

На правах рукописи



МАЛЮТИН Дмитрий Михайлович

**СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИНФОРМАЦИОННО -
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ И УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ
ГИРОСТАБИЛИЗАТОРОВ**

Специальность 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Тула – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный университет»

Научный консультант: **РАСПОПОВ Владимир Яковлевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **КОНЕШОВ Вячеслав Николаевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБУН Институт физики Земли
им. О. Ю. Шмидта Российской
академии наук г. Москва, руководитель
научного направления
«Потенциальные поля»

МАМОН Юрий Иванович
доктор технических наук, доцент,
АО Центральное конструкторское бюро
аппаратостроения (г. Тула), главный
специалист отдела перспективных
разработок

ТИМОШЕНКОВ Сергей Петрович
доктор технических наук, профессор,
ФГУП НИУ Московский институт
электронной техники, Институт нано и
микросистемной техники, директор

Ведущая организация: **Публичное акционерное общество**
«Ростовский оптико - механический завод»,
Ярославская область, г. Ростов

Защита состоится « 4 » марта 2025 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.417.03, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, пр. Ленина, 92 (9-101).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на сайте <https://tulsu.ru/science/dissertation/diss-24-2-417-03/malyutin-dm-24-2-417-03>

Автореферат разослан « 10 » декабря 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Маслова Анна Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Информационно - измерительные и управляющие системы (ИИиУС) на основе управляемых гиросtabilизаторов (ГС) нашли широкое применение при использовании на подвижных объектах. К ним относятся: гравиметрические комплексы для аэро и морских измерений; системы оптического наблюдения гражданского назначения; системы ориентации и навигации подвижных объектов; информационно - измерительные охраняемые системы.

Управляемые ГС ИИиУС представляют собой сложные многоконтурные системы автоматического управления, работающие в широком диапазоне температур, возмущающих воздействий в разнообразных режимах: удержания в пространстве заданного направления, электрического арретирования, ориентации в заданный сектор пространства, измерения параметров ориентации подвижного объекта и др. и во многом определяют выходные характеристики системы в целом. К таким системам предъявляются высокие требования по точности стабилизации и ориентации в пространстве стабилизируемой аппаратуры, технологичности конструкции, малому числу функциональных элементов, и, следовательно, повышенной надежности при малом времени готовности, малой потребляемой мощности. Создание теории, на базе которой организованы мероприятия по совершенствованию ИИиУС на основе управляемых ГС путем повышения точности и улучшения комплекса технических и экономических характеристик управляемых ГС является актуальной научной проблемой.

Разработкой, производством этих систем и решением задачи повышения их точности, улучшения технических характеристик в настоящее время активно занимаются такие фирмы и организации как La Coste Romberg, «SYSTRON DONNER», «Goodrich Corporation» (США), BODENSEEWORK (ФРГ), DST CONTROL AB (Швеция), Controp (Израиль), АО «Южморгеология» г. Геленджик, ФГУП ГНЦ «Электроприбор», ИФЗ РАН г. Москва, научно - производственный конструкторский центр «Новик-XXI век», ООО «ТеКнол», ГОУ ВПО «Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева», МГТУ им. Баумана, МАИ, АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро», «Пермская научно - производственная приборостроительная компания», ОАО «Мичуринский завод «Прогресс» (Россия).

Развитие теории ИИиУС на основе управляемых ГС связано с именами Д.С. Пельпора, С.С. Ривкина, А.К. Неусыпина, В.Г. Пешехонова, В.А. Бессекерского, А.Д. Березы, Л.П. Несенюка, В.А. Матвеева, В.Я. Распопова, Л.А. Северова, А.Я. Шайденко, В.К. Карпова, В.П. Подчерцева, В.В. Фатеева, В.Д. Арсеньева, А.В. Репникова, Г.П. Черноморского, В.И. Родионова, Ю.В. Иванова, Л.К. Железняк, В.Н. Конешова, А.Н. Лысова и др.

Управляемые ГС вышеперечисленных систем имеют свои особенности построения, но вместе с тем подчиняются и общим законам функционирования и математического описания, что позволяет разрабатывать универсальные методы и средства повышения точности, применимые к этим системам.

Несмотря на то, что в настоящий момент достигнут высокий уровень качественных показателей ИИиУС на основе управляемых ГС, существует противоречие между потенциальными возможностями таких систем и

достигнутым уровнем. Основными причинами отмеченного противоречия является несовершенство используемых структурных схем построения, математического описания, алгоритмов функционирования и элементной базы. В результате, практические погрешности существенно превышают потенциально достижимые.

В связи с этим **научная проблема** диссертационного исследования – развитие теории построения информационно-измерительных и управляющих систем повышенной точности на основе гиросtabilизаторов.

Цель диссертации – повышение точности информационно - измерительных и управляющих систем на основе гиросtabilизаторов.

В реальных условиях эксплуатации ИИиУС на основе ГС функция распределения возмущений заранее неизвестна и её параметры изменяются. Таким образом, имеет место априорная и текущая неопределенность в описании модели внешних возмущений. В этих условиях повышение точности возможно за счёт использования самонастраивающихся систем, в которых для восполнения недостающей информации о возмущениях активно используется текущая информация. Следовательно, одним из целесообразных путей решения проблемы повышения точности ИИиУС на основе ГС является использование принципа самонастройки. Самонастраивающиеся системы имеют ряд неоспоримых преимуществ при работе в условиях априорной неопределенности возмущений. Однако использование принципа самонастройки в ИИиУС на основе управляемых ГС сдерживается отсутствием общей методологии и теоретической базы, позволяющих исследовать и обосновывать направления его эффективного использования, синтезировать критерии и законы самонастройки параметров систем и разрабатывать алгоритмические и программные средства для решения различных задач.

Весьма эффективным методом повышения точности ИИиУС на основе ГС является метод комбинированного управления. Система с комбинированным управлением представляет собой объединение в одну систему замкнутой системы управления по отклонению и разомкнутой системы управления по возмущающему воздействию. Применение этого метода особенно актуально в условиях повышенного уровня возмущений, когда не удается добиться требуемых точностных показателей стабилизации полезной нагрузки в пространстве путем увеличения коэффициента усиления по контуру в замкнутой системе управления по отклонению, значение которого ограничено условиями устойчивости системы.

Перспективным решением проблемы повышения точности ИИиУС на основе управляемых ГС является также метод управления с применением эталонной модели системы.

Способы повышения точности ИИиУС на основе управляемых гиросtabilизаторов представляют собой совокупность и порядок действий, реализуемых перспективными структурами построения ИИиУС, состоящими из системы элементов и устойчивых межэлементных связей и обеспечивающих повышение точности ИИиУС.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие **новые задачи**:

1. Разработать структуру построения и математическое описание двухосного индикаторного ГС морского гравиметра повышенной точности с

системой коррекции, настроенной на период Шулера с автономным демпфированием собственных колебаний, обеспечивающей инвариантность системы к линейным ускорениям (с точностью до малой величины ε) не только при прямолинейном движении, но и при циркуляции судна.

2. Разработать структуру построения и математическое описание двухосного индикаторного ГС морского гравиметра повышенной точности с параметрической коррекцией сигнала первого интегратора системы интегральной коррекции.

3. Разработать структуры построения и математическое описание адаптивных схем акселерометрической коррекции ГС морского гравиметра повышенной точности. Разработать критерии самонастройки параметров адаптивных схем акселерометрической коррекции ГС морского гравиметра.

4. Разработать структуру построения и математическую модель двухосного индикаторного ГС гравиметрического комплекса с комбинированным управлением, включая описание каналов компенсации возмущающих воздействий, а также контуров самонастройки параметров каналов компенсации возмущающих воздействий для повышения точности системы стабилизации гравиметрического комплекса. Исследовать различные структурные решения построения каналов компенсации возмущающих воздействий и получить соотношения для выбора параметров каналов компенсации, обеспечивающих наилучшее качество работы.

5. Разработать структурные решения построения усилительно - преобразующих трактов (УПТ) чувствительных элементов (ЧЭ) ГС ИИиУС, обеспечивающих повышенную динамическую точность.

6. Разработать структуру построения и математическое описание многофункциональной информационно - измерительной и управляющей системы на основе двухосной индикаторной гировертикали на микромеханических чувствительных элементах (ММЧЭ), обеспечивающей функции стабилизации и управления полезной нагрузки (ПН) в пространстве и выработку параметров ориентации подвижного основания.

7. Разработать способ повышения точности и математическую модель двухосного индикаторного ГС ПН на динамически настраиваемом гироскопе (ДНГ).

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы математического анализа, теории автоматического управления, спектрального анализа, теории гироскопических приборов и систем, методы обработки измерительной информации.

Объектом исследования являются ИИиУС на основе ГС подвижных морских, наземных и воздушных объектов.

Предмет исследования: структурные схемы ГС ИИиУС и их чувствительных элементов, математические модели ГС ИИиУС и их чувствительных элементов, алгоритмы функционирования ГС ИИиУС, способы и средства повышения точности ГС ИИиУС и их чувствительных элементов.

Научная новизна диссертации представлена следующими результатами:

1. Структура построения двухосного индикаторного ГС морского гравиметра, с системой коррекции настроенной на период Шулера,

отличающаяся от известных автономным способом демпфирования собственных колебаний с применением полосового фильтра в прямой цепи, охватывающей первый интегратор и наличием приборных перекрестных связей между каналами системы коррекции и обеспечивающая инвариантность ГС к линейным ускорениям (с точностью до малой величины ε) не только при прямолинейном движении, но и при циркуляции судна. Особенностью математического описания структуры построения двухосного индикаторного ГС морского гравиметра, является возможность прогнозирования погрешностей ГС и погрешностей гравиметрических измерений в зависимости от кинематических параметров движения судна.

2. Структура построения двухосного индикаторного ГС морского гравиметра повышенной точности, отличающаяся от известных введением в систему интегральной коррекции контуров параметрической коррекции сигнала первого интегратора для обеспечения устойчивого режима работы ГС при сохранении инвариантности к движению судна.

3. Структуры построения адаптивных схем акселерометрической коррекции ГС морского гравиметра, в отличии от известных, обеспечивают повышенную точность гравиметрических измерений. Особенностью математического описания адаптивных схем акселерометрической коррекции ГС морского гравиметра являются критерии самонастройки параметров этих схем.

4. Структура построения и математическая модель двухосного индикаторного ГС гравиметрического комплекса с комбинированным управлением, отличающаяся от известных наличием каналов компенсации не только моментов сил вязкого трения, но и инерционных возмущающих воздействий, а также наличием контуров самонастройки параметров каналов компенсации возмущающих воздействий для повышения точности ГС гравиметрического комплекса. Соотношения для выбора параметров каналов компенсации возмущающих воздействий, обеспечивающие наилучшее качество работы системы.

5. Структурные решения построения УПГ ЧЭ ГС ИИиУС и проектировочные зависимости, обеспечивающие повышение динамической точности работы (микромеханических акселерометров (ММА) и микромеханических гироскопов (ММГ); волнового твердотельного гироскопа (ВТГ) в режиме ДУС; акселерометров компенсационного типа и датчика угловой скорости (ДУС) на основе поплавкового интегрирующего гироскопа (ПИГ), в отличии от известных решений, с учетом процессов модуляции и демодуляции полезного сигнала, цифрового преобразования выходного сигнала и заданными величиной динамической погрешности и помехи на выходе акселерометра компенсационного типа и ДУС на основе ПИГ).

6. Структура построения и математическое описание многофункциональной ИИиУС на основе двухосной индикаторной гировертикали на ММЧЭ, отличающейся от известных управлением с применением образцовых моделей контуров стабилизации и коррекции гировертикали, обеспечивающей функцию стабилизации и управления положением ПН в пространстве и функцию выработки параметров ориентации подвижного основания. Способы повышения точности многофункциональной

информационно - измерительной и управляющей системы на основе двухосной индикаторной гировертикали на ММЧЭ.

7. Способ повышения точности двухосного индикаторного ГС ПН на ДНГ, основанный на введении в УПТ каналов стабилизации, в отличие от известных решений, комбинации изодромного, интегро - дифференцирующего звена и трех режекторных звеньев, и обеспечивающий устойчивый режим работы ГС, расширение полосы пропускания, повышение динамической точности, инвариантность ГС к временной нестабильности ряда параметров ДНГ. Обобщенная математическая модель двухосного ГС ПН на ДНГ (как система нелинейных дифференциальных уравнений, включающая дифференциальные уравнения движения полезной нагрузки, дифференциальные уравнения функционирования ДНГ, дифференциальные уравнения функционирования УПТ контуров управления, дифференциальные уравнения кинематики движения элементов карданова подвеса), отличающаяся от имеющихся подробным представлением возмущений в виде функций угловых скоростей качки основания, угловых скоростей движения элементов карданова подвеса при переменных углах поворота рам карданова подвеса и учетом динамических связей между каналами системы, позволяющая анализировать работу системы в реальных условиях эксплуатации на подвижном основании.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Структура построения двухосного индикаторного ГС морского гравиметра с системой коррекции, настроенной на период Шулера, с автономным способом демпфирования собственных колебаний, позволяет обеспечить инвариантность ГС к линейным ускорениям (с точностью до малой величины ε) не только при прямолинейном движении, но и при циркуляции судна. Математическое описание двухосного индикаторного ГС морского гравиметра позволяет прогнозировать погрешности ГС и погрешности гравиметрических измерений в зависимости от кинематических параметров движения судна.

2. Структура построения двухосного индикаторного ГС морского гравиметра с контурами параметрической коррекции сигнала первого интегратора системы интегральной коррекции позволяет устранить противоречие между обеспечением инвариантности ГС к линейным ускорениям при настройке системы на период Шулера для обеспечения повышенной точности функционирования и автономным демпфированием собственных колебаний стабилизируемой платформы.

3. Структуры построения и математическое описание адаптивных схем акселерометрической коррекции ГС морского гравиметра являются методологической и теоретической базой, позволяющей исследовать, обосновывать и синтезировать критерии самонастройки и разрабатывать алгоритмические и программные средства для решения задачи повышения точности гравиметрических измерений.

4. Структура построения и математическая модель двухосного индикаторного ГС с каналами компенсации возмущающих воздействий и контурами самонастройки параметров каналов компенсации возмущающих воздействий описывает решение, обеспечивающее требуемую точность стабилизации полезной нагрузки в условиях повышенного уровня возмущений, когда это не удается добиться путем увеличения коэффициента усиления по

контур в замкнутой системе управления по отклонению, величина которого ограничена условиями устойчивости системы. Результаты исследования различных структурных решений построения каналов компенсации возмущающих воздействий и соотношения для выбора параметров каналов компенсации позволяют обеспечить высокое качество работы системы в процессе проектирования (значение ЛАЧХ по передаточной функции, являющейся отношением возмущающего момента после компенсации к действующему возмущающему моменту, на частоте 1с^{-1} составляет от -36дБ до -167дБ в зависимости от применяемого структурного решения).

5. Структурные решения построения УПТ ЧЭ ГС ИИиУС обеспечивают повышение динамической точности работы этих ЧЭ, а следовательно и всей ИИиУС. Аналитические выражения для определения параметров УПТ позволяют обеспечить проектирование ЧЭ с заданным значениям динамической погрешности, а также с заданной величиной помехи на выходе.

6. Структура построения многофункциональной информационно - измерительной и управляющей системы на основе индикаторной гировертикали на ММЧЭ позволяет реализовать с помощью этой системы совмещенный режим стабилизации, управления ПН в пространстве и измерения параметров ориентации подвижного основания, выполняя функции традиционно применяющихся для решения этих задач двух систем: карданной или бескарданной системы ориентации и системы стабилизации и управления ПН. Математическое описание многофункциональной информационно - измерительной системы позволяет анализировать погрешности стабилизации ПН и погрешности выработки параметров ориентации подвижного основания. Способы повышения точности обеспечивают уменьшение погрешностей стабилизации полезной нагрузки и измерения параметров ориентации подвижного основания.

7. Предложенный способ повышения точности двухосного индикаторного ГС ПН на ДНГ позволяет приблизить точностные характеристики системы к потенциально достижимым. Разработанная в работе математическая модель двухосного ГС ПН на ДНГ позволяет повысить достоверность результатов проектирования ИИиУС, сократить временные затраты при проектировании, получить оценки точности работы системы в условиях приближенным к реальным при установке на подвижном основании.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Структура построения и математическое описание двухосного индикаторного ГС морского гравиметра с двухканальной системой коррекции, настроенной на период Шулера, с автономным способом демпфирования собственных колебаний, обеспечивающей инвариантность системы к горизонтальным ускорениям (с точностью до малой величины ε) не только при прямолинейном движении, но и при циркуляции судна.

2. Структура построения и математическое описание двухосного индикаторного ГС морского гравиметра повышенной точности с контурами параметрической коррекции сигнала первого интегратора системы интегральной коррекции для обеспечения устойчивого режима работы ГС при сохранении инвариантности к движению судна.

3. Структуры построения адаптивных схем акселерометрической коррекции ГС морского гравиметра, обеспечивающие повышение точности

гравиметрических измерений и математическое описание адаптивных схем акселерометрической коррекции ГС морского гравиметра. Критерии самонастройки параметров адаптивных схем акселерометрической коррекции ГС морского гравиметра.

