

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тульский государственный университет»

На правах рукописи



МАТВЕЕВ Валерий Владимирович

**ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ
ОРИЕНТАЦИИ, СТАБИЛИЗАЦИИ И НАВИГАЦИИ НА
КОРИОЛИСОВЫХ ВИБРАЦИОННЫХ ГИРОСКОПАХ**

Специальность: 05.11.16 – Информационно-измерительные
и управляющие системы (в промышленности)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Тула – 2020

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

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
РАСПОПОВ Владимир Яковлевич

Официальные оппоненты: **МЕЛЬНИКОВ Валерий Ефимович**
доктор технических наук, профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), профессор

БАБИЧЕНКО Андрей Викторович
доктор технических наук, профессор,
Учебно-научный центр,
АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро», директор

КАЛИХМАН Дмитрий Михайлович
доктор технических наук, профессор, Научно-исследовательская лаборатория программно-математического обеспечения,
ФГУП «НПЦАП» – «ПО «Корпус», начальник

Ведущая организация: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники» (г. Москва, г. Зеленоград)

Защита состоится «02» февраля 2021 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.271.07, 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 http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-07/Matveev_VV/

Автореферат разослан «10» ноября 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Иванов Юрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Научные и технические проблемы информационно-измерительных и управляющих систем подвижных объектов (ПО) наземного, морского и воздушно-космического базирования связаны с разработкой и внедрением конкурентоспособных образцов датчиков первичной информации (ДПИ) параметров движения, а также систем ориентации, стабилизации и навигации на их основе. Информационно-измерительные системы ориентации (ИИСО), стабилизации (ИИСС) и навигации (ИИСН) помимо заданной точности должны удовлетворять целому ряду технических требований, наиболее существенными из которых являются: ограничения по массе, габаритам и потребляемой мощности; малое время готовности; минимизация количества подвижных узлов; высокая надежность; невысокая стоимость. Данные требования в значительной степени позволяют удовлетворить кориолисовые вибрационные гироскопы (КВГ), выполненные по кремниевой технологии микро-электро-механических систем (МЭМС), либо высокоточной обработки металла или кварцевого стекла. Если разработка МЭМС-КВГ в России ведется с некоторым отставанием от зарубежных компаний, то развитие КВГ с объемным резонатором, так называемых волновых твердотельных гироскопов (ВТГ), в последнее время достигло определенных успехов благодаря трудам В.Ф. Журавлева, Д.М. Климова, Ю.К. Жбанова, В.А. Матвеева, Б.С. Лунина, М.А. Басараба, И.А. Волчихина и др. Разработкой и производством КВГ с объемным резонатором в России занимаются такие предприятия как АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро» (РПКБ), «ГНПП «Темп-Авиа» (г. Арзамас), АО «НПК «КБМ» (г. Коломна), ОАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания» (ОАО «ПНППК»), АО «Завод «Фиолент» (г. Симферополь), ЗАО «НПП «Медикон» (г. Миасс, Челябинская обл.), ОАО «ИЭМЗ» Купол» (г. Ижевск), ОАО «Мичуринский завод «Прогресс» совместно с ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет». За рубежом выпуском ВТГ занимаются компании «Innalabs» (Ирландия), «Delco Electronics» (Индия), «Northrop Grumman», «General Motors Corp.» (США), «Marconi» (Италия), «Sagem», «Badin-Crouzet» (Франция) и др.

В настоящее время основными разработчиками МЭМС-КВГ в России являются АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (г. С. Петербург) и «Лаборатория микро-приборов» на базе НИУ МИЭТ (г. Зеленоград). Успешное освоение технологии МЭМС в России связано с трудами В.Г. Пешехонова, Я.А. Некрасова, С.Г. Кучеркова, М.И. Евстифеева, Д.Г. Грязина, Л.А. Северова, В.К. Пономарева, Л.П. Несенюка, А.М. Лестева, В.Я. Распопова, С.П. Тимошенкова, В.Д. Вавилова и др. Среди зарубежных ученых значительный вклад в теорию инерциальных МЭМС внесли С. Acar, А. Shkel, А. Trusov, F. Ayazi, K. Najafi, V. Kempe, D. Lynch, V. Apostolyuk и др.

Перспективы развития ИИСО и ИИСН на КВГ связаны в первую очередь с внедрением бескарданной технологии (*Strapdown Technology*), в соответствии с которой

ДПИ устанавливаются непосредственно на ПО, а функции гиросtabilизированной платформы возлагаются на вычислительное устройство. Большая роль в создании теории и развитии бескарданных ИИСО и ИИСН связана с трудами таких ученых, как: В.Н. Бранец, Н.П. Шмыглевский, А.В. Бабиченко, Е.Р. Рахтеенко, О.Н. Анучин, Г.И. Емельянец, С.М. Онищенко, Р.К. Лебедев, О.С. Салычев, П.К. Плотников, Д.М. Калихман, В.Е. Мельников, *J.E. Bortz, P.G. Savege, S. Mohinder, D.H. Titterton, J.L. Weston, P.D. Groves* и др.

Актуальные вопросы построения ИИСС, осуществляющих угловую стабилизацию и управление оптической системой, связаны с переходом на технологии индикаторной гиросtabilизации, использованием новых типов гироскопов и быстродействующих бесколлекторных разгрузочных устройств. Развитие теории анализа и синтеза ИИСС связано с именами Д.С. Пельпора, А.К. Неусыпина, В.Д. Арсеньева, В.П. Подчерзцева, В.В. Фатеева, В.И. Родионова, Д.М. Малютин и др.

Необходимость и актуальность развития ИИСО, ИИСС и ИИСН подтверждается тем, что развитие микросистемной техники, включая создание научных основ построения современных инерциальных датчиков, приборов и систем в условиях возмущающих воздействий включены в перечень критических технологий РФ и программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук.

В связи с этим **научная проблема** диссертационного исследования – развитие теории построения информационно-измерительных систем ориентации, стабилизации и навигации на кориолисовых вибрационных гироскопах для подвижных объектов различного базирования.

Цель диссертации – разработка и развитие математического описания, способов повышения точности, методик исследования и обработки измерительной информации ИИС ориентации, стабилизации и навигации на базе КВГ для различных подвижных объектов, включая вращающиеся по крену носители и морские волномерные системы.

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

1. Провести верификацию математической модели КВГ, предложенную докт. Д. Линчем (*D. Lynch*), и обосновать границы упрощающих при ее анализе допущений.
2. Разработать математическую модель КВГ для огибающих первичных и вторичных колебаний резонатора с учетом перекрестных связей между ними, позволяющую проводить анализ динамики КВГ без учета высокочастотной несущей колебаний резонатора.
3. Проанализировать известные алгоритмы комплексирования КВГ с акселерометрами при реализации бескарданной гировертикали и разработать методику ее испытаний для выбора параметров и структуры комплементарного фильтра.

4. Разработать способ измерения угловой скорости вращающегося носителя при ограниченном диапазоне измерения КВГ. Усовершенствовать алгоритм ИИС ориентации для вращающегося носителя, обладающий более высокой точностью по сравнению с традиционными алгоритмами ориентации.
5. Разработать устойчивый алгоритм определения ординаты морской волны ИИС волномерного буя при совместной обработке информации КВГ и акселерометров, обладающий более высокой точностью по сравнению с существующими способами.
6. Разработать методику анализа синхронных погрешностей ИИС стабилизации на базе двухосного индикаторного гиросtabilизатора с КВГ, а также проанализировать влияние инструментальных погрешностей КВГ на точность стабилизации и сопровождения.
7. Разработать математические модели погрешностей ИИС навигации на базе бескарданной инерциальной навигационной системы, позволяющие получать быструю экспресс-оценку точности ИИС с учетом инструментальных погрешностей КВГ и акселерометров без моделирования полного алгоритма функционирования ИИС.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались методы математического анализа, теории конечного поворота, спектрального анализа, теории автоматического управления, теории инерциальной навигации, статистические методы обработки измерительной информации.

Объектом исследования являются ИИС ориентации, стабилизации и навигации подвижных объектов наземного, морского и воздушного базирования.

Предмет исследования: математические модели КВГ, модели погрешностей, алгоритмы функционирования, методы повышения точности ИИСО, ИИСС, ИИСН.

Научная новизна диссертации:

1. Математическая модель КВГ с различной формой резонатора для огибающих первичных и вторичных колебаний, отличающаяся от известных наличием перекрестной связи от контура вторичных колебаний к первичным и позволяющая анализировать динамические и статические характеристики КВГ без учета высокочастотной несущей колебаний резонатора.
2. Теоретически и экспериментально обоснованный способ формирования выходного сигнала КВГ без контура компенсации кориолисова ускорения, обладающий существенно более широким линейным диапазоном функции преобразования КВГ, как датчика угловой скорости, по сравнению с традиционным способом контроля амплитуды вторичных колебаний.
3. Математическое описание погрешностей бескарданной гировертикали на КВГ и акселерометрах, включая методику испытания комплементарных фильтров связи КВГ с акселерометрами, отличительной особенностью которой является то, что

она позволяет контролировать, помимо прочих, баллистические и гармонические погрешности гировертикали.

4. Способ измерения угловой скорости вращающегося носителя, основанный на специальной ориентации измерительных осей КВГ вдоль косоугольного измерительного базиса, позволяющий использовать КВГ с меньшим диапазоном измерения, чем угловая скорость носителя.
5. Алгоритм ИИС ориентации вращающегося по крену носителя, отличающийся от известного тем, что он вырабатывает не три параметра ориентации (традиционные углы рыскания, тангажа и крена), а четыре: углы рыскания, тангажа и синус, косинус угла крена, имеющий более высокую точность по сравнению с классическими алгоритмами ориентации.
6. Способ повышения точности ИИС для измерения параметров морского волнения инерциальным методом при помощи волномерного буя, позволяющий устранить неустойчивость вертикального канала ИИС и повысить точность измерения ординаты морской волны по сравнению с методами, основанными на интеграторах с обратной связью.
7. Математическая модель погрешностей ИИС стабилизации на базе индикаторного гиросtabilизатора с КВГ, позволяющая прогнозировать точность сопровождения подвижных объектов в зависимости от случайных инструментальных погрешностей и постоянной времени КВГ.
8. Методика оценивания синхронных погрешностей ИИС сопровождения подвижных объектов на базе индикаторного гиросtabilизатора с КВГ в контуре стабилизации, основанная на спектральном анализе выходного сигнала КВГ, имеющая более высокую точность по сравнению с методом непосредственной оценки.
9. Математическая модель случайных погрешностей ИИС навигации на базе бескарданной инерциальной навигационной системы, отличительной особенностью которой является возможность проведения быстрой экспресс-оценки точности ИИС на различных интервалах времени в зависимости от инструментальных погрешностей КВГ и акселерометров без моделирования полного алгоритма ИИС.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Полученная математическая модель КВГ с различной формой резонатора для огибающих первичных и вторичных колебаний позволяет прогнозировать параметры новых образцов КВГ на этапе их проектирования. Способ формирования выходного сигнала КВГ позволит расширить диапазон линейности характеристики КВГ без контура компенсации.
2. Разработанная методика исследования комплементарных фильтров позволяет оценивать точность бескарданной гировертикали при создании новых или модернизации существующих образцов ИИС ориентации подвижных объектов. Пред-

ложенный алгоритм построения бескарданной гировертикали позволяет существенно снизить погрешности при синусоидальных колебаниях объекта.

3. Предложенные алгоритмы построения ИИС волномерного буя позволят устранить накапливание погрешностей при измерении ординаты морской волны волномерным буюм и повысить точность измерения по сравнению со способами интегрирования с обратной связью.
4. Предложенная методика исследования ИИС стабилизации и сопровождения подвижных объектов повысит достоверность оценки синхронных погрешностей при стендовых испытаниях ИИС сопровождения. Математическая модель погрешностей ИИС сопровождения позволит предъявлять требования к инструментальным погрешностям КВГ при разработке новых образцов ИИС.
5. Предложенные способы измерения угловой скорости вращающегося носителя позволят преодолеть ограничения по диапазону измерения КВГ. Разработанный алгоритм ИИС ориентации вращающегося по крену носителя повысит точность определения параметров ориентации. Способ построения ИИС ориентации вращающегося носителя на двух КВГ позволит повысить экономические показатели перспективных систем.
6. Разработанная математическая модель случайных погрешностей ИИС навигации позволит предъявлять требования к датчикам первичной информации на этапах проектирования бескарданных инерциальных систем ориентации и навигации различных подвижных объектов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Сформулировано условие, устанавливающее допустимость пренебрежения перекрестной связью в уравнении первичных колебаний резонатора КВГ без контура компенсации кориолисова ускорения.
2. Математическая модель КВГ для огибающих первичных и вторичных колебаний резонатора с учетом перекрестной связи между ними, достоверно отражающая характеристики КВГ в режиме датчика угловой скорости и интегрирующего гироскопа.
3. Теоретически и экспериментально обоснованный способ формирования выходного сигнала КВГ без контура компенсации кориолисова ускорения, обладающий более широкой линейной зоной выходной характеристики.
4. Методика исследования комплементарных фильтров, использующихся для комплексования КВГ с акселерометрами при построении бескарданной гировертикали. Способ построения комплементарного фильтра для бескарданной гировертикали.

5. Методика экспериментального и теоретического оценивания синхронных и случайных погрешностей ИИС стабилизации и сопровождения на базе индикаторного гиросtabilизатора с КВГ в контуре стабилизации.
6. Способ построения устойчивого вертикального канала ИИС измерения параметров морского волнения инерциальным методом при помощи волномерного буя.
7. Способы измерения угловой скорости и новые алгоритмы ориентации вращающегося по крену носителя с инерциальным измерительным модулем на КВГ.
8. Систематизированная по характеру инструментальных погрешностей КВГ и акселерометров математическая модель погрешностей ИИС навигации на базе бескарданной инерциальной навигационной системы.

Достоверность полученных результатов подтверждается согласованностью с результатами экспериментальных исследований МЭМС-КВГ, КВГ с металлическим резонатором и ИИС на базе КВГ, полученных на аттестованном оборудовании ФГБОУ ВО ТулГУ, а также имитационным и полунатурным моделированием ИИС, положительной оценкой при критическом обсуждении на научно-технических конференциях.

