

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ТУЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



КАЛИКАНОВ АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**Волновой твердотельный гироскоп
с низкодобротным объемным резонатором
для информационно-измерительной системы
ориентации беспилотного летательного аппарата**

**Специальность 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие
системы**

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук
Погорелов Максим Георгиевич

Тула 2023

СОДЕРЖАНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	5
ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ПОСТРОЕНИЮ ИИСО БПЛА.....	15
1.1 Беспилотные летательные аппараты.....	15
1.2 Механические гироскопические датчики для ИИСО БПЛА.....	19
1.3 Инерциальные датчики для ИИСО БПЛА.....	27
1.3.1 Волновой твердотельный гироскоп с объемным резонатором для ИИСО БПЛА.....	34
1.4 Выводы	45
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛИ ВТГ С НИЗКОДОБРОТНЫМ ОБЪЕМНЫМ РЕЗОНАТОРОМ, РАБОТАЮЩИМ В РЕЖИМЕ «СВОБОДНОЙ ВОЛНЫ»	47
2.1 Математическая модель ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны».....	47
2.2 Численная оценка необходимой добротности для обеспечения работы волнового твердотельного гироскопа с низкодобротным объемным резонатором.....	54
2.3 Разработка схмотехнического способа увеличения добротности ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны».....	56
2.4 Разработка автоколебательного способа возбуждения первичных колебаний ВТГ с низкодобротным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» для обеспечения минимального времени выхода на режим.....	62
2.5 Разработка способа обработки сигнала, полученного по огибающим первичных и вторичных колебаний с контрольных точек	

резонатора ВТГ, обеспечивающего работоспособность во всем диапазоне углов.....	70
2.5.1 Математическое описание по огибающим колебаний.....	70
2.5.2 Математическое описание разработанного способа.....	75
2.6 Описание ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» фигурами Лиссажу.....	78
2.7 Анализ полученных результатов.....	81
2.7.1 Методика имитационного моделирования ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» в составе ИИСО БПЛА.....	87
2.7.2 Определение времени работы ВТГ и времени выхода на режим.....	88
2.7.3 Исследование работы ВТГ ДУ при действии угловой скорости.....	89
2.7.4 Исследование работы ВТГ ДУ при повороте основания.....	94
2.8 Выводы	96
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РАБОТА НА МАКЕТНОМ ОБРАЗЦЕ ВТГ ДЛЯ ИИСО БПЛА.....	98
3.1 Разработка макетного образца ВТГ для ИИСО БПЛА.....	98
3.2 Экспериментальная установка для исследования ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» для ИИСО БПЛА.....	104
3.3 Программное обеспечение для исследований ВТГ для ИИСО БПЛА.....	106
3.4 Методика и условия экспериментальных исследований.....	107
3.5 Результаты экспериментальных исследований макета ВТГ для ИИСО БПЛА.....	111
3.6 Экспериментальные исследования макетного образца ВТГ для ИИСО БПЛА на подвижном основании.....	115

3.7 Выводы	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	121
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	123
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	141
Приложение А.....	141

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

БПЛА – беспилотный летательный аппарат

ВТГ – волновой твердотельный гироскоп

ВТГ-ДУС – волновой твердотельный гироскоп датчик угловой скорости

ВТГ-ИГ- волновой твердотельный гироскоп интегрирующий гироскоп

ВОГ – волоконно-оптический гироскоп

ДУ – датчик угла

ДУС – датчик угловой скорости

ИИСО – информационно измерительная система ориентации

КЛГ – кольцевой лазерный гироскоп

КВГ – кориолисовых вибрационных гироскопов

ЛГ – лазерный гироскоп

МЭМС – микроэлектромеханические системы

ММГ – микромеханический гироскоп

ММА – микромеханический акселерометр

SWaP-C – (*Size, Weight, Power and Cost*) – размер, вес, мощность и стоимость)

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В информационно-измерительных системах ориентации (ИИСО) подвижных объектов, в том числе высокодинамичных беспилотных летательных аппаратах (БПЛА) малого времени полета, измерительным ядром являются гироскопические датчики, построенные на различных физических принципах. Они могут применяться для измерения угловых скоростей с последующим интегрированием сигналов, однако, ввиду наличия погрешностей, это приводит к накоплению ошибки в вычисляемом угле и требует применения специальных мер коррекции или привлечения внешней информации. Другой способ применения – это непосредственное измерение углового положения подвижного объекта относительно стартовой системы координат, что является более предпочтительным для управления движением БПЛА.

Начиная с 40-х годов XX века в ИИСО БПЛА малого времени полета в качестве гироскопического датчика угла традиционно применяют трехстепенные механические гироскопы, относящиеся к приборам низкого и среднего класса точности, и представляющие собой изделия точной механики в виде гиromотора с импульсным разгоном, установленным в кардановом подвесе. Принцип их работы описывается теоретическими положениями Л. Эйлера, согласно которым быстровращающееся тело, имеющее неподвижную точку опоры и не подверженное влиянию моментов внешних сил, сохраняет в абсолютном пространстве первоначальное направление оси своего вращения. Тогда при угловом повороте объекта связанная с ним рама карданового подвеса развернется на тот же угол. Измерив его, например, потенциометрическим датчиком, можно определить и угловое отклонение объекта относительно опорного направления. Разгон гиromотора осуществляется за десятые или сотые доли секунды за счет импульсного освобождения энергии, запасенной в заведенной пружине, сжатом газе или пороховом заряде. Далее гироскоп работает в режиме «свободного выбега» ограниченный промежуток времени (порядка 40 секунд), ввиду последующей потери гироскопом своей работоспособности.