4. Структура построения и математическая модель двухосного индикаторного ГС гравиметрического комплекса с комбинированным управлением, включающая каналы компенсации возмущающих воздействий и контуры самонастройки параметров каналов компенсации возмущающих воздействий для повышения точности ГС гравиметрического комплекса. Соотношения для выбора параметров каналов компенсации, обеспечивающие наилучшее качество работы системы.

5. Структурные решения и проектировочные зависимости построения УПП ЧЭ ГС ИИиУС, обеспечивающие повышение динамической точности работы (акселерометров компенсационного типа и датчика угловой скорости на основе поплавкового интегрирующего гироскопа с учетом процессов модуляции и демодуляции полезного сигнала и цифрового преобразования выходного сигнала; ММА; волнового твердотельного гироскопа в режиме датчика угловой скорости).

6. Структура построения и математическое описание многофункциональной информационно - измерительной и управляющей системы на основе двухосной индикаторной гировертикали на ММЧЭ, обеспечивающей совмещенный режим стабилизации и управления положением ПН в пространстве и выработки параметров ориентации подвижного основания. Способы повышения точности системы.

7. Способ повышения точности двухосного индикаторного ГС ПН на ДНГ. Математическая модель двухосного индикаторного ГС ПН на ДНГ, достоверно отражающая динамику системы в реальных условиях эксплуатации на подвижном основании.

Достоверность полученных результатов подтверждается согласованностью с результатами лабораторных и натурных экспериментальных исследований ИИиУС на основе ГС, имитационным моделированием ИИиУС на основе ГС, положительной оценкой при обсуждении на научно - технических конференциях высокого уровня.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты исследования, полученные автором, использовались при выполнении грантов, проектов в рамках научно - технических программ и работ по заказам предприятий, исполнителем которых являлся ФГБОУ ВО Тульский государственный университет:

- научно-исследовательская работа (НИР) «Модернизация гравиметрического комплекса «ГРИН» и передача техдокументации» (заказчик ФГУП ГНЦ НПО «Южморгеология», договор № 2001-17, 2001г., **подтверждено актом внедрения**);

- проект 03.01.025 «Разработка аэроморского гравиметрического комплекса нового поколения для поиска месторождений углеводородного сырья» (по подпрограмме 206 «Топливо и энергетика» научно - технической программы «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» - Министерство образования РФ, 2001-2002 г.);

- НИР «Передача технической документации на пассивный демпфер для гиropлатформ семейства «ГРИН» (заказчик ФГУП ГНЦ НПО «Южморгеология», договор №2003-27, 2003 г., подтверждено актом внедрения);
- проект 03.01.003 «Разработка теории и принципов построения гравиметрического комплекса для поиска месторождений нефти и газа» (по подпрограмме 206 «Топливо и энергетика» научно - технической программы «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники» - Министерство образования РФ, 2003-2004 г.);
- НИР «Разработка и исследование гравиметрического комплекса «ГРИН-2000»» (заказчик ПО «Южморгеология», г. Геленджик договор №013604, 2006 г., **подтверждено актом внедрения**);
- ОКР «Разработка и серийное производство конкурентоспособного многооборотного интеллектуального электропривода нового поколения для управления, регулирования и мониторинга запорной арматурой систем автоматизации предприятий, газовых и нефтяных магистралей, ТЭЦ, ГРЭС, ГЭС и АЭС», договор 539 в рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства с участием высшего учебного заведения в рамках постановления Правительства РФ №р-218, 2010-2012 г.);
- НИР «Разработка модуля гиромангнитной курсовертикали волномерного буя» (заказчик ОАО «Концерн «ЦНИИэлектроприбор», г. Санкт-Петербург, 2013 г., **подтверждено актом внедрения**);
- Грант РФФИ 17-08-00434 «Разработка физических и технологических принципов создания измерительных средств повышенной точности для проведения работ в области гравиметрических и гидрографических измерений с подвижного объекта», 2017-2018 г.;
- Грант «Оформление заявки на получение патента на изобретение «Двухосный индикаторный гиросtabilизатор для беспилотного летательного аппарата» (заказчик Правительство Тульской области, договор ДС/110, 2022 г.).

Апробация результатов исследования. Результаты исследования докладывались и обсуждались на следующих конференциях: X Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (г. Санкт-Петербург, 2003 г.); VIII Всероссийская НТК «Проблемы проектирования и производства систем и комплексов» (Тула, 2005); XIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (г. Санкт-Петербург, 2006 г.); XIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (г. Санкт-Петербург, 2007 г.); XVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (г. Санкт-Петербург, 2009 г.); XXVII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова. 2010 (г. Санкт-Петербург, 2010 г.); VI международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в науке, образовании и производстве» (г. Орел, 2014 г.); «Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами» III Всероссийская научно-техническая конференция (г. Москва, 2015г.); «Приборостроение-2015» 8-я международная научно-техническая конференция, (г. Минск, Республика Беларусь, 2015 г.); «Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки» III Всероссийская научно-практическая

конференция «АВИАТОР» (г. Воронеж, 2016); XXIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (г. Санкт-Петербург, 2016 г.); XXIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (г. Санкт-Петербург, 2017 г.); «Приборостроение-2017» 10-ая международная научно-техническая конференция (г. Минск, Республика Беларусь, 2017 г.); Юбилейная XXV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (г. Санкт-Петербург, 2018 г.); «Приборостроение-2018» 11-ая международная научно-техническая конференция (г. Минск, Республика Беларусь, 2018 г.); «Приборостроение-2019» 12-ая международная научно-техническая конференция (г. Минск, Республика Беларусь, 2019 г.); XXVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (г. Санкт-Петербург, 2020); «Приборостроение-2020» 13-ая международная научно-техническая конференция (г. Минск, Республика Беларусь, 2020 г.); 57-я научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава ТулГУ с всероссийским участием (г. Тула, 2021 г.); Юбилейная XXX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (г. Санкт-Петербург, 2023 г.).

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 74 работах, в том числе в 10 статьях, входящих в реферативные базы данных Web of Science и Scopus, 30 статьях из перечня ВАК, 16 статьях в других изданиях, 12 патентах на изобретение РФ, 2 патентах РФ на полезную модель, двух программах для ЭВМ, а также в двух монографиях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, библиографического списка из 237 источников, содержит 391 страницу машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, обозначена цель диссертационного исследования, сформулированы объект, предмет и задачи исследования. Изложены научная новизна и практическая значимость работы. Сформулированы основные положения выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены области применения ИИиУС для измерения ускорения силы тяжести на основе управляемых (корректируемых) ГС. Рассмотрены принципы построения ИИиУС для измерения ускорения силы тяжести Земли на базе управляемых (корректируемых) ГС, существующие технические решения, технические характеристики современных образцов. В современных образцах гравиметрических ИИиУС применяется принцип индикаторной стабилизации гравиметра с акселерометрической коррекцией. В ряде случаев применяется настройка контура коррекции на период Шулера. Достигнутая предельная точность измерений составляет 0,06-0,1 мГал. Показано, что существует необходимость повышения достигнутой предельной точности измерений. Одним из основных путей решения этой задачи является совершенствование управляемых ГС гравиметрической аппаратуры.

Исследованы уравнения, описывающие динамику ГС с контуром интегральной коррекции с автономным демпфированием собственных колебаний с апериодическим звеном в прямой цепи, охватывающей первый

интегратор и с полосовым корректирующим фильтром в прямой цепи, охватывающей первый интегратор. Найдено аналитическое решение, связывающее параметры полосового корректирующего фильтра с характеристиками собственного движения системы. Применение полосового фильтра в прямой цепи, охватывающей первый интегратор контура коррекции, позволило обеспечить требуемые запасы устойчивости системы при настройке на период Шулера автономным способом и обеспечить среднюю интегральную величину $\langle \dot{V}_A \cdot \beta \rangle$ погрешности из-за ускорений и наклонов основания равной

$$\langle \dot{V}_A \cdot \beta \rangle = \frac{\dot{V}_A^2 \cdot \xi_{п.ф}^2 \cdot T^2 \cdot \omega^2}{2 \cdot g \cdot ((1 - (T \cdot \omega)^2)^2 + \xi_{п.ф}^2 \cdot (T \cdot \omega)^2)} \times \cos \left(180^\circ - 2 \cdot \arctg \frac{\xi_{п.ф} \cdot \omega \cdot T}{1 - (\omega \cdot T)^2} \right), (1)$$

где β – погрешность стабилизации платформы относительно плоскости горизонта, T – постоянная времени полосового фильтра, $\xi_{п.ф}$ – коэффициент затухания полосового фильтра, g – ускорение силы тяжести. При амплитуде возмущающего ускорения $\dot{V}_A = 100$ Гал, $T = 806$ с, $\omega = 1$ с⁻¹, $\xi_{п.ф} = 0,9$, погрешность составит лишь $7 \cdot 10^{-3}$ мГал.

ГС, работающий с малой постоянной времени, обеспечивает работоспособность системы даже при сравнительно большой угловой скорости разворота судна без принятия каких либо специальных мер. Работа системы при настройке на период Шулера требует принятия специальных мер, обеспечивающих работоспособность системы при наличии реальных угловых скоростей разворота судна. Разработана структура ГС с двухканальной системой коррекции, обеспечивающая практическую инвариантность системы при разворотах судна за счет преобразование сигналов акселерометров из подвижной системы координат в неподвижную систему координат, где реализован процесс интегрирования и демпфирования собственных колебаний гировертикали и далее обратного преобразования в подвижную систему координат для управления путем подачи сигналов на датчики момента поплавковых гироскопов. В результате исследований доказано, что погрешность стабилизации вертикали при разворотах судна на 180° с угловой скоростью разворота $0,01$ рад/с и погрешности определения курсового угла $0,5$ град не превышает $1,4$ угловых минут.

Увеличение скорости выставки к вертикали достигается за счет уменьшения собственной постоянной времени системы. Следующим шагом должна быть настройка системы на период Шулера. Исследованы процессы, возникающие в приборе при выставке к вертикали. Доказано, что переключение параметров и переход на больший период необходимо производить в момент времени, когда амплитуда переменной составляющей сигнала на выходе первого интегратора системы коррекции минимальна. Разработана структура и ее математическое описание, обеспечивающая быструю выставку вертикали в статике и на качке, которая позволяет автоматически осуществить переключение параметров в оптимальный момент времени без увеличения погрешности удержания вертикали, достигнутой в процессе быстрой выставки.

Разработано структурное решение построения ГС гравиметра с контурами параметрической коррекции сигнала первого интегратора системы интегральной

коррекции, которое обеспечивает инвариантность прибора к ускорениям судна и одновременно демпфирование собственных колебаний в автономном режиме. Разработано математическое и программное описание функционирования данной системы. Следствием инвариантности прибора к ускорениям судна является отсутствие погрешности гравиметрических измерений из-за наклонов и ускорений гиросtabilизированной платформы. На рис. 1 приведена функциональная схема одного канала системы. Сигнал с выхода акселерометра 1, пропорциональный ускорению движения судна по отношению к Земле, подается на вход интегратора 2, с выхода которого сигнал поступает на усилитель 3 и далее на датчик момента (ДМ) гироскопа 4, что обеспечивает удержание в горизонте стабилизируемой платформы (СП). Погрешности начальной выставки, возмущающие моменты в осях подвеса гироскопа и другие факторы приводят к возникновению незатухающих колебаний инерциальной вертикали относительно горизонта с периодом Шулера, что ухудшает точность стабилизации. Эти колебания измеряются акселерометром 1 в виде проекции ускорения силы тяжести и так же интегрируются интегратором 2. Сигнал с выхода интегратора 2 подается на вход полосового фильтра измерителя (ПФИ) 9.

Передаточная функция (ПФ) ПФИ 9 имеет вид

$$W_1(p) = K_2 T p / (T p + 1)^2, \quad (2)$$

где $T = 806$ с, K_2 – коэффициент передачи ПФИ.

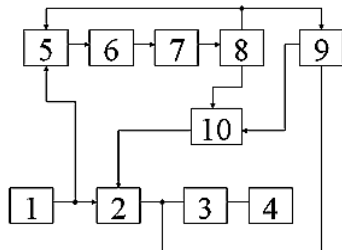


Рис. 1. Функциональная схема системы коррекции двухосной гировертикали

ПФИ при $K_2 = 2$ выделяет без искажения переменную составляющую сигнала интегратора 2 с частотой Шулера и эффективно сглаживает составляющие, имеющие частоты выше и ниже частоты Шулера. Сигнал на выходе ПФИ имеет нулевое отставание по фазе по отношению к выходному сигналу интегратора 2 на частоте Шулера. Сигнал с выхода акселерометра 1 подается на вход полосового фильтра наблюдателя (ПФН) 5, имеющего ПФ

$$W_2(p) = T p / (T p + 1)^2, \quad (3)$$

где $T = 806$ с. ПФН 5 выделяет переменную составляющую сигнала акселерометра 1 с частотой Шулера и эффективно сглаживает составляющие, имеющие частоты выше и ниже частоты Шулера. Сигнал на выходе ПФН 5 имеет нулевое отставание по фазе по отношению к выходному сигналу акселерометра 1 на частоте Шулера. Сигнал с ПФН 5 подается на вход компаратора 6. На выходе компаратора 6 положительным значениям выходного сигнала ПФН 5 соответствует постоянный положительный уровень напряжения, а отрицательным значениям выходного сигнала ПФН 5 соответствует постоянный отрицательный уровень напряжения. Сигнал с выхода компаратора поступает на вход фиксатора переходов 7, который выдает сигнал на вход схемы управления 8 в момент смены знака на выходе компаратора 6. По сигналу с выхода фиксатора переходов 7 схема управления 8 обеспечивает срабатывание

ключа 10. При этом выходной сигнал ПФИ поступает на второй вход интегратора 2 и из текущего значения интегратора 2 вычитается текущее значение выходного сигнала ПФИ 9. Далее схема управления 8 обеспечивает приведение ключа 10 в исходное состояние «разомкнут» и установку текущего значения на выходе ПФИ 9 равным нулю, а также установку текущего значения на выходе ПФН 5 равным нулю. При этом СП находится в горизонте, а на выходе интегратора 2 переменная составляющая с частотой Шулера оказывается скомпенсированной, что обеспечивает демпфирование собственных колебаний инерциальной вертикали. На рис.2 представлена зависимость угла отклонения СП по отношению к горизонту от времени. На рис. 3 представлена зависимость X_4 – величины выходного сигнала интегратора 2 (в единицах цифрового кода (ед.ц.к)) от времени. На рис. 4 представлена зависимость U_1 – величины выходного сигнала ПФИ 9 (в ед.ц.к) от времени, а на рис. 5 представлена зависимость U_2 – величины выходного сигнала ПФН 5 (в ед.ц.к) от времени. Моменты времени $t_1=22,9$ мин, $t_2=51$ мин, $t_3= 59,7$ мин, $t_4= 85,4$ мин соответствуют моментам смены знака на выходе компаратора 6 и параметрической коррекции сигнала интегратора 2. В момент времени $t_4=85,4$ мин амплитуда отклонения гиросtabilизированной площадки уменьшается уже в 30000 раз и составляет 0,00001 рад. Параметрическая коррекция сигнала интегратора 2 не нарушает условие инвариантности ГС по отношению к линейным ускорениям судна. Структурная схема двухканального индикаторного ГС с параметрической коррекцией показаний первого интегратора системы коррекции представлена на рис.6.

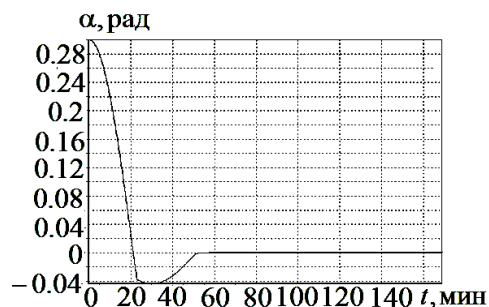


Рис.2. График погрешности стабилизации

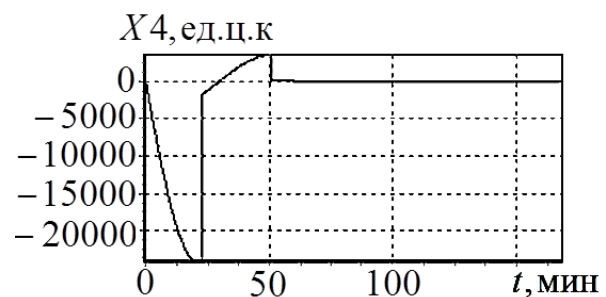


Рис.3. Выходной сигнал интегратора

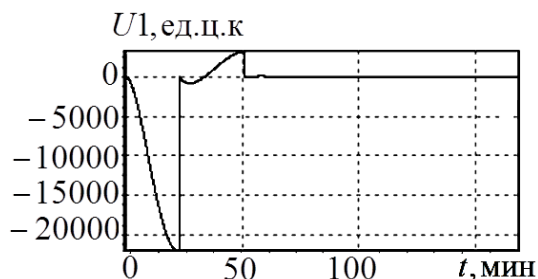


Рис. 4. Выходной сигнал ПФИ

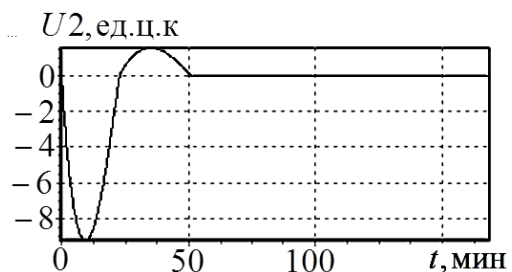


Рис.5. Выходной сигнал ПФН

Проведены исследования динамики контура стабилизации ГС с учетом процессов модуляции и демодуляции сигнала поплавкового интегрирующего гироскопа. Сформулированы требования к корректирующему фильтру контура стабилизации: обеспечение требуемых запасов устойчивости системы, эффективное подавление высокочастотных помех сигнала датчика угла (ДУ) гироскопа после демодуляции, обеспечение нулевой погрешности стабилизации

в установившемся режиме функционирования системы при действии постоянного возмущающего момента относительно оси стабилизации. В качестве корректирующего фильтра, удовлетворяющего вышеперечисленным требованиям, рассмотрен изодром, представляющий собой интегратор, с полосовым фильтром в прямой положительной связи, охватывающей интегратор. С целью добиться наилучших показателей подавления высокочастотных помех фильтром сигнала датчика угла (ДУ) гироскопа при заданных запасах устойчивости на частоте среза системы проведена оптимизация параметров корректирующего фильтра контура стабилизации ГС.

