта регулирования в прямых каналах; K_{ij} – коэффициенты передачи объекта регулирования по перекрестным каналам; $i = j = 1, 2, 3$. В векторной записи:

$$Y = (W_0 K_0 E + W_{\Pi} K_{\Pi} E) U, \text{ где} \quad (5)$$

$$U = K W_p (X - Y) E - \text{матричное уравнение регуляторов.} \quad (6)$$

Недиагональные элементы $K_{\Pi} E$ в уравнении (5) равны между собой – это очевидно из условия однотипности каналов СТР и их параметров. Матричное произведение $K_{\Pi} E = A$ называется матрицей преобразования. Переход к эквивалентной системе заключается в замене переменных уравнений (3) с помощью матрицы преобразования C – матрицы канонического базиса матрицы A . Путем несложных преобразований с учетом соотношений:

$$Y = C \eta - \text{регулируемый параметр; } U = C \xi - \text{регулирующее воздействие;}$$

$$X = C \chi - \text{задающее воздействие, - получается матричное уравнение (7) эквивалентной системы: } \eta = (W_0 K_0 E + W_1 A) \xi - \text{объект регулирования,} \quad (7)$$

$$\text{где } \xi = W_p E (\chi - \eta) - \text{регулятор;} \quad (8)$$

η, ξ, χ – координаты эквивалентной системы соответственно регулируемого параметра, регулирующего воздействия и задающего воздействия. Полученная после перехода к новым переменным эквивалентная система уравнений (7) и (8) почти полностью совпадает (с точностью до обозначений) с исходной (5), изменяется лишь член уравнений, содержащий матрицу A . Итак, переход к эквивалентной системе фактически заключается в вычислении канонической формы Λ матрицы преобразования A путем приведения ее к диагональному виду и определения характеристических чисел λ_i где $i = 1, 2, 3$. Если элементы матрицы A обозначить как:

$$A = \begin{bmatrix} a & b & b \\ b & a & b \\ b & b & a \end{bmatrix}, \text{ - невырожденная симметричная (3x3) вещественная матрица.}$$

Каноническая форма такой матрицы вычисляется по выражению:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix}, \text{ где } \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 - \text{ характеристические числа.}$$

Для симметричной, вещественной, приведенной к диагональному виду матрицы характеристические числа вычисляются по следующим формулам:

$$\lambda_1 = a + (n - 1), \quad \lambda_2 = \lambda_3 = a - b. \quad (9)$$

Матрица канонического базиса C для трехстепенной матрицы определяется по выражению (10):

$$C = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{n}} & \frac{1}{\sqrt{n(n-1)}} & \frac{1}{\sqrt{n(-1)(n-2)}} \\ \frac{1}{\sqrt{n}} & \frac{1}{\sqrt{n(n-1)}} & \frac{1}{\sqrt{n(n-1)(n-2)}} \\ \frac{1}{\sqrt{n}} & \frac{1}{\sqrt{n(n-1)}} & \frac{1}{\sqrt{n(n-1)(n-2)}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Значения характеристических чисел λ_i используются в структурных схемах и передаточных функциях сепаратных каналов для анализа динамики регулирования, а элементы матрицы канонического базиса (10) – при формировании матрицы перекрестных связей в регуляторе СТР как коэффициенты связей между каналами регулирования. Частотным методом и методом Рауса-Гурвица проведен анализ устойчивости, динамической точности и качества регулирования развязанной системы. Передаточные функции разомкнутой системы сепаратных каналов с ПИД-регуляторами имеют вид (11):

$$W_C = \frac{K_p K_n K_1 (T_n p + 1)(T_d p + 1)(T_l p + 1)e^{-\tau_p p}}{p(T_{об} p + 1)(T_{\Pi} p + 1)(T_b p + 1)}, \quad (11)$$

где: $K_1 = K_{об} + \lambda_1 K_{\Pi}$, K_{Π} - коэффициент передачи объекта по перекрестной

перекрестной связи; $T_1 = \frac{(K_{об} T_{об} + \lambda_1 K_{\Pi} T_{об})}{K_{об} + \lambda_1 K_{\Pi}}$ - постоянная времени перекре-

стных связей с учетом сепаратности канала регулирования; K_p - коэффициент передачи регулятора; T_n - постоянная времени интегрирования; T_d - постоянная времени дифференцирования; $T_{об}$ - постоянная времени объекта регулирования; T_{Π} - постоянная времени объекта по перекрестным связям; T_b - “балластная” постоянная времени, учитывающая реальную динамику ПИД - регулятора; τ_3 - время запаздывания в объекте регулирования; $p = d/dt$ - оператор дифференцирования.