Развитие техники и появление новых областей применения БПЛА требуют повышения их эффективности, что в свою очередь накладывает необходимость в улучшении эксплуатационных характеристик применяемых гироскопов. В тоже время по оценке экспертов существующая точность механообработки в процессе изготовления трехстепенных гироскопов достигла во многом своего предела и дальнейшая их модернизация экономически не целесообразна. Существующие гироскопы с электрическим гироскопом, способные работать длительное время, не нашли применения в высокодинамичных БПЛА малого времени полета ввиду длительного (до нескольких минут) времени разгона.

Появление в начале 60-х годов XX века гироскопов на новых физических принципах, в частности волновых оптических гироскопов, в класс которых входят лазерные гироскопы (ЛГ) и волоконно-оптические гироскопы (ВОГ), позволило им занять свою нишу в условиях уже сложившейся к тому времени разветвлённой индустрии производства механических гироскопов для решения задач высокоточной ориентации и навигации подвижных объектов. Однако, для производства ЛГ характерно применение сложной технологии изготовления, предъявляющей допуск к точности размеров до 10 мкм с шероховатостью поверхности до 0,5 нм. Точность ВОГ серьезно ухудшается в агрессивных условиях (вибрация, ударные воздействия и градиенты температуры), при этом к точности изготовления так же предъявляются высокие требования. Все это приводит к высокой себестоимости и к экономической нецелесообразности их применения для построения ИИСО БПЛА малого временем полета.

В конце XX века бурное развитие промышленности и техники сформулировало перед разработчиками новую концепцию конструирования *SWaP-C* (*Size, Weight, Power and Cost* – размер, вес, мощность и стоимость) по снижению и оптимизации этих параметров ИИСО с целью повышения ее эффективности. Развитие технологии изготовления микро-электромеханических систем (МЭМС), в наибольшей степени удовлетворяющих концепции *SWaP-C*, привело к созданию микромеханических гироскопов (ММГ), представляющих собой датчики угловой скорости. Современные ММГ сочетают в себе механические и электрические

компоненты крайне малых размеров (до 4 мм и толщиной до 20 мкм). Среди основных проблем применения ММГ в составе ИИСО БПЛА специалисты выделяют такие как: чувствительность к действию ускорений (в англоязычной терминологии *g-sensitivity*), высокие требования к обеспечению работоспособности при значительных стартовых нагрузках, малый диапазон измерения, низкий класс точности (существуют ММГ и среднего класса точности на уровне 0,1-10 °/ч, однако их стоимость сопоставима со стоимостью ВОГ и они малодоступны к приобретению гражданскими компаниями). Это накладывает значительные ограничения на их применение в контуре управления движением высокодинамичных БПЛА малого времени полета.

Решением описываемой проблемы могут являться волновые твердотельные гироскопы (ВТГ), также относящиеся к классу кориолисовых вибрационных гироскопов (КВГ) как и ММГ, но при этом лишенные многих недостатков свойственных последним. В конструкции ВТГ не содержится подвижных частей, они обладают небольшими массогабаритами и стоимость их может быть на порядок ниже стоимости ВОГ и ЛГ. Конструктивно ВТГ состоит из резонатора и блока электроники. К настоящему времени существуют два основных типа ВТГ в зависимости от применяемого материала резонатора:

- ВТГ с высокодобротным полусферическим резонатором из плавленного кварца, обладающего чрезвычайно низкими характеристиками внутреннего трения. Они позволяют создать как датчик угловой скорости навигационного класса точности, так и датчик угла, но требуют при этом применения дорогостоящей технологии высокоточной обработки кварцевого стекла.

- ВТГ с низкодобротным объемным резонатором из металлического элинварного сплава, обладающего заданными температурно-стабильными параметрами упругости. Они позволяют создать датчик угловой скорости среднего и низкого класса точности, при этом простота конструкции позволяет производить их практически на любом металлообрабатывающем предприятии, имеющем высокоточные станки с ЧПУ. Однако существующие на сегодняшний день технические решения не позволяют создавать датчик угла с требуемым временем

работы в составе ИИСО БПЛА. В ВТГ с низкодобротным объемным резонатором «свободная волна», являющаяся носителем информации об ориентации объекта, может существовать не более 3-5 секунд, что является недостаточным для эффективного управления движением БПЛА. Столь малое время объясняется низкой добротностью, которая для объемных резонаторов из металлических сплавов обычно не превышает значения в 35 000. Для сравнения резонатор из плавленого кварца имеет добротность в 100 и более раз больше – порядка 3 000 000 ...10 000 000.

Таким образом, разработка способов повышения эффективности ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны», для построения ИИСО БПЛА малого времени полета, является востребованной и актуальной задачей для промышленности Российской Федерации. Решение этой сложной научно-технической задачи позволит повысить и эффективность выполнения целевых задач БПЛА, на которых они установлены.

Объектом исследования является волновой твердотельный гироскоп с низкодобротным объемным резонатором, работающий в режиме «свободной волны» в составе ИИСО БПЛА.

Предметом исследования являются элементы структуры, математическая и имитационная модели, алгоритмы обработки информации, позволяющие повысить эффективность ВТГ в составе ИИСО БПЛА.