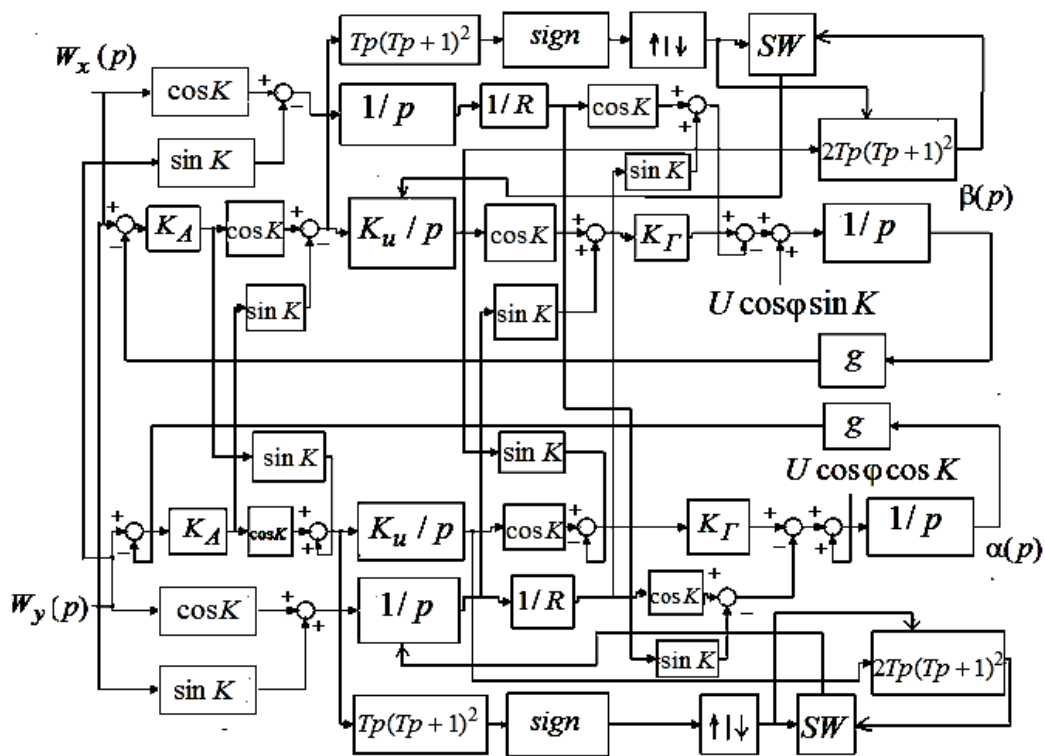


Рис.6. Структурная схема двухканального индикаторного ГС с параметрической коррекцией показаний первого интегратора системы коррекции: K – курсовой угол, φ – широта места, $\uparrow\downarrow$ – фиксатор переходов, SW – схема управления и ключевая схема, K_u – коэффициент передачи первого интегратора, $W_x(p), W_y(p)$ – линейные ускорения основания, R – радиус Земли, K_A – коэффициент передачи акселерометра, K_Γ – коэффициент передачи гироскопа во управляющем воздействии, U – угловая скорость вращения Земли, $\alpha(p), \beta(p)$ – погрешности стабилизации.

Имея систему зависимостей (4), можно однозначно определить все параметры фильтра, при которых требуемому запасу устойчивости по фазе θ соответствует минимальный коэффициент k передачи полосового фильтра.

$$\varphi = (\text{arctg}(\text{tg}\theta))/4, \quad k = 4/(\sin 4\varphi - 2\sin^2 2\varphi \cdot \text{tg}\theta), \quad T_0\omega = 1, \quad T\omega = \text{tg}\varphi, \quad (4)$$

здесь θ – запас устойчивости по фазе, создаваемый корректирующим фильтром, φ – промежуточный параметр, T_0 – постоянная времени интегратора, T – постоянная времени полосового фильтра, k – коэффициент передачи полосового фильтра. В итоге синтезирован контур стабилизации, обладающий следующими достоинствами: высокая динамическая точность (-130 дБ ÷ -133 дБ) в области

рабочих частот (1рад/с ÷ 0,8 рад/с), отсутствие статической погрешности, эффективное подавление высокочастотных помех сигнала датчика угла гироскопа после демодуляции при требуемых запасах устойчивости. Результаты, полученные при исследовании электропривода ГС, использованы также при создании электропривода трубопроводной арматуры.

Во второй главе разработаны и исследованы структуры построения и математические модели схем акселерометрической коррекции индикаторного ГС морского гравиметра с самонастройкой параметров. Сигнал с выхода датчиков ГС (двух акселерометров и ДУС, ось чувствительности которого перпендикулярна плоскости СП с гравиметром) подается на вход устройств измерения спектра, характеристики которых определяются интегральным преобразованием Фурье временного сигнала в его частотный спектр. В спектре определяются частоты качки (преобладающие частоты), где спектр имеет преобладающее значение амплитуды. В соответствии с полученными значениями частот качки управляющее устройство изменяет параметры дополнительных динамических звеньев контура коррекции таким образом, чтобы обеспечить фазовый сдвиг между горизонтальными ускорениями и отклонением платформы точно равным -270 град на преобладающих частотах качки. Предложены и исследованы различные структурные решения построения схем акселерометрической коррекции ГС с самонастройкой параметров (с дополнительным апериодическим звеном первого порядка, с применением комбинации апериодического и форсирующего звеньев первого порядка, с применением дополнительного интегро - дифференцирующего звена четвертого порядка с рекуррентной процедурой настройки его параметров), получены соответствующие критерии самонастройки и исследованы особенности функционирования системы.

На рис. 7 приведена структурная схема ГС морского гравиметра повышенной точности с самонастройкой параметров с применением дополнительного интегро - дифференцирующего звена четвертого порядка. В каждом канале системы коррекции применено дополнительное звено с ПФ

$$W_4(p) = \frac{(T_4p/l + 1)(T_5p + 1)(T_7p/l_2 + 1)(T_8p + 1)}{(T_4p + 1)(T_6p + 1)(T_7p + 1)(T_9p + 1)}, \quad (5)$$

где $T_4, l, T_5, T_6, T_7, l_2, T_8, T_9$ – параметры ПФ $W_4(p)$. ПФ одного канала ГС с предлагаемой системой коррекции имеет вид (K_0 – общий коэффициент передачи):

$$W(p) = \alpha(p)/W\eta(p) = W_p(p)/(1 + gW_p(p)), \quad (6)$$

$$W_p(p) = \frac{K_0(T_3p + 1)(T_4p/l + 1)(T_5p + 1)(T_7p/l_2 + 1)(T_8p + 1)}{(T_2^2 p^2 + 2\xi_2 T_2 p + 1)(T_4p + 1)(T_6p + 1)(T_7p + 1)(T_9p + 1)p^2} \quad (7)$$

Критерий самонастройки системы имеет вид (8-11). Предлагаемые схемы акселерометрической коррекции обеспечивают отсутствие погрешности $\langle \delta g_1 \rangle$ ($\langle \delta g_1 \rangle$ – среднее за период качки значение погрешности гравиметра из-за ускорений и наклонов СП) на преобладающих частотах качки, пренебрежимо малое значение погрешности $\langle \delta g_2 \rangle$ ($\langle \delta g_2 \rangle$ – среднее за период качки значение погрешности гравиметра, обусловленной наклонами СП), отсутствие погрешности по скорости, статической погрешности из-за постоянных

возмущающих моментов, действующих по оси прецессии гироскопа, и малое время переходного процесса.

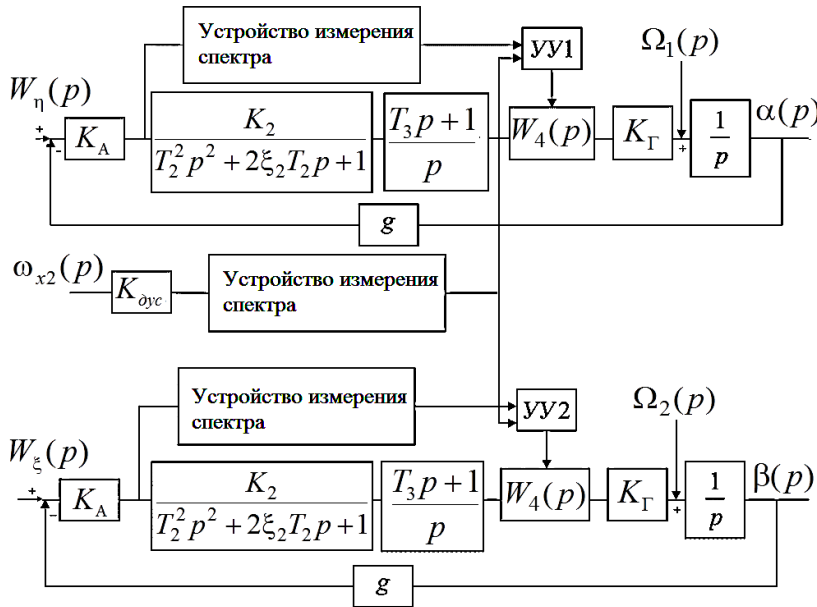


Рис.7. Структурная схема ГС:
 $\alpha(p)$, $\beta(p)$ – погрешности стабилизации, ω_{x2} – абсолютная угловая скорость СП относительно оси перпендикулярной ее плоскости, W_η, W_ξ – горизонтальные ускорения, $K_A, K_\Gamma, K_{\text{дус}}$ – коэффициенты передачи, акселерометра, гироскопа по управляющему воздействию, ДУС соответственно, g – ускорение силы тяжести, T_2, T_3, K_2, ξ_2 – параметры корректирующего устройства контура коррекции, $\Omega_1(p), \Omega_2(p)$ – угловые скорости системы отсчета.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta Q_1 = -90^\circ + \arctg(T_3 \omega_{K3}) - \\ - \arctg\left(\frac{2\xi_2 T_2 \omega_{K3}}{1 - (T_2 \omega_{K3})^2}\right), \\ l = \frac{1 + \sin|\Delta Q_1|}{1 - \sin|\Delta Q_1|}, \quad T_4 = \frac{1}{\omega_{K3}} \sqrt{l}. \end{array} \right. \quad (8)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta Q_2 = -90^\circ + \arctg(T_3 \omega_{K1}) - \\ - \arctg\left(\frac{2\xi_2 T_2 \omega_{K1}}{1 - (T_2 \omega_{K1})^2}\right) - \\ - \arctg(T_4 \omega_{K1}) + \arctg\left(\frac{T_4}{l} \omega_{K1}\right), \quad (9) \\ l_1 = \frac{1 + \sin|\Delta Q_2|}{1 - \sin|\Delta Q_2|}, \quad T_5 = \frac{1}{\omega_{K1}} \sqrt{l_1}, \quad T_6 = \frac{T_5}{l_1}. \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta Q_3 = -90^\circ + \arctg(T_3 \omega_{K3}) - \\ - \arctg\left(\frac{2\xi_2 T_2 \omega_{K3}}{1 - (T_2 \omega_{K3})^2}\right) - \arctg(T_4 \omega_{K3}) + \\ + \arctg\left(\frac{T_4}{l} \omega_{K3}\right) - \arctg(T_6 \omega_{K3}) + \\ + \arctg(T_5 \omega_{K3}), \quad l_2 = \frac{1 + \sin|\Delta Q_3|}{1 - \sin|\Delta Q_3|}, \\ T_7 = \frac{1}{\omega_{K1}} \sqrt{l_2}. \end{array} \right. \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta Q_4 = -90^\circ + \arctg(T_3 \omega_{K1}) - \\ - \arctg\left(\frac{2\xi_2 T_2 \omega_{K1}}{1 - (T_2 \omega_{K1})^2}\right) - \\ - \arctg(T_4 \omega_{K1}) + \arctg\left(\frac{T_4}{l} \omega_{K1}\right) - \\ - \arctg(T_6 \omega_{K1}) + \arctg(T_5 \omega_{K1}) - \\ - \arctg(T_7 \omega_{K1}) + \arctg\left(\frac{T_7}{l_2} \omega_{K1}\right), \\ l_3 = \frac{1 + \sin|\Delta Q_4|}{1 - \sin|\Delta Q_4|}, \quad T_8 = \frac{1}{\omega_{K1}} \sqrt{l_3}, \quad T_9 = \frac{T_8}{l_3}. \end{array} \right. \quad (11)$$

Предлагаемый подход, в случае применения системы акселерометрической коррекции с самонастройкой параметров и дополнительного интегро-дифференцирующего звена четвертого порядка, обеспечивает отсутствие систематических погрешностей гиросtabilизированного гравиметра от составляющих горизонтального

ускорения с различными значениями преобладающей частоты качки, обусловленных не только линейными ускорениями орбитального движения центра тяжести судна, бортовой качкой, килевой качкой, но и рысканием и наличием хода судна, рысканием при установке гравиметра на некотором расстоянии от центра тяжести судна в условиях нерегулярной качки судна. Обеспечены минимальные значения погрешности измерения $\langle \delta g_1 \rangle$ при изменении преобладающей частоты качки, в течении интервала времени, необходимого для самонастройки устройства системы коррекции и неточности при определении истинного значения преобладающей частоты качки. Разработан алгоритм цифрового управления ГС с самонастройкой параметров системы коррекции. Проведенный анализ динамики системы доказывает высокую эффективность применения акселерометрической коррекции с самонастройкой параметров с целью уменьшения систематической погрешности гравиметра из-за ускорений и наклонов основания. Приведены расчетные примеры, подтверждающие, что при использовании системы акселерометрической коррекции с самонастройкой параметров с применением дополнительного аperiodического звена первого порядка при нерегулярной качке, обусловленной орбитальным движением центра масс, бортовой и килевой качкой погрешность уменьшается в 3,5 раза по сравнению с системой акселерометрической коррекции без самонастройки параметров. В случае использования системы акселерометрической коррекции с самонастройкой параметров с применением комбинации аperiodического и форсирующего звеньев первого порядка при нерегулярной качке погрешность уменьшается в 4,43 раза по сравнению с системой акселерометрической коррекции без самонастройки параметров. Применение системы акселерометрической коррекции с самонастройкой параметров и дополнительным звеном четвертого порядка при нерегулярной качке уменьшает погрешность, обусловленную рысканием судна (кривая 2 рис.8) в 9,4 раза и уменьшает в 2,36 раза погрешность, обусловленную рысканием и наличием хода судна (кривая 2 рис.9) по сравнению с системой акселерометрической коррекции с применением комбинации аperiodического и форсирующего звеньев первого порядка в качестве дополнительного звена (кривые 1 на рис.8, рис.9).

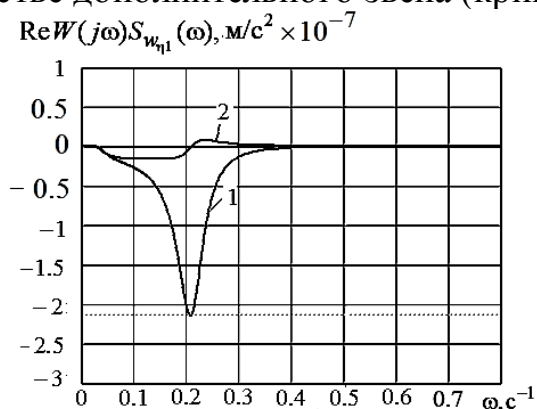


Рис.8. Погрешности гиросtabilизированного гравиметра: $S_{W_{\eta 1}}$ – спектральная плотность горизонтального ускорения, обусловленного рысканием судна

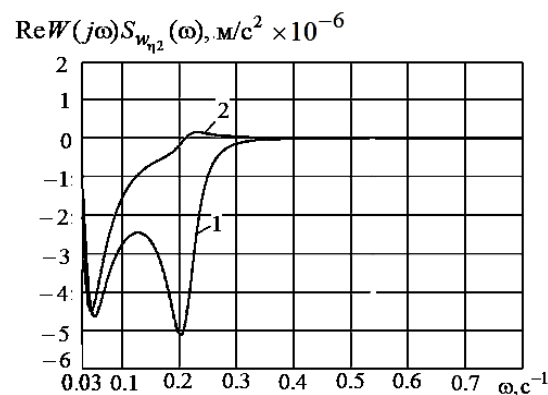


Рис.9. Погрешности гиросtabilизированного гравиметра: $S_{W_{\eta 2}}$ – спектральная плотность горизонтального ускорения, обусловленного рысканием и наличием хода судна

В третьей главе на основе метода комбинированного управления разработана структура построения ГС гравиметра с компенсацией возмущающих воздействий по каналам наружной и внутренней рамок ГС, позволяющая повысить точность ГС (рис.10).

