

На правах рукописи

УДК 629.7.05

БОРДАЧЕВ Дмитрий Анатольевич

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
СИСТЕМЫ ТЕРМОСТАТИРОВАНИЯ ПРЕЦИЗИОННОГО
ИЗМЕРИТЕЛЯ ВЕКТОРА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ
НА ПОПЛАВКОВЫХ ГИРОСКОПАХ**

Специальность 05.11.03 - Приборы навигации

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Научный руководитель: **Подчерцев Виктор Павлович**
кандидат технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Никифоров Виталий Меркурьевич**
доктор технических наук, профессор, академик АНУД, начальник отдела организационно-методической координации научных функций ФГУП «НПЦ Автоматики и приборостроения им. акад. Н.А. Пилюгина»

Панкратов Владимир Михайлович
доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией анализа и синтеза возмущенных динамических систем в прецизионной механике ФГБУН Институт проблем точной механики и управления Российской академии наук

Ведущая организация: Публичное акционерное общество «Московский институт электромеханики и автоматики»,
г. Москва

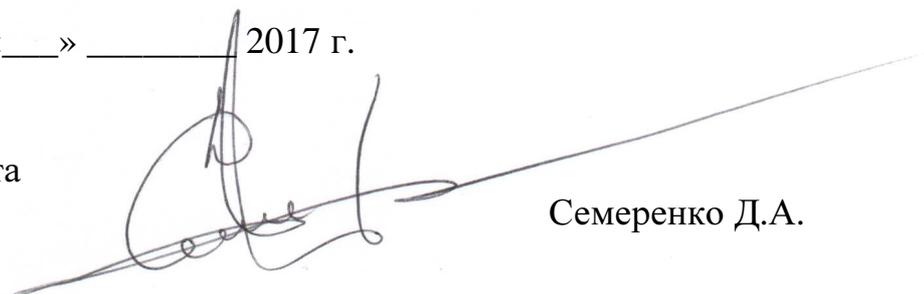
Защита диссертации состоится «27» сентября 2017 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.141.19 по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, МГТУ имени Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан «___» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н.



Семеренко Д.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время в Российской Федерации ведется разработка космических аппаратов (КА) для дистанционного зондирования Земли (например КА серии Электро) и космических обсерваторий (Спектр-УФ, Спектр-М, Гамма-400). Угловая ориентация КА подобных классов должна выдерживаться в инерциальном пространстве с достаточно высокой точностью – порядка 0,1 угл. сек, и стабильностью 10^{-3} – 10^{-5} °/с при движении КА по орбитальной траектории.

Для решения задач управления ориентацией и стабилизации КА он должен иметь в своем составе прецизионный измеритель вектора угловой скорости.

В современных КА преимущественно используются бесплатформенные гироскопические измерители вектора угловой скорости (ГИВУС) в силу простоты их конструкции, малого энергопотребления, небольших габаритно-массовых характеристик. Также их применение стало возможным благодаря достаточной вычислительной мощности бортовых цифровых вычислительных машин КА для обработки первичной информации, поступающей с измерительных датчиков, и расчета ориентации КА. Главными достоинствами ориентирования по гироскопическим измерителям является автономность, не требующая использования внешних источников информации, и соответственно высокая помехозащищенность.

ГИВУС должен обеспечивать свои точностные параметры с высокой степенью повторяемости в реальных условиях эксплуатации. На борту КА температура окружающей среды вокруг ГИВУС может меняться в диапазоне от 0 до +35 °С, а флуктуации напряжения первичного электропитания находятся в диапазоне от 25 до 29 В. Диапазон рабочих температур прибора определяется параметрами системы терморегулирования КА, представляющей собой, как правило, совокупность пассивных и активных подсистем терморегулирования. Диапазон напряжения первичного электропитания прибора определяется параметрами бортовой энергетической установки КА, для которой основными источниками электроэнергии являются солнечные батареи, работающие совместно с буферными аккумуляторными батареями. В силу ограниченной электрической емкости современных аккумуляторных батарей, максимальная мощность, потребляемая ГИВУС, не должна превышать 100 Вт.

Точность системы ориентации и стабилизации КА в условиях невесомости определяется стабильностью компоненты скорости дрейфа ГИВУС, не зависящей от ускорения, которую принято называть «нулевым сигналом». Стабильность нулевого сигнала прибора должна быть не хуже 0,002 °/ч при заданных изменениях температуры окружающей среды и напряжения первичного электропитания. Временной интервал, в течение которого должна обеспечиваться стабильность нулевого сигнала, составляет 24 часа и определяется периодичностью калибровки ГИВУС, выполняемой 1-2 раза в сутки по показаниям оптических астродатчиков, установленных на КА.

На сегодняшний день самыми точными ГИВУС, производимыми в Российской Федерации, являются приборы типа КИНД34-020, разработанные в

филиале ФГУП «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ им. акад. В.И. Кузнецова», у которых случайная составляющая нулевого сигнала не превышает $0,001 \text{ } ^\circ/\text{ч}$ (оценка по 1σ). Однако нестабильность нулевого сигнала подобных приборов при внешних температурных воздействиях может достигать $0,005 \text{ } ^\circ/\text{ч}$, что обусловлено использованием в качестве чувствительных элементов (ЧЭ) приборов двухступенных поплавковых интегрирующих гироскопов.

Одним из недостатков гироскопов указанного типа является зависимость стабильности их скорости дрейфа от:

- температуры корпуса гироскопа;
- тепловыделения в элементах конструкции гироскопа;
- внешних и внутренних магнитных полей.

Повышение точности ГИВУС до уровня, соответствующего требованиям современных и перспективных КА, помимо совершенствования гироскопических ЧЭ и разработки инерциальных ЧЭ, работающих на новых принципах, может быть также обеспечено применением более совершенных систем термостатирования (СТС) серийных гироскопических ЧЭ и снижением их чувствительности к магнитным полям.

Значительный вклад в создание СТС приборов для инерциальных навигационных систем внесли Джашитов В.Э., Громов Д.С., Пылаев Ю.А., Голиков А.В., Панкратов В.М. В их работах показано, что даже для идеально изготовленного инерциального прибора имеет место тепловой дрейф, доля которого в суммарном дрейфе может достигать для некоторых типов приборов от 30 до 40 % и более. По мнению авторов, уменьшение этого дрейфа для достижения инерциальных точностей навигационных приборов с температурозависимыми ЧЭ можно обеспечить путём применения активных реверсивных двухконтурных СТС, обеспечивающих как нагрев, так и охлаждение элементов конструкции приборов. В подобных СТС первый контур используется для термостатирования общих для всех ЧЭ конструктивных узлов прибора, а второй для индивидуального термостатирования каждого ЧЭ.

Однако вопрос о необходимой и достаточной точности термостатирования поплавковых гироскопов в настоящее время не имеет однозначного ответа. В известных публикациях говорится об оптимальной точности термостатирования на уровне от $0,01$ до $0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$, но при этом не приводится её связь со стабильностью скорости дрейфа гироскопов. Для определения достаточной точности термостатирования ЧЭ необходимо исследовать взаимосвязь работы и параметров СТС со стабильностью нулевого сигнала ГИВУС.

В связи с вышесказанным, актуальной задачей является создание системы термостатирования ГИВУС, позволяющей оптимизировать параметры температурной стабилизации ЧЭ, для обеспечения требуемых точностных характеристик прибора в заданных условиях его эксплуатации. Учитывая собственное (без учета СТС) энергопотребление ГИВУС на поплавковых гироскопах, не превышающее 65 Вт , потребление СТС четырёх измерительных каналов прибора не должно превышать 35 Вт , исходя из энергетических возможностей КА.