Степень разработанности.

Теоретические основы разработки ВТГ заложены в трудах отечественных и зарубежных ученых: В.Ф. Журавлева, Д.М. Климова, Ю.К. Жбанова, В.А. Матвеева, *D. Lynch*, Б.С. Лунина, М.А. Басараба, В.Я. Распопова, В.В. Матвеева, Ю. К. Шелковникова, В. В. Хворенкова и др.

В России исследованиями и разработками в области ВТГ с объемным резонатором занимаются различные отраслевые предприятия РФ, однако, на сегодняшний день отечественный серийный образец ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны», с требуемым уровнем эффективности. За рубежом исследованиями и серийным выпуском ВТГ

занимаются такие компании, как: «*Innalabs*» (Ирландия), «*Delco Electronics*», «*Northrop Grumman*», «*General Motors Corp.*» (США), «*Marconi*» (Италия), «*Sagem*», «*Badin-Crouzet*» (Франция), *Sumitomo Precision Products Company Ltd* (Япония) и др.

Цель работы заключается в повышении эффективности волнового твердотельного гироскопа с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» в составе ИИСО БПЛА, за счет улучшения его характеристик.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе сформулированы и решены следующие **задачи исследования**:

1) Проведен анализ существующих схем построения ИИСО БПЛА, в составе которых применяются гироскопические датчики, реализованные на различных физических принципах. Обоснована актуальность проблемы, цель и сформулированы задачи работы.

2) Разработаны математическая и имитационная модели ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» в составе ИИСО БПЛА, описывающие взаимосвязь конструктивных параметров резонатора с параметрами блока электроники и условий функционирования ВТГ.

3) Разработан способ повышения эффективности ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» в составе ИИСО БПЛА, увеличивающий время его работы.

4) Разработан способ повышения эффективности ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» в составе ИИСО БПЛА, сокращающий время выхода ВТГ на режим.

5) Разработан способ повышения эффективности ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» в составе ИИСО БПЛА, обеспечивающий работоспособность ИИСО во всем диапазоне измеряемых углов.

б) Разработан натурный макет ВТГ с низкодобротным объемным резонатором с программно-алгоритмическим обеспечением, а также проведены его экспериментальные исследования с целью подтверждения достоверности теоретических результатов работы.

Соответствие паспорту научной специальности. Отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследования (п. 2 «Исследование возможностей и путей совершенствования существующих и создания новых элементов структуры и образцов информационно-измерительных и управляющих систем, улучшение их технических, эксплуатационных, экономических и эргономических характеристик, разработка новых принципов построения и технических решений») специальности 2.2.11. – Информационно-измерительные и управляющие системы.

Методология и методы диссертационного исследования

В работе применялся комплексный метод исследования, сочетающий методы теории колебаний, теории функции комплексного переменного, математического анализа, имитационного моделирования с применением ЭВМ, объектно-ориентированного программирования и экспериментального исследования.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработаны математическая и имитационная модели ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» в составе ИИСО БПЛА, отличающиеся учетом контура возбуждения первичных колебаний резонатора ВТГ в автоколебательном режиме, учетом процессов компенсации диссипации энергии, а также возможностью функционирования ИИСО во всем диапазоне измеряемых углов.

2. Разработан схемотехнический способ, повышающий эффективность ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» в составе ИИСО БПЛА, увеличивающий время его работы до 20 раз по сравнению с существующими решениями.

3. Разработан способ возбуждения первичных колебаний, повышающий эффективность ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в

режиме «свободной волны» в составе ИИСО БПЛА, сокращающий время выхода ВТГ на режим не менее чем в 7 раз по сравнению с существующими решениями.

4. Разработан способ обработки сигналов, полученных по огибающим первичных и вторичных колебаний с контрольных точек резонатора, повышающий эффективность ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» в составе ИИСО БПЛА, за счёт обеспечения работоспособности во всем диапазоне измеряемых углов.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что предлагаемые структуры, модели и алгоритмы углубляют и конкретизируют систему знаний в области построения ВТГ с низкодобротным резонатором для ИИСО БПЛА в части расширения его функциональных возможностей за счёт увеличения времени работы, сокращения времени выхода на режим и обеспечения работоспособности ИИСО во всем диапазоне измеряемых углов.

1. Практическая значимость работы состоит в том, что предложенные в диссертации теоретические положения, математическая и имитационные модели, а также алгоритм определения угловой ориентации БПЛА позволяют проводить оценку предложенных технических решений, обоснованно выбирать оптимальные параметры блока электроники ВТГ, а также служат основой для повышения эффективности ВТГ с низкодобротным объемным резонатором для ИИСО БПЛА за счет увеличения его времени работы более чем в 20 раз, сокращенным временем выхода на режим не менее чем в 7 раз, применения оригинальной методики обработки данных с контрольных точек, обеспечивающей работоспособность во всем диапазоне измеряемых углов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Математическая и имитационная модели ВТГ, работающего в режиме «свободной волны» в составе ИИСО БПЛА, отличающиеся учетом контура возбуждения первичных колебаний резонатора ВТГ, учетом процессов компенсации диссипации энергии в резонаторе ВТГ, а также возможностью функционирования во всем диапазоне измеряемых углов.