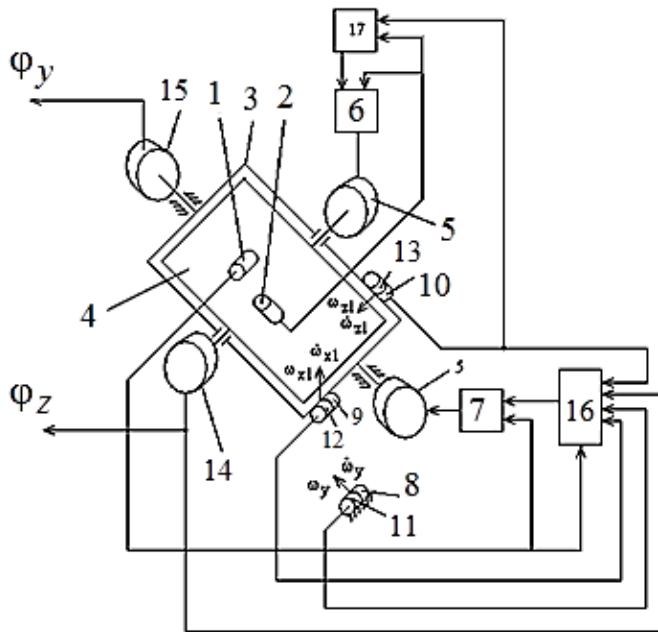


Рис.10. Функциональная схема ГС с комбинированным управлением: 1, 2 – гироскопы контуров стабилизации платформы, 3 – наружная рамка ГС, 4 – стабилизируемая платформа, 5 – исполнительные двигатели (датчики моментов), 6,7 – усилители, 8,9,10 – ДУС каналов компенсации возмущений, 11,12,13 – датчики углового ускорения (ДУУ) каналов компенсации возмущений, 14,15 – датчики углов, 16,17 – вычислители компенсирующих сигналов

Разработана математическая модель ГС с комбинированным управлением. ПФ канала компенсации составляющей момента сил вязкого трения $b_1\omega_y$:

$$W_1(p) = \frac{\Delta M_1(p)}{b_1\omega_y(p)} = 1 - \frac{K_{ds1}}{T_{ds1}p + 1} \left[\frac{K_{dys(y)}}{T_{dys}^2 p^2 + 2\xi_{dys} T_{dys} p + 1} + \frac{K_{dyy(y)p}}{T_{dyy}^2 p^2 + 2\xi_{dyy} T_{dyy} p + 1} \right] W_{kz3}(p). \quad (12)$$

ПФ канала компенсации составляющей момента сил вязкого трения $b_1 tg\phi_z \omega_{x1}$ имеет вид:

$$W_2(p) = \frac{\Delta M_2(p)}{b_1 tg\phi_z \omega_{x1}(p)} = 1 - \frac{K_{ds1}}{T_{ds1}p + 1} \left[\frac{K_{dys(x1)}}{T_{dys}^2 p^2 + 2\xi_{dys} T_{dys} p + 1} + \frac{K_{dyy(x1)p}}{T_{dyy}^2 p^2 + 2\xi_{dyy} T_{dyy} p + 1} \right] W_{kz4}(p). \quad (13)$$

ПФ канала компенсации составляющей момента сил вязкого трения $b_2\omega_{z1}$ имеет вид:

$$W_3(p) = \frac{\Delta M_3(p)}{b_2\omega_{z1}(p)} = 1 - \frac{K_{ds2}}{T_{ds2}p + 1} \left[\frac{K_{dys(z1)}}{T_{dys}^2 p^2 + 2\xi_{dys} T_{dys} p + 1} + \frac{K_{dyy(z1)p}}{T_{dyy}^2 p^2 + 2\xi_{dyy} T_{dyy} p + 1} \right] W_{kz6}(p). \quad (14)$$

ПФ канала компенсации инерционного возмущающего момента $(J_{y1} + J_{x2})tg\phi_z \dot{\omega}_{x1}$ имеет вид:

$$W_4(p) = \frac{\Delta M_4(p)}{(J_{y1} + J_{x2})tg\phi_z \dot{\omega}_{x1}(p)} = 1 - \frac{K_{ds1}}{T_{ds1}p + 1} \left[\frac{K_{dyy(x1)}}{T_{dyy}^2 p^2 + 2\xi_{dyy} T_{dyy} p + 1} \right] W_{kz5}(p). \quad (15)$$

В ПФ (12-15) проекции абсолютной угловой скорости основания на его главные оси обозначены $\omega_x, \omega_y, \omega_z$, где система координат $x_0 y_0 z_0$ жестко связанная с основанием. Положение осей СП с установленной на ней гравиметрической аппаратурой $x_2 y_2 z_2$ относительно $x_0 y_0 z_0$ задано углами ϕ_y, ϕ_z . $\omega_{x2}, \omega_{y2}, \omega_{z2}$ – проекции абсолютной угловой скорости платформы. С наружной

рамой ГС связаны оси координат $x_1 y_1 z_1$. b_1, b_2 – удельные демпфирующие моменты относительно осей наружной рамы и платформы соответственно, K_{dsi} – коэффициент передачи ДМ, T_{ds1}, T_{ds2} – электромагнитные постоянные времени ДМ; $W_{kz3}(p), W_{kz4}(p), W_{kz5}(p), W_{kz6}(p)$ – передаточные функции корректирующих звеньев каналов компенсации возмущающих воздействий, $K_{dyy(y)}, K_{dyy(x1)}, K_{dyy(z1)}, K_{dys(y)}, K_{dys(x1)}, K_{dys(z1)}$ – коэффициенты передачи дополнительных ДУУ и ДУС, оси чувствительности которых направлены вдоль осей oy, ox_1, oz_1 . T_{dys}, T_{dyy} – постоянные времени ДУС и ДУУ, ξ_{dyy}, ξ_{dys} – коэффициенты демпфирования собственных колебаний ДУУ и ДУС. ΔM_i – возмущающий момент после компенсации.

Разработаны и исследованы различные структурные решения построения каналов компенсации возмущающих воздействий. Полученные в работе соотношения позволяют рассчитать параметры каналов компенсации возмущающих воздействий, при которых обеспечивается лучшее качество работы ГС. Применение ДУУ и фазопередающих корректирующих фильтров позволяет компенсировать собственную инерционность датчиков каналов компенсации и инерционность исполнительного двигателя и приводит к увеличению степени компенсации возмущающих воздействий. Соотношения для выбора параметров в случае, если в канале компенсации используются ДУС и ДУУ приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Соотношения для выбора параметров каналов компенсации

№	Вид корректирующего фильтра канала компенсации	Соотношения для выбора параметров	Численные значения параметров	Подавление возмущения на частоте $\omega = 1c^{-1}$, дБ.
	1	2	3	4
1	$W_{kz}(p) = 1$	$K_{ds}K_{dys} = 1,$ $K_{ds}K_{dyy} = T_{ds} + 2\xi T_{dys},$ $T_{dyy} = \frac{T_{dys}^2(4\xi^2 - 1)}{2\xi(T_{ds} + 2\xi T_{dys})}.$	$T_{ds} = 0,01c;$ $T_{dys} = 0,008c;$ $T_{dyy} = 0,00265c;$ $\xi = 0,785c;$ $K_{dyy} = 0,02256.$	-136
2	$W_{kz}(p) = \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1}$	$K_{ds}K_{dys} = 1, T_1 = T_{ds},$ $K_{ds}K_{dyy} = T_{ds} + 2\xi T_{dys} + T_2 - T_1,$ $T_{dys} = \frac{8\xi^3 T_{dyy} + (T_{dyy}/2\xi) - 4\xi T_{dyy}}{8\xi^3 - 4\xi},$ $T_2 = \frac{4\xi^2 T_{dys}(T_{dys} - T_{dyy}) - T_{dys}^2}{2\xi T_{dyy}}.$	$T_{ds} = 0,01c;$ $T_{dys} = 0,008073c;$ $T_{dyy} = 0,00265c;$ $T_1 = 0,01c;$ $T_2 = 0,0081c;$ $\xi = 0,745;$ $K_{dyy} = 0,020139$	-167

Разработана структура построения ГС гравиметра с компенсацией возмущающих воздействий по каналам наружной и внутренней рамок ГС с самонастройкой параметров и ее математическая модель (16).

$$\begin{aligned}
& (J_y \cos^2 \varphi_z + J_x \sin^2 \varphi_z + J_{y1}) \dot{\omega}_{y2} / \cos \varphi_z + b_1 \omega_{y2} / \cos \varphi_z - M_{ds1} = \\
& = -(J_x - J_z) \omega_{z2} \omega_{x2} \cos \varphi_z - (J_z - J_y) \omega_{z2} \omega_{y2} \sin \varphi_z + M_{bn1} + b_1 \omega_y - \\
& - b_1 (\omega_x \cos \varphi_y \operatorname{tg} \varphi_z - \omega_z \sin \varphi_y \operatorname{tg} \varphi_z) - J_{y1} (\omega_{z2} - \omega_{z1}) (\omega_x \cos \varphi_y - \omega_z \sin \varphi_y) - \\
& - (J_{x1} - J_{z1}) \omega_{x1} \omega_{z1} - (J_x + J_{y1}) \dot{\omega}_{x1} \operatorname{tg} \varphi_z - (J_x + J_{y1}) (\omega_{z2} - \omega_{z1}) (\omega_{x2} \operatorname{tg} \varphi_z \sin \varphi_z + \\
& + \omega_{y2} \sin \varphi_z); \\
& J_z \dot{\omega}_{z2} + b_2 \omega_{z2} - M_{ds2} = M_{bn2} - b_2 (-\omega_z \cos \varphi_y - \omega_x \sin \varphi_y) - (J_y - J_x) \omega_{x2} \omega_{y2}, \\
& J_\alpha (\ddot{\delta} + \dot{\omega}_{z2}) + b_\alpha \dot{\delta} - H \delta \omega_{x2} - H \omega_{y2} = M_{p\delta}, \\
& J_\beta (\ddot{\gamma} + \dot{\omega}_{y2}) + b_\beta \dot{\gamma} + H \omega_{z2} + H \gamma \omega_{x2} = M_{p\gamma}, \quad \alpha = \int_0 \omega_{y2} dt, \quad \beta = \int_0 \omega_{z2} dt, \\
(16) \quad & U_1(p) = K_\delta \delta(p), \quad U_2(p) = K_\gamma \gamma(p), \\
& U_3(p) = U_1(p) K_{ym1} W_{kz1}(p), \quad U_4(p) = U_2(p) K_{ym2} W_{kz2}(p), \\
& U_5(p) = \omega_y(p) \frac{K_{dys}(y)}{T_{dys}^2 p^2 + 2\xi T_{dys} p + 1}, \quad U_6(p) = \omega_y(p) \left(\frac{K_{dyy}(y) p}{T_{dyy}^2 p^2 + 2\xi T_{dyy} p + 1} \right), \\
& U_7(p) = \frac{K_6 U_6(p) U_1(p)}{p}, \quad U_8(p) = (U_5(p) + U_6(p)) W_{kz3}(p) K_3 U_7(p), \quad K_3 = b_1, \\
& U_9(p) = \omega_{x1}(p) \left(\frac{K_{dyy}(x1) p}{T_{dyy}^2 p^2 + 2\xi T_{dyy} p + 1} \right), \quad U_{10}(p) = \omega_{x1}(p) \left(\frac{K_{dys}(x1)}{T_{dys}^2 p^2 + 2\xi T_{dys} p + 1} \right), \\
& U_{11}(p) = (U_9(p) + U_{10}(p)) W_{kz4}(p) K_4 U_7(p), \quad K_4 = b_1 \operatorname{tg} \varphi_z, \\
& U_{12}(p) = \omega_{x1}(p) \left(\frac{K_{dyy}(x1) p}{T_{dyy}^2 p^2 + 2\xi T_{dyy} p + 1} \right) W_{kz5}(p) K_5, \quad K_5 = (J_x + J_{y1}) \operatorname{tg} \varphi_z, \\
& U_{13}(p) = \omega_{z1}(p) \left(\frac{K_{dyy}(z1) p}{T_{dyy}^2 p^2 + 2\xi T_{dyy} p + 1} \right), \quad U_{14}(p) = \omega_{z1}(p) \left(\frac{K_{dys}(z1)}{T_{dys}^2 p^2 + 2\xi T_{dys} p + 1} \right), \\
& U_{15}(p) = \frac{K_7 U_{14}(p) U_2(p)}{p}, \quad U_{16}(p) = (U_{13}(p) + U_{14}(p)) W_{kz6}(p) K_8 U_{15}(p), \\
& K_8 = b_2, \quad U_{17}(p) = U_3(p) + U_8(p) - U_{11}(p) - U_{12}(p), \quad U_{18}(p) = U_4(p) + U_{16}(p), \\
& T_{ds1} M_{ds1}(p) p + M_{ds1}(p) = K_{ds1} U_{17}(p), \quad T_{ds2} M_{ds2}(p) p + M_{ds2}(p) = K_{ds2} U_{18}(p), \\
& \omega_{z1} = \omega_z \cos \varphi_y + \omega_x \sin \varphi_y, \quad \omega_{x1} = \omega_x \cos \varphi_y - \omega_z \sin \varphi_y, \quad \omega_{y1} = \omega_{oy} + \dot{\varphi}_y, \\
& \omega_{x2} = \omega_x \frac{\cos \varphi_y}{\cos \varphi_z} - \omega_z \frac{\sin \varphi_y}{\cos \varphi_z} + \omega_{y2} \frac{\sin \varphi_z}{\cos \varphi_z}, \quad \dot{\varphi}_z = \omega_{z2} - \omega_z \cos \varphi_y - \omega_x \sin \varphi_y, \\
& \dot{\varphi}_y = \omega_{y2} / \cos \varphi_z + \omega_x \cos \varphi_y \operatorname{tg} \varphi_z - \omega_y - \omega_z \sin \varphi_y \operatorname{tg} \varphi_z, \\
& \omega_{y2} = \omega_{y1} \cos \varphi_z - \omega_{x1} \sin \varphi_z, \quad \omega_{z2} = \omega_{z1} + \dot{\varphi}_z.
\end{aligned}$$

В уравнениях (16) дополнительно обозначены M_{ds1}, M_{ds2} – моменты, развиваемые ДМ наружной рамки и платформы соответственно, M_{bn1}, M_{bn2} – возмущающие моменты относительно осей наружной рамки и платформы соответственно, J_x, J_y, J_z – моменты инерции платформы относительно соответствующих осей; J_{x1}, J_{y1}, J_{z1} – моменты инерции наружной рамки относительно соответствующих осей; K_{ymi} – коэффициент передачи усилителя

контура стабилизации, $W_{kz1}(p), W_{kz2}(p)$ – ПФ корректирующих звеньев контуров стабилизации, p – оператор Лапласа, H – кинетический момент поплавкового интегрирующего гироскопа (ПИГ)), J_α, J_β – моменты инерции ПИГ каналов стабилизации наружной рамки и платформы соответственно относительно осей прецессии, δ, γ – углы поворота ротора ПИГ каналов стабилизации наружной рамки и платформы относительно осей прецессии, K_δ, K_γ – коэффициенты передачи ДУ ПИГ, $M_{p\delta}, M_{p\gamma}$ – возмущающие моменты по осям прецессии ПИГ, $K_3, K_4, K_5, K_6, K_7, K_8$ – коэффициенты передачи каналов компенсации возмущений. С целью компенсации составляющей момента от вязкого трения $b_1\omega_y$ ДУС измеряет угловую скорость ω_y . При изменении температуры окружающей среды изменяется величина удельного демпфирующего момента b_1 , что обуславливает нарушение равенства возмущающего и компенсирующего моментов и появление погрешности стабилизации от момента $\Delta b_1\omega_y$ (Δb_1 – разность между величиной удельного демпфирующего момента и величиной постоянного коэффициента передачи K_3 канала компенсации). Погрешность стабилизации от момента $\Delta b_1\omega_y$ имеет частоту, равную частоте изменения угловой скорости основания ω_y и сдвиг по фазе по отношению к угловой скорости основания ω_y стремящийся к нулю. После перемножения сигнала ДУС и сигнала гироскопа, в котором присутствует гармоника, соответствующая погрешности стабилизации от момента $\Delta b_1\omega_y$, на выходе умножителя содержится постоянная составляющая сигнала и переменная составляющая сигнала. Интегратор с коэффициентом передачи K_6 эффективно сглаживает переменную составляющую сигнала умножителя и осуществляет интегрирование постоянной составляющей сигнала умножителя. В установившемся режиме величина выходного сигнала интегратора равна отношению величины коэффициента вязкого трения к коэффициенту передачи K_3 канала компенсации. На выходе второго умножителя (сигнал U_8) формируется скорректированный компенсирующий сигнал, амплитуда которого вновь равна амплитуде момента от вязкого трения, что приводит к повышению точности двухосного ГС.