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты исследования, полученные автором, использовались при выполнении грантов и хоз. договорных работ:

- НИР «Исследование возможностей применения бесплатформенной инерциальной навигационной системы на микромеханических чувствительных элементах для решения задачи попадания вращающихся по крену летательных аппаратов» (заказчик ФГУП «ЦНИИ Электроприбор» г. С.- Петербург, договор №49Д/081/07 от 01.02.07, **подтверждено актом внедрения**);

- НИР «Разработка авионики мини беспилотного летательного аппарата (БПЛА)» (заказчик ФГУП«С-П ОКБ Электроавтоматика, г. С. - Петербург, договор № 130704 от 02.07.07);

- Грант «Информационно-измерительные и управляющие системы на базе микромеханических чувствительных элементов отечественной разработки для вращающегося по крену летательного аппарата» (заказчик Администрация Тул. обл., договор № 60-к-1/2347 от 19.12.07);

- Грант РФФИ «Научные основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем на микромеханических чувствительных элементах для вращающихся по крену летательных аппаратов» (договор Ц13.08 ГРФ от 01.01.2008);

- Грант РФФИ «Концепция построения и проектирования авионики малоразмерного БЛА» (договор Ц1309ГРФ от 07.09.2009);

- Грант РФФИ «Научные основы построения малогабаритных систем ориентации и навигации для беспилотных вращающихся по крену летательных аппаратов» (договор Ц1310ГРФ от 25.03.2010);

- Грант РФФИ «Развитие МТБ для проведения исследований по областям знаний 08-606 компенсации инструментальных погрешностей инерциальных датчиков для систем ориентации малогабаритных летательных аппаратов» (договор № Ц1310.1ГРФ от 01.10.2010 г.);

- НИР «Разработка математических моделей и программного обеспечения для САПР информационно-управляющих микросистем и интегрированных датчиков инерциальной навигации» (заказчик ОАО «Авангард», г. С. - Петербург, договор № 2460/3.3 от 01.01.2011, **подтверждено актом внедрения**);

- НИР «Разработка модуля гиромагнитной курсовертикали волномерного буя (Заказчик ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» г. С.-Петербург, 2013 г.);

- Грант «Создание гироскопических датчиков угловой скорости (ДУС) на новых физических принципах» (заказчик ТулГУ, 2018 г.);

- НИР «Разработка математического и функционального программного обеспечения бесплатформенной инерциальной навигационной системы» (заказчик: ФГУП «РФЯЦ - ВНИИЭФ», договором № 131802 от 02.08.2018., **подтверждено актом внедрения**);

- НИР «Разработка математической модели и алгоритмов бесплатформенной инерциальной навигационной системы 1109.Т305-2016» (заказчик: ФГУП «РФЯЦ - ВНИИЭФ», г. Саров, договор № 131704 от 0.1.02.2017 г.);

- НИР «Разработка математической модели и имитационное моделирование двухосного управляемого индикаторного гироскоординатора» (заказчик АО "Азовский оптико-механический завод", г. Азов, договор № 131801 от 22.06.2018 г., **подтверждено актом внедрения**).

Апробация результатов исследования. Результаты исследования докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

«Технологии производства перспективных МЭМС-приборов» (г. Заречный, Пензенская обл., 2006 г.); XIV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (г. Санкт-Петербург, 2007 г.); Юбилейная XVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (г. Санкт-Петербург, 2008 г.); XXVII Конференция памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова (г. Санкт-Петербург, 2010 г.); XVIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (г. Санкт-Петербург, 2011 г.); XIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным

системам (г. Санкт-Петербург, 2012 г.); XXI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (г. Санкт-Петербург, 2014 г.); 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.); Всероссийская научно-практическая конференция «Волновой твердотельный гироскоп» (г. Мичуринск Тамбовской обл., 2018 г.); VI Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки» – «АВИАТОР» (Воронеж, 2019 г.); XXVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам (г. Санкт-Петербург, 2019 г.).

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 10 статьях, входящих в библиографическую и реферативную базу данных *Scopus*, и 45 публикациях из перечня ВАК, а также в 3-х монографиях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, библиографического списка из 221 источника; содержит 361 стр. машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе (*Методологические аспекты проблемы построения информационно-измерительных систем на кориолисовых вибрационных гироскопах*) приведены особенности построения инерциальных измерительных модулей (ИИМ), ИИСО, ИИСС и ИИСН на их основе, в соответствии с классификацией, приведенной на рис. 1.

На основе анализа литературных источников и научно-технических проблем, возникших при выполнении хоз. договорных работ с предприятиями-заказчиками, формулируются проблемы, требующие разработки математического описания погрешностей ИИС ориентации, стабилизации и навигации в зависимости от инструментальных погрешностей КВГ. Обсуждаются виды случайных погрешностей инерциальных измерительных модулей на КВГ, в частности, случайное блуждание угла – *ARW (Angle Random Walk)*. На основе анализа экспериментальных данных, полученных при испытаниях ВТГ, показана необходимость совершенствования математического описания КВГ. Формулируются особенности комплексирования КВГ с акселе-

рометрами и демонстрируются недостатки существующего математического описания систем на их основе.



Рисунок 1 – Классификация ИИС на КВГ

Показаны малоизученные области теории систем стабилизации и сопровождения на КВГ, касающихся синхронных погрешностей и влияния инструментальных погрешностей КВГ на качество ИИСС. Обосновывается необходимость совершенствования алгоритмов и математических моделей ИИС ориентации и навигации, включая вращающиеся носители и волномерные морские системы.

Во второй главе (*Кориолисовые вибрационные гироскопы. Теория, особенности динамики*) приводится анализ КВГ с различной формой резонатора на основе исследования системы двух обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка, описывающих возбуждаемую моду (режим возбуждения) и измеряемую моду (режим чувствительности), предложенную Д. Линчем¹ (*D. Lynch*), которая вытекает из рассмотрения движения двумерного линейного осциллятора и с некоторой модификацией может быть представлена в виде:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_1 + 2\xi\omega_1\dot{x}_1 + (\omega_1^2 - \Omega^2)x_1 + \omega_{12}^2x_2 &= f_0 \sin vt + \underline{2K_1\Omega\dot{x}_2} + N_1\dot{\Omega}x_2, \\ \ddot{x}_2 + 2\xi\omega_2\dot{x}_2 + (\omega_2^2 - \Omega^2)x_2 + \omega_{21}^2x_1 &= -\underline{2K_2\Omega\dot{x}_1} - N_2\dot{\Omega}x_1, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

¹ Lynch D. *Vibratory gyro analysis by the method of averaging*. In: *Proceedings of the 2nd St. Petersburg conference on gyroscopic technology and navigation*, St. Petersburg, 1995. pp. 26–34.

где x_1, x_2 ; ω_1, ω_2 – фазовые координаты и собственные частоты резонатора в режиме возбуждения и чувствительности соответственно; ξ – относительный коэффициент демпфирования; Ω – угловая скорость основания; f_0, ν – амплитуда и частота ускорения резонатора, придаваемая внешними силами (моментами); K_1, K_2 – коэффициенты кориолисовых сил (моментов); $\omega_{12}^2, \omega_{21}^2$ – частоты резонатора от перекрестных жесткостей; N_1, N_2 – коэффициенты углового ускорения.

Основное направление изложения теории КВГ связано с допущением, при котором перекрестная связь $2K_1\Omega\dot{x}_2$ в первом уравнении системы (1) опускается, что позволяет его решить независимо от второго. Аргументом в пользу такого допущения является соотношение между амплитудами первичных и вторичных колебаний $x_2 \ll x_1$, которое, по мнению многих авторов, «всегда выполняется». Повышение внимания к данной проблеме связано с созданием перспективных ИИС подвижных объектов, имеющих значительные угловые скорости. Проведенные автором экспериментальные исследования (рис. 2-а, б) КВГ с металлическим цилиндрическим резонатором ($K_1 = K_2 \approx 0,4$) позволяют сделать вывод об ограниченности такого допущения, так как в противном случае зависимости амплитуд первичных и вторичных колебаний резонатора КВГ от угловой скорости основания обладали бы линейными характеристиками в широком диапазоне угловых скоростей Ω . Кроме того, при угловой скорости основания 60 °/с амплитуда первичных колебаний больше амплитуды вторичных для данного резонатора всего в 1,3 раза.

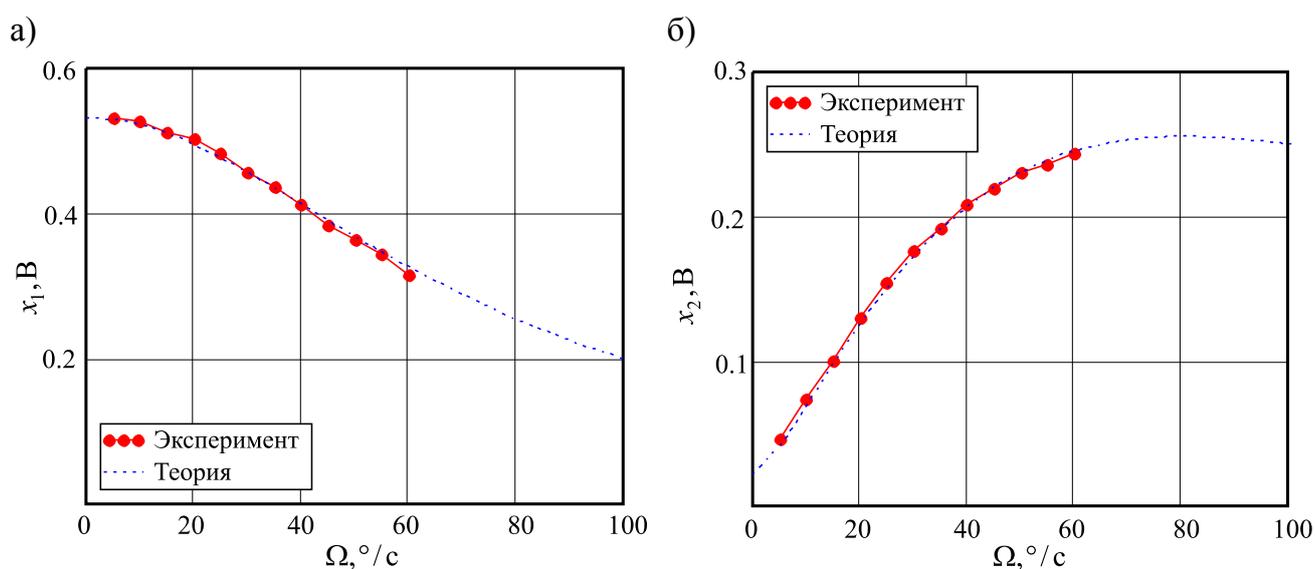


Рисунок 2 – Зависимость амплитуд первичных и вторичных колебаний КВГ с металлическим цилиндрическим резонатором от угловой скорости основания

В связи с этим автором получены теоретические зависимости амплитуд установившихся первичных и вторичных колебаний на основе частных решений системы уравнений (1) в резонансном режиме с учетом упомянутой выше перекрестной связи:

$$x_{10}^{\text{уст}} = \frac{Tf_0}{2\nu(1+n\Omega^2)}, \quad x_{20}^{\text{уст}} = \frac{T^2K_2f_0}{2\nu} \frac{\Omega}{1+n\Omega^2}, \quad (2)$$

где $T = 2Q/\nu$ – постоянная времени резонатора (Q – добротность), $n = K_1K_2T^2$ – коэффициент нелинейности, характеризующий нелинейную зависимость амплитуд колебаний от угловой скорости основания. На рис. 2 приведены также характеристики первичных и вторичных колебаний, полученные по аналитическим соотношениям (2), которые описывают нелинейную зависимость от угловой скорости основания. Установлено, что условием для пренебрежения перекрестной связью может служить выполнение неравенства:

$$TK_2\Omega \ll 1,$$

которое и является решением *первой задачи*. Установлено, что максимум амплитуды вторичных колебаний достигается при угловой скорости: $\Omega_{\text{max}} = 1/\sqrt{n}$.

В работе получены аналитические соотношения для определения коэффициента нелинейности n различных типов КВГ: *LL*-типа, одноколечного КВГ *RR*-типа, двухколечного КВГ *RR*-типа, 8-и массового КВГ *LR*-типа, рамочного КВГ, камертонного КВГ. Показано, что нелинейный характеристики. На рисунке 3 приведены графики функции $f(\Omega) = \Omega/(1+n\Omega^2)$ для трех типов КВГ: одномассового КВГ *LL*-типа, одноколечного *RR*-типа и КВГ с объемным резонатором (на базе ВТГ с коэффициентом Брайна 0,4). Так, например, если принять нелинейность выходного сигнала КВГ без контура компенсации в 1 %, контролируемого по амплитуде вторичных колебаний, то диапазон измерения одноколечного КВГ *RR*-типа составит всего 5 °/с, одномассового *LL*-типа – 3,6 °/с, КВГ с объемным резонатором – 9 °/с, при постоянной времени $T = 1,5$ с.

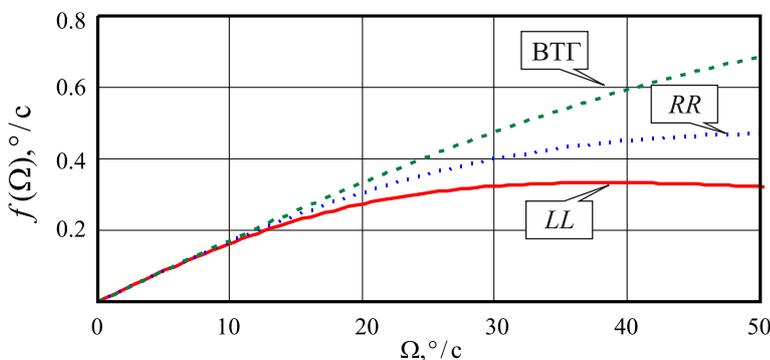


Рисунок 3 – Графики функции $f(\Omega)$ для одномассового КВГ *LL*-типа, одноколечного *RR*-типа и КВГ с цилиндрическим резонатором (ВТГ)

Таким образом, если рассматривать КВГ без контура компенсации кориолисового ускорения и в качестве информативного параметра использовать амплитуду вторичных колебаний, то в этом случае КВГ будет обладать чрезвычайно малым линей-

ным диапазоном (до $10^\circ/\text{с}$). Для преодоления этого ограничения при работе КВГ без контура компенсации кориолисового ускорения предложен способ формирования сигнала об измеряемой угловой скорости, как отношение амплитуды вторичных колебаний к амплитуде первичных:

$$x_{20}^{\text{уст}} / x_{10}^{\text{уст}} = TK_2\Omega,$$

которое линейно зависит от угловой скорости основания. Установлено, что данное соотношение соответствует случаю, когда информация об угловой скорости основания формируется по амплитуде вторичных колебаний при отсутствии перекрестной связи. Для подтверждения этого факта на рис. 4 приведена экспериментальная зависимость x_2 / x_1 КВГ с металлическим резонатором с постоянной времени $T \approx 1,52$ с в функции угловой скорости основания. При таком способе формирования информации об угловой скорости основания коэффициент передачи для КВГ составит $\approx 0,4T$.