2. Схемотехнический способ увеличения добротности резонатора ВТГ, работающего в режиме «свободной волны» в составе ИИСО БПЛА, позволяющий увеличить время его работы до 20 раз по сравнению с существующими решениями.

3. Способ возбуждения первичных колебаний ВТГ, работающего в режиме «свободной волны» в составе ИИСО БПЛА, позволяющий сократить время выхода ВТГ на режим не менее чем в 7 раза по сравнению с существующими решениями.

4. Способ определения угловой ориентации БПЛА, отличающийся от известных оригинальной методикой обработки сигналов, полученных по огибающим первичных и вторичных колебаний с контрольных точек резонатора ВТГ, обеспечивающий работоспособность ИИСО во всем диапазоне измеряемых углов.

Степень достоверности результатов. Достоверность полученных результатов обусловлена адекватностью, разработанной математической и имитационной модели, подтверждено экспериментальными исследованиями.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: ВНТК «Информационно-измерительные системы комплексов навигации и управления движением», г. Тула 2019 г.; 14-ой и 15-ой МНПК «Новые направления развития приборостроения» Минск, Респ. Беларусь, 2021, 2022 гг.; XXIX, XXX Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам г. Санкт-Петербург 2022, 2023 г.; Первом Петербургском научно-техническом форуме оборонных технологий «ВОЕНТЕХ», г. Санкт-Петербург, 2022. г.

Получена золотая медаль XXVI Московского международного салона изобретений и инновационных технологий «Архимед», г. Москва – 2023 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 печатных работ, из них 5 в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ, 2 статьи в журналах, индексируемых в базе *Scopus*, 5 публикаций в иных изданиях. Получено 4 результата интеллектуальной деятельности, из них: 1 патент на изобретение № 2787809 приоритет от 17.06.2022 г. и 3 свидетельства на программу для ЭВМ

Личный вклад автора. Личный вклад автора состоит в непосредственном участии во всех этапах исследований, направленных на разработку ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» для ИИСО БПЛА; в формулировании и обоснованности цели и задач исследований, в разработке способов их решений.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, приложения, изложенных на 144 страницах основного текста и иллюстрируется 94 рисунками и 9 таблицами, 136 наименований используемых источников.

ГЛАВА 1 АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ПОДХОДОВ К ПОСТРОЕНИЮ ИИСО БПЛА

В настоящей главе представлены результаты обзора и анализа существующих подходов построения ИИСО БПЛА, в составе которых применяются гироскопические датчики, реализованные на различных физических принципах.

Показана типовая структура ИИСО БПЛА, в которой измерительным ядром являются гироскопические и вспомогательные датчики первичной информации (акселерометры, магнитометры, пирометры, барометры, приемники спутниковой навигационных сигналов, датчики воздушной скорости). Отмечено, что большое разнообразие существующих типов и видов БПЛА определяется большим количеством выполняемых целевых задач, предъявляемыми требованиями по массогабаритным характеристикам, времени работы и условиям полета. При этом одним из массовых БПЛА являются аппараты с малым временем полета, которым присущи большие скорости полета, высокий уровень маневрирования и значительные динамические нагрузки, что накладывает специальные требования к гироскопическим датчикам, используемым в составе ИИСО БПЛА. Для таких БПЛА лучше подходят гироскопические датчики – измерители угла, а не угловой скорости.

Проведен обзор применяемых типов гироскопических датчиков в ИИСО БПЛА. А также выполнен анализ патентов и технической литературы.

1.1 Беспилотные летательные аппараты

Под термином беспилотный летательный аппарат (БПЛА) следует понимать любое воздушное средство без экипажа, имеющее разную степень автономности, от управляемых дистанционно до полностью автоматических, а также различающихся по конструкции, назначению и множеству других параметров [1]. В настоящее время БПЛА затрагивают многие области человеческой деятельности. Это использование в сельском хозяйстве, топографии, геологии, образовании, медицине и т.д [2-11]. Решение столь большого количества задач требует построения ИИСО, которая является неотъемлемой частью любого БПЛА, в том

числе с малым временем полета, поскольку везде требуется информация о положении объекта в пространстве [12-14].

Анализ существующих подходов к построению ИИСО БПЛА показал, что они зачастую имеют типовую схему построения (рисунок 1.1).