Предложенный способ самонастройки параметров каналов компенсации возмущающих моментов, в условиях изменяющегося комплекса влияющих факторов, позволяет в 180 раз уменьшить погрешность стабилизации от моментов сил вязкого трения в установившемся режиме. Время самонастройки параметров канала компенсации не превышает 2с.

Теоретические положения и способы повышения точности, описанные в главах 1-4 диссертации, применены при создании гравиметрического комплекса ГРИН-2000 (рис.11, 12) (разработка Тульского государственного университета и НПО «Южморгеология» г. Геленджик), который сертифицирован Государственным комитетом Российской Федерации по стандартизации и метрологии (сертификат соответствия № 0000938 от 15.12.2005 г.). Комплекс «ГРИН» применен при проведении научных исследований и производственных работ в акватории Мирового океана и переходных зон на научно -

исследовательском судне «17 съезд профсоюзов» водоизмещением 5000 т; при проведении научных и производственных работ в районе Штокмановского, Приразломного месторождений в Баренцевом море. В период с 2000 по 2005 г. комплексом ГРИН-2000 выполнено более 10000 км. гравиметрической съемки на акваториях Азовского, Черного и Каспийского морей, причем более 2000 км съемки выполнено в условиях предельного мелководья с использованием плоскодонных судов, имеющих осадку 0.7-1м.



Рис.11. Гравиметрический комплекс «ГРИН-2000»



Рис.12. Гравиметрический комплекс «ГРИН-2000М»

В четвертой главе в процессе решения задачи синтеза предложена эффективная структура построения УПТ акселерометра компенсационного типа, исследованы особенности функционирования прибора с учетом процессов модуляции и демодуляции сигнала ДУ акселерометра, разработана методика проектирования УПТ акселерометра и получены аналитические выражения для определения параметров элементов УПТ, обеспечивающих устойчивый режим работы прибора, заданное значение динамической погрешности, а также заданную величину пульсаций на выходе акселерометра. Структурная схема динамической системы представлена на рис. 13, а эквивалентная расчетная схема на рис. 14.

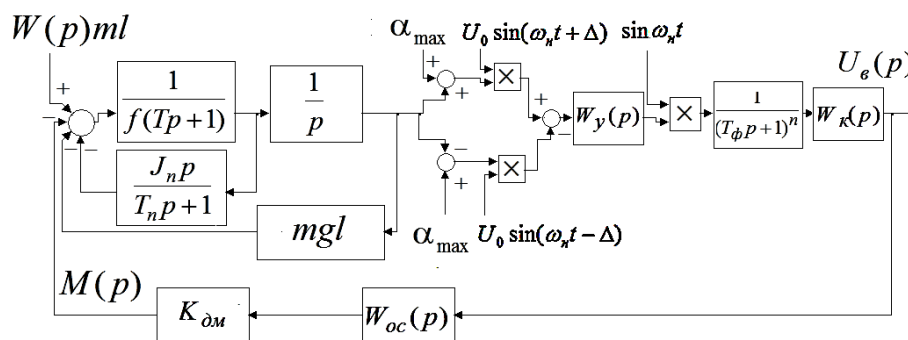


Рис. 13. Структурная схема маятникового поплавкового акселерометра компенсационного типа: $W_y(p)$ – ПФ усилителя переменного тока, $W_k(p)$ – ПФ корректирующего устройства прямой цепи УПТ, $W_{oc}(p)$ – ПФ корректирующего устройства цепи обратной связи УПТ, $K_{ом}$ – коэффициент передачи ДМ, U_e – выходное напряжение, α_{max} – максимальный угол поворота ротора индуктивного ДУ относительно нулевого положения, ω_n – круговая частота модуляции, U_0 – амплитудное значение модулирующего сигнала, Δ – фазовый сдвиг, обусловленный технологией изготовления индуктивного ДУ, J – момент инерции маятника, f – удельный коэффициент вязкого трения, f_n – величина приведенной силы вязкого трения, $W(p)$ – ускорение, действующее в горизонтальной плоскости, m – масса маятника, l – смещение центра тяжести маятника относительно оси подвеса, g – ускорение силы тяжести, $T=J/f$, J_n – приведенный момент инерции жидкости, $T_n = J_n / f_n$

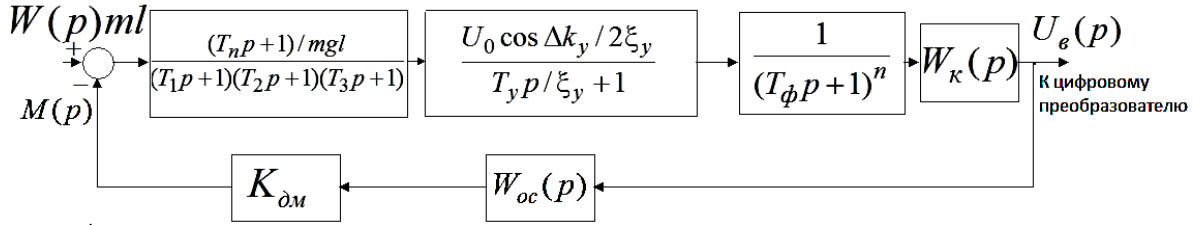


Рис.14. Эквивалентная расчетная структурная схема маятникового поплавкового акселерометра компенсационного типа: T_1, T_2, T_3 – постоянные времени ЧЭ, ξ_y, T_y, k_y – параметры усилителя переменного тока (эквивалентная постоянная времени усилителя по огибающей $T_y = T_y / \xi_y$, а коэффициент передачи $K_y = k_y / 2\xi_y$), T_ϕ – постоянная времени сглаживающего фильтра

Проектирование УПТ осуществляется в следующей последовательности. Примем в качестве ПФ прямой цепи выражение вида $W_\kappa(p) = K_n(T_3p + 1)/p$, а в качестве ПФ цепи обратной связи выражение вида $W_{oc}(p) = K_{oc}(T_{oc}p + 1)/(T_{oc}p/m + 1)$. Постоянные времени ЧЭ T_1, T_2, T_n, T_3 известны. Зададимся требуемой величиной динамической погрешности $\gamma_\partial = 0,0001 = 0,01\%$ измерения ускорения, изменяющегося по гармоническому закону с частотой $\omega = 1 \text{ рад/с}$, тогда справедливо выражение

$$\frac{K_0(T_n^2\omega^2 + 1)\sqrt{(T_{oc}\omega)^2 + 1}}{\omega(T_\phi^2\omega^2 + 1)\sqrt{(T_1\omega)^2 + 1}\sqrt{(T_2\omega)^2 + 1}\sqrt{(T_3\omega)^2 + 1}\sqrt{(T_y\omega)^2 + 1}\sqrt{(T_{oc}\omega/m)^2 + 1}} = \frac{1}{\gamma_\partial}$$

или общий коэффициент передачи $K_0 \approx (\omega\sqrt{(T_1\omega)^2 + 1})/\gamma_\partial = 11926$.

Распределим полученное значение между составляющими общего коэффициента усиления следующим образом $K_y = 1000$, $mgI = 0,001 \text{ кгм}^2/\text{с}^2$, $U_0 = 10 \text{ В}$, $\Delta = 1 \text{ град}$, $K_n = 12$, $K_{\Delta m} K_{oc} = 0,0001 \text{ Нм/В}$. Зададимся требуемой величиной относительного уровня пульсаций на выходе системы $\gamma_n = 0,0001 = 0,01\%$ и определим значение постоянной времени

сглаживающего фильтра исходя из соотношения $\frac{K_n\sqrt{(T_n 2\omega_n)^2 + 1}}{2\omega_n((T_\phi 2\omega_n)^2 + 1)} = \gamma_n$ или

$$T_\phi \approx \sqrt{\frac{K_n T_n}{(2\omega_n)^2 \gamma_n}} = 0,00037 \text{ с}. \quad \text{Найдем частоту среза системы}$$

$$\frac{K_0(T_n^2\omega_{\phi\max}^2 + 1)\sqrt{m}}{\omega_{\phi\max}\sqrt{(T_1\omega_{\phi\max})^2 + 1}\sqrt{(T_2\omega_{\phi\max})^2 + 1}\sqrt{(T_3\omega_{\phi\max})^2 + 1}} = 1, \quad \text{или}$$

$$\omega_{\phi\max}^2 \approx \frac{K_0 T_n^2 \sqrt{m}}{T_1 T_2 T_3}. \quad \text{Если принять } m = 6, \text{ то } \omega_{\phi\max} = \sqrt{\frac{K_0 T_n^2 \sqrt{m}}{T_1 T_2 T_3}} = 204 \text{ с}^{-1}.$$

Найдем постоянную времени корректирующего устройства обратной связи $T_{oc} = \sqrt{m}/\omega_{\phi\max} = 0,012 \text{ с}$. Запас устойчивости системы по фазе равен

$$\theta = 180^\circ - \arctg(T_1\omega_{\phi\max}) - \arctg(T_2\omega_{\phi\max}) - \arctg(T_3\omega_{\phi\max}) - \arctg(T_y\omega_{\phi\max}) - \\ - 2\arctg(T_\phi\omega_{\phi\max}) - 90^\circ + 2\arctg(T_n\omega_{\phi\max}) + \arcsin\frac{m-1}{m+1} = 41 \text{ град}.$$

В процессе решения задачи синтеза предложена эффективная структура построения УПТ ДУС на основе поплавкового интегрирующего гироскопа, исследованы особенности функционирования прибора с учетом процессов модуляции и демодуляции сигнала ДУ гироскопа, разработана методика проектирования УПТ ДУС, получены аналитические выражения для определения параметров элементов УПТ, обеспечивающих устойчивый режим работы прибора, заданное значение динамической погрешности, а также заданную величину пульсаций на выходе ДУС. Приведен пример синтеза УПТ ДУС. В результате синтеза обеспечены характеристики ДУС: полоса пропускания 76с^{-1} , относительная погрешность отслеживания сигнала на частоте $\omega = 0,42\text{с}^{-1}$ $\gamma_\delta = 0,003\%$, относительная пульсация на выходе интегратора $\gamma_n = 0,003\%$, время переходного процесса, как реакция на ступенчатое воздействие $0,08\text{с}$.

В работе разработана схема аналого - цифрового преобразователя (АЦП) с компенсацией апертурной погрешности. Проведен сравнительный анализ динамических характеристик АЦП ЧЭ гироскопических систем с непосредственным преобразованием аналоговой информации в цифровой код и с компенсацией апертурной погрешности. Показано, что преобразователь с компенсацией апертурной погрешности существенно расширяет допустимую полосу пропускания измеряемого сигнала при заданной точности преобразования. Коэффициент эффективности АЦП с компенсацией апертурной погрешности

$$k_\gamma = \frac{f_T}{(2^d - 1)} \sqrt[3]{\frac{6}{2^d - 1}} : \frac{2f_T}{(2^d - 1)^2} = (2^d - 1) \sqrt[3]{\frac{6}{2^d - 1}} / 2$$

показывает во сколько раз увеличивается допустимая полоса пропускания измеряемого сигнала при неизменной точности преобразования по сравнению с АЦП с непосредственным преобразованием в цифровой код, если f_T – тактовая частота, а d – разрядность АЦП. Например, 16 разрядный АЦП с компенсацией апертурной погрешности имеет коэффициент эффективности 929.

Разработана структура построения УПТ ММА прямого преобразования, обеспечивающая существенное уменьшение динамической погрешности за счет введения в УПТ кроме последовательно включенных повторителя, фазового детектора и фильтра низких частот (ФНЧ) второго порядка дополнительно последовательно включенных интегро - дифференцирующего фильтра первого порядка $W_{\phi 2}(p) = (T_3 p + 1)/(T_4 p + 1)$ и ФНЧ первого порядка $W_{\phi 3}(p) = 1/(T_5 p + 1)$. ФНЧ первого порядка обеспечивает одинаковый уровень пульсации выходного сигнала предлагаемого ММА по сравнению с ММА при традиционном способе его построения. Использование интегро-дифференцирующего фильтра первого порядка и ФНЧ первого порядка позволяет реализовать ММА прямого преобразования с ПФ вида :

$$\frac{U_{\text{вых}}(p)}{W(p)} = \frac{mU_0 k_y k_{\phi 1} (T_3 p + 1)}{h_0 (T_{\phi 1}^2 p^2 + 2\xi_{\phi 1} T_{\phi 1} p + 1)(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_4 p + 1)(T_5 p + 1)}, \quad (17)$$

где k_y – коэффициент передачи ЧЭ, h_0 – зазор между центральной подвижной пластиной и неподвижной пластиной дифференциального конденсатора ММА при нулевом значении измеряемого ускорения W , U_0, ω_e – опорное напряжение и частота источника питания, $k_{\phi 1}, T_{\phi 1}, \xi_{\phi 1}$ – параметры ФНЧ второго порядка, T_1, T_2 -

постоянные времени ЧЭ ММА, $U_{вых}$ – выходной сигнал ММА. ПФ относительной погрешности такого ММА имеет вид:

$$\frac{\Delta W(p)}{W(p)} = 1 - \frac{(T_3 p + 1)}{(T_{\phi 1}^2 p^2 + 2\xi_{\phi 1} T_{\phi 1} p + 1)(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)(T_4 p + 1)(T_5 p + 1)}, \quad (18)$$

где $\Delta W(p)$ – динамическая погрешность акселерометра. Постоянная времени T_4 интегро-дифференцирующего фильтра первого порядка выбирается равной постоянной времени $T_{\phi 1}$ ФНЧ второго порядка. Постоянная времени T_3 интегро-дифференцирующего фильтра первого порядка и постоянная времени T_5 ФНЧ первого порядка определяются путем решения системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} T_3 &= T_1 + T_2 + T_{\phi 1}(1 + 2\xi) + T_5, \\ \sqrt{1 + \omega_c^2 T_3^2} \cdot \sqrt{(1 + \omega_c^2 T_4^2)(1 + \omega_c^2 T_5^2)} &= 1, \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

при этом передаточная функция относительной погрешности (18) имеет нуль второго порядка в точке $p=0$, что соответствует астатизму второго порядка, а следовательно наклону логарифмической амплитудно-частотной характеристики в области частот ниже частоты среза -40дБ/дек. Использование предложенного технического решения позволяет, например, при гармоническом изменении ускорения с амплитудой 1м/с^2 и частотой $\omega = 6,28\text{с}^{-1}$ обеспечить амплитуду погрешности $0,00875\text{м/с}^2$ предлагаемого ММА в установившемся режиме, что в 13,5 раз меньше по сравнению с амплитудой погрешности аналога в установившемся режиме, которая составляет $0,1174\text{м/с}^2$.

Разработана математическая модель, описывающая зависимость нулевого сигнала ММГ от температуры. На основании экспериментальных данных для двух экземпляров ММГ ADXRS610 определены числовые значения параметров математической модели. Алгоритмическая компенсация изменения нулевого сигнала ММГ1 и ММГ2 от температуры с учетом неоднозначности функциональной зависимости изменения нулевого сигнала от температуры (погрешность тепловой модели) в диапазоне изменения температуры от -40°C до $+50^\circ\text{C}$ позволяет уменьшить составляющую собственного ухода ГС, обусловленную изменением нулевого сигнала от температуры, в 30 раз для ММГ1 и в 12 раз для ММГ2. Для получения лучших точностных характеристик при создании ГС на ММГ невысокой стоимости необходимы испытания серии ММГ и выявление экземпляров ММГ с наименьшей величиной неоднозначности функциональной зависимости изменения нулевого сигнала от температуры с целью их последующего применения в системе стабилизации.

Предложены и исследованы два перспективных структурных решения построения контуров регулирования и обработки информации волновых твердотельных гироскопов (ВТГ). Установлены соотношения для выбора параметров звеньев этих контуров, обеспечивающих увеличение динамической точности ВТГ. В первом случае предложенная структура построения ВТГ позволяет существенно уменьшить динамические погрешности, обусловленные различием масштабного коэффициента ВТГ при различных частотах измеряемой угловой скорости в полосе пропускания. Во втором случае (рис.15), предложенной структуре построения ВТГ соответствует ПФ относительной погрешности измерения, которая имеет нуль второго порядка в точке $p = 0$, что соответствует астатизму второго порядка

$$\frac{\omega(p) - \omega_{izm}(p)}{\omega(p)} = \frac{p^2 \left(\frac{1}{k_{wtg2} k_{wtg3}} p + \frac{1}{T_{wtg} k_{wtg2}^2 k_{wtg3}} + \frac{k_{wtg1}^2}{k_{wtg2}^2} + \frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} \right)}{\frac{1}{k_{wtg2} k_{wtg3}} p^3 + \left(\frac{1}{T_{wtg} k_{wtg2}^2 k_{wtg3}} + \frac{k_{wtg1}^2}{k_{wtg2}^2} \right) p^2 + 2 \frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} p + 1},$$

а абсолютная погрешность измерения в полосе частот 10 Гц не превышает 0,1 %.