Цель работы

Определение схемы построения, алгоритма работы и точности поддержания температуры системы термостатирования ГИВУС на поплавковых гироскопах для достижения стабильности независящего от ускорения нулевого сигнала прибора на уровне $0,002 \text{ } ^\circ/\text{ч}$ при его эксплуатации в составе КА.

Для достижения цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработана концепция построения СТС ГИВУС, способной обеспечить требуемую точность ГИВУС и стабильность поддержания температуры корпуса поплавкового гироскопического ЧЭ на уровне $0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$.

2. Разработана аналитическая тепловая модель СТС ГИВУС, с помощью которой проведены теоретические исследования, подтвердившие требуемые точностные и эксплуатационные характеристики СТС.

3. Разработана методика экспериментальных исследований точностных характеристик измерительного канала ГИВУС с СТС.

4. Проведены экспериментальные исследования измерительного канала ГИВУС с СТС и получены оценки точности термостатирования корпуса ЧЭ, стабильности нулевого сигнала измерительного канала и их взаимосвязи при температурных воздействиях на прибор.

5. Выполнена верификация аналитической тепловой модели путем сравнения результатов моделирования СТС ГИВУС с результатами экспериментальных исследований.

6. По результатам экспериментальных исследований и моделирования предложены технические решения по модернизации СТС ГИВУС, позволяющие достигнуть стабильности нулевого сигнала измерительного канала прибора на уровне $0,002 \text{ } ^\circ/\text{ч}$.

7. Проведены экспериментальные исследования измерительного канала ГИВУС с модернизированной СТС и оценка стабильности нулевого сигнала измерительного канала в течение 24 часов при изменении температуры основания и напряжения первичного электропитания ГИВУС в диапазонах, соответствующих условиям эксплуатации прибора в составе КА.

Объектом исследования является ГИВУС с измерительным каналом, содержащим индивидуальную двухконтурную систему термостатирования ЧЭ.

Предметом исследования является взаимосвязь работы и параметров индивидуальной двухконтурной системы термостатирования ЧЭ со стабильностью нулевого сигнала измерительного канала ГИВУС.

Методы исследования

При решении поставленных в работе задач использовались основы теории гироскопических приборов, теории теплообмена, методы статистической обработки результатов измерений, методы математического и компьютерного моделирования и методы экспериментальных исследований, основанные на методиках прямых и косвенных измерений.

Научная новизна работы

1. Показана возможность реализации ГИВУС на поплавковых гироскопах, обладающего стабильностью независимого от ускорения нулевого сигнала на уровне $0,002$ °/ч в условиях температурных воздействий на ГИВУС и изменения напряжения первичного электропитания, за счёт применения индивидуальной двухконтурной системы термостатирования для каждого ЧЭ прибора.

2. Выявлено значительное влияние на нулевой сигнал поплавковых ЧЭ магнитных полей, обусловленных током, протекающим в нагревательных элементах ЧЭ. Установлено, что кардинальным решением уменьшения влияния магнитных полей является магнитное экранирование ЧЭ и стабилизация мощности тепловыделения в его нагревательных элементах.

3. Представлен способ стабилизации мощности тепловыделения в нагревательных элементах 2-го контура термостатирования, расположенных на корпусе ЧЭ, путём введения специального алгоритма работы 1-го контура термостатирования с адаптируемой температурой настройки, стабилизирующего температуру элементов конструкции, окружающей ЧЭ.

Практическая значимость работы

1. Разработанная аналитическая тепловая модель ЧЭ с СТС, позволяет анализировать работу СТС и прогнозировать стабильность нулевого сигнала измерительного канала ГИВУС при различных параметрах СТС и температурных условиях эксплуатации прибора. Тепловую модель целесообразно использовать в филиале ФГУП «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ им. акад. В.И. Кузнецова» при разработке приборов на поплавковых гироскопах.

2. Концепция двухконтурной системы термостатирования ЧЭ с адаптируемой температурой настройки одного контура повышает точностные характеристики ЧЭ и может быть использована ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», ФГУП «НПЦ Автоматики и приборостроения им. акад. Н.А. Пилюгина».

3. ГИВУС со стабильностью нулевого сигнала измерительных каналов в пределах $0,002$ °/ч в совокупности со своими высокими эксплуатационными характеристиками может быть использован в составе бортовых комплексов управления современных и перспективных космических аппаратов ПАО РКК «Энергия», ФГУП «МОКБ «Марс», АО «НПО им. С.А. Лавочкина», АО «ИСС им. акад. М.Ф. Решетнёва».

Достоверность результатов работы подтверждается удовлетворительным соответствием результатов, полученных математическим моделированием, результатам экспериментальных исследований образца измерительного канала ГИВУС с предложенной СТС, проведенных в филиале ФГУП «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ имени академика В.И. Кузнецова» по разработанной методике.

Внедрение результатов работы

Результаты работы использованы при модернизации конструкции поплавковых ЧЭ, разрабатываемых в филиале ФГУП «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ имени академика В.И. Кузнецова», что подтверждено актом внедрения. Магнитные экраны, являющиеся частью предложенной в работе модернизации гироскопических приборов, предназначены минимизировать влияние магнитных

полей от токов, протекающих в нагревательных элементах системы термостатирования, на ферромагнитные массы поплавка и повысить стабильность нулевого сигнала ЧЭ. Также результаты работы рекомендованы к использованию при разработке перспективных систем ориентации на базе прецизионных поплавковых гироскопических ЧЭ для космических аппаратов различного класса.

Положения, выносимые на защиту

1. Для достижения стабильности независимого от ускорения нулевого сигнала измерительных каналов гироскопического измерителя вектора угловой скорости на уровне $0,002$ °/ч необходимо термостатировать поплавковые чувствительные элементы с точностью $0,01$ °С и стабилизировать мощность тепловыделения в их нагревательных элементах с точностью $0,1$ Вт.

2. Основной вклад в изменение нулевого сигнала чувствительного элемента при температурных воздействиях на гироскопический измеритель вектора угловой скорости вносит влияние на чувствительный элемент магнитных полей, обусловленных током, протекающим в нагревательных элементах 2-го контура термостатирования, расположенных на корпусе чувствительного элемента.

3. Для стабилизации мощности тепловыделения в нагревательных элементах чувствительного элемента с сохранением точности его термостатирования, необходимо применение специального алгоритма работы 1-го контура термостатирования с адаптируемой температурой настройки, стабилизирующего температуру элементов конструкции, окружающей чувствительный элемент.

Личный вклад автора

Разработал аналитическую тепловую модель ЧЭ с СТС, позволяющую проводить расчёт работы СТС в динамическом и установившемся режимах; провёл экспериментальные исследования измерительного канала ГИВУС с предложенной СТС, выполнил анализ полученных результатов, получил оценку взаимосвязи параметров СТС с точностью прибора; для достижения требуемых точностных характеристик ГИВУС разработал специальный алгоритм работы 1-го контура СТС с адаптируемой температурой настройки.

Апробация результатов работы

Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены и обсуждались на:

– V Общероссийской молодёжной научно-технической конференции «Молодёжь. Техника. Космос» БГТУ им. Д.Ф. Устинова (Санкт-Петербург, 2013);

– VII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2014);

– XX научно-технической конференции молодых учёных и специалистов ПАО «РРК «Энергия» им. С.П. Королёва» (Королёв, 2014);

– XXXIX и XL академических чтениях по космонавтике, посвященных памяти С.П. Королёва МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2015, 2016).