Дальнейшие исследования КВГ связаны с решением задачи о разработке математической модели КВГ для огибающих первичных и вторичных колебаний резонатора с учетом составляющей $2K_1\Omega\dot{x}_2$. Структурная схема такой математической модели приведена на рис. 5, в которой ветвь ab объясняет нелинейную зависимость амплитуд первичных и вторичных колебаний от угловой скорости основания. Полученная структурная схема позволяет анализировать КВГ без учета высокочастотной несущей колебаний резонатора, а также выполнять синтез контура компенсации кориолисова ускорения путем выбора вида и параметров корректирующего звена $W_p(s)$.

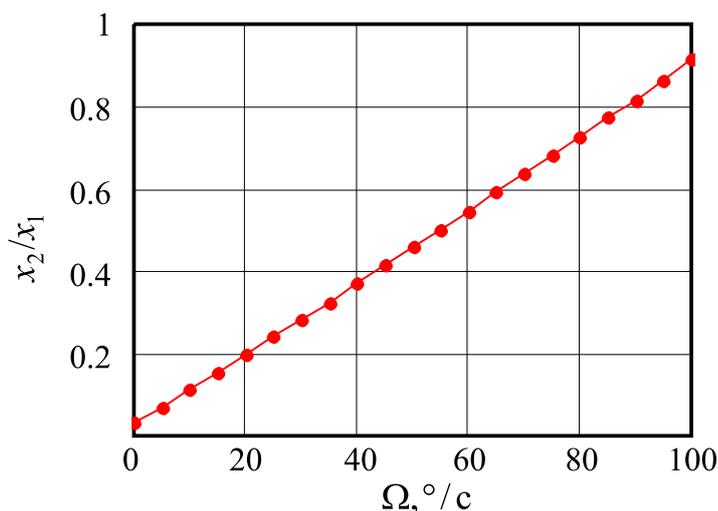


Рисунок 4 – Экспериментальная зависимость отношения амплитуд вторичных колебаний к первичным КВГ с металлическим цилиндрическим резонатором от угловой скорости

Передачная функция по выходному сигналу КВГ с пропорционально-интегральным (ПИ) регулятором, наиболее используемому в контуре компенсации, имеет вид

$$W_{out}(s) = \frac{x_{out}(s)}{f_0(s)} = \frac{\Omega K_2 T^2 k_i (T_p s + 1)}{(Ts + 1)[2\nu s(Ts + 1) + Tk_i(T_p s + 1)] + 2\nu n \Omega^2 s}, \quad (3)$$

где $T_p = k_p/k_i$ – постоянная времени; k_p , k_i – коэффициенты передачи пропорциональной и интегральной части ПИ-регулятора.

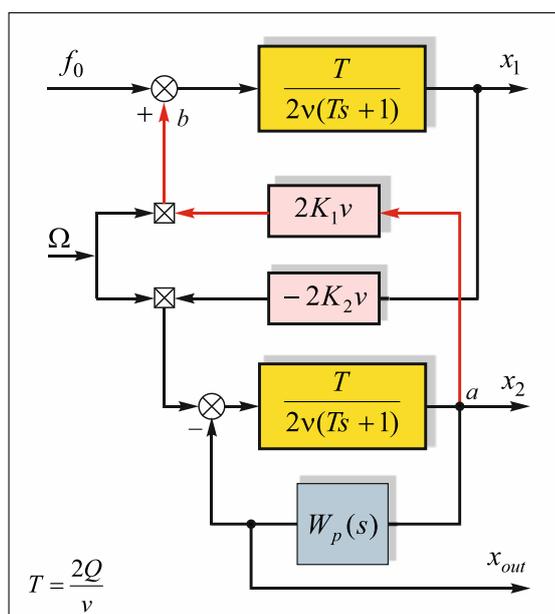


Рисунок 5 – Структурная схема КВГ для огибающих первичных и вторичных колебаний

дрилеским резонатором. В этом случае передаточная функция КВГ с обратной связью может быть приближенно представлена в виде:

$$W_{out}(s) = \frac{x_{out}(s)}{\Omega(s)} \approx \frac{f_0 K_2 T}{T_c s + 1},$$

где $T_c = 2v/Tk_i$ – постоянная времени КВГ с контуром компенсации кориолисова ускорения. В работе также получена общая формула для определения амплитуды квадратурной составляющей, которая отличается от известных в литературе² тем, что она выведена также с учетом перекрестной связи $2K_1\Omega\dot{x}_2$ в уравнении первичных колебаний и с учетом разночастотности.

В третьей главе (*Информационно-измерительные системы ориентации на КВГ*) рассматриваются ИИС ориентации на базе бескарданной гировертикали (БГ) и ИИС ориентации вращающегося носителя. Показано, что при построении БГ с классическим комплементарным фильтром погрешности КВГ и акселерометров пропускаются через апериодическое звено первого порядка с постоянной времени T , а численная реализация данного фильтра близка к известному $\alpha\beta$ -фильтру. Установлено,

² Acar C., Shkel A. *MEMS Vibratory Gyroscopes –Structural Approaches to Improve Robustness*. Springer, 2008– 256 p.

что СКО погрешности БГ в этом случае может быть оценено по зависимости, полученной в работе:

$$\sigma^{\text{БГ}} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(ARW^2 \cdot T + \frac{VRW^2}{Tg^2} \right)},$$

где ARW (VRW) –случайные блуждания угла (скорости) КВГ (акселерометров) соответственно; g – ускорение свободного падения.

Установлено, что минимум СКО погрешности БГ, построенной на базе классического комплементарного фильтра, достигается при постоянной времени $T = VRW / (g \cdot ARW)$. В этом случае СКО случайной погрешности БГ может быть оценена по зависимости: $\sigma^{\text{БГ}} = \sqrt{ARW \cdot VRW / g}$. Коэффициент комплементарного фильтра может быть рассчитан по формуле:

$$\alpha = VRW / (g \cdot T_0 ARW + VRW), \quad (4)$$

ранее не приводимой в литературе.

Разработан алгоритм БГ на основе уравнения Бортца (*Bortz*), ранее применявшийся только в задачах ориентации беспилотных инерциальных навигационных систем:

$$\boldsymbol{\varphi}(k+1) = \boldsymbol{\alpha}(k+1) + \boldsymbol{\beta}(k+1),$$

где $\boldsymbol{\varphi}(k+1)$ – вектор ориентации, $\boldsymbol{\alpha}(k+1)$ – квазиордината ориентации, $\boldsymbol{\beta}(k+1)$ – коническая поправка. Предлагаемый алгоритм представляет собой развитие метода компенсации при комплексировании углов тангажа и крена, вычисленных по КВГ и акселерометрам соответственно.

Если вопросы исследования случайных погрешностей БГ в литературе нашли отражение, то анализ баллистических погрешностей, а тем более гармонических носит фрагментарный характер. В рамках сформулированной выше задачи разработана методика испытаний БГ (рис. 6), включающая анализ случайных погрешностей параметров ориентации методом вариаций Аллана, анализ баллистических погрешностей и исследование погрешностей БГ при гармонических колебаниях подвижного объекта. Показано, что кривая отклонения Аллана БГ при белом шумных погрешностях КВГ и акселерометров имеет асимптоты с наклонами -1 и $-0,5$, что соответствует пропусканию белого шума через апериодическое звено первого порядка (рис. 7). Данные асимптоты отличаются от принятых в стандарте на КВГ *IEEE 1431*³, так как установлено, что при анализе БГ методом отклонений Аллана должен отсутствовать блок предварительного интегрирования сигнала. Показано, что точка излома асимптот кривой отклонения Аллана соответствует времени осреднения $\tau = 1,89T$.

³ *IEEE Std 1431-2004. Standard Specification Format Guide and Test Procedure for Coriolis Vibratory Gyros/ IEEE Aerospace and Electronic Systems Society, 2004. 69 p.*

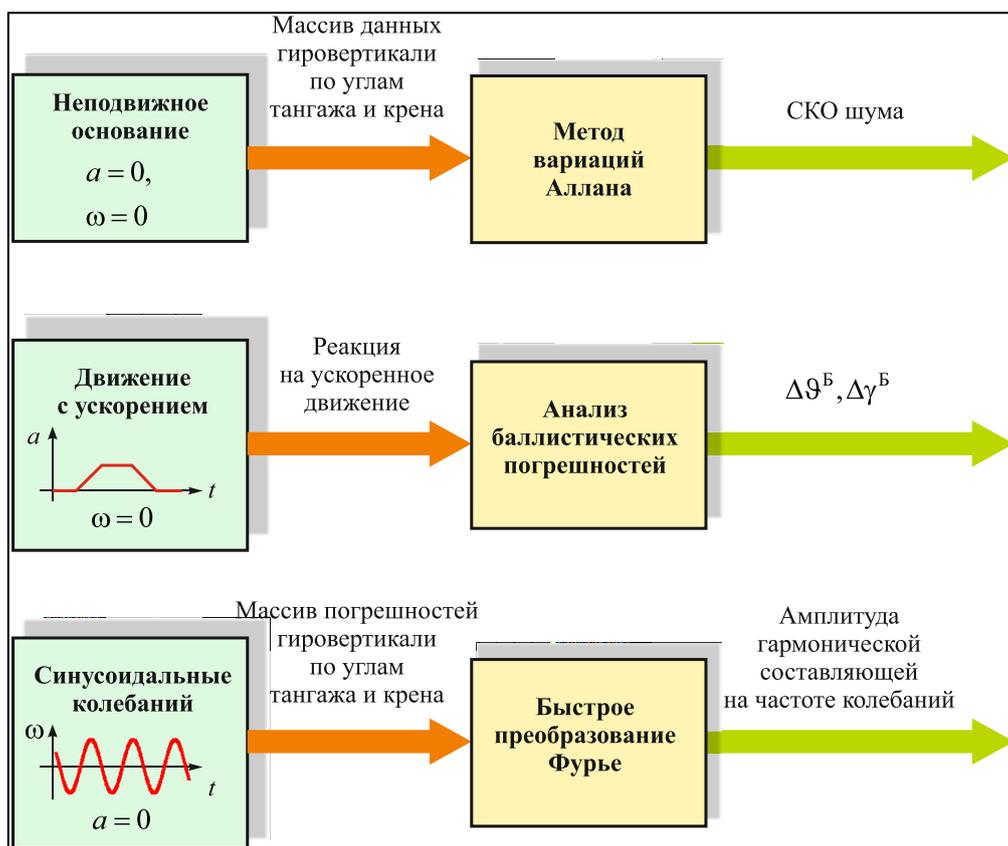


Рисунок 6 – Схема методики испытаний комплементарных фильтров при построении бескарданной гировертикали

Дисперсия на выходе комплементарного фильтра может быть найдена в точке $\tau = \sqrt{3}c$. По разработанной методике анализировались баллистические и гармонические погрешности БГ на основе классического комплементарного фильтра (КФ), фильтра Винера (ФВ), фильтра Маджвика (ФМ), фильтра Калмана (ФК), фильтра с уравнением Бортца (Б).

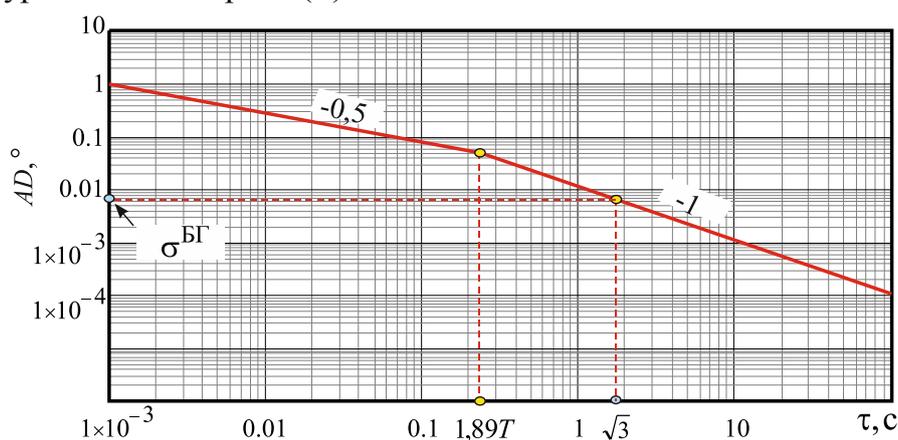


Рисунок 7 – Кривая Аллана БГ при белошумных случайных погрешностях КВГ и акселерометров

Установлено, что в среднем упомянутые выше фильтры дают близкие результаты с точки зрения СКО случайных погрешностей и реакции на ускоренное движение объекта (баллистические погрешности), причем данные погрешности связаны обратной зависимостью. При этом тезис о преимуществе одного фильтра по сравнению с другими в условиях реализации БГ является спорным. К примеру, ФМ при численных

экспериментах показал меньшие случайные погрешности, но в то же время имеет практически безынерционную реакцию (с переходным процессом менее 1 с) на ускоренное движение объекта, что при реализации БГ недопустимо. С точки зрения реакции БГ на колебания основания лучшие результаты показал фильтр на основе уравнения Бортца (рис. 8).

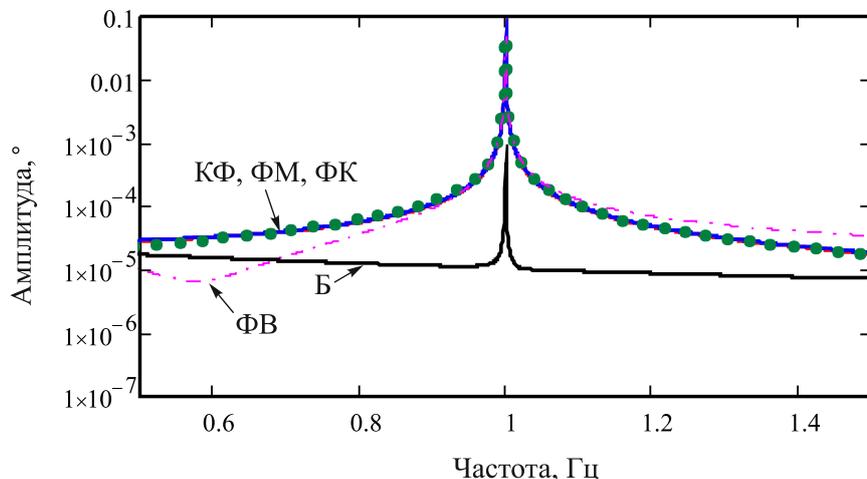


Рисунок 8 – Спектральные характеристики погрешности угла тангажа при синусоидальных колебаниях основания

При синусоидальных колебаниях объекта по углу тангажа с амплитудой 3° и частотой 1 Гц все фильтры дают гармонику в выходном сигнале БГ на частоте колебаний объекта. Амплитуда этой гармоники у КФ, ФМ, ФК, ФВ составляет около $0,1^\circ$, что на два порядка больше, чем у фильтра с уравнением Бортца.