Анализ динамики и качества регулирования исходной СТР показал, что: - в системе имеются замкнутые неустойчивые межканальные связи;

- погрешность регулирования на ступенчатое воздействие $\pm 25\text{Вт}$ составляет величину : $0,25^\circ\text{C}$ - расчетная, $0,2^\circ\text{C}$ - экспериментальная;
- время переходного процесса в каналах регулирования: до 10 мин. расчетное, до 15 мин. экспериментальное;
- собственная частота в каналах регулирования: $-0,01 \div 0,02$ 1/сек – расчетная; $0,01$ 1/сек – экспериментальная. Указанные расчетные и экспериментальные параметры не удовлетворяют техническим требованиям к СТР СПГ.

Применение метода эквивалентных схем позволяет определить условия и технические решения по компенсации перекрестных связей, параметры регуляторов индивидуальной настройки, обеспечивающих:

- сепаратность каналов регулирования;
- ошибку регулирования в сепаратном канале не более $0,04^\circ\text{C}$ при ступенчатом возмущении ± 25 Вт в диапазоне частот $0,006 \div 0,06$ 1/сек;
- время переходного процесса $2,6 \div 2,1$ мин при собственной частоте регуляторов $0,04 \div 0,05$ 1/сек.

На рисунках 8,9,10 показана динамика температуры установочных баз ГЧЭ при командном вращении СП в режиме калибровки-выставки:

без СТР СПГ - рис.8; с СТР СПГ без компенсации перекрестных связей-рис.9; с зонной СТР СПГ с сепаратными каналами с компенсацией перекрестных связей в объекте регулирования - рис.10. Результаты расчетных и экспериментальных исследований имеют хорошую сходимость, что подчеркивает высокую эффективность примененного метода эквивалентных схем.

С целью повышения эффективности исследований применен управляющий вычислительный комплекс (УВК) на базе РС IBM с программным обеспечением в среде TURBO PASCAL, позволяющий в автоматическом режиме: измерять, обрабатывать и выдавать в графическом виде информацию о динамике температурного поля прибора в 100 контрольных точках; реализовать 4 канала автоматического регулирования; компенсировать с помощью матрицы формирования регулирующих воздействий перекрестные связи в объекте регулирования; формировать настройки параметров регуляторов индивидуальной настройки. Структурная схема УВК показана на рисунке 11.

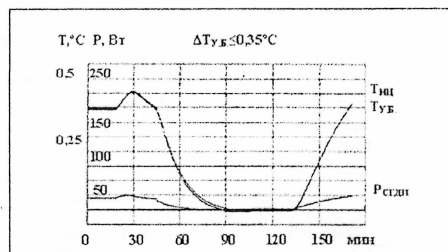


Рис.8. Динамика температуры СПГ в режиме К-В без СТР

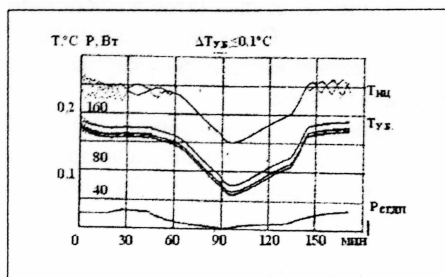


Рис.9. Динамика температуры СПГ в режиме К-В с СТР без компенсации перекрестных связей

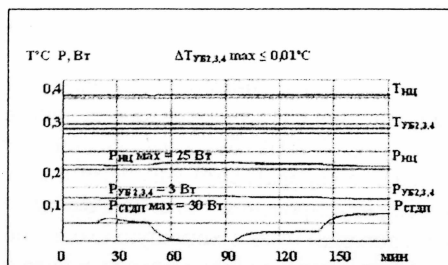


Рис.10. Динамика температуры СПГ в режиме К-В с СТР с компенсацией перекрестных связей