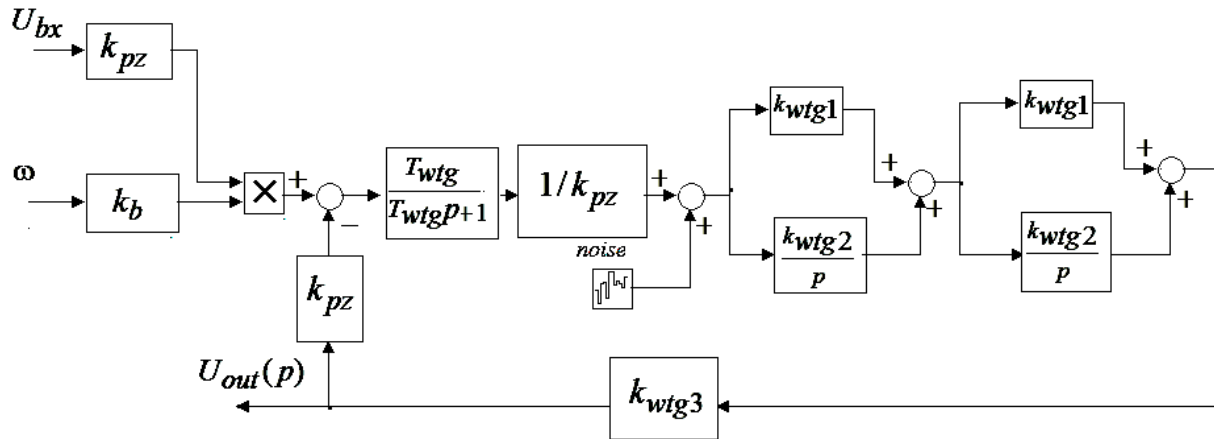


Рис.15. Структурная схема ВТГ: k_b – коэффициент Брайана; U_{bx} – входное напряжение; $k_{wtg1}, k_{wtg2}, k_{wtg3}$ – коэффициенты передачи в контурах регулирования ВТГ; T_{wtg} – постоянная времени ЧЭ ВТГ; k_{pz} – коэффициент передачи пьезоэлементов; ω – измеряемая угловая скорость; U_{out} – напряжение на выходе ВТГ после коррекции, T_{kz} – постоянная времени корректирующего звена.

В пятой главе показано, что ММА и ММГ позволяют создавать на их основе ИИиУС, обладающие малыми массой и габаритами, невысокой стоимостью при решении задач наблюдения за состоянием тепловых, газовых и электрических магистральных сетей, исследовании морских течений, поиска рыбных косяков, спасения людей при катастрофах, транспортных работах, контроля дорожной обстановки и массовых мероприятий, обнаружения пожаров, выполнения геодезических и картографических исследований, обследования труднодоступной для человека местности, применения в составе охранных систем, в системах технического зрения автомобильного транспорта и решении многих других народнохозяйственных задач. Однако в этом случае необходима разработка специальных структурных, аппаратных и программных решений, обеспечивающих надлежащую точность системы. Разработана структура построения многофункциональной ИИиУС на основе двухосной индикаторной гировертикали на ММЧЭ с возможностью одновременного выполнения функции выработки информации об углах крена и тангажа транспортного средства и функции стабилизации и управления положением ПН в пространстве. Нелинейная математическая модель миниатюрной многофункциональной двухосной ГВ на ММЧЭ, позволяющая исследовать особенности функционирования системы имеет вид (20). K_{ymi} – коэффициент передачи усилителя контура стабилизации, K_{dyc} – коэффициент передачи ДУС, K_{yi} – коэффициент передачи усилителя контура коррекции, W_1, W_2 – проекции

линейного ускорения транспортного средства на ось чувствительности ММА каналов наружной рамки и платформы соответственно, U_1, U_2 – выходное напряжение ММГ, U_3, U_4 – выходное напряжение ММА после усиления. K_{ai} – коэффициент передачи ММА, U_{a0i} – смещение нуля ММА, $K_{\partial yi}$ – коэффициент передачи ДУ по осям ГС. Остальные обозначения приведены в описании системы уравнений (18). Следует отметить, что в системе уравнений (20), если на вход подан управляющий сигнал U_{y1} , то управляющий сигнал $U_{y3} = 0$ и наоборот, если на вход подан сигнал U_{y3} , то управляющий сигнал $U_{y1} = 0$.

$$\left\{ \begin{array}{l} (J_y \cos^2 \varphi_z + J_x \sin^2 \varphi_z + J_{y1}) \dot{\omega}_{y2} / \cos \varphi_z + b_1 \omega_{y2} / \cos \varphi_z - M_{ds1} = M_{bn1} + b_1 \omega_{oy} - \\ - (J_x - J_z) \omega_{z2} \omega_{x2} \cos \varphi_z - (J_z - J_y) \omega_{z2} \omega_{y2} \sin \varphi_z - b_1 (\omega_{ox} \cos \varphi_y \operatorname{tg} \varphi_z - \\ - \omega_{oz} \sin \varphi_y \operatorname{tg} \varphi_z) - J_{y1} (\omega_{z2} - \omega_{z1}) (\omega_{ox} \cos \varphi_y - \omega_{oz} \sin \varphi_y) - (J_{x1} - J_{z1}) \omega_{x1} \omega_{z1} - \\ - (J_x + J_{y1}) \dot{\omega}_{x1} \operatorname{tg} \varphi_z - (J_x + J_{y1}) (\omega_{z2} - \omega_{z1}) (\omega_{x2} \operatorname{tg} \varphi_z \sin \varphi_z + \omega_{y2} \sin \varphi_z), \\ J_z \dot{\omega}_{z2} + b_2 \omega_{z2} - M_{ds2} = M_{bn2} - b_2 (-\omega_{oz} \cos \varphi_y - \omega_{ox} \sin \varphi_y) - (J_y - J_x) \omega_{y2} \omega_{x2}, \\ \alpha = \int_0^t \omega_{y2} dt, \quad \beta = \int_0^t \omega_{z2} dt, \quad U_1 = K_{dys1} \omega_{y2} + U_{dys01}, \quad U_2 = K_{dys2} \omega_{z2} + U_{dys02}, \\ U_5 = U_1 + U_3 + U_{y1}, \quad U_6 = U_2 + U_4 + U_{y3}, \\ U_3 = (K_{a1}(W_1 + g \sin \alpha) + U_{a01}) K_{y1}, \quad U_4 = (K_{a2}(W_2 + g \sin \beta) + U_{a02}) K_{y2}, \\ T_{ds1} M_{ds1}(p) p + M_{ds1}(p) = K_{ds1} K_{ym1} U_5(p) W_{kz1}(p), \\ T_{ds2} M_{ds2}(p) p + M_{ds2}(p) = K_{ds2} K_{ym2} U_6(p) W_{kz2}(p), \\ \omega_{z1} = \omega_{oz} \cos \varphi_y + \omega_{ox} \sin \varphi_y, \quad \omega_{x1} = \omega_{ox} \cos \varphi_y - \omega_{oz} \sin \varphi_y, \quad \omega_{y1} = \omega_{oy} + \dot{\varphi}_y, \\ \omega_{x2} = \omega_{ox} \cos \varphi_y / \cos \varphi_z - \omega_{oz} \sin \varphi_y / \cos \varphi_z + \omega_{y2} \sin \varphi_z / \cos \varphi_z, \\ \dot{\varphi}_z = \omega_{z2} - \omega_{oz} \cos \varphi_y - \omega_{ox} \sin \varphi_y, \quad \omega_{y2} = \omega_{y1} \cos \varphi_z - \omega_{x1} \sin \varphi_z, \\ \dot{\varphi}_y = \omega_{y2} / \cos \varphi_z + \omega_{ox} \cos \varphi_y \operatorname{tg} \varphi_z - \omega_{oy} - \omega_{oz} \sin \varphi_y \operatorname{tg} \varphi_z, \quad \omega_{z2} = \omega_{z1} + \dot{\varphi}_z \end{array} \right. \quad (20)$$

В работе показано, что формирование сигнала α_m , необходимого для компенсации изменения сигнала ДУ по оси наружной рамки ГС, обусловленного поворотом платформы в пространстве под действием управляющего сигнала U_{y1} , осуществляется на основании системы уравнений (21).

$$\left\{ \begin{array}{l} (J_{ym} \cos^2 \varphi_z + J_{xm} \sin^2 \varphi_z + J_{y1m}) \dot{\omega}_{y2m} / \cos \varphi_z + b_{1m} \omega_{y2m} / \cos \varphi_z - M_{ds1m} = 0, \\ \alpha_m = \int_0^t \omega_{y2m} dt, \quad T_{ds1m} M_{ds1m}(p) p + M_{ds1m}(p) = K_{ds1m} K_{ym1m} U_{5m}(p) W_{kz1m}(p), \\ U_{5m} = U_{1m} + U_{3m} + U_{y1}, \quad U_{1m} = K_{dys1m} \omega_{y2m}, \quad U_{3m} = K_{y1m} K_{a1m} g_m \sin \alpha_m, \quad U_{y3} = 0. \end{array} \right. \quad (21)$$

Тогда сигнал с выхода ДУ по оси наружной рамки представляется в виде $U_\gamma = K_{\partial y1} \varphi_y - K_{\partial y1m} \alpha_m$. Сигнал β_m , необходимый для компенсации изменения сигнала ДУ по оси платформы ГС, обусловленного поворотом платформы в пространстве под действием управляющего сигнала U_{y3} , формируется на основании системы уравнений (22).

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{z2m} \dot{\omega}_{z2m} + b_{2m} \omega_{z2m} - M_{ds2m} = 0, \quad \beta_m = \int_0^t \omega_{z2m} dt, \quad U_{2m} = K_{dys2m} \omega_{z2m}, \\ U_{6m} = U_{2m} + U_{4m} + U_{y3}, \quad U_{4m} = K_{y2m} K_{a2m} g_m \sin \beta_m, \quad U_{y1} = 0, \\ T_{ds2m} M_{ds2m}(p) p + M_{ds2m}(p) = K_{ds2m} K_{ym2m} U_{6m}(p) W_{kz2m}(p). \end{array} \right. \quad (22)$$

Тогда сигнал с выхода ДУ по оси платформы запишется $U_g = K_{\partial y2} \varphi_z - K_{\partial y2m} \beta_m$. Индекс "м" в обозначениях параметров систем (21, 22) означает, что данные параметры являются параметрами модели, реализуемой вычислительными устройствами каналов наружной рамки и платформы. Параметры модели устанавливаются равными соответствующим параметрам многофункциональной двухосной ГВ на ММЧЭ. Проведена линеаризация математической модели и составлены ПФ системы. На основе полученных ПФ методом ЛАФЧХ проведен анализ устойчивости системы и синтез УПТ каналов стабилизации, коррекции и управления.

Разработана имитационная модель функционирования миниатюрной ГВ, позволяющая при моделировании работы системы получить численное решение сложной нелинейной системы дифференциальных уравнений, включающей как уравнения движения стабилизированной платформы, ММЧЭ с учетом шума в выходных сигналах, так и дифференциальных уравнений кинематики движения карданова подвеса при воздействии на систему комплекса возмущающих и управляющих воздействий.

Проведено исследование влияния шума в выходных сигналах ММГ и ММА на величину погрешности стабилизации ГВ. Получены соотношения для расчета СКО погрешности стабилизации, обусловленной белым шумом со случайным блужданием ARW в выходном сигнале ММ ДУС

$\sigma_{\alpha MМГ} = K_{dys1} ARW \sqrt{\cos \varphi_{z0} / 2gK_{a1} K_{y1} K_{dys1}}$ и СКО погрешности стабилизации, обусловленной белым шумом со случайным блужданием VRW в выходном сигнале ММА $\sigma_{\alpha MМА} = K_{a1} VRW \sqrt{\cos \varphi_{z0} K_{y1} / 2gK_{a1} K_{dys1}}$. СКО погрешности стабилизации, обусловленной шумами ММГ и ММА определяется зависимостью

$$\sigma_{\alpha MМГ, MМА} = \sqrt{ARW^2 \left(\frac{K_{dys1}^2 \cos \varphi_{z0}}{2gK_{a1} K_{y1} K_{dys1}} \right) + VRW^2 \left(\frac{K_{a1}^2 \cos \varphi_{z0} K_{y1}}{2gK_{a1} K_{dys1}} \right)}. \quad \text{Пусть}$$

$ARW = 0,0024 \text{ } ^\circ / \sqrt{c}$, $VRW = 0,001 \text{ м/с}^2 / \sqrt{c}$, тогда при $\varphi_{z0} = 0^\circ$ $\sigma_{\alpha MМГ} = 0,0031 \text{ } ^\circ$, $\sigma_{\alpha MМА} = 0,0004 \text{ } ^\circ$, $\sigma_{\alpha MМГ, MМА} = 0,0031 \text{ } ^\circ$.

Исследована динамика ГВ на ММЧЭ на подвижном основании. Итоговая погрешность стабилизации по каналам наружной рамки и платформы от воздействия моментов сил вязкого и сухого трения, инерционных моментов, моментов тяжения токоподводов, линейных ускорений качки основания, случайных составляющих в выходных сигналах ММГ и ММА в расчетном примере не превышает $\pm 2,9 \text{ угл. мин}$ (рис.16).

Разработан способ формирования управляющего сигнала, обеспечивающий увеличение быстродействия ГВ в режиме управления. Способ позволяет осуществить поворот платформы на угол $0,5 \text{ рад}$ за $0,35 \text{ с}$ при

собственной постоянной времени ГВ по контуру коррекции 3,4 с.

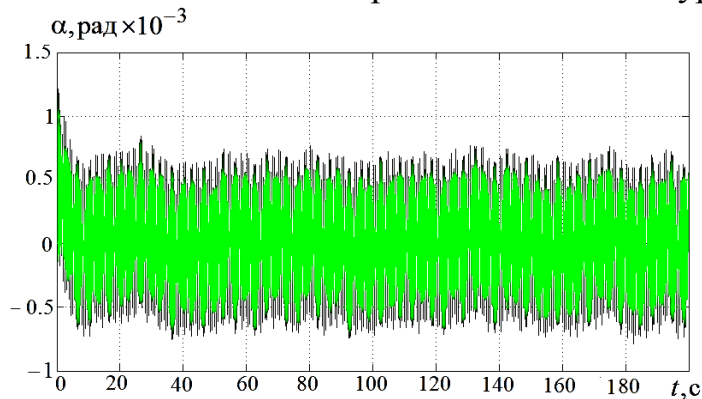


Рис.16. Суммарная погрешность стабилизации

Формирование управляющих сигналов $U_{y1}(t)$, $U_{y3}(t)$ производится в

соответствии с выражениями:

- при отклонении платформы по оси наружной рамки на угол β_{np}

$U_{y1}(t) = 0$; $U_{y3}(t) = U_1 = const$; если $\beta_m(t) = \beta_{np}$, то $U_{y1}(t) = U_2 = const$, $U_1 > U_2$;

- при возврате платформы к горизонтальному положению из положения β_{np}

$U_{y1}(t) = 0$; $U_{y3}(t) = -U_1 = const$; если $\beta_m(t) = 0$, то $U_{y3}(t) = 0$;

- при отклонении платформы по оси наружной рамки на угол $-\beta_{np}$

$U_{y1}(t) = 0$; $U_{y3}(t) = -U_1 = const$; если $\beta_m(t) = -\beta_{np}$, то $U_{y1}(t) = -U_2 = const$, $-U_2 > -U_1$;

- при возврате платформы к горизонтальному положению из положения $-\beta_{np}$

$U_{y1}(t) = 0$; $U_{y3}(t) = U_1 = const$; если $\beta_m(t) = 0$, то $U_{y3}(t) = 0$.

здесь β_{np} – программируемый угол поворота платформы с ПН по каналу платформы. Диаграмма управляющего сигнала представлена на рис.17. В начальный момент времени обеспечивается форсирование процесса управления путем подачи управляющего сигнала высокого уровня (например, 0,5В), а при достижении заданного угла переход к низкому уровню управляющего сигнала (например, 0,05В), обеспечивающего удержание заданного угла поворота (рис.18). Аналогично формируются сигналы управления по каналу наружной рамки.

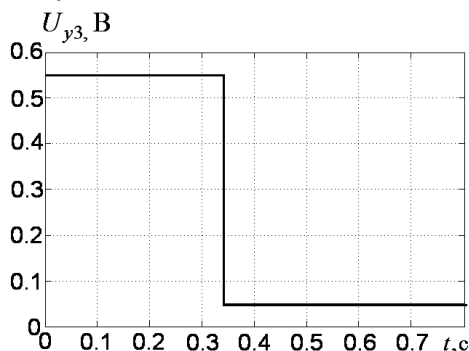


Рис.17. Управляющий сигнал

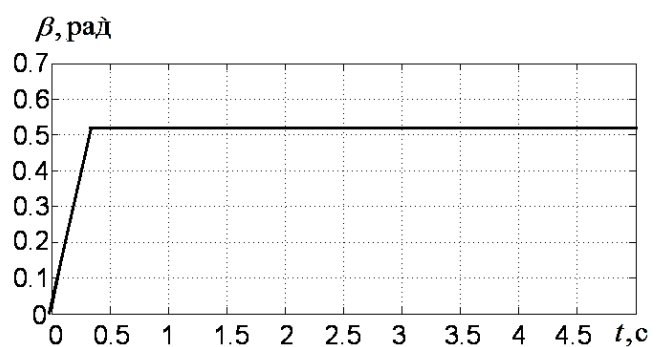


Рис.18. Программируемый поворот платформы

Проведена оценка влияния нестабильности параметров ГВ по отношению к соответствующим параметрам вычислительных устройств на точность выдачи информации о пространственном положении транспортного средства. Выявлено, что наиболее жесткие требования предъявляются к величине коэффициента передачи по контуру коррекции. При нестабильности этого параметра в 1% указанная погрешность не превышает 18 угл. мин в совмещенном режиме

поворота платформы на угол 0,5 рад и выдачи информации о пространственном положении основания.