Особое место среди ИИСО на КВГ занимают системы ориентации вращающегося носителя. Показано, что независимо от количества каналов управления вращающимся носителем необходимо на борту иметь информацию о синусе и косинусе угла крена. По этой причине система ориентации вращающегося по крену носителя должна вырабатывать четыре параметра ориентации: традиционные углы рыскания ψ и тангажа ϑ , а также тригонометрические функции синуса и косинуса угла крена (рис. 9).

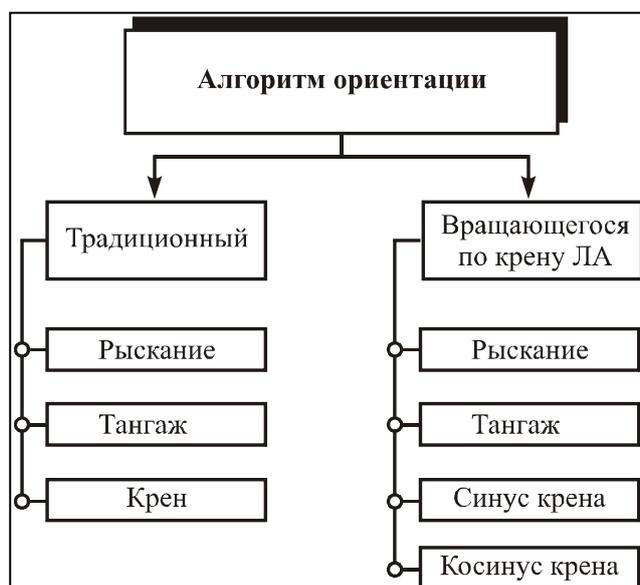


Рисунок 9 – Параметры ориентации, вырабатываемые традиционным алгоритмом и вращающегося по крену носителя

Разработан способ измерения угловых скоростей носителя, превышающих диапазон измерения КВГ. В этом случае измерительные оси КВГ устанавливаются вдоль осей косоугольного измерительного базиса (m), который отклонен на угол μ относительно связанной с носителем системы координат (b) (рис. 10). Показано, что угол установки КВГ может быть оценен в соответствии с неравенством:

$$\mu \leq \arcsin \omega_{\max} / (\omega_{ib,x}^b)_{\max},$$

где ω_{\max} – диапазон измерения, $(\omega_{ib,x}^b)_{\max}$ – максимальная угловая скорость носителя вокруг продольной оси относительно инерциальной системы координат (i)⁴.

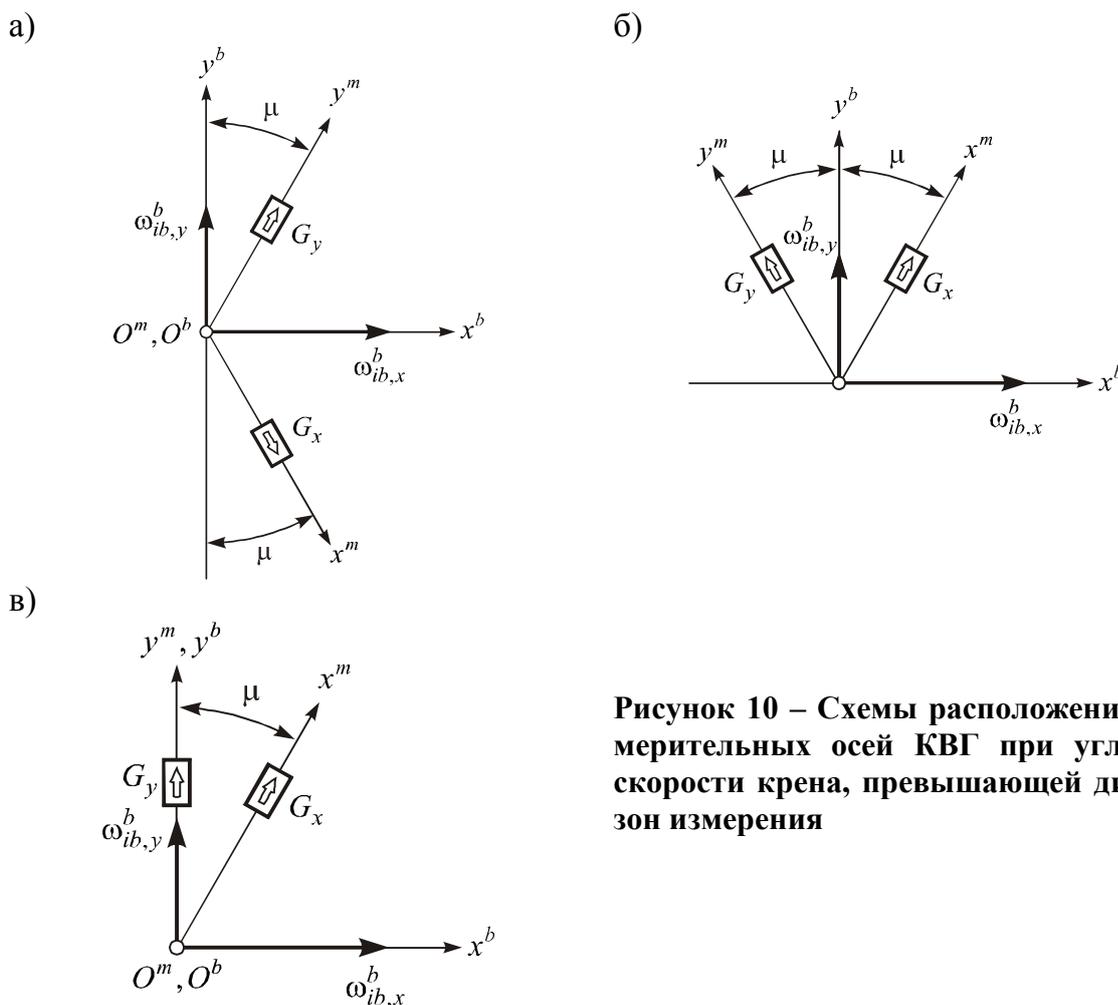


Рисунок 10 – Схемы расположения измерительных осей КВГ при угловой скорости крена, превышающей диапазон измерения

Разработан усовершенствованный алгоритм ИИС ориентации (рис. 11) для носителей со значительной угловой скоростью крена ($\dot{\gamma} \gg \dot{\psi} \sin \vartheta$). Реализация алгоритма основана на расщеплении вычислительного алгоритма, в котором угловая ско-

⁴ Здесь и далее используется индексная форма записи векторов вида $\omega_{\alpha\beta}^{\gamma}$, которая в данном случае означает вектор угловой скорости вращения системы координат β относительно системы координат α , причем вектор задан своими проекциями в системе координат γ .

рость носителя вокруг продольной оси $\omega_{ib,x}^b$ привлекается независимо от двух других проекций и путем ее интегрирования $\omega_{ib,x}^b$ формируются синус и косинус угла крена носителя. Далее осуществляется пересчет поперечных проекций $\omega_{ib,y}^b$ и $\omega_{ib,z}^b$ в систему координат Резаля (r), которая не участвует во вращении по крену, а, следовательно, имеет медленный характер изменения. Далее обновление информации об углах рыскания и тангажа осуществляется на основе уравнения Бортона (рис. 11).

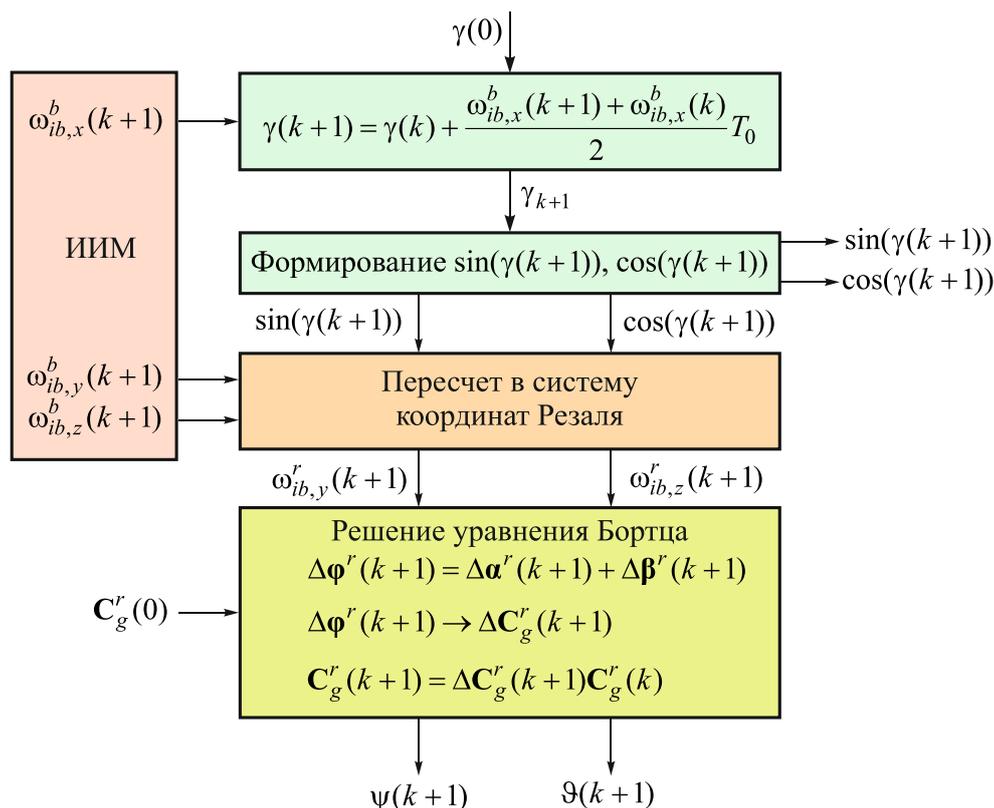


Рисунок 11 – Расщепленная схема алгоритма ориентации

В результате моделирования было установлено, что на частоте вращения носителя 10 Гц алгоритма в соответствии с рис. 11 показал более высокую точность (на несколько порядков) по сравнению с традиционными алгоритмами ориентации на кватернионах.

Автором предложен также способ построения ИИСО вращающегося носителя при измерении только двух проекций угловой скорости⁵ $\omega_{ib,x}^b$, $\omega_{ib,y}^b$, что позволяет использовать на борту подвижного объекта всего два КВГ. Алгоритм строится также

⁵ Отчет о НИР: «Исследование возможностей применения бесплатформенной инерциальной навигационной системы на микромеханических чувствительных элементах для решения задачи попадания вращающихся по крену летательных аппаратов» (заказчик ФГУП «ЦНИИ Электроприбор» г. С.-Петербург, договор №49Д/081/07, от 01.02.2007).

по расщепленной схеме, когда из проекции первой $\omega_{ib,x}^b$ формируются функции синуса и косинуса угла крена, которые затем используются для выделения из второй проекции $\omega_{ib,y}^b$ низкочастотных составляющих угловых скоростей рыскания и тангажа подобно процедуре демодуляции (рис. 12).

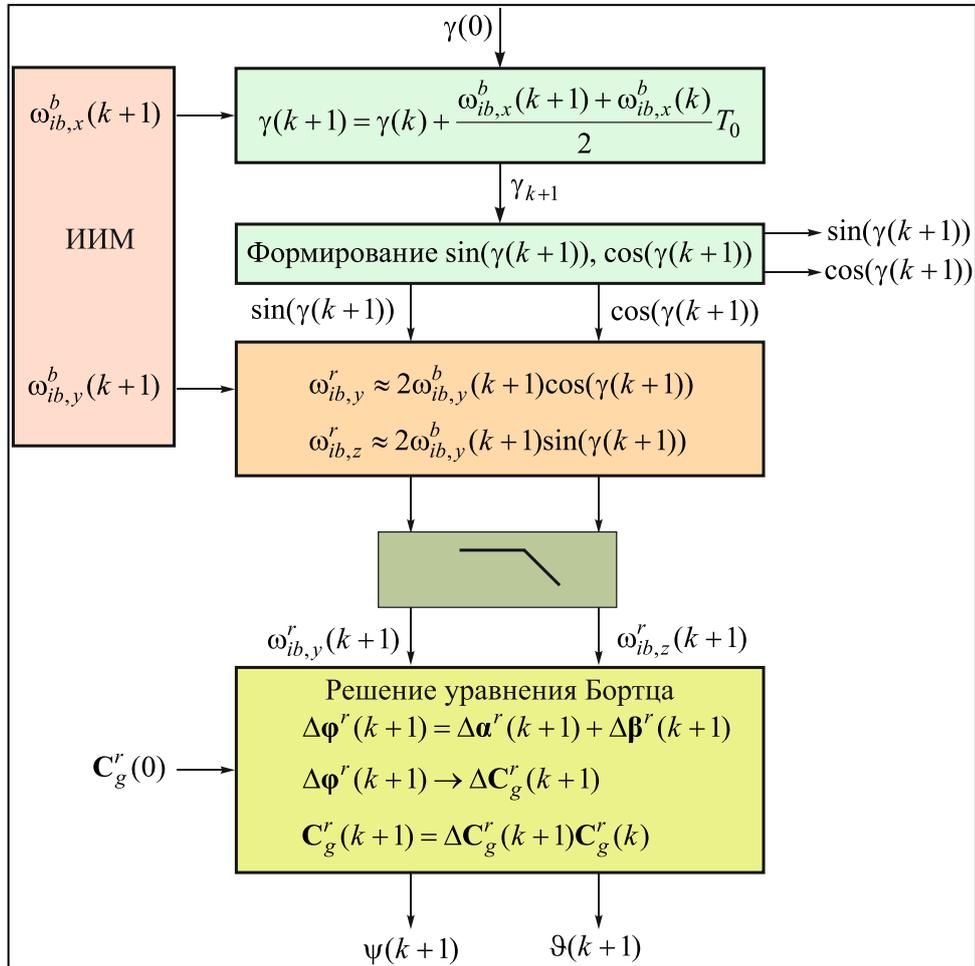


Рисунок 12 – Блок-схема алгоритма ориентации, построенная на двух КВГ

После подавления в сигналах составляющих меняющихся на удвоенной частоте вращения носителя формируются оценки проекций угловой скорости носителя $\omega_{ib,y}^r$ и $\omega_{ib,z}^r$ на оси Резаля. Обновление углов рыскания и тангажа осуществляется аналогично, как и в схеме на рис. 11. Так как данная операция предполагает интегрирование, то при определенных допущениях можно исключить фильтры нижних частот. Точность алгоритма сопоставима с алгоритмом, приведенным на рис. 11.