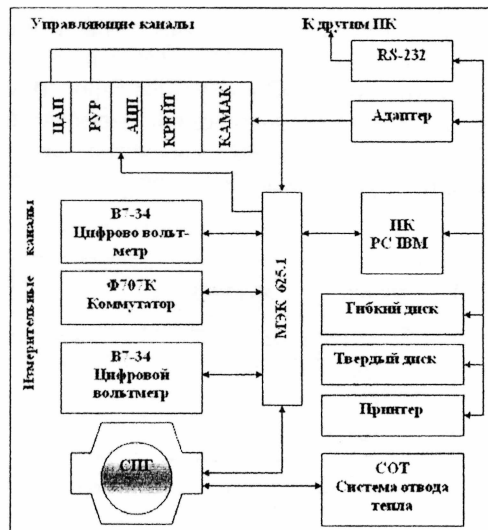


Рис.11. Структурная схема рабочего места испытаний СПГ – КИ85-3-КТМ/Т3 с УВК Т-204

В конце главы приведены основные выводы.

В четвертой главе представлены материалы расчетно-аналитических и экспериментальных исследований конструктивной тепловой схемы СПГ, проведенных с целью определения условий и параметров инвариантности конструкции прибора к типу объекта применения, типу охлаждения и условиям эксплуатации. Анализ результатов исследований показал, что тепловая схема СПГ одинаково эффективно может быть использована как для изделий с жидкостным охлаждением, так и с воздушным. Функциональные схемы жидкостной и воздушной системы охлаждения показаны на рисунках 12 и 13.

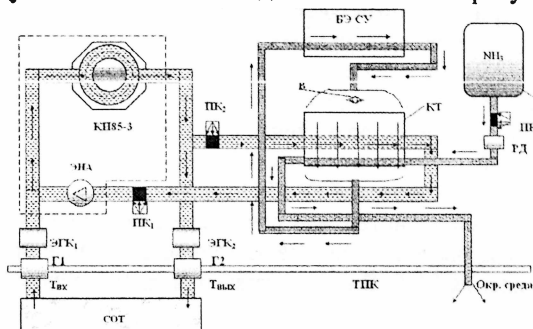


Рис.12. Функциональная схема жидкостной системы охлаждения СПГ

Перечень элементов на рис.12:

- | | | | |
|-------------------------------------|-----------------------------------|---|-----------------------|
| КИНД-85-3 | – прибор СПГ; | Г ₁ , Г ₂ | – гидрозатворы; |
| ЭНА | – электронасосный агрегат; | Б | – баллон с аммиаком; |
| СОТ | – система отвода тепла; | РД | – регулятор давления; |
| КТ | – комбинированный теплообменник; | В | – вентилятор. |
| ТПК | – транспортно-пусковой контейнер; | | |
| БЭ СУ | – блоки электроники СУ; | ПК ₁ , ПК ₂ , ПК ₃ | – пироклапаны; |
| ЭГК ₁ , ЭГК ₂ | – электрогидроклапаны; | | |

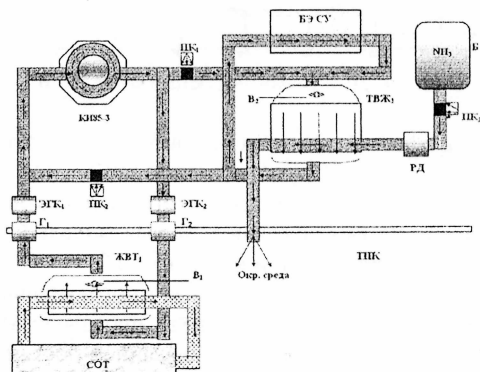


Рис.13. Функциональная схема воздушной системы охлаждения СПГ

Перечень элементов на рис.13:

- | | | | |
|----------|---------------|-----|------------------------|
| КИ85 – 3 | – прибор СПГ; | ТПК | – пусковое устройство; |
|----------|---------------|-----|------------------------|

СОТ – система отвода тепла;
ЖВТ₁, ЖВТ₂ – жидкостно-воздушные теплообменники;
БЭ СУ – блоки электроники СУ;
РД – редуктор;

ПК₁, ПК₂, ПК₃ – пироклапаны;
Г₁, Г₂ – гидроразъемы;
ЭГК₁, ЭГК₂ – электрогидроклапаны;
Б – баллон с аммиаком;
В₁, В₂ – вентиляторы.