В диссертации разработаны структурные решения построения УПТ контуров системы коррекции, обеспечивающие повышение точности функционирования ГВ на ММЧЭ. Показано, что для уменьшения влияния шума ММГ на точность стабилизации необходимо увеличить коэффициент усиления по контуру коррекции, однако это приводит к увеличению составляющей погрешности от воздействия линейных ускорений основания. Решить эту задачу удастся при реализации ПФ ГВ в виде фильтра Баттерворта третьего порядка (рис.19). В работе получены аналитические выражения (23) для выбора параметров корректирующего устройства, обеспечивающие реализацию ПФ ГВ в виде фильтра Баттерворта третьего порядка. При этом удастся увеличить коэффициент усиления по контуру коррекции (уменьшив погрешность стабилизации, обусловленную шумом ММГ) и обеспечить эффективное уменьшение влияния линейных ускорений транспортного средства на погрешность стабилизации ГВ (на частоте 2Гц в 15 раз) за счет того, что наклон ЛАЧХ ПФ ГВ с замкнутым контуром коррекции выше частоты среза обеспечен равным -60дБ/дек.

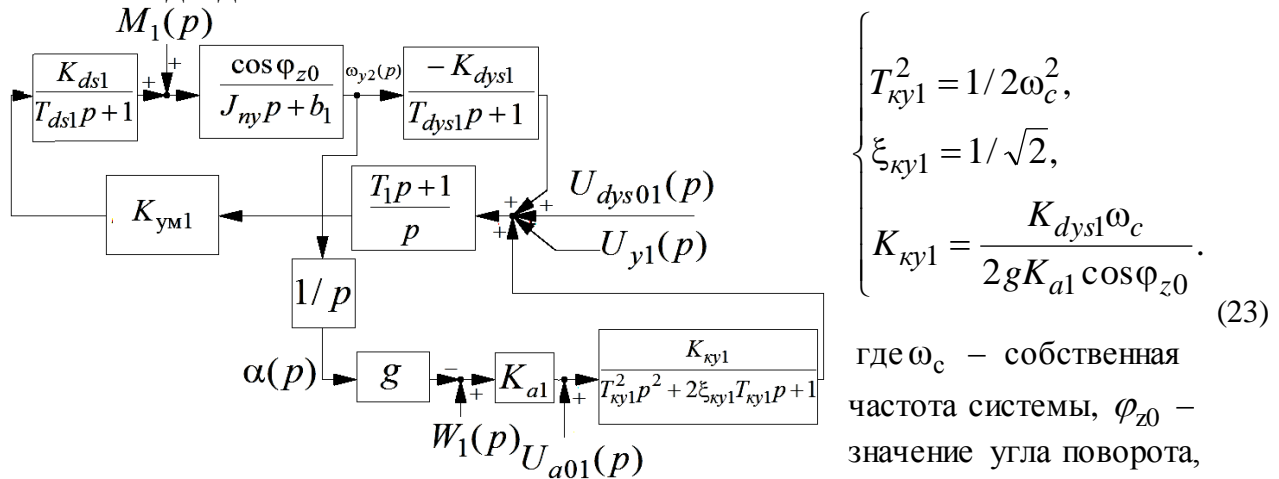


Рис.19. Структурная схема ГВ, имеющей передаточную функцию фильтра Баттерворта третьего порядка

где ω_c – собственная частота системы, φ_{z0} – значение угла поворота, относительно которого проведена линеаризация уравнений

Соотношения для расчета СКО погрешности стабилизации, обусловленной белым шумом со случайным блужданием ARW в выходном сигнале ММ ДУС в этом случае имеет вид

$$\sigma_{\alpha_{ММГ}} = ARW \cos \varphi_{z0} K_{dys1} \times$$

$$\times \sqrt{\frac{(4T_{кы1}^2 \xi^2 - 2T_{кы1}^2) T_{кы1}^2 K_{dys1} g K_{a1} K_{y1} \cos \varphi_{z0} - T_{кы1}^4 K_{dys1} g K_{a1} K_{y1} \cos \varphi_{z0} - T_{кы1}^2 K_{dys1} 2\xi T_{кы1} K_{dys1}}{2T_{кы1}^2 K_{dys1} g K_{a1} K_{y1} \cos \varphi_{z0} (T_{кы1}^2 K_{dys1} g K_{a1} K_{y1} \cos \varphi_{z0} - 2\xi T_{кы1} K_{dys1}^2)}}$$

СКО погрешности стабилизации, обусловленной белым шумом со случайным блужданием VRW в выходном сигнале ММА

$$\sigma_{\alpha_{ММА}} = VRW \cos \varphi_{z0} K_{y1} \sqrt{\frac{T_{кы1}^2 K_{dys1} 2\xi T_{кы1} K_{dys1}}{2T_{кы1}^2 K_{dys1} g K_{a1} K_{y1} \cos \varphi_{z0} (2\xi T_{кы1} K_{dys1}^2 - T_{кы1}^2 K_{dys1} g K_{a1} K_{y1} \cos \varphi_{z0})}}$$

СКО погрешности стабилизации, обусловленной шумами ММГ и ММА определяется зависимостью $\sigma_{\alpha_{ММГ,ММА}} = \sqrt{\sigma_{\alpha_{ММА}}^2 + \sigma_{\alpha_{ММГ}}^2}$.

Пусть $ARW = 0,0024^0 / \sqrt{c}$, $VRW = 0,001m / c^2 / \sqrt{c}$, тогда при $\varphi_{z0} = 0^0$, $\sigma_{\alpha_{ММГ}} = 0,002584^0$, $\sigma_{\alpha_{ММА}} = 0,0011^0$, $\sigma_{\alpha_{ММГ,ММА}} = 0,0028^0$.

Итоговая погрешность стабилизации за счет реализации предложенного структурного решения, по сравнению с пропорциональным законом управления в контуре коррекции, уменьшена в 4,2 раза (рис.20). Время программного разворота платформы увеличивается до 4 с.

Предложено структурное решение построения ГВ с корректирующим устройством в контуре коррекции в виде комбинации колебательного и изодромного звеньев. Данное структурное решение обеспечивает уменьшение влияния линейных ускорений транспортного средства на погрешность стабилизации ГВ за счет того, что наклон ЛАЧХ передаточной функции ГВ, как отношение погрешности стабилизации к линейным ускорениям основания выше частоты среза обеспечен равным -60дБ/дек. Кроме того, обеспечен астатизм первого порядка в ПФ (24), связывающей шум ММГ и погрешность стабилизации ГВ.

$$\frac{\alpha(p)}{U_{dys01}(p)} = \frac{\frac{1}{gK_{a1}K_{кy1}} p(T_{кy1}^2 p^2 + 2\xi_{кy1} T_{кy1} p + 1)}{\frac{T_{кy1}^2 K_{dys1}}{gK_{a1} \cos \varphi_{z0} K_{кy1}} p^4 + \frac{2\xi_{кy1} T_{кy1} K_{dys1}}{gK_{a1} \cos \varphi_{z0} K_{кy1}} p^3 + \frac{K_{dys1}}{gK_{a1} \cos \varphi_{z0} K_{кy1}} p^2 + T_{кy3} p + 1}. \quad (24)$$

При этом минимизируется влияние низкочастотных составляющих шума и составляющей шума ММГ «случайное блуждание нуля» на погрешность стабилизации ГВ. Итоговая погрешность стабилизации по сравнению с исходной системой уменьшается в 4 раза и не превышает $\pm 0,71$ угл. мин. Время программного разворота на заданный угол заметно увеличивается (до 10,2 с), поэтому предложенную структуру целесообразно использовать при реализации функции получения информации об углах крена и тангажа и функции стабилизации ПН в заданном неизменном направлении.

Разработаны способы повышения точности стабилизации. При формировании УПТ контура стабилизации предложено последовательно с традиционно используемым изодромным звеном устанавливать дополнительное корректирующее интегро-дифференцирующее звено, что позволяет уменьшить погрешность стабилизации. В приведенном расчетном примере погрешность стабилизации уменьшена в два раза.

При формировании УПТ контура стабилизации предложено последовательно с изодромным звеном и интегро-дифференцирующим звеном устанавливать дополнительное изодромное звено. При этом погрешность стабилизации предлагаемого индикаторного ГС в установившемся режиме стремится к нулю, а в переходном процессе, как реакция в контуре стабилизации на единичное ступенчатое воздействие, уменьшена еще в 1,4 раза.

Применение на первом этапе обработки данных сигналов ММ ДУС процедуры медианного фильтра с целью устранения из потока входного сигнала ЧЭ шумовых импульсов позволяет увеличить точность калибровки сигналов ММ ДУС, а следовательно, уменьшить собственный уход ГВ при разомкнутом контуре коррекции.

Приведено описание макета двухосной ГВ на ММЧЭ. В качестве центрального процессорного устройства использован микроконтроллер АТМega8. Для увеличения точности оцифровки сигналов ММЧЭ в макете применен внешний 16 разрядный АЦП последовательного приближения AD7680. Общий вид макетного образца представлен на рис. 21. Приведены результаты статических и динамических испытаний макета ГВ на ММЧЭ. Амплитуда погрешности стабилизации на качке определялась при помощи автоколлиматора и составила 1 угл. мин при амплитуде качки основания 4 град и частоте качки 1-2 Гц. Подтвержден штатный режим функционирования ГВ в режиме управления. Результаты испытаний подтверждают достоверность теоретических положений диссертации.

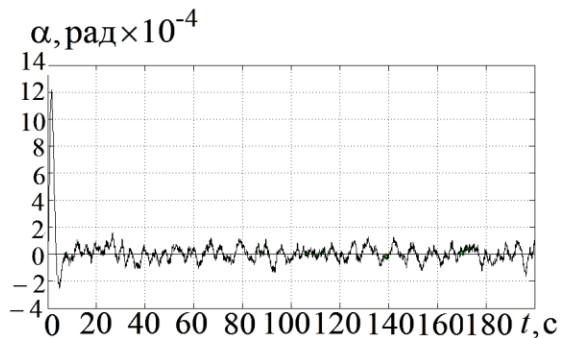


Рис.20. Погрешность стабилизации



Рис. 21. ГВ на ММЧЭ

В шестой главе показано, что задача повышения точности ИИиУС может быть решена путем использования в качестве ЧЭ ГС ДНГ, который при сравнительно малых массе и габаритах имеет лучшие точностные характеристики по сравнению с трехстепенными астатическими гироскопами с внешним кардановым подвесом, гироскопами с сферическим шарикоподшипниковым подвесом, ММ ДУС. Разработана математическая модель двухосного индикаторного ГС на ДНГ, которая представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений, включающую дифференциальные уравнения движения ПН, дифференциальные уравнения функционирования ДНГ, дифференциальные уравнения функционирования УПТ контуров управления, дифференциальные уравнения кинематики движения элементов карданова подвеса. Рассмотрены особенности математического описания ДНГ с учетом вариативности вида передаточной функции ДНГ на низких частотах при изменении условий функционирования. Разработана структурная схема построения УПТ каналов стабилизации, обеспечивающая расширение полосы пропускания, увеличение динамической точности, шумоподавление, инвариантность к временной нестабильности ряда параметров ДНГ. УПТ каналов стабилизации содержит корректирующие звенья с передаточной функцией

$$W_{kz}(p) = \frac{k_{y1}(T_{k31}p + 1)(T_{k32}p + 1)(T_{k34}^2p^2 + a_1p + 1)(T_{k36}^2p^2 + a_3p + 1)(T_{k38}^2p^2 + a_5p + 1)}{T_{k3}p(T_{k33}p + 1)(T_{k35}^2p^2 + a_2p + 1)(T_{k37}^2p^2 + a_4p + 1)(T_{k39}^2p^2 + a_6p + 1)}$$

Разработана имитационная модель ГС на ДНГ, функционирующего при трехкомпонентной качке основания, с учетом перекрестных связей между каналами и переменных углов поворота рам карданова подвеса.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты, полученные в диссертационной работе.

В приложении приведены акты внедрения и использования результатов исследования, сертификат соответствия.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В диссертационном исследовании разработаны и теоретически обоснованы способы повышения точности ИИиУС на основе ГС.

1. Разработана структура построения и математическое описание двухосного индикаторного ГС морского гравиметра повышенной точности с системой коррекции, настроенной на период Шулера с автономным демпфированием собственных колебаний, обеспечивающей инвариантность системы к линейным ускорениям (с точностью до малой величины ε) не только при прямолинейном движении, но и при циркуляции судна. При этом средняя интегральная величина погрешности из-за ускорений и наклонов основания равна 0,007 мГал на частоте качки 1рад/с при амплитуде возмущающего ускорения 100 Гал, а погрешность стабилизации вертикали при циркуляции не превышает 1,4 угловых минуты, если курсовой угол определен с погрешностью не более 0,5 град и 14,4 угловых секунды, если курсовой угол определен с погрешностью не более 0,05 град.

2. Разработана структура построения и математическое описание двухосного индикаторного ГС морского гравиметра повышенной точности с параметрической коррекцией сигнала первого интегратора системы интегральной коррекции, которая обеспечивает инвариантность прибора к ускорениям судна и одновременно демпфирование собственных колебаний в автономном режиме. Следствием инвариантности прибора к ускорением судна является отсутствие погрешности гравиметрических измерений из-за наклонов и ускорений гиростабилизированной платформы.

3. Разработаны структуры построения адаптивных структурных схем акселерометрической коррекции ГС морского гравиметра повышенной точности и их математическое описание. Разработаны критерии самонастройки параметров адаптивных схем акселерометрической коррекции ГС морского гравиметра. При использовании системы акселерометрической коррекции с самонастройкой параметров с применением дополнительного апериодического звена первого порядка при нерегулярной качке, обусловленной орбитальным движением центра масс, бортовой и килевой качкой погрешность уменьшается в 3,5 раза по сравнению с системой акселерометрической коррекции без самонастройки параметров. В случае использования системы акселерометрической коррекции с самонастройкой параметров с применением комбинации апериодического и форсирующего звеньев первого порядка в качестве дополнительного звена при нерегулярной качке погрешность уменьшается в 4,43 раза по сравнению с системой акселерометрической коррекции без самонастройки параметров. Применение системы акселерометрической коррекции с самонастройкой параметров и дополнительным звеном четвертого порядка при нерегулярной качке уменьшает погрешность, обусловленную рысканием судна в 9,4 раза и уменьшает в 2,36 раза погрешность, обусловленную рысканием и наличием хода судна по сравнению с системой акселерометрической коррекции с применением комбинации апериодического и форсирующего звеньев первого порядка в качестве дополнительного звена.

4. Разработана структура построения и математическая модель двухосного индикаторного ГС гравиметрического комплекса с комбинированным управлением, включающая математическое описание каналов компенсации возмущающих воздействий и контуров самонастройки параметров каналов компенсации возмущающих воздействий для повышения точности системы стабилизации гравиметрического комплекса. Предложены и исследованы различные структурные решения построения каналов компенсации возмущающих воздействий, получены соотношения для выбора параметров каналов компенсации, обеспечивающих наилучшее качество работы. Самонастройка параметров каналов компенсации возмущающих моментов, в условиях изменяющегося комплекса влияющих факторов, позволяет в 180 раз уменьшить погрешность стабилизации от моментов сил вязкого трения в установившемся режиме. Время самонастройки параметров канала компенсации не превышает 2 с.

5. Разработаны структурные решения и проектировочные зависимости построения УПТ ЧЭ ГС ИИиУС, обеспечивающие повышенную динамическую точность этих ЧЭ. Применение АЦП с компенсацией апертурной погрешности преобразования при неизменной точности преобразования позволяет расширить допустимую полосу пропускания измеряемого сигнала. Например, 16 разрядный АЦП с компенсацией апертурной погрешности при неизменной точности преобразования позволяет расширить допустимую полосу пропускания сигнала в 929 по сравнению с АЦП с непосредственным преобразованием.

6. Разработана структура построения, математическое описание и способы повышения точности многофункциональной ИИиУС на основе двухосной ГВ на ММЧЭ, обеспечивающей функции стабилизации и управления ПН пространстве и выработку параметров ориентации транспортного средства в пространстве. Погрешность стабилизации ГВ не превышает $\pm 0,69$ угл. мин.