В четвертой главе (*Информационно-измерительная система волномерного буя*) рассматривается ИИС волномерного буя (ВБ) для измерения параметров морской

волны инерциальным методом. *Задача* реализации устойчивого вертикального канала ИИС ВБ может быть разделена на два этапа: реализация аналитической вертикали ВБ для пересчета показаний акселерометров из связанной системы координат в плоскость горизонта и собственно алгоритм двойного интегрирования ускорения для определения ординаты морской волны. Первый этап решения задачи реализуется на основании совместной обработки КВГ и акселерометров подобно построению БГ (рис. 13).

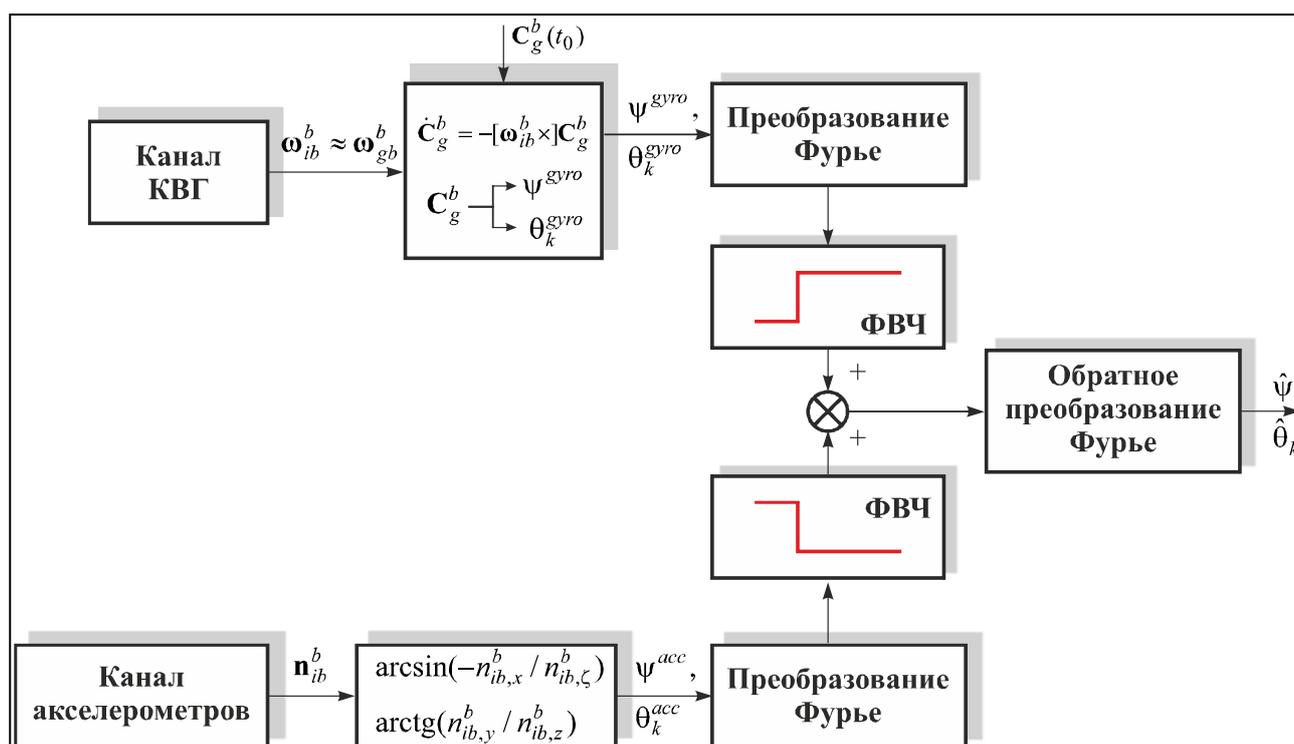


Рисунок 13 – Структурная схема аналитической вертикали ВБ

Канал КВГ основан на измерениях вектора угловой скорости ω_{ib}^b и решении матричного уравнения Пуассона: $\dot{C}_g^b = -[\omega_{ib}^b \times] C_g^b$ ($[\omega_{ib}^b \times]$ – кососимметрическая матрица из проекций вектора ω_{ib}^b). Результатом решения данного уравнения является матрица направляющих косинусов C_g^b , характеризующая преобразование географической системы координат g в связанную с ВБ систему b . Далее известными методами определяются гироскопические углы килевой и бортовой качки ψ^{gyro} , θ_k^{gyro} . Данный канал имеет те же недостатки, что и некорректируемая гироскопическая система ориентации – накопление погрешностей с течением времени и отсутствие избирательности к плоскости горизонта. По измерениям проекций вектора кажущегося ускорения n_{ib}^b в канале акселерометров определяются акселерометрические углы ψ^{acc} , θ_k^{acc} , которые искажены ударами морской волны и инструментальными погрешно-

стями акселерометров. Далее полученные параметры ориентации подвергаются преобразованию Фурье и затем в частотной области фильтруются фильтрами верхних (ФВЧ) и нижних частот (ФНЧ) соответственно с последующим суммированием. Оценки углов килевой $\hat{\psi}$ и бортовой качки $\hat{\theta}_k$ восстанавливаются процедурой обратного преобразования Фурье, в которых ослаблены вышеописанные недостатки отдельно взятых каналов. Преимуществом данного алгоритма является реализация ФНЧ и ФВЧ в частотной области, что позволяет реализовать их «идеальные» частотные характеристики. На основе оценок углов $\hat{\psi}$, $\hat{\theta}_k$ осуществляется формирование вертикальной составляющей кажущегося ускорения $n_{ib,\zeta}^b$.

Решение задачи по устранению неустойчивости вертикального канала ИИС ВБ иллюстрируется рисунком 14.

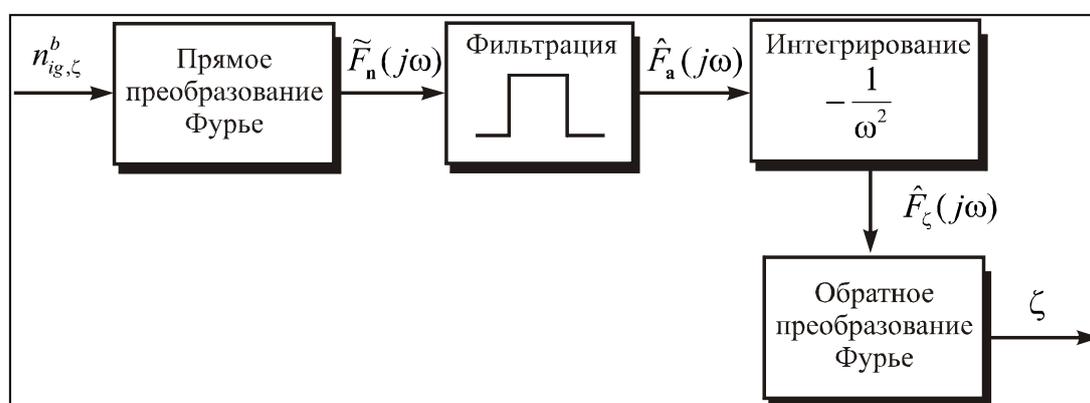


Рисунок 14 – Блок-схема измерения вертикальной качки

Проекция кажущегося ускорения ВБ $n_{ib,\zeta}^b$ раскладывается в спектр $\tilde{F}_n(j\omega)$ с помощью прямого быстрого преобразования Фурье и фильтруется полосовым фильтром, который с одной стороны удаляет постоянные погрешности акселерометров и ускорение силы тяжести в их показаниях и высокочастотные инструментальные погрешности с другой стороны. Полученная после фильтрации спектральная характеристика $\hat{F}_a(j\omega)$ вектора ускорения $a_{ig,\zeta}^g = \ddot{\zeta}$ дважды интегрируется в частотной области посредством множителя $-1/\omega^2$, после чего образуется спектральная характеристика оценки ординаты морской волны $\hat{F}_\zeta(j\omega)$. Последняя затем подвергается обратному преобразованию Фурье, после чего восстанавливается вертикальное перемещение буя ζ во временной области. Достоинством предлагаемого алгоритма является то, что нет необходимости знать с высокой точностью значение ускорения силы тяжести, чтобы его исключить из вертикальной составляющей кажущегося ускорения, как это реализуется в традиционных алгоритмах вертикального канала инерциальных навигацион-

ных систем. Кроме того, интегрирование ускорения сводится к алгебраической операции деления на $j\omega$ (где $j=\sqrt{-1}$).

Для подтверждения разработанного алгоритма моделировался сигнал вертикального ускорения в виде суммы ускорения силы тяжести $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, ускорения гармонической качки амплитудой 1 м/с^2 и периодом 5 с и гауссова белого шума со среднеквадратическим отклонением $0,01 \text{ г}$ и математическим ожиданием $0,001 \text{ г}$. Полосовой фильтр задавался в диапазоне $0,05 \div 1 \text{ Гц}$. На рисунке 15 представлены графики вертикального перемещения ВБ, полученного по предлагаемому алгоритму, и результат интегрирования традиционными методами во временной области при точной компенсации ускорения силы тяжести.

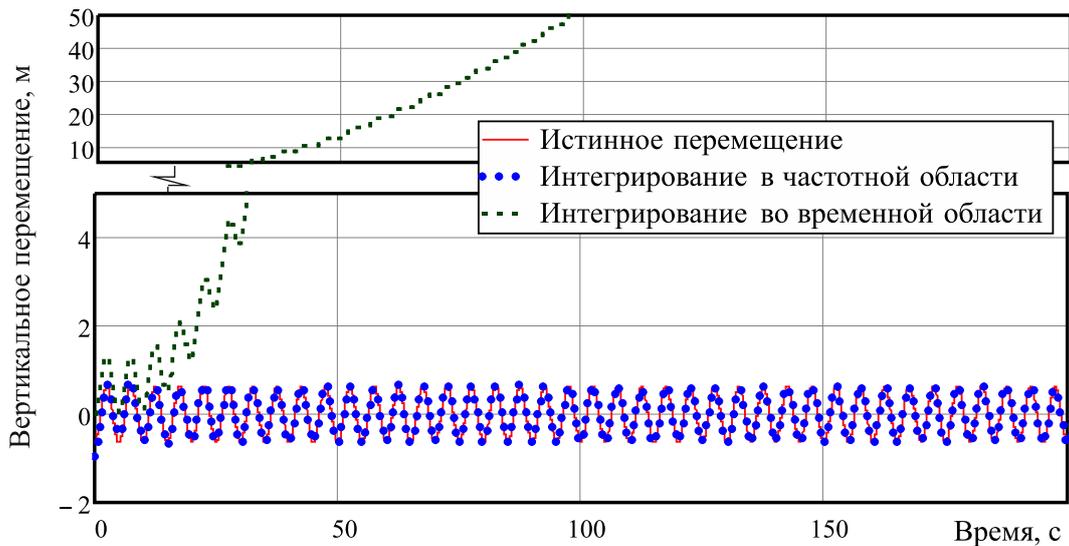


Рисунок 15 – Вертикальное перемещение ВБ

Как следует из рис. 15, непосредственное интегрирование даже в случае точной компенсации ускорения силы тяжести дает накапливающуюся погрешность с течением времени, обусловленную инструментальными погрешностями акселерометров. Предлагаемый алгоритм также сравнивался с методами интегрирования на апериодических звеньях (интеграторах с обратной связью)⁶. В результате исследования было установлено, что предложенный метод обладает существенно более высокой точностью (до 5 раз) и значительно меньшим переходным процессом.

В пятой главе (*ИИС стабилизации на основе индикаторного гиросtabilизатора на КВГ*) рассматривается ИИС стабилизации и сопровождения на базе двухосного индикаторного гиросtabilизатора с КВГ в контуре стабилизации, один из каналов которой приведен на рис. 16.

⁶ Иванов Ю.В. Гироскопические системы измерения вертикальной качки. – Тула: Изд-во Тул. гос. ун-т, 2004. 184 с.