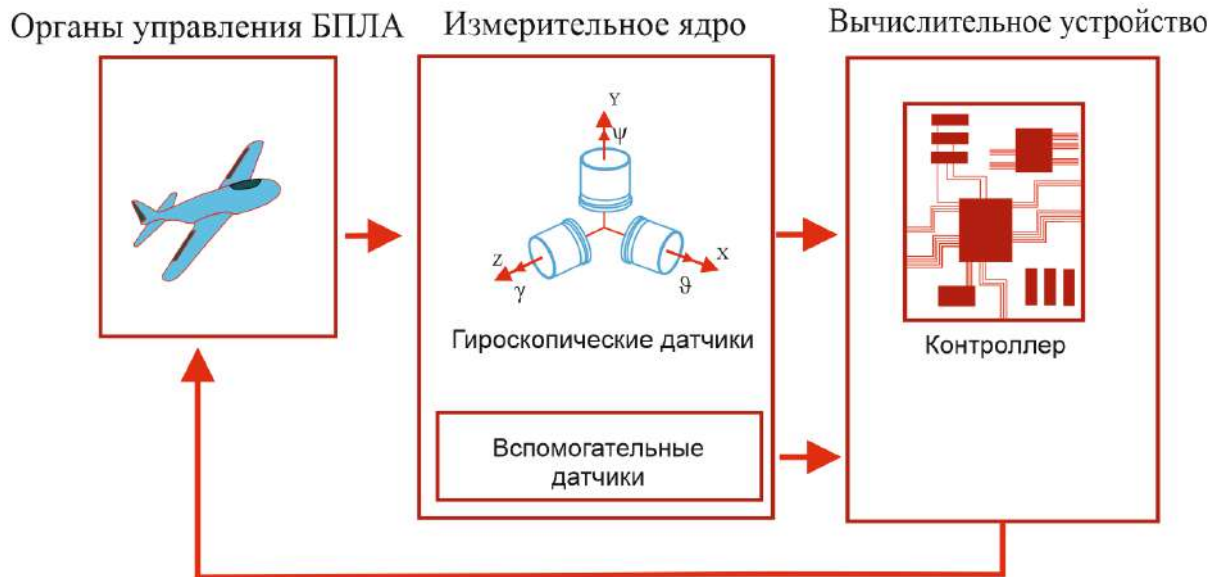


Рисунок 1.1 – Схема построения ИИСО БПЛА

Измерительным ядром в ИИСО БПЛА являются гироскопические датчики, измеряющие угловые скорости объекта, и вспомогательные датчики первичной информации (акселерометры, магнитометры, пирометры, барометры, приемники спутниковых навигационных сигналов, датчики воздушной скорости), применяющиеся для коррекции и повышения эффективности ИИСО. В состав также входит вычислительное устройство, осуществляющее обработку сигналов и реализацию алгоритмов ориентации; исполнительные элементы в виде электромеханических двигателей/рулевых машинок (рулевые органы управления БПЛА). [15-16].

Основной задачей ИИСО БПЛА является определение ориентации подвижных объектов в пространстве, которая традиционно описывается с помощью углов Эйлера-Крылова (углы рысканья (ψ), тангажа (ϑ), крена (γ)). Количество углов Эйлера-Крылова равно трем, что соответствует трем степеням свободы подвижного объекта рисунок 1.2 [10]:

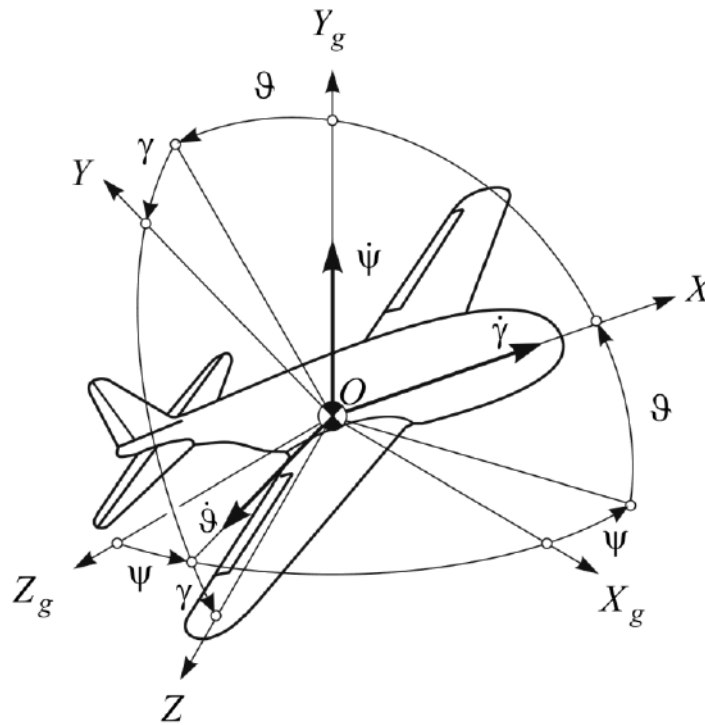


Рисунок 1.2 – Географической системы координат

- угол рыскания - угол между продольной осью подвижного объекта и проекции продольной оси на горизонтальную плоскость; за положительное значение угла следует считать, когда продольная ось подвижного объекта совмещается с проекцией продольной оси на горизонтальную плоскость поворотом вокруг нормальной оси подвижного объекта по часовой стрелке, если смотреть в направлении этой оси.

- угол тангажа - угол между плоскостью горизонта и продольной осью БПЛА; за положительное значение угла принят угол поворота объекта от плоскости горизонта вверх;

- угол крена – угол между вертикальной плоскостью, проходящей через продольную ось подвижного объекта, и его плоскостью симметрии; за положительное значение угла принят угол поворота нормальной оси БПЛА от вертикальной плоскости в правую сторону.

К настоящему времени известно много типов и видов БПЛА, что определяется большим количеством выполняемых целевых задач и предъявляемыми требованиями по массогабаритным характеристикам, времени

работы и условиям полета. Классификация современных БПЛА по летным параметрам приведена в таблице 1.1 [9].

Таблица 1.1 – Российская классификация БПЛА по летным параметрам

Группа БПЛА	Взлетная масса, кг	Дальность полета, км
Микро и мини ближнего радиуса	< 5	< 25-40
Легкие малого радиуса действия	5-50	10-70
Легкие среднего радиуса действия	50-100	70-150 (250)
Средние	100-300	150-1000
Среднетяжелые	300-500	70-300
Тяжелые большой продолжительности полета	> 1500	Около 1500
Беспилотные боевые самолеты	> 1500	Около 1500

Рассматривая БПЛА по конструктивным особенностям их можно классифицировать по:

- аэродинамической схеме;
- количеству, типу, конструкции, форме крыльев;
- типу фюзеляжа или хвостового оперения;
- типу шасси.