7. Разработан способ повышения точности и математическая модель двухосного индикаторного ГС на ДНГ. Погрешность стабилизации не превышает $\pm 0,0045$ град при частоте качки основания 2 Гц. Имитационные модели ГС ИИиУС позволяют исследовать функционирование конструкций ГС с отличающимися значениями характеристик моментов инерции, массы, габаритов полезной нагрузки и элементов карданова подвеса, изменять характеристики ПФ двигателей стабилизации и ЧЭ в зависимости от конкретной модели, примененной в конструкции, изменять вид и параметры корректирующих звеньев и элементов УПТ контуров управления, исследовать функционирование ГС при различных режимах качки основания, оценить влияние шума ЧЭ ГС на точность стабилизации, оценить «зашумленность» УПТ ГС, проводить анализ величины составляющих возмущений, действующих на ГС в процессе эксплуатации с учетом переменных значений углов поворота рам карданова подвеса, проводить анализ влияния возмущений на выходные характеристики системы, проводить анализ составляющих погрешностей функционирования, сократить затраты при проектировании ГС ИИиУС. В дальнейшем разработка способов повышения точности ИИиУС на основе ГС может быть связана с построением многокаскадных гироскопических ГС.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи библиографических и реферативных баз данных Web of Science и Scopus

1. Alaluev R.V., Ivanov Yu.V., **Malyutin D.M.**, Raspopov V.Ya., Dmitriev V.A., Ermilov S.P., Ermilova G.A. High-precision algorithmic compensation of temperature instability of accelerometer's scaling factor // Automation and Remote Control. 2011. T. 72. № 4. С. 853-860.
 2. **Malyutin, D.M.**, Malyutina, M.D. Information-measuring and control system of unmanned aerial vehicles based on high-accuracy micromechanical sensitive elements // Russian Aeronautics . 2014, 57(2), pp. 162–168.
 3. **Malyutin D.M.**, Ivanov Yu.V., Raspopov V.Ya., Gryazin D.G. Orientation system of a waverider buoy on mems accelerometers // В сборнике: 23rd Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2016 - Proceedings. 23. 2016. С. 52-56.
 4. **Малютин Д.М.** Система стабилизации полезной нагрузки на динамически настраиваемом гироскопе // Приборы и методы измерений. 2016. Т. 7. № 1. С. 32-40.
 5. **Malyutin D.M.** Gyroscopic stabilization system on micromechanical sensing elements. В сборнике: 2017 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2017 - Proceedings. 24. 2017. С. 7995642.
 6. **Malyutin D.M.** Miniature gyroscopic orientation system for unmanned aerial vehicle. В сборнике: 25th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2018. Proceedings. 2018. С. 1-4.
 7. **Malyutin D.M.**, Korolyev M.N. Gyroscopic system based on wave solidv-state gyros // В сборнике: 27th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2020 - Proceedings. 27. 2020. С.9133841.
 8. **Малютин Д.М.** Структурные решения, обеспечивающие увеличение динамической точности волнового твердотельного гироскопа // Приборы и методы измерений. 2021.Т.12. №2. С.146-155.
 9. **Малютин Д.М.**, Распопов В.Я., Иванов Ю.В. Способ увеличения точности гироскопа со сферическим шарикоподшипниковым подвесом // Мехатроника, автоматизация, управление. Т.24. №8. 2023. С.440-447.
 10. **Malyutin D.M.**, Adyakin Y.N., Shvedov A.P., Orlov V.A., Channel dynamics of the controllable indicator gyrostabilizer for surveillance object line-of-sight angular rate measurement» 30th St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, St. Petersburg, Concern CSRI Electropribor, 2023, pp. 254-258.
- Научные работы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ**
11. **Малютин Д.М.**, Кузнецов Д.А. Применение маятникового акселерометра для определения измерения биомеханических реакций жизненных функций человека // Датчики и системы. 2001. №5. С.8-10.
 12. **Малютин Д.М.** Система стабилизации гравиметрического комплекса для аэроморских измерений // Датчики и системы. 2002. №8. С.16-18.
 13. **Малютин Д.М.** Гиростабилизатор морского гравиметра с самонастройкой параметров // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2003. Т. 46. № 9. С. 17-22.
 14. Грязев Б.В., **Малютин Д.М.**, Савельев В.В., Смирнов В.А. Исследование динамики двухосной системы стабилизации и наведения при учете влияния технологических погрешностей и способ повышения точности // Гироскопия и навигация. 2003. №4 (43) С.126-135.
 15. **Малютин Д.М.**, Кутуров А.Н., Коржук Н.Л. Датчик угловой скорости с цифровым информационным выходом // Датчики и системы. 2004. № 8. С. 11-14.
 16. **Малютин Д.М.** Особенности построения цепи самонастройки системы коррекции гиростабилизатора морского гравиметра // Известия Вузов «Приборостроение». № 8. 2005. С. 26-30.

17. **Малютин Д.М.** Комбинированная двухосная гировертикаль // Авиакосмическое приборостроение. 2005. № 3. С. 6-10.

18. **Малютин Д.М.,** Кутуров А.Н. Аналого-цифровой преобразователь для элементов гироскопических систем // Известия Вузов «Приборостроение», 2005. Т.48. № 8. С. 41-46.

19. **Малютин Д.М.** Совершенствование системы стабилизации гравиметрического измерительного комплекса // Датчики и системы. 2006. №7. С.59-65.

20. **Малютин Д.М.,** Погорелов М.Г. Исследование влияния температурной погрешности акселерометров на точность работы бескарданной системы ориентации магнитного типа // Датчики и системы. 2006. № 7. С. 47-51.

21. **Малютин Д.М.,** Малютина М.Д., Грязев Б.В. Коррекция динамических свойств микромеханического акселерометра прямого преобразования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2007. № 3. Т.50. С. 49-53.

22. **Малютин Д.М.** Исследование динамики рулевого привода беспилотного малоразмерного летательного аппарата // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 10. С. 54-55.

23. Погорелов М.Г., Шведов А.П., **Малютин Д.М.** Система ориентации подвижного объекта по показаниям магнитных датчиков // Датчики и системы. 2009. № 5. С.51-55.

24. **Малютин Д.М.,** Малютина М.Д. Микромеханический акселерометр прямого преобразования // Нано - и микросистемная техника. 2009. № 4 (105). С. 35-37.

25. Распопов В.Я., Иванов Ю.В., Алалуев Р.В., **Малютин Д.М.,** Погорелов М.Г., Шведов А.П., Лихошерст В.В., Товкач С.Е. Информационно - измерительные микросистемы для подвижных объектов // Нано - и микросистемная техника. 2010. №1(114). С.27-34.

26. **Малютин Д.М.,** Дегтярев М.И. Математическое описание и результаты моделирования управляемого гиросtabilизатора на динамически настраиваемом гироскопе // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. № 1. С. 161-167.

27. **Малютин Д.М.,** Малютина М.Д. Алгоритмическая компенсация изменения нулевого сигнала микромеханического гироскопа от температуры // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. №2. С.187-191.

28. **Малютин Д.М.,** Малютина М.Д. Гироскопические системы стабилизации в информационно - измерительных и управляющих системах мини беспилотных летательных аппаратов (аналитический обзор) // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. № 12-1. С. 157-164.

29. **Малютин Д.М.** Система стабилизации и управления на волоконно-оптических гироскопах // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2014. № 5 (307). С. 121-125.

30. Распопов В.Я., **Малютин Д.М.,** Иванов Ю.В., Грязин Д.Г. Система ориентации на микромеханических акселерометрах // Нано - и микросистемная техника. 2014. № 9 (170). С. 52-56.

31. **Малютин Д.М.** Система для морских гравиметрических измерений повышенной точности с самонастройкой параметров гиросtabilизатора // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. № 5 (325). С. 147-155.

32. **Малютин Д.М.** Алгоритм цифрового управления гиросtabilизированной платформой морского гравиметра с самонастройкой параметров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 9-2. С. 88-95.

33. **Малютин Д.М.,** Распопов В.Я. Исследование динамики гиросtabilизатора морского гравиметра с самонастройкой параметров // Известия Тульского

государственного университета. Технические науки. 2017. № 9-2. С. 96-104.

34. Волчихин И.А. Волновые твердотельные гироскопы (аналитический обзор) / И.А. Волчихин, А.И. Волчихин, **Д.М. Малютин**, В.В. Матвеев, В.Я. Распопов, С.В. Телухин, А.П. Шведов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 9-2. С. 59-78.

35. Алалуев Р.В., **Малютин Д.М.**, Распопов В.Я., Телухин С.В., Шепилов С.И., Ладонкин А.В. Результаты экспериментальных исследований датчика углов со сферическим шарикоподшипниковым подвесом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 9-2. С. 43-51.

36. **Малютин Д.М.** Гиросtabilизатор гравиметра с комбинированным управлением // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2018. № 3 (329). С. 123-135.

37. Распопов В.Я., **Малютин Д.М.** Измерительные приборы и системы для ориентации, стабилизации и управления // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 4. С. 372-386.

38. **Малютин Д.М.** Математическая модель гиросtabilизатора гравиметра с комбинированным управлением и самонастройкой параметров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 10. С. 226-232.

39. **Малютин Д.М.** Динамические характеристики управляемого гиросtabilизатора на датчиках угловой скорости // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2018. № 6 (332). С. 126-141.

40. **Малютин Д.М.** Управляемый гиросtabilизатор повышенной точности на микромеханических чувствительных элементах // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2018. № 6. С. 326-339.

Научные работы в других изданиях

41. **Малютин Д.М.** Российские и зарубежные наборные гравиметрические комплексы // Инженерный журнал «Справочник» с Приложением №10 (127). Приложение №10 к журналу «Бортовые гироскопы и системы. Научно - технические и образовательные аспекты». 2007. С.13-16.

42. Распопов В.Я., Иванов Ю.В., **Малютин Д.М.** Инерциальные чувствительные элементы. Ч.2. Акселерометры (аналитический обзор) // Мир авионики. 2008. №3. С.32-36.

43. Распопов В.Я., Телухин С.В., Алалуев Р.В., Кузнецов Я.С., Ладонкин А.В., **Малютин Д.М.** Автопилот мини беспилотного летательного аппарата // Мехатроника, автоматизация, управление. Приложение №10(91). М. 2008. С.19-24.

44. Распопов В.Я., **Малютин Д.М.**, Иванов Ю.В. Гироскопы в системах гироскопической стабилизации // Справочник. Инженерный журнал. 2009. №7(148). С.52-58.

45. **Малютин Д.М.**, Телухин С.В., Погорелов М.Г. Автопилоты // Справочник. Инженерный журнал. 2010. №11. С.20-24.

46. **Малютин Д.М.**, Малютина М.Д., Филин И.В. Индикаторный гиросtabilизатор на микромеханических гироскопах // Справочник. Инженерный журнал. 2011. № 1 (166). С. 44-56.

47. Распопов В.Я., **Малютин Д.М.**, Алалуев Р.В., Телухин С.В., Шепилов С.И. Гироскопические датчики углов со сферическим шарикоподшипниковым подвесом // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 10. С. 266-280.

48. Распопов В.Я., **Малютин Д.М.**, Алалуев Р.В., Телухин С.В., Шепилов С.И. Гироскопический датчик углов со сферическим шарикоподшипниковым подвесом с улучшенными эксплуатационными характеристиками // Гироскопия и навигация. 2018. Т. 26. № 2 (101). С. 88-94.

49. **Малютин Д.М.** Гравиметрические комплексы для аэро и морских измерений // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2019. № 4-1 (336). С. 26-34.
50. Королев М.Н., **Малютин Д.М.** Анализ технических характеристик чувствительных элементов индикаторных гироскопических стабилизаторов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2019. №8. С.30-46.
51. Королев М.Н., **Малютин Д.М.** Исследование динамических характеристик гироскопического стабилизатора на волновом твердотельном гироскопе // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2019. № 8. С.129-135.
52. Алалуев Р.В., Волчихин И.А., Ладонкин А.В., Лихошерст В.В., **Малютин Д.М.**, Матвеев В.В., Распопов В.Я. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором и его применение в системах ориентации, стабилизации и навигации // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2019. №8. С.7-21.
53. **Малютин Д.М.** Об одном законе построения усилительно преобразующего тракта индикаторного гиросtabilизатора на датчиках угловой скорости // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2019. № 8. С.135-143.
54. Королев М.Н., **Малютин Д.М.** Динамика гироскопического стабилизатора с волновым твердотельным гироскопом // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2021. №10. С.249-255.
55. **Малютин Д.М.** Гироскоп увеличенной точности со сферическим шарикоподшипниковым подвесом // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2021. № 10. С. 235-243.
56. **Малютин Д.М.** Исследования динамики управляемых индикаторных гиросtabilизаторов // В сборнике: 57-я Научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава ТулГУ с Всероссийским участием. Сборник докладов в 2-х частях. Под редакцией М. С. Воротилина. 2021. С. 29-36.
- Патенты РФ, свидетельства на полезную модель РФ, свидетельства о регистрации программы для ЭВМ РФ**
57. Патент на изобретение №2244261. Российская Федерация. Система коррекции гиросtabilизатора морского гравиметра / **Малютин Д.М.**, Коржук Н.Л., Лыгин В.А., Мирошниченко И.В., Прироженко И.В., Ларин И.И. 10.01.2005. бюл 1. Заявка №2003112060/28 от 24.06.2003.
58. Патент на изобретение N2260189. Российская Федерация. Устройство для измерения угловой скорости / Кутуров А.Н., **Малютин Д.М.**, Коржук Н.Л., Малютина М.Д. 10.09.2005. бюл. №25. Заявка: 2004110294/28 от 05.04.2004.
59. Патент на изобретение №2277223. Российская Федерация. Система коррекции гиросtabilизатора морского гравиметра / **Малютин Д.М.** 27.05.2006. бюл. №15. Заявка: 2005112364/28 от 25.04.2005.
60. Патент на изобретение №2282147. Российская Федерация. Система коррекции гиросtabilизатора морского гравиметра / **Малютин Д.М.**, Кутуров А.Н., Малютина М.Д. 20.08.2006. бюл. №23. Заявка № 2005115181/28 от 18.05.2005.
61. Патент на изобретение № 2297008. Российская Федерация. Микромеханический акселерометр прямого преобразования / **Малютин Д.М.**, Распопов В.Я., Грязев Б.В., Малютина М.Д. 20.07. 2007. бюл. №23. Заявка: 2005130383/28, 29.09.2005.
62. Патент на изобретение №2293949. Российская Федерация. Двухосный управляемый гиросtabilизатор / **Малютин Д.М.**, Малютина М.Д. 10.04.2007. бюл. №5. Заявка №2006100854/28 от 10.01.2006.
63. Патент на изобретение №2332642. Российская Федерация. Система коррекции гиросtabilизатора морского гравиметра / **Малютин Д.М.**, Малютина М.Д.,

Лыгин В.А., Мирошниченко И.В., Пироженко И.В., Ларин И.И. 27.08.2008. бюл. №24. Заявка № 2007113564/28 от 11.04.2007.

64. Патент № 2328700. Российская Федерация. Микромеханический акселерометр прямого преобразования / Малютин Д.М., Малютина М.Д. 10.07.2008г. бюл. №19. Заявка №2007108227/28 от 05.03.2007.

65. Патент на полезную модель №120491. Российская Федерация. Двухосный индикаторный гиросtabilизатор / Малютина М.Д., **Малютин Д.М.** 20.09.2012. бюл. №26. Заявка № 2012116322/28 от 23.04.2012.

66. Патент на полезную модель №122477. Российская Федерация. Двухосный индикаторный гиросtabilизатор на динамически настраиваемом гироскопе / **Малютин Д.М.**, Дегтярев М.И. 27.11.2012. бюл. №33. Заявка № 2012131917/28 от 26.07.2012.

67. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2021617608. Российская Федерация. Программа "Инерциальная гировертикаль с параметрической коррекцией показаний первого интегратора". / **Малютин Д.М.** 18.05.2021. бюл. №5. Заявка № 2021616743 от 28.04.2021.

68. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2021617609. Российская Федерация. Программа "Система управления индикаторным гиросtabilизатором морского гравиметра" / **Малютин Д.М.** 18.05.2021. бюл. №5. Заявка № 2021616742 от 28.04.2021.

69. Патент на изобретение №2767715. Российская Федерация. Двухосный индикаторный гиросtabilизатор / **Малютин Д.М.** 18.03.2022. бюл. №8. Заявка № 2021114117 от 18.05.2021.

70. Патент на изобретение №2771918. Российская Федерация. Гироскоп / Алалуев Р.В., Ведешкин Ю.В., **Малютин Д.М.**, Распопов В.Я., Стрельников Д.В., Телухин С.В., Шепилов С.И. 13.05.2022. бюл. №14. Заявка № 2021120561 от 12.07.2021.

71. Патент на изобретение №2764744. Российская Федерация. Двухосный индикаторный гиросtabilизатор / **Малютин Д.М.** 20.01.2022. бюл. №2. Заявка № 2021112609 от 28.04.2021.

72. Патент на изобретение №2793844. Российская Федерация. Двухосный индикаторный гиросtabilизатор / **Малютин Д.М.** 07.04.2023. бюл. №10. Заявка № 2022127504 от 21.10.2022.

Монографии

73. Микросистемы ориентации беспилотных летательных аппаратов / Р.В. Алалуев, А.В. Ладонкин, **Д.М. Малютин**, В.В. Матвеев и др.; под. ред. В.Я. Распопова. М.: Машиностроение, 2011. - 184 с.

74. Грязев М.В., Дмитриев А.В., Иванов Ю.В., Кухарь В.Д., Маликов А.А., **Малютин Д.М.**, Пашин А.А., Распопов В.Я., Рогов С.В., Сидоров П.Г. Многооборотный электропривод трубопроводной арматуры: монография / под ред. В.Я. Распопова.-Тула: Изд-во ТулГУ, 2011.-322с.