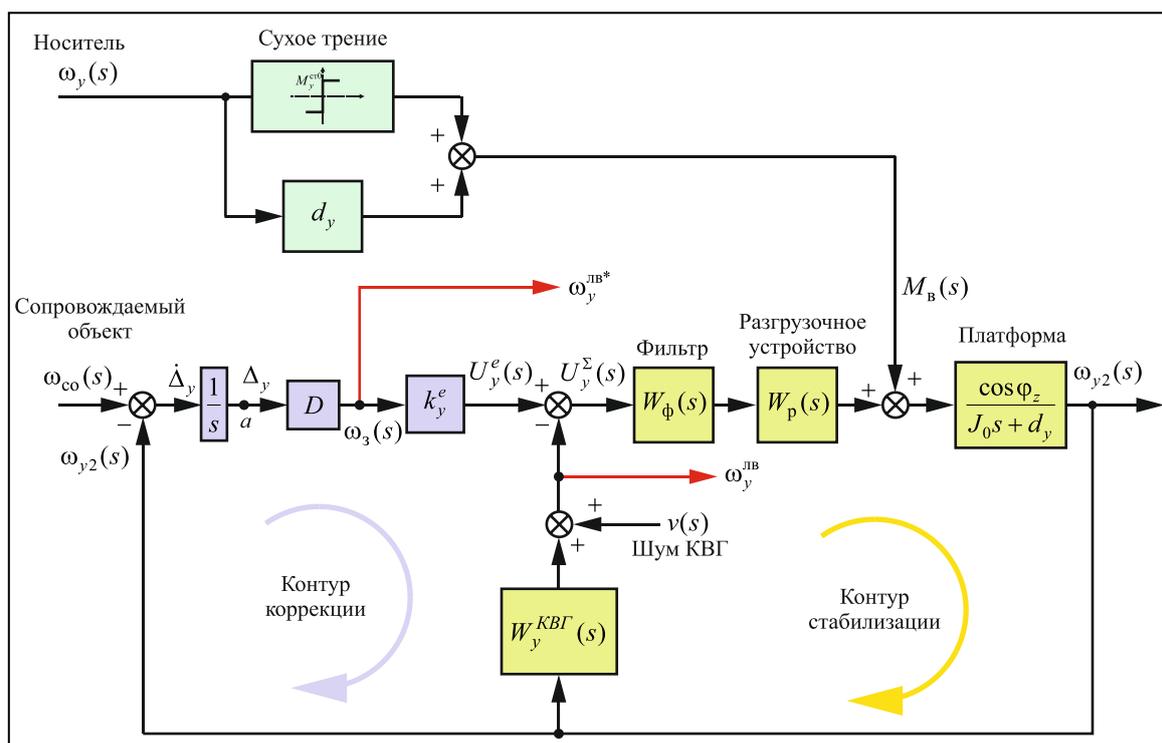


Рисунок 16 – Структурная схема ИИС стабилизации и сопровождения с КВГ

На рис. 16 обозначено: ω_{co} , ω_{y2} , ω_y , ω_3 – угловые скорости сопровождаемого объекта, платформы, носителя и заданной угловой скорости соответственно; $\omega_y^{лв}$, $\omega_y^{лв*}$ – угловые скорости линии визирования; Δ_y – угол рассогласования между линией визирования и направлением на сопровождаемый объект; J_0 – момент инерции платформы; d_y – коэффициент вязкого трения; φ_z – угол отклонения платформы; $W_p(s)$ – передаточная функция разгрузочного устройства, включающего усилитель мощности, двигатель, редуктор; $W_\phi(s)$ – передаточная функция фильтра, улучшающего динамику контура сопровождения; k_y^e – коэффициент передачи контура управления; k_r – коэффициент передачи КВГ; D – добротность по скорости контура управления; $v(s)$, $L[\text{sign } \omega_H]$ – изображения по Лапласу инструментальных погрешностей КВГ и функции $\text{sign } \omega_y$; $M_y^{ст0}$ – модуль момента сил сухого трения.

Несомненная важность решения задачи о синхронных погрешностях ИИС стабилизации и сопровождения связана с тем, что ее воздействие в контуре стабилизации носителя эквивалентно введению дополнительной положительной обратной связи по угловой скорости носителя. Эта обратная связь снижает демпфирование контура управления носителем, а в некоторых случаях может привести к его неустойчивости. Наиболее полное исследование синхронных погрешностей системы сопровожде-

ния выполнено А.К. Неусыпиным⁷, которые, однако, ограничены гирос приводами на классических гироскопах. Применение КВГ в ИИСС требует принципиально новых решений. В рамках сформулированной задачи разработана методика экспериментального оценивания синхронных погрешностей ИИСС, основанная на спектральном анализе выходного сигнала КВГ-ДУС и определения амплитуды гармоники на частоте колебаний стенда (рис. 17). Данная методика позволяет более точно оценить синхронные погрешности ИИСС по сравнению с методом непосредственной оценки.

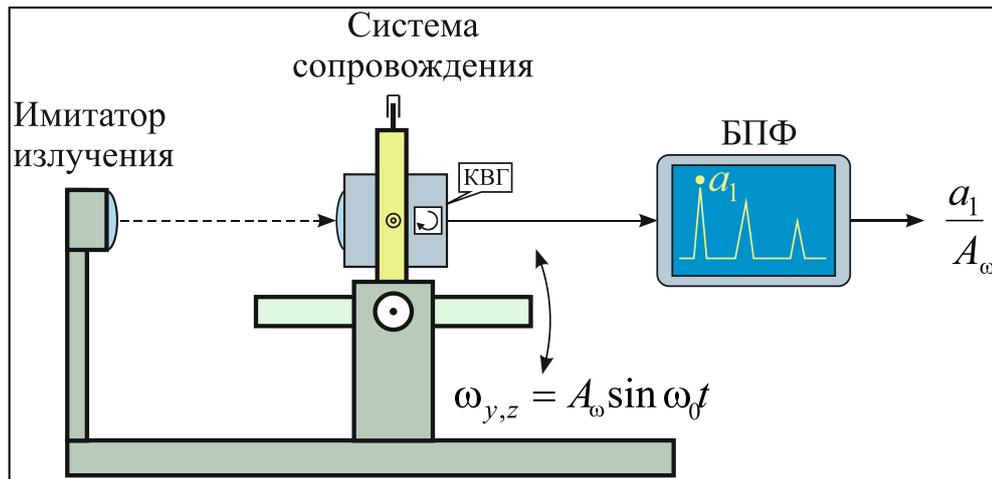


Рисунок 17 – Схема способа для экспериментальной оценки синхронных погрешностей ИИСС

Сущность методики заключается в том, что ИИСС устанавливается на стенд синусоидальных колебаний с амплитудой A_ω и частотой ω_0 , а выходной сигнал КВГ записывается в файл данных. Затем данные об угловой скорости платформы ИИСС подвергается быстрому преобразованию Фурье (БПФ) и определяется амплитуда a_1 гармоники на частоте колебаний стенда ω_0 . Далее определяются относительная синхронная погрешность или коэффициент ослабления:

$$\Delta\omega_{y,z}^{\text{синхр}} = \frac{a_1}{A_\omega}, \quad k_{y,z}^{\text{осл}} = \frac{A_\omega}{a_1},$$

где a_1 – амплитуда гармоники на частоте колебаний стенда.

На рис. 18 приведен экспериментальный сигнал МЭМС-КВГ и его спектральная характеристика (рис. 19) макета ИИСС, полученная для колебаний стенда с частотой 2 Гц и амплитудой 200 °/с. На рис. 19 четко прослеживается гармоника на частоте колебаний стенда и кратные ей гармоники с коэффициентами 3, 5, 7, 9, вызванные силами сухого трения. Относительная синхронная погрешность для данной ИИСС со-

⁷ Неусыпин А. К. Гироскопические приводы. – М.: Машиностроение, 1978. – 192 с.

ставила 0,00085 (коэффициент ослабления соответственно – 1176). При использовании метода непосредственной оценки синхронная погрешность имеет значение $\approx 0,005$, которое существенно завышено из-за шума МЭМС-КВГ.

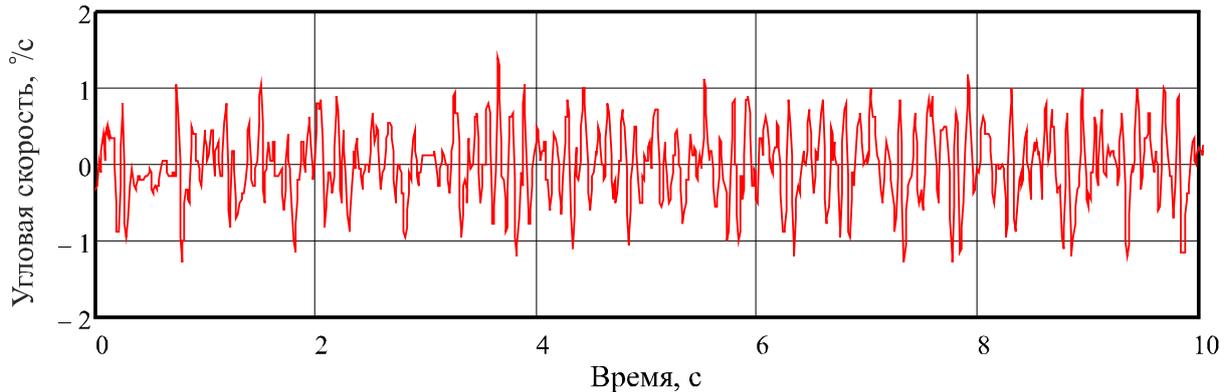


Рисунок 18 – Сигнал МЭМС-КВГ при синусоидальных колебаниях макета ИИСС

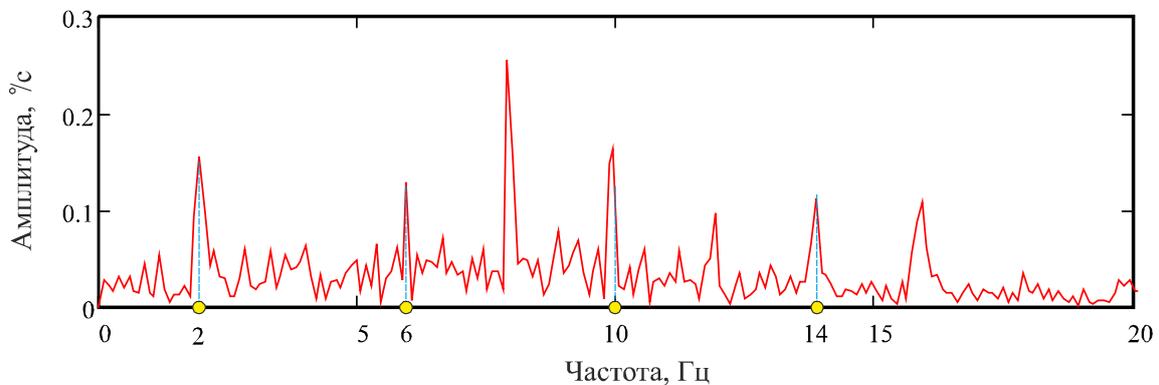


Рисунок 19 – Амплитудный спектр выходного сигнала МЭМС-КВГ макета ИИСС

Показана эффективность применения метода вариаций Аллана для исследования случайных погрешностей измерения линии визирования ИИСС, которые могут быть проанализированы непосредственно с выходов КВГ или с выхода координатора.

Получено аналитическое соотношение, позволяющее оценивать синхронные погрешности ИИСС на этапе проектирования:

$$\Delta\omega_{\text{синхр}} = \frac{\cos\varphi_z \omega \sqrt{T_c^2 \omega^2 + 1} \left(d_y + \frac{4M_y^{\text{ст0}}}{\pi A_\omega} \right)}{\sqrt{(DK_{\text{дус}}^{\text{КВГ}} k_y^p \cos\varphi_z - J_0 \omega_0^2)^2 + [(1 + DT_c) K_{\text{дус}}^{\text{КВГ}} k_y^p \cos\varphi_z \omega_0 - J_0 T_c \omega_0^3]^2}},$$

где T_c – постоянная времени КВГ.

В работе также получены соотношения, позволяющие оценить модули сил сухого трения по амплитуде третьей гармоники спектральной характеристики выходного сигнала КВГ-ДУС при испытаниях системы на колебательном стенде. Данные соотношения могут быть полезны при верификации математической модели системы сопровождения на КВГ.

Установлено, что информацию об угловой скорости линии визирования можно получать двумя способами: непосредственно снимая сигнал $\omega_y^{ЛВ}$ с КВГ-ДУС и по информации о об угле рассогласования $\omega_y^{ЛВ*} = D\Delta_y$. Показано, что использование КВГ-ИГ в контуре стабилизации целесообразно в режиме стабилизации (без контура коррекции) и недопустимо в системе сопровождения за подвижным объектом, так как в этом случае угол рассогласования будет нарастать со временем.

Показано, что СКО погрешности угла рассогласования, вызванное шумом КВГ со случайным блужданием угла ARW , приближенно определяется соотношением $\sigma_{\Delta}^{ARW} \approx ARW / \sqrt{2D}$. Случайные колебания платформы могут быть приближенно оценены по зависимости $\sigma_{\omega_{y2}}^{ARW} \approx ARW \sqrt{K_{дус}^{КВГ} k_y^p \cos \varphi_z / (2J_0)}$. Установлено, что случайные погрешности КВГ-ДУС приводят к неограниченному росту СКО погрешности ИИСС в режиме стабилизации (без контура коррекции) и остаются ограниченными с контуром коррекции. СКО погрешности ИИСС без контура коррекции на КВГ-ИГ, вызванного шумом КВГ не нарастает со временем.

В шестой главе (*Анализ погрешностей ИИС навигации на различных интервалах функционирования*) рассмотрена модель погрешностей ИИНС на базе бескарданной инерциальной навигационной системы (БИНС). Несмотря на кажущуюся изученность задачи о погрешностях БИНС, анализ литературы показал отсутствие систематически изложенного математического описания погрешностей в виде аналитических соотношений. Показана необходимость разработки аналитических соотношений для оценки точности БИНС на различных интервалах функционирования: коротком ($0 \div 1000$ с); среднем ($0 \div 2$ ч) и длинном ($0 \div 24$ ч).

Установлено, что дрейф интегратора долготы БИНС приводит к появлению «векового члена», который ранее был установлен для платформенных инерциальных навигационных систем⁸. В БИНС дрейф интегратора долготы может быть вызван погрешностями округления при реализации численных алгоритмов. Дрейф интегратора долготы со скоростью примерно 1,5 м/сутки подтвержден при реализации алгоритма БИНС для отечественного контроллера в течение 100 модельных суток на широте 52° (рис. 20). Показано, что тренд погрешности долготы сопровождается шулеровскими и суточными колебаниями.

Получены и систематизированы аналитические соотношения погрешностей БИНС при различных моделях случайных погрешностей КВГ (акселерометров): случайной константы $\Delta\omega_{ib,x}^b$ ($\Delta n_{ib,z}^b$), белого шума со случайным блужданием угла (ARW),

⁸ Бромберг П. В. Теория инерциальных систем навигации. М.: Наука, 1979. – 294 с.

(скорости (VRW)), винеровского процесса интенсивностью Q_{ω}^{Win} (Q_a^{Win}), марковского процесса с временем корреляции $1/\mu_{\omega}$ ($1/\mu_a$) и дисперсией D_{ω}^{Mark} (D_a^{Mark}) (табл. 1 – 4).