В свою очередь все это формирует определенные требования к выбору гироскопических датчиков для ИИСО БПЛА.

В книге [17] приведены основные области применения ИИСО БПЛА в США в зависимости от типа гироскопов, на базе которого они реализованы (рисунок 1.3).

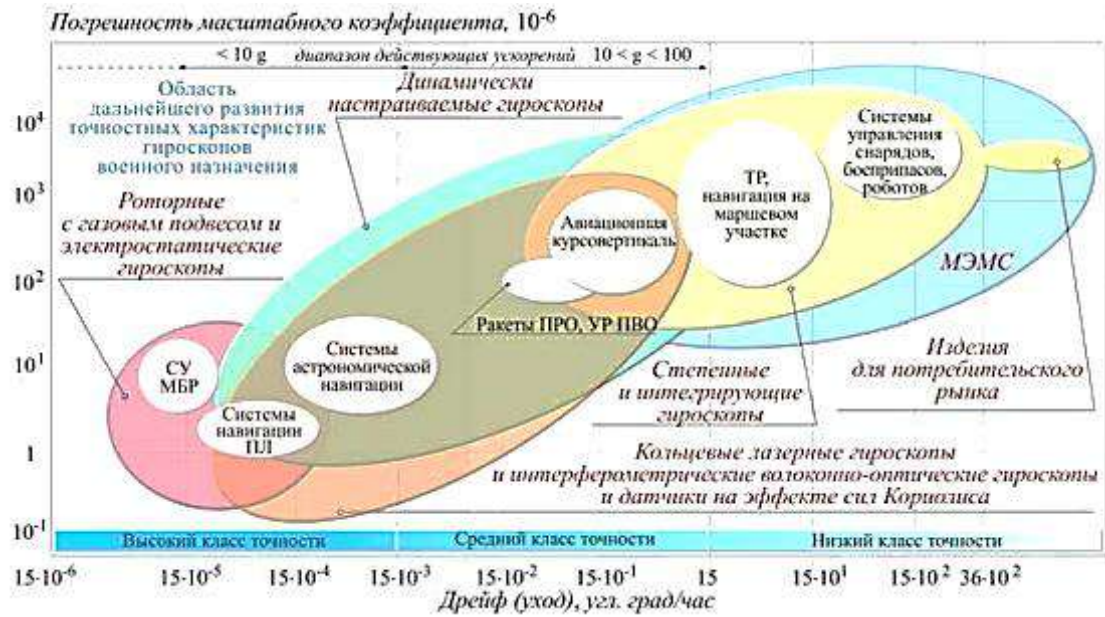


Рисунок 1.3 – Области применения гироскопов различного типа в ИИСО БПЛА

На основании рисунка 1.3 может быть выбран тип чувствительного элемента, на базе которого должна строиться ИИСО БПЛА в зависимости от требуемого класса точности (дрейфа гироскопа), погрешности масштабного коэффициента, диапазона действующих ускорений.

1.2 Механические гироскопические датчики для ИИСО БПЛА

Начиная с 40 годов XX века одним из массовых БПЛА являются аппараты с малым временем полета, исчисляемым десятками секунд или несколькими минутами. При этом таким БПЛА присущи большие скорости полета, высокое маневрирование и значительные динамические нагрузки. Это накладывает специальные требования к гироскопическим датчикам, используемым в составе ИИСО БПЛА, поэтому для управления их движением лучше подходят измерители непосредственно угла, а не угловой скорости. В качестве гироскопического датчика в ИИСО таких БПЛА стали применяться трехстепенные механические гироскопы с импульсным гиromотором, представляющие собой изделия точной механики. В отечественной литературе импульсными называют гиromоторы, которые за десятые или сотые доли секунды достигают заданной скорости вращения за счет импульсного освобождения энергии, запасенной в заведенной пружине, сжатом

газе, пороховом заряде или стартующим БПЛА [17,18]. Малое время полета БПЛА позволяло использовать работу гироскопа в режиме выбега ротора [19-20].

Принцип работы трехстепенных механических гироскопов описывается теоретическими положениями Л. Эйлера о том, что быстровращающееся тело, имеющее неподвижную точку и неподверженное влиянию моментов внешних сил, сохраняет в абсолютном пространстве первоначальное направление оси своего вращения. Большой вклад в создание данных приборов для ИИСО БПЛА внесла целая плеяда талантливых конструкторов предприятий Тулы, Коломны и Москвы участвовала в разработке гироскопов с различными типами гиромоторов: Вайнберг С.З., Фиолетов Б.С., Кравченко Ю.М. и др. (гироскопов с пороховыми гиромоторами); Цвингли А.Э., Тимофеев В.И., Лютый М.Н. и др. (гироскопы с ленточными и газовыми гиромоторами); Осецкий В.П., Шуранов В.И., Ростовцев Ю.В. и др. (гироскопы с пороховыми гиромоторами для экстремальных условий работы; Распопов В.Я, Бабичев В.И., Горин В.И., Филимонов В.Я. и др. (гироскопы с пороховыми и пружинным гиромоторами) [18,22].