Публикации Основные результаты диссертации опубликованы в 13 научных работах общим объемом 2,19 п.л, в том числе в 4 статьях в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ.

Структура и объем работы Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и заключения, приложения. Работа изложена на 141 странице машинописного текста и содержит 70 рисунков, 8 таблиц и список литературы из 79 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, описана степень её разработанности, сформулирована цель исследования, определены объект и предмет исследования, представлены методы достижения поставленной цели, результаты выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость проведенной работы, структура диссертации.

В первой главе диссертации приводится анализ существующих вариантов ГИВУС, их классификация по типу чувствительного элемента, сравниваются точностные характеристики, описываются достоинства и недостатки применения различных вариантов базовых чувствительных элементов.

Делается вывод, что на сегодняшний день в России наиболее точными и надёжными чувствительными элементами для создания ГИВУС способных удовлетворить потребности современных и перспективных КА являются поплавковые интегрирующие гироскопы (ПИГ). Для обеспечения точностных характеристик ПИГ необходима система термостатирования для поддержания их рабочей температуры с высокой степенью точности.

Рассматриваются конструкция и схема построения двухконтурной СТС наиболее точного производимого в Российской Федерации ГИВУС типа КИНД34-020, построенного на базе ПИГ и состоящего из четырёх функционально независимых измерительных каналов (Рис. 1).

Первый контур термостатирует общее основание, на котором размещаются четыре ЧЭ в два яруса, а вся конструкция закрывается тепловым экраном, образуя блок чувствительных элементов. Рабочая температура контура +50 °С со стабильностью поддержания 1 °С. Исполнительными элементами контура являются элементы Пельтье, работающие релейно в режиме нагрева при внешней температуре от 0 до +20 °С и в режиме охлаждения при внешней температуре от +20 °С до +35 °С.

Второй контур СТС термостатирует индивидуально каждый ЧЭ. Рабочая температура контура +60 °С со стабильностью поддержания 0,1 °С. Исполнительными элементами контура являются два элемента нагревательного типа расположенных на торцах ЧЭ.

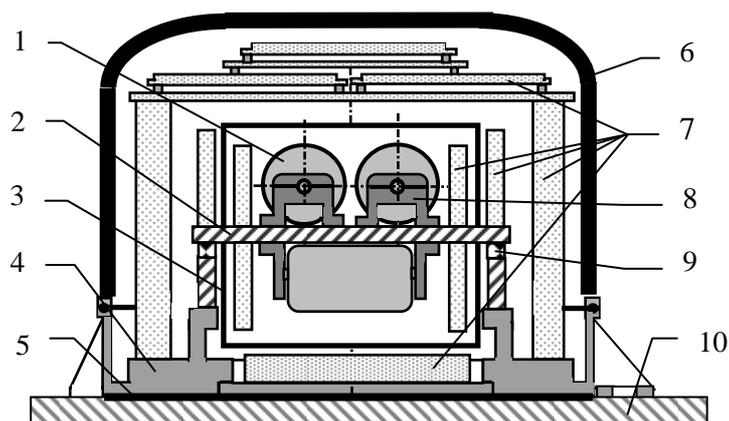


Рис. 1. Схема компоновки ГИВУС КИНД34-020

1 – поплавковый ЧЭ, 2 – основание блока чувствительных элементов, 3 – тепловой экран, 4 – корпус, 5 – теплопроводящая паста, 6 – герметичный кожух, 7 – электронные устройства, 8 – теплоизолирующие опоры ЧЭ, 9 – элементы Пельтье, 10 – теплоотводящее основание КА

Отмечается, что подобная схема построения двухконтурной СТС прибора КИНД34-020 помимо своих достоинств имеет и ряд недостатков:

- тепловое взаимовлияние ЧЭ, проявляющееся при включении и выключении одного из четырех измерительных каналов прибора, так как все ЧЭ закреплены на общем термостатируемом основании;
- отказ первого контура термостатирования приводит к нештатной работе второго контура термостатирования всех ЧЭ прибора;
- недостаточная технологичность монтажа-демонтажа конструкции не позволяющая в случае необходимости обеспечить оперативную замену ЧЭ;
- влияние релейного режима работы исполнительных элементов первого контура СТС на выходную информацию измерительных каналов;
- наличие элементов Пельтье, со свойственными им недостатками.

Также в главе 1 ставятся основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе диссертации рассматривается чувствительный элемент ГИВУС – поплавок интегрирующий гироскоп, измерительный канал ГИВУС и метод построения аналитической тепловой модели СТС.

Описываются принцип действия и конструкция ПИГ, его уравнения движения и основные погрешности, в том числе обусловленные влиянием температуры. Рассматриваются работа ПИГ в режиме датчика угловой скорости и характеристики измерительного канала ГИВУС, построенного на ПИГ.

Приводятся основные характеристики конкретной модели ЧЭ, выбранной для ГИВУС и особенности её конструкции, включающей элементы для построения системы термостатирования (Рис. 2).

ЧЭ крепится к элементам конструкции ГИВУС с помощью двух установочных кронштейнов 4, расположенных на торцах корпуса ЧЭ. Для построения системы термостатирования в ЧЭ имеются:

1) два последовательно соединённых резистивных нагревательных элемента 1 с сопротивлением (60 ± 10) Ом каждый, приклеенные к торцевым поверхностям корпуса ЧЭ;

2) элементы 3 мостовой измерительной схемы контура термостатирования:

– два термодатчика с сопротивлением $(200 \pm 1,5)$ Ом каждый при температуре $+60$ °С, выполненные в виде катушек провода из никеля типа ПЭВНК-2, расположенных на краях цилиндрической поверхности корпуса ЧЭ;

– два резистора на наружной поверхности термодатчиков, выполненные в виде катушек провода из манганина типа ПЭМС, величина сопротивления которых подбирается близкой к величине сопротивления термодатчиков при температуре нулевой плавкости поплавка ЧЭ, равной $+60$ °С.

Для контроля температуры ЧЭ имеется термодатчик 2 аналогичный термодатчикам мостовой измерительной схемы и расположенный на центральной части цилиндрической поверхности корпуса ЧЭ.

Также во второй главе представлен метод построения аналитической тепловой модели разрабатываемой СТС, основанный на комбинированном использовании программной системы конечно-элементного анализа ANSYS и графической среды имитационного моделирования Simulink (Matlab), суть которого заключается в следующем:

1) В системе ANSYS создаётся 3D-модель исследуемой конструкции, задаются характеристики материалов ее элементов и производится первоначальный расчет теплового поля конструкции при температуре основания прибора в рабочем диапазоне. На практике для создания 3D-модели целесообразнее использовать специализированные системы трехмерного моделирования (Inventor, SolidWorks, Catia, Proingeneer или другие), а затем импортировать её в систему ANSYS для последующего теплового анализа.

2) По результатам моделирования в системе ANSYS исследуемая конструкция разбивается на отдельные элементы или их группы по принципу конструктивной и температурной однородности выделенных элементов, что позволит в дальнейшем определить температуру контрольных точек конструкции при различных режимах работы СТС.