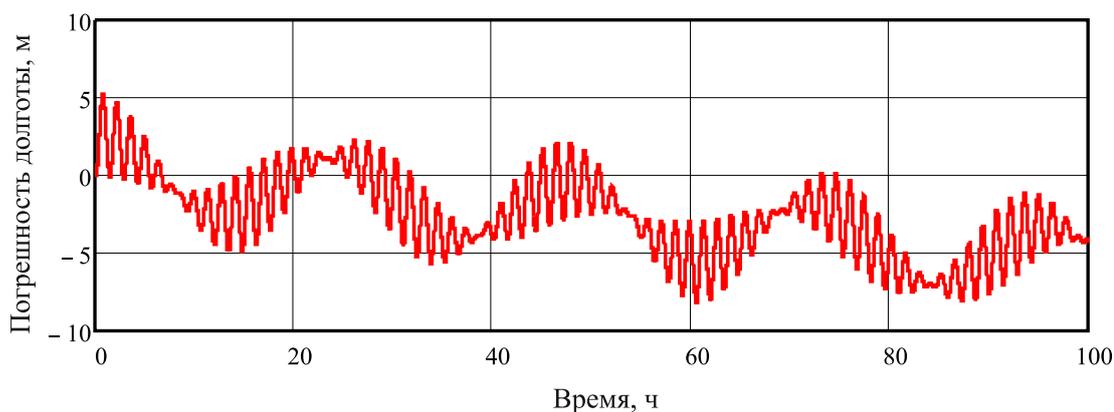


Рисунок 20 – Погрешность БИНС по долготе, вызванная дрейфом интегратора (фрагмент)

Таблица 1 – Погрешности линейной скорости БИНС для различных моделей инструментальных погрешностей КВГ

		Интервал функционирования БИНС	
		Короткий	Длительный
Модель погрешности КВГ	Случайная константа	$g\Delta\omega_{ib,x}^b t^2$	$\frac{g\Delta\omega_{ib,x}^b}{\omega_S^2} (1 - \cos\omega_S t)$
	Белый шум, σ	$\frac{gARW_x}{\sqrt{3}} t^{1,5}$,	$\frac{g \cdot ARW_x}{\omega_S} \sqrt{\frac{t}{2}}$,
	Винеровский шум, σ	$g\sqrt{\frac{Q_{\omega}^{Win}}{20}} t^{2,5}$,	$\frac{g\sqrt{Q_{\omega}^{Win}}}{\omega_S^2} \sqrt{\frac{3t}{2}}$,
	Марковский шум, σ	$g\sqrt{\frac{2D_{\omega}^{Mark}\mu_{\omega}}{20}} t^{2,5}$	$\frac{g\sqrt{2D_{\omega}^{Mark}\mu_{\omega}}}{\omega_S\mu_{\omega}} \sqrt{\frac{t}{2}}$

Таблица 2 – Погрешности БИНС по координате для различных моделей инструментальных погрешностей КВГ

		Интервал функционирования БИНС	
		Короткий	Длительный
Модель погрешности КВГ	Случайная константа	$g\frac{\Delta\omega_{ib,x}^b}{6} t^3$	$R\Delta\omega_{ib,x}^b t$
	Белый шум, σ	$g\frac{ARW_x}{\sqrt{20}} t^{2,5}$	$R \cdot ARW_x \sqrt{\frac{3t}{2}}$.
	Винеровский шум, σ	$g\sqrt{\frac{Q_{\omega}^{Win}}{252}} t^{3,5}$	$R\sqrt{Q_{\omega}^{Win}} \sqrt{\frac{t^3}{3}}$
	Марковский шум, σ	$g\sqrt{\frac{2D_{\omega}^{Mark}\mu_{\omega}}{252}} t^{3,5}$	$R\sqrt{\frac{2D_{\omega}^{Mark}}{\mu_{\omega}}} \sqrt{\frac{3t}{2}}$

Показано, что на коротком интервале времени действие винеровского и марковского шума КВГ эквивалентно, что приводит к нарастанию СКО погрешности по координате пропорционально $t^{3,5}$. На длительном интервале времени (более 2 ч) действие белого шума эквивалентно марковскому процессу. Аналогичные выводы сделаны и для влияния случайных погрешностей акселерометров на погрешности БИНС.

Существенно, что СКО погрешностей по координате, скорости и углам ориентации являются неограниченными сверху функциями времени, так как под знаком радикалов присутствует время в явном виде.

Таблица 3 – Погрешности линейной скорости БИНС для различных моделей погрешностей акселерометров

		Интервал функционирования БИНС	
		Короткий	Длительный
Модель погрешности акселерометров	Постоянный	$\Delta n_{ib,z}^b t$	$\frac{\Delta n_{ib,z}^b}{\omega_S} \sin \omega_S t$
	Белый шум, σ	$VRW_z \sqrt{t}$	$VRW_z \sqrt{\frac{t}{2}}$
	Винеровский шум, σ	$\frac{\sqrt{Q_a^{Win}}}{\sqrt{3}} t^{\frac{3}{2}}$	$\frac{\sqrt{Q_a^{Win}}}{\omega_S} \sqrt{\frac{t}{2}}$
	Марковский шум, σ	$\frac{\sqrt{2D_a^{Mark} \mu_a}}{\sqrt{3}} t^{\frac{3}{2}}$	$\frac{\sqrt{2D_a^{Mark} \mu_a}}{\mu_a} \sqrt{\frac{t}{2}}$

Таблица 4 – Погрешности БИНС по координате для различных моделей погрешностей акселерометров

		Интервал функционирования БИНС	
		Короткий	Длительный
Модель погрешности акселерометров	Постоянный	$\frac{\Delta n_{ib,z}^b}{2} t^2$	$\frac{\Delta n_{ib,z}^b R}{g} (1 - \cos \omega_S t)$
	Белый шум, σ	$\frac{VRW_z}{\sqrt{3}} t^{\frac{3}{2}}$	$\frac{VRW_z}{\omega_S} \sqrt{\frac{t}{2}}$
	Винеровский шум, σ	$\frac{\sqrt{Q_a^{Win}}}{\sqrt{20}} t^{\frac{5}{2}}$	$\frac{R \sqrt{Q_a^{Win}}}{g} \sqrt{\frac{3t}{2}}$
	Марковский шум, σ	$\frac{\sqrt{2D_a^{Mark} \mu_a}}{\sqrt{20}} t^{\frac{5}{2}}$	$\frac{\sqrt{2D_a^{Mark} \mu_a}}{\omega_S \mu_a} \sqrt{\frac{t}{2}}$

Показано, что в северном канале БИНС постоянная погрешность КВГ в виде случайной константы $\Delta\omega_{ib,z}^b$ при длительном функционировании БИНС подобно платформенной ИНС не вызывает неограниченного роста погрешности широты, в отличие от восточного канала. Воспринимаемое на среднем интервале функционирования накопление погрешности по широте $-R\Delta\omega_{ib,z}^b\omega_S t$ (ω_S – частота Шулера, R – средний радиус Земли) является фрагментом синусоиды, амплитудой $R\Delta\omega_{ib,z}^b/U$ (U – угловая скорость суточного вращения Земли) при длительном функционировании БИНС.

Получены аналитические соотношения, позволяющие оценить влияние шумов КВГ на СКО погрешности БИНС по широте на любом интервале функционирования с учетом суточных колебаний:

– вклад «восточного» КВГ:

$$\sigma_{\Delta X}^{ARW_z} = \frac{gARW_z}{\omega_S^2 - U^2} \sqrt{t - \frac{\sin[(\omega_S - U)t]}{\omega_S - U} + \frac{\sin 2\omega_S t}{4\omega_S} - \frac{\sin[(\omega_S + U)t]}{\omega_S + U} + \frac{\sin Ut}{4U}},$$

– вклад «азимутального» КВГ

$$\sigma_{\Delta X}^{ARW_y} = \frac{R \cdot ARW_y \cdot \omega_S}{\omega_S^2 - U^2} \times \\ \times \sqrt{\frac{1}{2}(\omega_S^2 + U^2)t + U\omega_S \frac{\sin[(\omega_S + U)t]}{\omega_S + U} + \frac{\sin[(U - \omega_S)t]}{\omega_S - U} - \frac{U^2 \sin 2\omega_S t}{4\omega_S} - \frac{\omega_S^2 \sin 2Ut}{4U}}.$$

Совместный вклад КВГ в СКО погрешности широты при длительном времени функционирования можно оценить по приближенной зависимости

$$\sigma_{\Delta X}^{ARW} \approx R \cdot ARW \sqrt{\frac{3}{2}t},$$

которая аналогична СКО погрешности долготы.

На основе теоретического исследования установлено, что СКО погрешностей построения аналитической вертикали (β , χ) и азимутальной погрешности (α), вызванных шумом КВГ, при длительном функционировании БИНС определяются соотношениями

$$\sigma_{\beta,\chi}^{ARW}(t) \approx ARW \sqrt{\frac{t}{2}}, \quad \sigma_{\alpha}^{ARW}(t) \approx ARW \sqrt{t},$$

из которых следует, что СКО азимутальной погрешности, по меньшей мере, в $\sqrt{2}$ раз возрастает быстрее, чем СКО погрешности построения вертикали.

Приведенные аналитические соотношения позволяют проводить быструю экспресс-оценку погрешностей БИНС, вызванных различными случайными погрешностями датчиков первичной информации без моделирования алгоритмов БИНС или полной математической модели погрешностей высокого порядка.

В общих выводах и **заключении** приведены основные результаты исследований, проведенных в диссертационной работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Решена задача верификации математической модели КВГ, предложенной докт. Линчем, с учетом перекрестной связи, следующей от контура первичных колебаний к вторичному, которая часто пренебрегается при исследовании динамики КВГ. Показана недопустимость пренебрежения перекрестной связью в уравнении первичных колебаний для угловой скорости основания, составляющей более 5–10 °/с (в зависимости от типа резонатора КВГ). Это связано с тем, что при больших угловых скоростях начинает проявляться нелинейная зависимость амплитуд первичных и вторичных колебаний резонатора КВГ в зависимости от угловой скорости основания. Нелинейность теоретически установлена на основе частных решений уравнений колебаний резонатора с учетом перекрестной обратной связи. Данный вывод экспериментально подтвержден на волновом твердотельном гироскопе с металлическим резонатором прямого измерения (без контура компенсации кориолисова ускорения). При функционировании КВГ без обратной связи нелинейность характеристики может быть устранена, если выходной сигнал КВГ формировать в виде отношения амплитуд вторичных колебаний к первичным. Разработана структурная схема КВГ для огибающих первичных и вторичных колебаний, позволяющая анализировать КВГ без высокочастотной несущей колебаний резонатора с учетом перекрестной связи. Структурная схема позволяет осуществлять анализ КВГ для любой угловой скорости основания и выполнять синтез регулятора. Установлено, что интегральная часть ПИ-регулятора позволяет устранить нелинейную зависимость амплитуды вторичных колебаний компенсационного КВГ от угловой скорости основания.

2. Проанализированы способы комплексирования КВГ с акселерометрами при построении бескарданной гировертикали (БГ) с использованием классического комплементарного фильтра, фильтра Маджвика, фильтра Винера, Калмана и фильтра на основе уравнения Бортца. Разработана методика испытаний БГ, включающая исследования погрешностей БГ, вызванных случайными погрешностями КВГ и акселерометров методом вариаций Аллана, баллистических погрешностей при ускоренном движении объекта и погрешностей при синусоидальных колебаниях основания. Показано, что при анализе БГ методом Аллана должна отсутствовать процедура предварительного интегрирования сигнала, так как выходной информацией БГ являются углы. Установлено, что при белошумных погрешностях КВГ и акселерометров кривая отклонения Аллана имеет асимптоты с наклонами $-0,5$ и -1 . В результате исследования установлено, что описанные в литературе фильтры связи КВГ и акселерометров при построении БГ дают близкие результаты с точки зрения случайных и баллистических

погрешностей. В связи с этим встречающийся в периодической литературе тезис о превосходстве одного фильтра перед другим является спорным. С точки зрения гармонических погрешностей лучшие результаты дает фильтр на основе уравнения Бортца.

3. Показано, что для вращающегося по крену носителя целесообразным является реализация ИИС ориентации, вырабатывающей не три параметра ориентации, как в классических системах, а четыре: синус, косинус угла крена и традиционные углы рыскания и тангажа. Такой подход к построению системы ориентации упрощает решение задачи управления вращающимся подвижным объектом. Решена задача измерения угловой скорости крена при ограниченном диапазоне измерения КВГ, путем специальной ориентации измерительных осей КВГ. Предложена расщепленная схема алгоритма ориентации, в которой задача формирования синуса и косинуса угла крена решается независимо от углов рыскания и тангажа. Подтверждено, что такая схема имеет более высокую точность по сравнению с традиционными алгоритмами ориентации. Разработан алгоритм ориентации вращающегося носителя, основанный на измерениях только двух КВГ, что позволяет снизить экономические затраты на изготовление инерциального измерительного модуля.

4. Решена задача построения аналитической вертикали волномерных информационно-измерительных систем на основе совместной обработки информации КВГ и акселерометров в частотной области. Фильтрация в частотной области позволяет реализовывать практические идеальные частотные характеристики фильтров, что приводит к выигрышу в точности при оценивании углов дифферента и бортовой качки волномерного буя (ВБ). На основе обработки экспериментальных данных подтверждена целесообразность применения данных способов. Решена задача построения устойчивого вертикального канала ИИС ВБ, позволяющего измерять ординату морской волны инерциальным методом. Решение задачи основано на спектральном анализе сигнала акселерометра, выделения участка спектра, содержащего полезный сигнал с последующим интегрированием в частотной области. Существенно, что такое интегрирование сводится к алгебраической операции деления на $j\omega$, что не требует применения сложных вычислительных процедур интегрирования, реализующихся во временной области. Результаты исследований показали более высокую точность измерения по сравнению с методами интегрирования с обратной связью.

5. Решена задача анализа синхронных погрешностей ИИС сопровождения на базе индикаторного гиросtabilизатора с КВГ в контуре стабилизации, учитывая тот факт, что последние такого рода теоретические исследования относятся к 70 гг. прошлого столетия и сделаны были для гиросприводов на классических гироскопах. Разработана методика оценивания синхронных погрешностей на основе спектрального анализа выходного сигнала КВГ в составе индикаторного гиросtabilизатора, имеющая более высокую точность по сравнению с методом непосредственной оцен-

ки. Получены аналитические соотношения для оценивания синхронных погрешностей на этапе проектирования новых образцов ИИС. Показана возможность оценивания модуля момента сил сухого трения по третьей гармонике спектральной характеристики выходного сигнала КВГ. Получены аналитические соотношения для оценки влияния случайных инструментальных погрешностей КВГ на точность стабилизации и выработки угловой скорости линии визирования. Показана перспективность анализа случайных погрешностей ИИСС, как измерителя угловой скорости линии визирования, методом вариаций Аллана, который обычно применяется только для анализа выходных сигналов датчиков первичной информации.