Проведенный анализ показал, что к настоящему времени существует развитое математическое описание трехстепенных механических гироскопов, работающих на подвижном объекте [19-38]. Вопросы теории и проектирования трехстепенного гироскопа, установленного в ИИСО БПЛА малого времени полета, методики расчета точности, оптимального проектирования импульсных гиромоторов подробно изложены в трудах Распопова В.Я [17,19,21,27]. Именно работами Распопова В.Я в 1967 году открыто исследования построения трехстепенного гироскопа с импульсными гиромоторами [21,32].

Большой вклад в теорию и проектирования гироскопов указанной группы внесли также работы: Горина В.И, Шипунова А.Г, Бабичева В.И, Савельева В.В, Алехина А.В [19,32,33,35]. Решение ряда задач, учитывающих факторы, имеющие место при работе гироскопа на БПЛА с малым временем полета, содержатся в работах Ишлинского А.Ю. [28,29], Павлова В.А.[25,30,31], Пельпора Д.С., [36]. В работе Павлова В.А. рассматриваются вопросы выбора оптимальной формы ротора гироскопа, описываются основные требования, предъявляемые к кольцам

карданового подвеса и методам их удовлетворения. Уделяется внимание выбору шариковых подшипников в качестве опор карданового подвеса гироскопа, влиянию возмущающих моментов, проводится анализ уравнений движения гироскопа вокруг осей подвеса во втором приближении. Работы Горина В.И. позволяют обобщить накопленный опыт предшественников по проектированию трехстепенных гироскопов и в исчерпывающей форме излагают основные моменты проектирования датчика трехстепенного гироскопа для ИИСО БПЛА малого времени полета.

Некоторые технические характеристики трехстепенного механического гироскопа представлены в таблице 1.2

Таблица 1.2 – Основных характеристик трехстепенного гироскопа, применяемого в ИИСО БПЛА малого времени полета

Наименование характеристики	Значение характеристик
Тип гироскопа	пружинный
Допустимые стартовые перегрузки, ед.	1000
Тип датчика угла	оптронный
Минимальное время складывания рамок, с	50
Максимальный уход по оси наружной рамки гироскопа за 20 с, град	$\pm 3,5$
Габаритные размеры, мм	$\emptyset 36 \times 60,5$

На рисунке 1.4 приведен внешний вид в настоящее время серийно выпускающихся гироскопов 9Б861, 9Б865-1 для ИИСО БПЛА малого времени полета, а в таблице 1.3 основные характеристики [37,38].

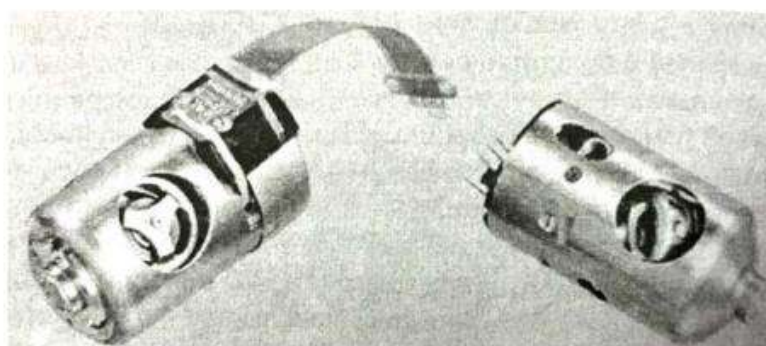


Рисунок 1.4 – Трехстепенной гироскоп 9Б861 (слева) и 9Б865 для ИИСО БПЛА малого времени полета

Таблица 1.3 – Основных характеристик трехстепенных гироскопов
9Б865-1 и 9Б861 для ИИСО БПЛА

Наименование характеристики	Значение характеристик	
	9Б865-1	9Б861
Тип гироскопа	пружинный	пружинный
Допустимые стартовые перегрузки, ед	1000	5000
Тип датчика угла	оптронный	оптронный
Минимальное время складывания рамок, с	50	33
Максимальный уход по оси наружной рамки гироскопа за 20 с, град	$\pm 3,5$	$\pm 3,0$
Габаритные размеры, мм	$\emptyset 36 \times 60,5$	$\emptyset 40 \times 67,5$

Из таблицы 1.3 видно, что для данных приборов важным является возможность работы при больших стартовых перегрузках.

По оценке экспертов, за столь большой многолетний опыт проектирования трехстепенного гироскопа для ИИСО БПЛА к настоящему времени точность механообработки для таких гироскопических датчиков достигла своего предела, дальнейшая модернизация экономически не целесообразна. Это утверждение подтверждается проведенными патентными поисками по изобретениям в области конструирования трехстепенных гироскопов, имеющимися в открытом доступе. На основании данного поиска было отобрано 115 патентов. На рисунке 1.5 приведено распределение количества патентов по годам.