Для каждой пары выделенных и непосредственно взаимодействующих элементов i и j рассчитывается тепловая проводимость между ними G_i^j ($G_i^j = G_j^i$), для чего эти элементы теплоизолируются от других элементов модели в системе ANSYS, и при задании мощности P_i в i -й элемент определяются температуры i -го и j -го элементов.

Также определяется эквивалентная теплоемкость выделенных элементов C_i , как суммарная теплоемкость материалов этого элемента.

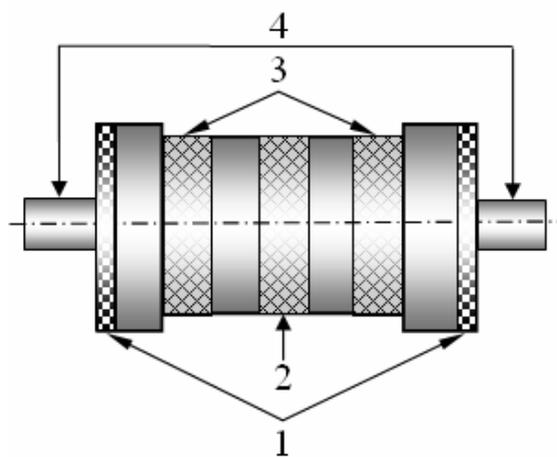


Рис. 2. Схема расположения элементов конструкции ЧЭ

3) По результатам расчета коэффициентов G_i^j и C_i составляется уравнение теплового баланса для каждого выделенного элемента конструкции:

$$C_i \frac{d}{dt} T_i + \sum_j G_i^j (T_i - T_j) + G_i^0 (T_i - T_0) = P_i, \quad (1)$$

где: G_i^0 – тепловая проводимость между i -м элементом и окружающей средой; P_i – тепловая мощность, выделяемая в i -м элементе; T_i и T_j – температуры i -го и j -го элементов; T_0 – температура окружающей среды.

В соответствии с уравнением (1) в среде Simulink строится аналитическая тепловая модель ЧЭ с СТС, где взаимодействие между i -м и j -м элементами может быть представлено, как показано на Рис. 3, а подсистемы C_i и G_i^j изображены на Рис. 4. В разработанной Simulink-модели формируются алгоритмы управления контурами СТС, позволяющие проводить полноценный анализ СТС в динамическом и установившемся режимах.

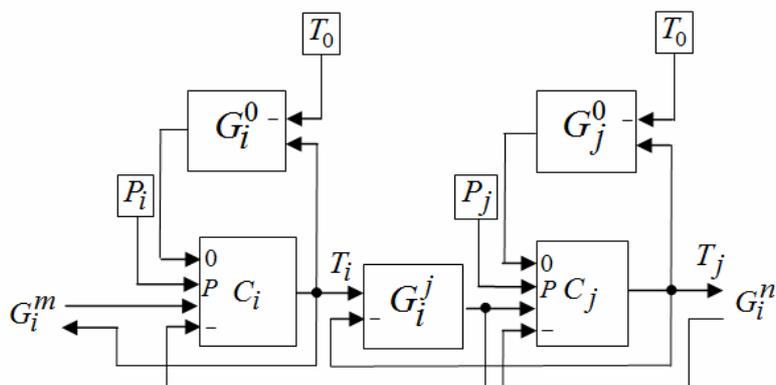


Рис. 3. Тепловая Simulink-модель для i -го и j -го элемента

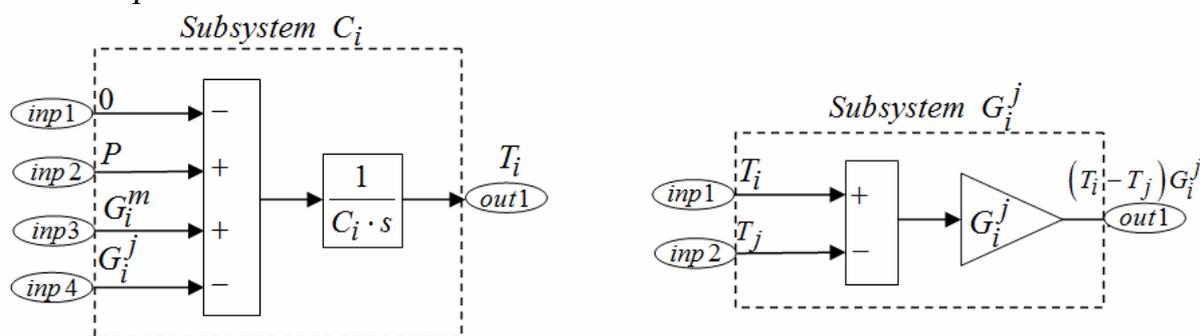


Рис. 4. Подсистемы C_i и G_i^j тепловой Simulink-модели.

В третьей главе диссертации приводится предлагаемая оптимальная конструкция двухконтурной системы термостатирования для каждого ЧЭ ГИВУС (Рис. 5) в которой ЧЭ заключён в собственный термостатируемый модуль гироблока (МГБ), где 1-й контур поддерживает температуру элементов конструкции, окружающей корпус ЧЭ, в диапазоне от +58 до +59,8 °С, а 2-й стабилизирует температуру самого корпуса на уровне +60 °С.

ЧЭ устанавливается на кронштейн, который охватывает нижнюю цилиндрическую часть его корпуса. Кронштейн крепится к основанию МГБ с помощью двух теплоизолирующих стоек, что позволяет уменьшить теплопередачу между ЧЭ и основанием МГБ, а, следовательно, снизить подводимую мощность к ЧЭ для его обогрева.

Под кронштейном на основание МГБ устанавливаются стабилизатор тока и предварительный усилитель, которые помимо своих основных функций служат дополнительными источниками тепловыделения.

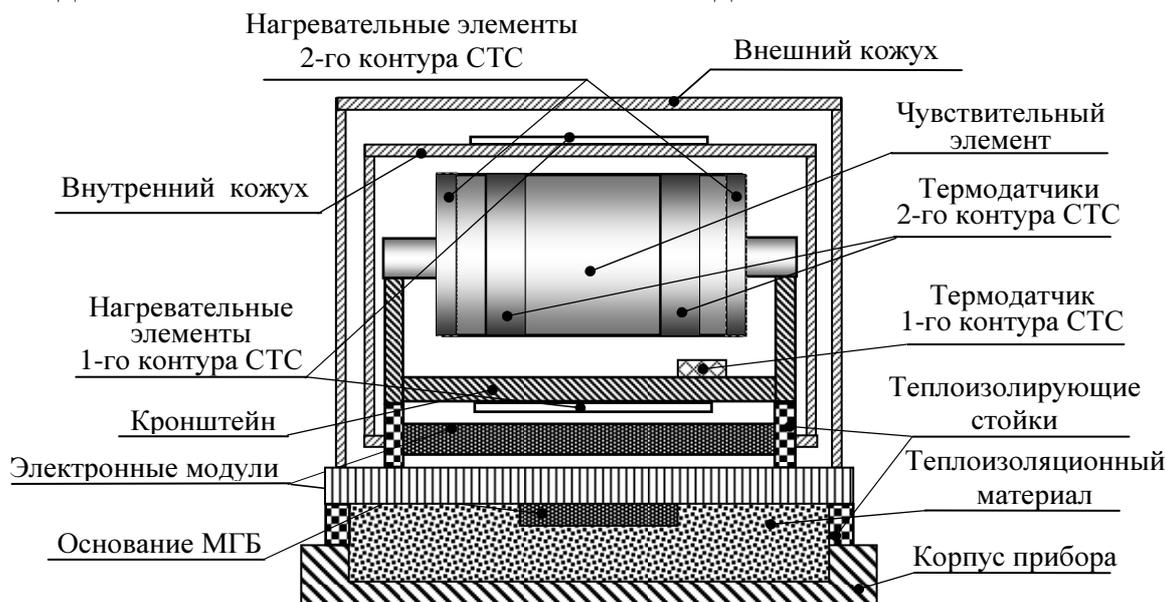


Рис. 5. Схема конструкции ЧЭ с СТС

ЧЭ закрывается внутренним кожухом с открытыми торцами, а весь МГБ закрывается внешним кожухом. Каждый термостатируемый МГБ (рис. 6) устанавливается на корпус прибора (рис. 7) с помощью четырёх теплоизолирующих стоек. Зазор между основанием МГБ и корпусом прибора для исключения конвективных потоков газа и уменьшения тепловой проводимости между МГБ и корпусом прибора заполняется теплоизоляционным материалом – пенопластом.