Расчетная и экспериментальная оценка запаса времени точностной “невозмущенности” СПГ при работе на тепловой инерции без активных средств отвода тепла (рис. 14) позволяет с большой степенью вероятности рассчитывать на то, что этот запас может составлять:

- для ГБ – до 25 мин с сохранением требуемой величины суммарного ухода не более $\delta\omega = 1 \cdot 10^{-3}$ дуг.мин/мин;
- для ГИ – до 25 мин с сохранением суммарной погрешности $\delta(\mu + \tau)$ (масштабный коэффициент μ с учетом тяжения τ) не более $1 \cdot 10^{-5}$ м/с². Рост погрешностей ГЧЭ до потери СТР ГЧЭ термической устойчивости имеет практически линейный характер, что позволяет с помощью алгоритмических методов компенсировать их влияние на точность управления движением объекта без охлаждения СПГ. В конце главы приведены основные выводы.

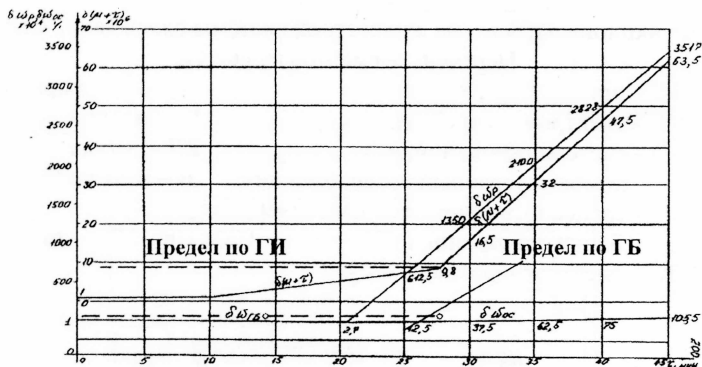


Рис. 14. Динамика погрешностей ГБ и ГИ

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Разработана методика математического моделирования тепловых режимов СПГ и создана математическая тепловая модель СПГ с программным обеспечением по оценке динамики и качества СТР.
2. Разработана методика синтеза и анализа многоканальной связанной СТР, на основе математической тепловой модели произведены исследования динамики и качества регулирования СТР в связанной постановке с реализацией регуляторов индивидуальной настройки.
3. Впервые в практике разработки приборов подобного назначения применена и исследована жидкостная система терморегулирования с использованием центрального насоса СГДП в качестве исполнительного органа СТР.

4. Выбрана и экспериментально - расчетными исследованиями обоснована конструктивная схема СПГ, обеспечивающая удовлетворительное качество работы СТР СПГ, характеризующаяся инвариантностью к объекту применения и условиям эксплуатации.

5. Разработана и испытана натурная тепло-гидравлическая модель СПГ с многоконтурной СТР, позволившая получить достоверные результаты по оценке температурных режимов прибора в условиях применения различных типов СОТ.

6. Разработан и применен в технологии экспериментальных исследований высокопроизводительный управляющий вычислительный комплекс на базе РС IBM, магистрально-модульной технологии измерения и управления.

Полученные в диссертации результаты теоретических исследований и предложенные методики проектирования и экспериментального исследования многоконтурных СТР в связанной постановке совместно с аппаратными средствами УВК могут быть рекомендованы для практического применения при разработке и исследовании многоконтурных СТР приборов типа СПГ, гиросtabilизаторов кардановой схемы, бесплатформенных инерциальных навигационных систем и т.п.