б. Разработана и систематизирована совокупность аналитических соотношений, позволяющая получать быструю экспресс-оценку точности решения задач ориентации и навигации ИИС с учетом инструментальных погрешностей КВГ и акселерометров без моделирования полного алгоритма БИНС или модели погрешностей БИНС высокого порядка. Полученные аналитические соотношения представлены на различных интервалах функционирования БИНС. Аналитически и экспериментально подтверждена неустойчивость восточного канала БИНС, вызванная дрейфом интегратора долготы.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи библиографической и реферативной базы данных *Scopus*

1. *The microsystem avionics of smallsize pilotless aircraft / P.P. Paramonov, Yu.I. Sabo, V.Ya. Raspopov, V.Ya. Tovkach, R.V. Alaluev, V.V. Matveyev et al. // 14th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2007. P. 298–300.*
2. *Experience of optoelectronic single-rotor target gyro-coordinator development/ A.V. Dmitriev, S.L. Pogorelskiy, V.V. Matveyev, V.Ya. Raspopov et al. //14th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2007 - Proceedings. 14. 2007. P. 146-148.*
3. *Raspopov V.Ya., Matveev V.V., Alaluev R.V. Onboard information control systems on micromechanical sensors for various unmanned aerial vehicles // Jubilee 15th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2008. P.1–2.*
4. *Integrated navigation microsystems for small unmanned aerial vehicles / V.Ya. Raspopov, Yu.V. Ivanov, R.V. Alaluev, V.V. Matveev et al. //18th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2011. P. 184–192.*

5. *Backup strapdown attitude control system on russian-made measuring base/ P.P. Paramonov, V.A. Shukalov, Yu. I. Sabo, V.Ya. Raspopov, Yu.V. Ivanov, A.P. Shvedov, A.V. Ladonkin, V.V. Matveev //19th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2012. P. 114-116.*
6. *Matveev V.V. Strapdown inertial navigation system of a rotating carrier// 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2017. P. 1–2.*
7. *Micromechanical positioning system based on angular rate sensors/ R.V. Alaluev, V.V. Matveev., V.Y. Raspopov, A.P. Shvedov // 23rd Saint-Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2016. 2016. P. 31-37.*
8. *Matveev V.V., Raspopov V.Y. MEMS-based devices and systems for orientation, stabilization and navigation / 24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2017 - Proceedings. 24. 2017. P. 1–2.*
9. *Robust navigation of MAVs based on deeply integrated laser-camera information / R.V. Alaluev, V.V. Matveev, V.Y. Raspopov, A.P. Shvedov //24th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2017. 2017. P. 1–4.*
10. *Coriolis Vibratory Gyroscope with a Metal Resonator for Free Wave Mode/ V. Y. Raspopov, V. V. Likhosherst, I. A. Volchikhin, V. V. Matveev et al. // 26th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). Saint Petersburg. Russia. 2019. P. 1–2.*

Научные работы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Матвеев В.В.**, Распопов В.Я. Зависимость характеристик микромеханического гироскопа от ориентации упругих элементов на пластине монокристаллического кремния //Изв. вузов Приборостроение. 2006. Т. 49. № 6. С. 61-65.
2. Исследование погрешностей инерциально-спутниковой навигационной системы на базе микромеханических чувствительных элементов/ Р.В. Алалуев, **В.В. Матвеев**, В.А. Орлов, Ю.В. Иванов //Гироскопия и навигация. 2006. № 2 (53). С. 102.
3. Демпфирование поперечных колебаний вращающейся по крену ракеты с помощью микрогироскопа / В.Я. Распопов, А.П. Марков, Ю.В. Иванов, Д.М. Малютин, А.А. Горин, Р.В. Алалуев, **В.В. Матвеев** //Гироскопия и навигация. 2007. № 1 (56). С. 125–128.

4. Исследование статистических характеристик микромеханических датчиков инерциального модуля / Иванов Ю.В., Орлов В.А., Алалуев Р.В., **Матвеев В.В.** // Датчики и системы. 2007. № 1. С. 25–26.
5. Информационно-управляющие системы на микрогироскопах вращающихся по крену летательных аппаратов / В.Я. Распопов, **В.В. Матвеев**, Д.М. Малютин, Ю.В. Иванов и др. // Датчики и системы. 2007. № 4. С. 8–11.
6. Измерительный модуль микросистемной бесплатформенной инерциальной навигационной системы / Р.В. Алалуев, Ю.В. Иванов, **В.В. Матвеев** и др. // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 9. С. 61–64.
7. Микросистемная авионика малогабаритного беспилотного летательного аппарата / П.П. Парамонов, Ю.И. Сабо, В.Я. Распопов, С.Е. Товкач, Р.В. Алалуев, **Матвеев В.В.** и др. // XIV С.-Петербургская межд. конференция по интегрированным навигационным системам: сб. материалов / гл. ред. В. Г. Пешехонов. 2007. С. 270–272.
8. Опыт разработки оптико-электронных однороторных гироскоординаторов цели / Дмитриев А.В., Погорельский С.Л., **Матвеев В.В.**, Распопов В.Я. и др. // XIV С.-Петербургская межд. конференция по интегрированным навигационным системам: сб. материалов / гл. ред. В. Г. Пешехонов. 2007. С. 151–153.
9. **Матвеев В.В.**, Распопов В.Я. Выбор ориентации топологии микрогироскопа на пластине монокристаллического кремния // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 7 (96). С. 44–47.
10. Бесплатформенная система ориентации и навигации мини-беспилотного летательного аппарата / Р.В. Алалуев, Ю.В. Иванов, **В.В. Матвеев** и др. // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 10. С. 54с–54.
11. Распопов В.Я., **Матвеев В.В.**, Алалуев Р.В. Бортовые информационно-управляющие системы на микромеханических чувствительных элементах для беспилотных летательных аппаратов различного назначения // Юбилейная XV С.-Петербургская межд. конференция по интегрированным навигационным системам: сб. материалов / гл. ред. В. Г. Пешехонов. 2008. С. 45–53.
12. Телухин С.В., **Матвеев В.В.** Беспилотный летательный аппарат как объект управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 10. С. 54а-54.
13. Лихошерст В.В., **Матвеев В.В.** Акселерометрические инерциальные системы // Справочник. Инженерный журнал (с приложением). 2009. № 7. С. 14.

14. Интегрированная навигационная система для малоразмерного летательного аппарата / П.П. Парамонов, Ю.И. Сабо, А.В. Шукалов, **В.В. Матвеев** и др. //Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 10. С. 60–67.
15. Информационно-измерительные системы на микромеханических чувствительных элементах для беспилотных летательных аппаратов /В.Я. Распопов, Р.В. Алалуев, **В.В. Матвеев**, Д.М. Малютин и др. // XXVII конференция памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова: рефераты докладов. 2010. С. 19–20.
16. **Матвеев В.В.** Погрешности микромеханических гироскопов// Справочник. Инженерный журнал (с приложением). 2010. № 11. С. 15.
17. Информационно-измерительные системы ориентации на микромеханических чувствительных элементах для вращающихся по крену летательных аппаратов / В.Я. Распопов, **В.В. Матвеев**, В.В. Лихошерст, Р.В. Алалуев и др. //Нано- и микросистемная техника. 2010. № 12 (125). С. 26-30.
18. **Матвеев В.В.**, Распопов В.Я., Лихошерст В.В. Система ориентации беспилотного летательного аппарата с каналом видеонаблюдения //Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 12. С. 66–70.
19. Распопов В.Я., **Матвеев В.В.** Определение угловых параметров вращающегося по крену летательного аппарата //Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2010. № 6 (284). С. 115–119.
20. Комплексованные микросистемы ориентации малоразмерных беспилотных летательных аппаратов/ В.Я. Распопов, Ю.В. Иванов, Р.В. Алалуев, **В.В. Матвеев** и др. //XVIII С.- Петербургская межд. конференция по интегрированным навигационным системам: сб. материалов/ гл. ред. В. Г. Пешехонов. 2011. С. 161–169.
21. **Матвеев В.В.** Бесплатформенная система ориентации с акселерометрической коррекцией //Датчики и системы. 2011. № 8. С. 12–15.
22. Информационно-аналитическое обеспечение начальных этапов проектирования микромеханических гироскопов и акселерометров/ В.В. Ефимов, В.А. Калинин, В.В. Лихошерст, **В.В. Матвеев** и др. //Нано- и микросистемная техника. 2012. № 1 (138). С. 11–18.
23. **Матвеев В.В.** Исследование погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы высокодинамичного летательного аппарата // Изв. Тул. гос. ун-та. Техн. науки. 2012. № 12-1. С. 165–173

24. **Матвеев В.В.** Модель погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы // Изв. Тул. гос. ун-та. Техн. науки. 2012. № 12-1. С. 188–196.
25. **Матвеев В.В.**, Серегин С.И., Лихошерст В.В. Математические модели микромеханических гироскопов LL – типа // Изв. Тул. гос. ун-та. Техн. науки. 2012. № 12-1. С. 205-213.
26. **Матвеев В.В.**, Шведов А.П., Серегин С.И. Алгоритм ориентации для вращающегося по крену летательного аппарата//Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 9. С. 5–9.
27. Резервная бесплатформенная система ориентации на отечественной измерительной базе/ В.Я. Распопов, Ю.В. Иванов, П.П. Парамонов, Ю.И. Сабо, **В.В. Матвеев**, А.П. Шведов //Нано- и микросистемная техника. 2012. № 11 (148). С. 43–45.
28. **Матвеев В.В.** Инженерный анализ погрешностей бесплатформенной инерциальной навигационной системы // Изв. Тул. гос. ун-та. Техн. науки. 2014. № 9-2. С. 251–267.
29. **Матвеев В.В.**, Погорелов М.Г. Система измерения вертикальной качки волномерного бую // Изв. Тул. гос. ун-та. Техн. науки. 2014. № 9-2. С. 267–275.
30. Расчетно-аналитический модуль для САПР микромеханических приборов навигации /В.Я. Распопов, **В.В. Матвеев**, В.В. Лихошерст, В.В. Турчанинов // XXI С.-Петербургская межд. конференция по интегрированным навигационным системам: сб. материалов/ гл. ред. В. Г. Пешехонов. 2014. С. 238–241.
31. **Матвеев В.В.**, Погорелов М.Г. Автопилот беспилотного летательного аппарата на базе смартфона// Изв. Тул. гос. ун-та. Техн. науки. 2015. № 3. С. 136–148.
32. **Матвеев В.В.**, Погорелов М.Г. Анализ погрешностей микромеханических гироскопов методом вариаций Аллана // Изв. Тул. гос. ун-та. Техн. науки. 2015. № 3. С. 123–135.
33. Инерциальные измерители угловых параметров вращающихся летательных аппаратов / Р.В. Алалуев, В.В. Лихошерст, **В.В. Матвеев** и др. // Изв. Тул. гос. ун-та. Техн. науки. 2016. № 10. С. 196 – 223.
34. Микромеханическая система позиционирования на базе датчиков угловой скорости/ Р.В. Алалуев, **В.В. Матвеев**, В.Я. Распопов, А.П. Шведов // XXIII С.-Петербургская межд. конференция по интегрированным навигационным системам: сб. материалов/ гл. ред. В. Г. Пешехонов. 2016. С. 17–24.
35. Микросистемы ориентации / В.Я. Распопов, **В.В. Матвеев**, А.П. Шведов, М.Г. Погорелов и др. // Изв. Тул. гос. ун-та. Техн. науки. 2016. № 10. С. 239–265.

36. Системы позиционирования/ Р.В. Алалуев, Ю.В. Иванов, Малютин Д.М., **В.В. Матвеев** и др. //Изв. Тул. гос. ун-та. Техн. науки. 2016. № 10. С. 223–238.
37. **Матвеев В.В.** Бесплатформенная инерциальная навигационная система вращающегося носителя//XXIV С.- Петербургская межд. конференция по интегрированным навигационным системам: сб. материалов/ гл. ред. В. Г. Пешехонов. 2017. С. 194–196.
38. Анализ эффективности алгоритмов коррекции микромеханической системы позиционирования углового положения головы пилота / Р.В. Алалуев, **В.В. Матвеев**, В.Я. Распопов, А.П. Шведов // XXIV С.- Петербургская межд. конференция по интегрированным навигационным системам: сб. материалов/ гл. ред. В. Г. Пешехонов. 2017. С. 35–38.
39. Волновые твердотельные гироскопы (аналитический обзор)/ И.А. Волчихин, А.И. Волчихин, Д.М. Малютин, **В.В. Матвеев** и др. // Изв. Тул. гос. ун-та. Техн. науки. 2017. № 9-2. С. 59–78.
40. **Матвеев В.В.**, Распопов В.Я. Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации на микромеханических датчиках//XXIV С.- Петербургская межд. конференция по интегрированным навигационным системам: сб. материалов/ гл. ред. В. Г. Пешехонов. 2017. С. 264–266.
41. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором и его применение в системах ориентации, стабилизации и навигации/ Р.В. Алалауев, И.А. Волчихин, А.В. Ладонкин, В.В. Лихошерст, Д.М. Малютин, **В.В. Матвеев** и др. // Изв. Тул. гос. ун-та. Техн. науки. 2019. № 8. С. 7–20.
42. Идентификация параметров системы сопровождения на базе индикаторного гиростабилизатора с МЭМС-гироскопом в контуре стабилизации/ Е. Ю. Кисловский, Д.Н. Мильченко, **В. В. Матвеев** и др. // Изв. Тул. гос. ун-та. Техн. науки. 2019. №8. С. 165–171.
43. **Матвеев В.В.** Анализ комплементарных фильтров при построении бескарданной гировертикали // Изв. Тул. гос. ун-та. Техн. науки. 2019. № 8. С. 153–164.
44. **Матвеев В.В.**, Лихошерст В.В. Влияние перекрестной связи на динамику кориолисового вибрационного гироскопа// Изв. Тул. гос. ун-та. Техн. науки. 2019. № 8. С. 22–29.
45. Система сопровождения подвижных объектов на МЭМС-гироскопах. / **В.В. Матвеев**, Е.Ю. Кисловский, Д.Н. Мильченко, В.Я. Распопов и др. //Мехатроника, автоматизация, управление. 2019; 20(7). 437–442.

Монографии

1. 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.
2. **Матвеев В.В.** Бескарданные инерциальные системы ориентации и навигации: монография. – Саарбрюккен, Германия, LAP. 2015. – 152 с.
3. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором / В.Я. Распопов, И.А. Волчихин, А.И. Волчихин, А.В. Ладонкин, В.В. Лихошерст, **Матвеев В.В.**; под ред. В.Я. Распопова. Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. – 189 с.