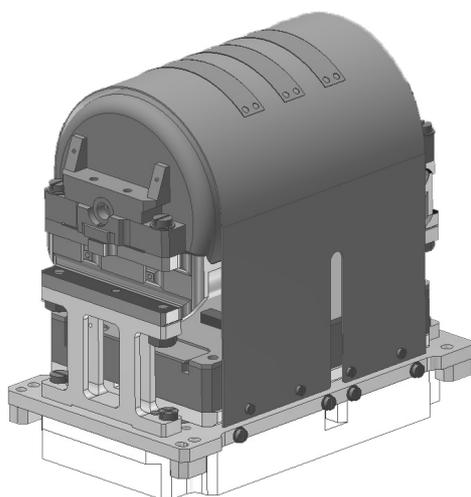


Рис. 6. 3D-модель МГБ без внешнего кожуха

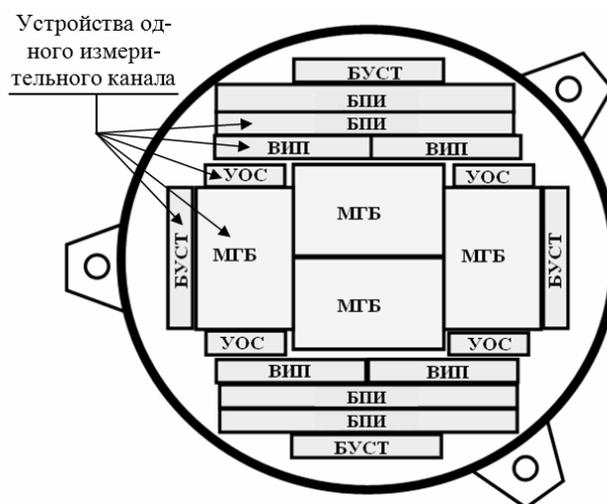


Рис. 7. Схема компоновки прибора

Оба контура СТС питаются однополярным напряжением с широтно-импульсной модуляцией, позволяющей по величине скважности импульсов напряжения с достаточно высокой точностью контролировать мощность, выделяемую в нагревательных элементах контуров. Амплитуда этих импульсов равна напряжению первичного электропитания ГИВУС. Выходная статическая характеристика контуров термостатирования представлена на Рис. 8.

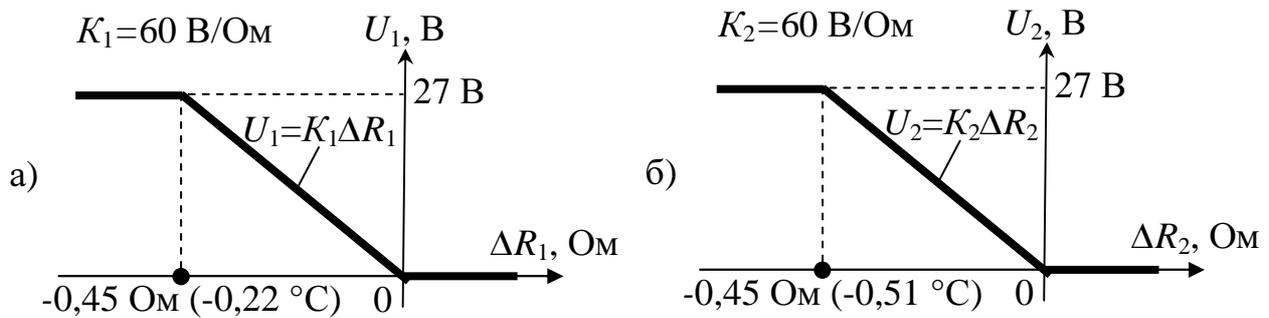


Рис. 8. Выходная статическая характеристика 1-го (а) и 2-го (б) контура СТС U_1, U_2 – средние значения выходных напряжений контуров, K_1, K_2 – коэффициенты усиления контуров, ΔR_1 – отклонение сопротивления контрольного термодатчика 1-го контура от требуемого значения, ΔR_2 – сумма отклонений сопротивлений двух контрольных термодатчиков 2-го контура от требуемого значения

Предложенный вариант построения двухконтурной СТС для каждого ЧЭ имеет принципиальное отличие от СТС, используемой в приборе КИНД34-020. Все четыре индивидуальные СТС ЧЭ развязаны между собой с точки зрения тепловых связей, что практически исключает теплообмен между ЧЭ. В приборе КИНД34-020 имеется контур термостатирования общий для всех ЧЭ, обеспечивающий стабилизацию температуры основания, на котором они установлены.

К достоинствам и преимуществам предложенной в работе СТС ГИВУС по сравнению с СТС прибора КИНД34-020 относятся:

- возможность автономной сборки, проверки и отладки МГБ, их взаимозаменяемость;
- упрощение конструкции за счет отсутствия элементов Пельтье и использования системы термостатирования с активным обогревом и пассивным охлаждением;
- снижение теплового взаимодействия ЧЭ, при различных сочетаниях включения и выключения измерительных каналов прибора и в случае отказа любого из них;
- увеличение точности термостабилизации корпуса ЧЭ (с 0,1 до 0,01 °С).

В третьей главе также представлен тепловой расчёт СТС для установившегося теплового состояния ЧЭ в системе ANSYS (Рис. 9).

Описывается аналитическая тепловая модель ЧЭ с СТС в среде Simulink (Matlab) и приводятся результаты её моделирования в динамическом и установившемся режимах, как системы автоматического регулирования при различных температурных условиях эксплуатации прибора.

На Рис. 10 представлены графики изменения мощностей P_1, P_2 в 1-м и 2-м контурах СТС и отклонения температур $\Delta T_{\text{чэ}}, \Delta T_{\text{кр}}$ корпуса ЧЭ и кронштейна от

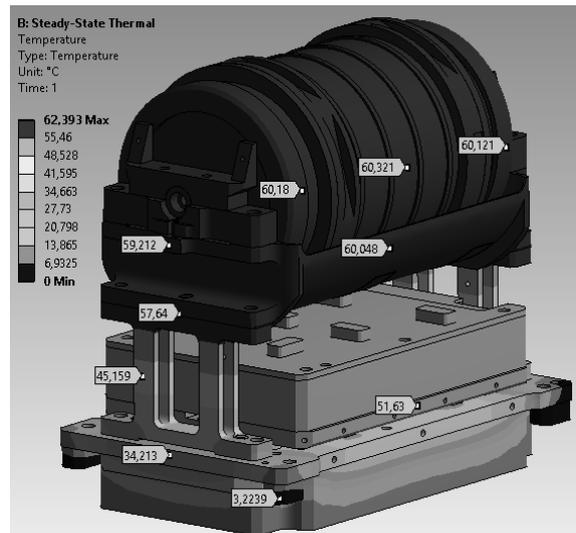


Рис. 9. Результаты теплового расчёта в системе ANSYS

температуры настройки, полученные в среде Simulink. По результатам моделирования при изменении температуры основания прибора $T_{осн}$ в диапазоне от 0 до +35 °С точность термостабилизации корпуса ЧЭ составила 0,03 °С, а максимальная потребляемая СТС мощность для одного измерительного канала не превысила 8,3 Вт.