Таким образом, можно сделать заключение, что поставленные задачи исследований выполнены в полной мере.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Применение терморезисторов ТР-5 при исследовании температурных полей изделий сложной конструкции / В.С. Абрамов, Ю.А. Заболотский, В.И. Захаров // Всесоюзный семинар Сенсор-87, г.Черновцы, 8 - 13 сент. 1987 г.: Сборник докладов.-Л., 1988. - С. 8 - 10.
2. Использование толстопленочных резисторов ТР-5 для исследования температурных полей изделий сложной конструкции / В.С. Абрамов, Ю.А. Заболотский, В.И. Захаров // Электронная техника, сер.5. Радиодетали и радиокомпоненты. Вып. 1(74).- М., 1989.- С. 22 - 24.
3. Абрамов В.С. Жидкостная система терморегулирования плавающей сферы // РК Техника. Сер.Х, вып.3.- М., 1991. – 18 с.
4. Abramov V.S. Hydraulic system for thermal control of floating sphere. Second Soviet-Chinese symposium of Inertial Technology, Saint-Petersburg, ibid, 1992. p.114 - 116.
5. Инерциальная геодезическая система на базе сферической плавающей гиropлатформы / В.С. Абрамов, А.П. Мезенцев, С.А. Харламов, М.А. Урюпин // Второй советско-китайский симпозиум по инерциальным технологиям: Сборник докладов.- Санкт-Петербург, 1992. - С. 84 - 85.
6. Абрамов В.С., Шульгин Г.К. Тепловая математическая модель бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС) в составе быстровращающегося изделия под воздействием интенсивного внешнего кинематического разогрева корпуса изделия // Научно-практическая конференция молодых специалистов и студентов, посвященная памяти главного

конструктора академика В.И. Кузнецова: Сборник докладов.- Вып.001.- М.:МГУЛ, 2003. - 142 с. ISSN 0540-9691.

7. Абрамов В.С., Шульгин Г.К. Тепловая математическая модель и компенсация температурной зависимости коэффициентов чувствительности бесплатформенного инерциального блока на основе микромеханических гироскопов и акселерометров // Научно-практическая конференция молодых специалистов и студентов, посвященная памяти главного конструктора академика В.И. Кузнецова: Сборник докладов.- М.: МГУЛ, 2004. – 156 с.

8. А.с. 251149 СССР, МКИ G 05 D 23/00. Спец. тема. / В.С. Абрамов, Ю.А. Заболотский, А.Б. Затюрюкин и др. (СССР).- № 3143190; Заявлено 26.05.86; Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР 02.03.87.

9. А.с. 205927 СССР, МКИ G 01 C 21/18. Спец. тема. / В.С. Абрамов, Ф.В. Артамонов, Н.И. Белоусов и др. (СССР).- № 3063782; Заявлено 06.04.83; Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР 27.07.84.

10. А.с. 241502 СССР, МКИ G 01 C 21/18. Спец. тема. / В.С. Абрамов, Ф.В. Артамонов, Ю.А. Заболотский и др. (СССР).- № 3126793; Заявлено 18.10.85; Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР 01.08.86.

11. А.с. 207738 СССР, МКИ G 01 C 21/18. Спец. тема. / В.С. Абрамов, Ф.В. Артамонов, П.С. Гнедкин и др. (СССР).- № 3069255; Заявлено 04.07.83; Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР 27.08.84.

12. А.с. 227386 СССР, МКИ G 01 C 21/18. Спец. тема. / В.С. Абрамов, Ф.В. Артамонов, Ю.А. Заболотский и др. (СССР).- № 3106950; Заявлено 28.01.85; Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР 01.10.85.

13. А.с. 254735 СССР, МКИ G 05 D 23/19. Спец. тема. / В.С. Абрамов, Ю.А. Заболотский, А.М. Терехов и др. (СССР).- № 3148086; Заявлено 21.07.86; Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР 04.05.87.

14. А.с. 149988 СССР, МКИ G 01 C 21/18. Спец. тема. / А.С. Гришин, Э.В. Филин, Е.А. Колокольчиков, В.С. Абрамов (СССР).- № 2268340; Заявлено 04.12.79; Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР 03.10.80.

15. Расчетно-экспериментальные исследования тепловой схемы прибора КИ85-ЗЭК. Технический отчет по теме СПИН. /ФГУП НИИ ПМ им. академика В.И. Кузнецова, Руководитель темы М.Л.Еффа. Исполнители В.С. Абрамов, Н.Д. Харламова, Т.В. Гусева и другие. Инв. КИНДЭ.088.0079, 1989. - 93 с.