В четвертой главе диссертации описывается методика проведения экспериментальных исследований разработанной индивидуальной двухконтурной СТС ЧЭ в составе измерительного канала ГИВУС для подтверждения правильности принятых технических решений и результатов моделирования. Сравнение результатов эксперимента и моделирования (Рис. 11) показало, что их отличие не превысило 1 % для значений температурного поля в установившемся режиме.

На Рис. 12 представлены результаты экспериментальных исследований зависимости нулевого сигнала ω_0 измерительного канала от температуры основания прибора $T_{осн}$. Конечное изменение ω_0 относительно исходного значения составило 0,009 °/ч, что больше требуемого значения на 0,005 °/ч, при этом стабильность поддержания

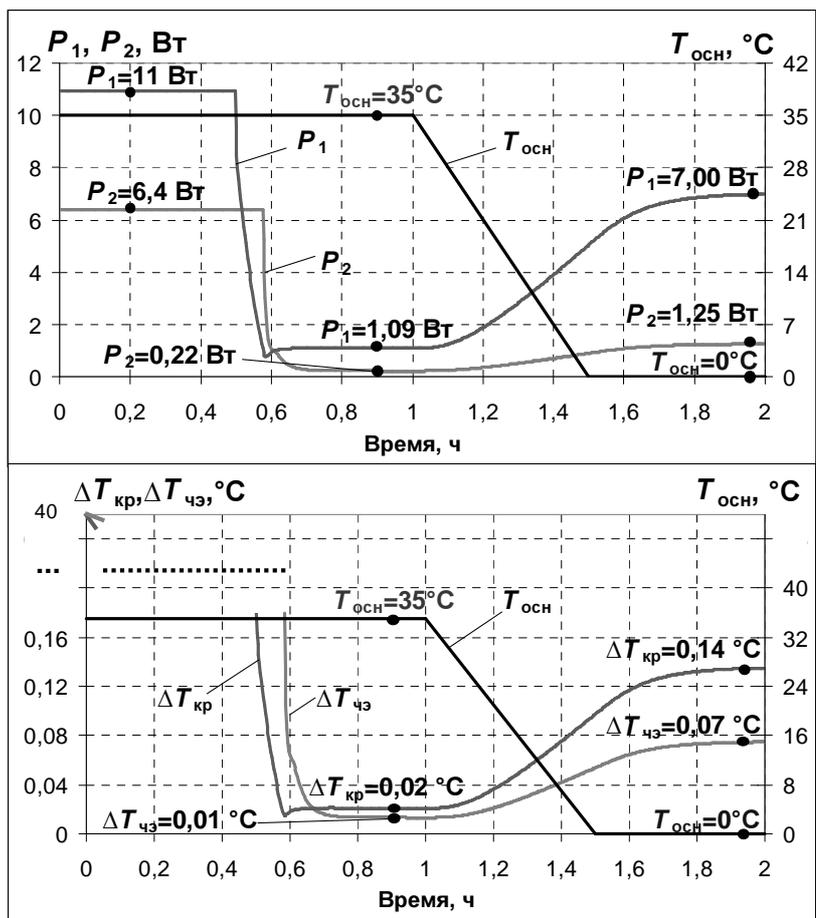


Рис. 10. Результаты моделирования в среде Simulink

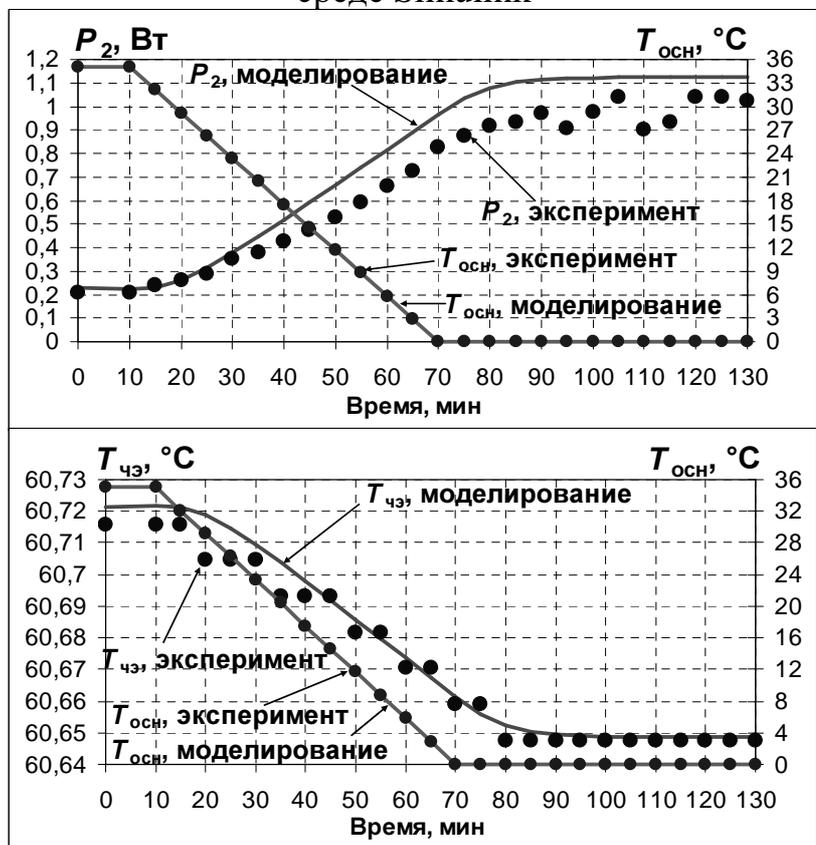


Рис. 11. Сравнение результатов моделирования и эксперимента

температуры корпуса ЧЭ составила $0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$.

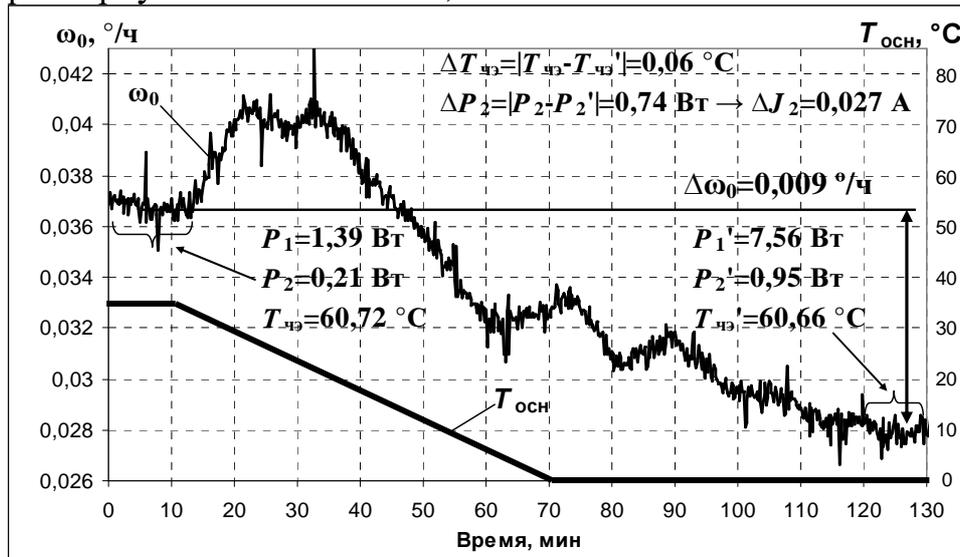


Рис. 12. Влияние температуры основания $T_{\text{осн}}$ на величину нулевого сигнала ω_0 измерительного канала

$T_{\text{чэ}}$ – температура корпуса ЧЭ, ΔJ_2 – изменение тока во 2-м контуре СТС, $\Delta\omega_0$ – изменение нулевого сигнала

По результатам дополнительных экспериментов выявлено влияние тока J_2 , протекающего во 2-м контуре термостатирования, на величину нулевого сигнала ω_0 (Рис. 13). Из данных на Рис. 13 можно выделить коэффициенты влияния величины и направления тока во 2-м контуре термостатирования и температуры ЧЭ на нулевой сигнал, которые составили $K_J = (K_{-J} + K_{+J})/2 = -0,2677\text{ }^{\circ}/\text{ч}/\text{A}$ и $K_T = 0,0178\text{ }^{\circ}/\text{ч}/^{\circ}\text{C}$ соответственно.

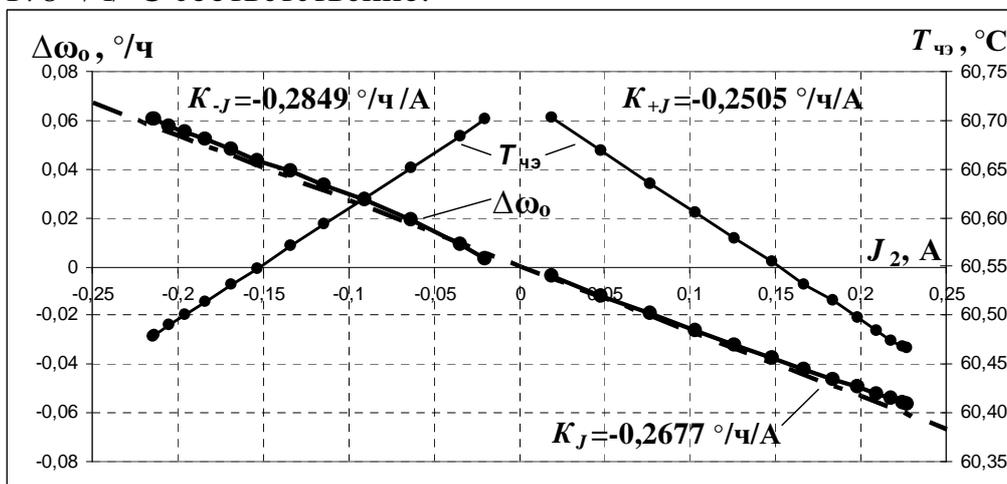


Рис. 13. Зависимость изменения нулевого сигнала ω_0 и температуры ЧЭ от тока J_2 во 2-м контуре СТС

Предположительно, влияние тока на величину нулевого сигнала обусловлено конструктивными особенностями и погрешностями изготовления бифилярных нагревательных элементов, приклеенных к торцевым поверхностям корпуса ЧЭ, которые определяют величину нескомпенсированного магнитного поля от тока и, соответственно, величину возмущающих моментов, создаваемых магнитным полем вокруг выходной оси гироскопа через взаимодействие с ферромагнитными включениями поплавка ЧЭ. Как показывают эксперименты

коэффициент влияния K_J индивидуален для каждого образца ЧЭ, как по величине, так и по знаку. Для восьми экспериментальных образцов гироскопов коэффициент влияния варьируется от $K_J = -0,2677$ °/ч/А до $K_J = 0,1638$ °/ч/А.

Для уменьшения влияния на ω_0 тока во 2-м контуре термостатирования предлагается ввести адаптируемую температуру настройки 1-го контура $T_{н1}$ (Рис. 14), благодаря которой возможно поддержание минимальной мощности во 2-м контуре в диапазоне от 0,2 до 0,4 Вт при всех допустимых температурных воздействиях на ГИВУС. При этом выходные статические характеристики контуров СТС сохраняются и соответствуют Рис. 8.

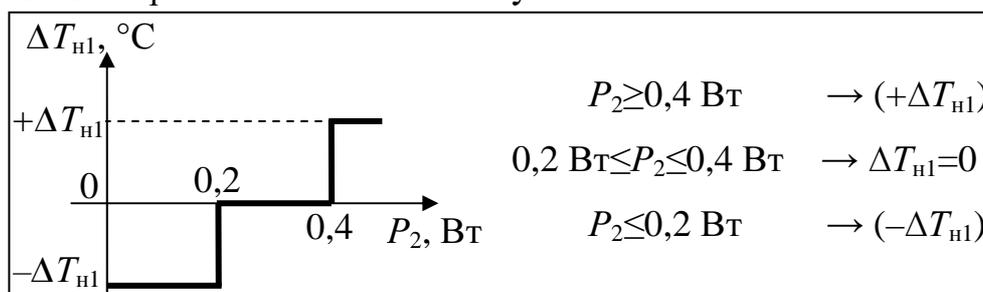


Рис. 14. Алгоритм работы 1-го контура СТС с адаптируемой температурой настройки

При достижении мощности P_2 , выделяемой в нагревательных элементах ЧЭ второго контура, значения больше 0,4 Вт, в мостовую измерительную схему 1-го контура термостатирования должна подаваться команда на электронный ключ, обеспечивающий коммутацию дополнительных резисторов в мостовой схеме соответствующих увеличению его температуры настройки на один шаг величиной $\Delta T_{н1}$, а при достижении мощности P_2 значения меньше 0,2 Вт, температура настройки соответственно должна понижаться на один шаг величиной $\Delta T_{н1}$. При этом с целью завершения переходных процессов в 1-м и 2-м контурах СТС после срабатывания команды на переключение температуры настройки 1-го контура термостатирования, должна осуществляться задержка длительностью 8 мин (постоянная времени СТС) перед выдачей следующей команды переключения.

По результатам экспериментальных исследований (Рис. 15) для конкретного измерительного канала ГИВУС предлагается установить 9 значений температуры настройки $T_{н1}$ 1-го контура СТС, среднее значение которой подбирается при температуре основания прибора $T_{осн} = +17$ °С и величину приращения $\Delta T_{н1}$ температуры настройки, равную 0,12 °С.

Стабильность ω_0 при использовании СТС с адаптируемой настройкой 1-го контура и изменении температуры $T_{осн}$ в диапазоне от 0 до +35 °С достигает 0,0018 °/ч, что в совокупности со случайной составляющей отклонения ω_0 за 24 часа, равной 0,00035 °/ч (оценка по 1σ , Рис. 16) даёт суммарную стабильность ω_0 , равную 0,002 °/ч, что соответствует предъявляемым к прибору требованиям. Также установлено, что влияние напряжения первичного электропитания ГИВУС в диапазоне от 25 до 29 В на стабильность ω_0 отсутствует.

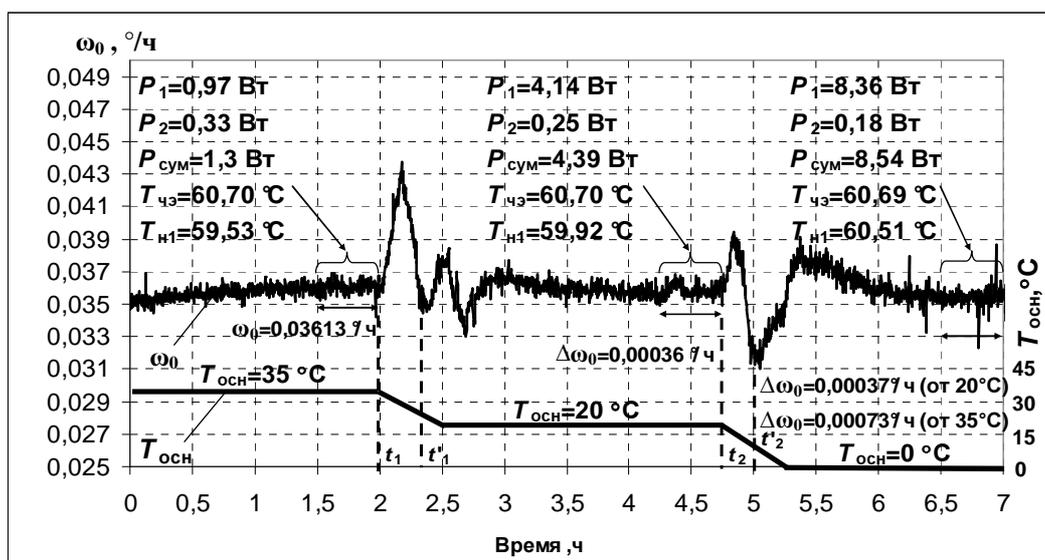


Рис. 15. Изменение нулевого сигнала измерительного канала с адаптируемой температурой настройки 1-го контура СТС
 $P_{\text{сум}}$ – суммарная мощность в контурах СТС, t_1, t_1' – время начала изменения $T_{\text{осн}}$, t_1', t_2' – время перенастройки $T_{\text{н1}}$

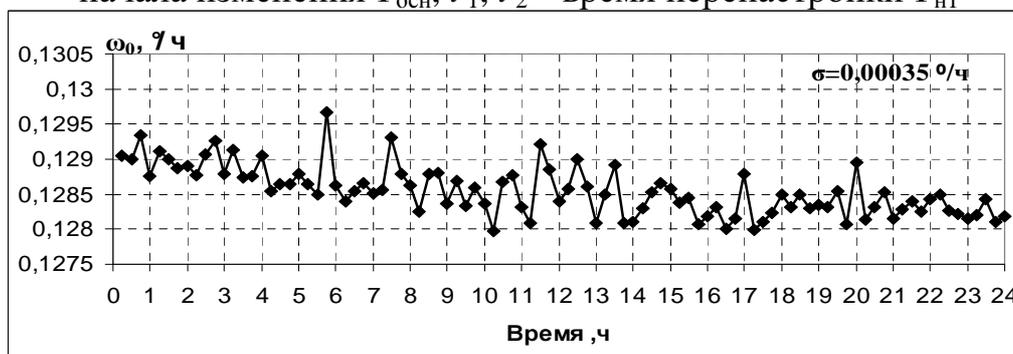


Рис. 16. Случайная составляющая отклонения ω_0 за 24 часа.

Также в четвертой главе предложены технические решения по модернизации 1-го контура СТС в части обеспечения адаптируемой температуры его настройки. Представлены результаты моделирования итогового варианта СТС со статическими характеристиками контуров, представленными на Рис.8, и модернизированным 1-м контуром СТС.

В общих выводах и заключении изложены основные результаты диссертационной работы.

Приложение включает в себя материалы, описывающие аналитическую тепловую модель ЧЭ с СТС в среде Simulink.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Разработан метод построения аналитической тепловой модели, заключающийся в комбинированном использовании системы ANSYS и среды Simulink (Matlab).

2. Построена аналитическая тепловая Simulink-модель ЧЭ с СТС, позволяющая проводить расчёт работы СТС в динамическом и установившемся режимах, для оценки точности поддержания температуры ЧЭ и необходимой для этого мощности потребления исполнительными элементами СТС при различных температурных условиях эксплуатации ГИВУС.

3. По результатам моделирования в системе ANSYS и среде Simulink (Matlab) разработана индивидуальная двухконтурная система термостатирования, в которой каждый ЧЭ измерительного канала ГИВУС заключён в собственный термостатируемый модуль, где 1-й контур поддерживает температуру вне корпуса ЧЭ, а 2-й стабилизирует температуру этого корпуса.

4. Аналитическая тепловая Simulink-модель ЧЭ с разработанной СТС верифицирована сравнением результатов моделирования с экспериментальными данными, отличие которых не превысило 1 % для значений температурного поля в установившемся режиме.

5. Проведенный анализ взаимосвязи параметров СТС со стабильностью нулевого сигнала измерительного канала ГИВУС показал, что основной вклад в изменение нулевого сигнала вносят магнитные поля, обусловленные током в нагревательных элементах 2-го контура термостатирования, расположенных на торцевых поверхностях корпуса ЧЭ.

6. Разработан и промоделирован алгоритм работы 1-го контура СТС с адаптируемой температурой настройки, при котором стабилизируется температура элементов конструкции, окружающей корпус ЧЭ, так чтобы мощность, выделяемая во 2-м контуре находилась в пределах от 0,2 до 0,4 Вт. Подобный алгоритм работы 1-го контура термостатирования позволяет минимизировать изменение мощности и соответственно рабочего тока во 2-м контуре, термостабилизирующем корпус ЧЭ, тем самым обеспечивая постоянство, как температуры ЧЭ, так и тепловыделения в нём и, как следствие, требуемую стабильность его нулевого сигнала.

7. Результатами экспериментальных исследований подтверждена возможность обеспечения стабильности нулевого сигнала измерительного канала ГИВУС на уровне 0,002 °/ч в течение 24 ч при использовании разработанной СТС, потребляемая мощность которой составила 8,54 Вт для каждого измерительного канала, что обеспечило суммарную потребляемую мощность СТС ГИВУС не превышающую 35 Вт.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Бордачев Д.А., Шустов И.Е., Казаков Б.А. Гироскопический измеритель вектора угловой скорости с двухотсчётной измерительной системой // Гироскопия и навигация. 2013. № 2. С. 112-118 (0,61 п.л. / 0,2 п.л.).

2. Бордачев Д.А., Подчерзцев В.П., Фатеев В.В. Моделирование системы термостатирования гироскопического измерителя вектора угловой скорости // Авиакосмическое приборостроение. 2015. №3. С. 3-9 (0,7 п.л. / 0,35 п.л.).

3. Некоторые результаты наземной отработки перспективного прецизионного гироскопического измерителя вектора угловой скорости космического аппарата / Д.А. Бордачев [и др.] // Гироскопия и навигация. 2015. №4. С. 106-116 (0,96 п.л. / 0,19 п.л.).

4. Бордачев Д.А., И.Е. Шустов., В.П. Подчерзцев. Экспериментальные исследования системы термостатирования прецизионного гироскопического измерителя вектора угловой скорости // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2017. № 1. С. 24-34 (1 п.л. / 0,5 п.л.).