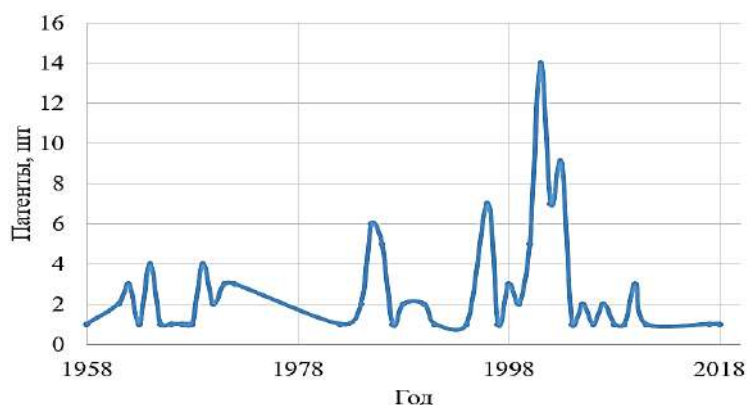


Рисунок 1.5 – Патентный поиск с распределением по годам

На основании проведенного патентного поиска (рисунок 1.5) установлено:

1) Трехстепенные механические гироскопы имеют типовую конструкцию (рисунок 1.6), состоящую из карданового подвеса, образованного ротором 1, внутренней рамкой 2, наружной рамкой 3. Карданов подвес закрепляется в корпусе 7 (показан условно). В корпусе помещается датчик для преобразования механического угла поворота в другую физическую величину (напряжение). Среди большого количества различных датчиков наибольшее распространение получили бесконтактные оптронные, которые состоят из фотодиода 5 и светодиода 6, закрепленных в корпусе 7, а также модулирующего диска 4 с нанесенным бинарным кодом, который крепится на оси наружной рамки, как неподвижный элемент. [39]

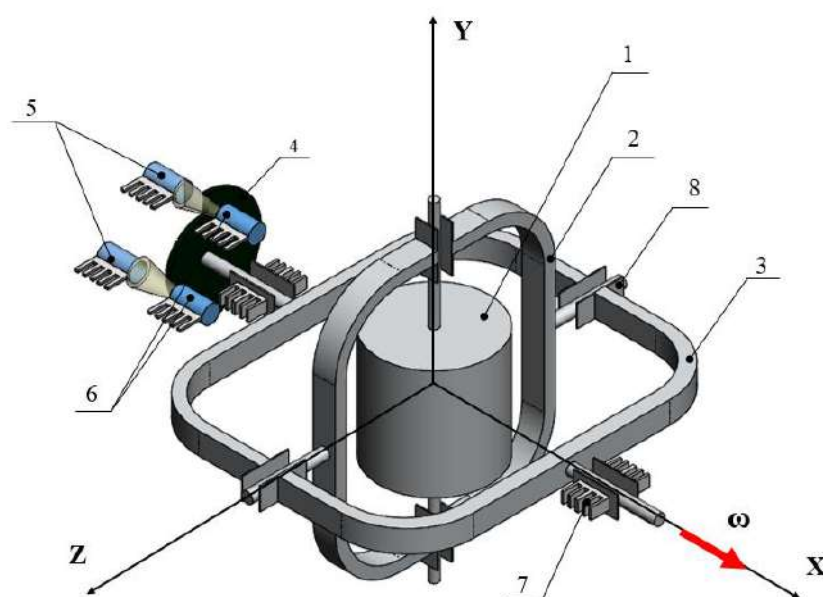


Рисунок 1.6 – Типовая конструкция трехстепенного механического гироскопа для ИИСО БПЛА малого времени полета: 1 – ротор; 2 – внутренняя рамка; 3 – наружная рамка; 4 – модулирующий диск; 5 – фотодиоды; 6 – диоды; 7 – корпус (показан условно); 8 – опоры вращения (шарикоподшипники)

2) Наибольшее количество патентов направлено на повышение эффективности гироскопов, а именно: минимизацию массогабаритных параметров; формирование более совершенных способов разгона ротора, в том числе

сокращение времени выхода на режим, разработку способов измерения механического угла поворота рамок.

3) С наступлением нового тысячелетия, очевидно, что интерес к данному типу гироскопов резко упал, что можно объяснить с одной стороны достигнутым пределом по точности механообработки и экономической не целесообразностью дальнейшего совершенствования конструкции, с другой стороны – возрастающими требованиями по минимизации массогабаритных характеристик при сохранении или увеличении заданной точности.

С целью подтверждения, сложности решения задачи повышения эффективности ИИСО БПЛА на базе трехстепенного механического гироскопа проведен анализ конструкции для выявления путей повышения технических характеристик трехстепенного гироскопа при минимизации параметров.

Графически распределение конструктивных элементов в трехстепенном гироскопе представлено на рисунке 1.7

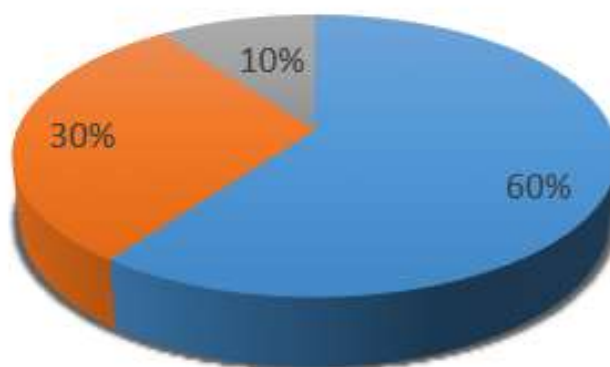


Рисунок 1.7 – Распределение конструктивных элементов в трехстепенном гироскопе: 60% - карданов подвес с гиромотором; 30% - датчик угла крена; 10% прочие конструктивные элементы

Из рисунка 1.7 видно, что уменьшение массогабаритных параметров возможно в конструкции только за счет гиromотора и датчика угла.

В публикациях [23] отмечается, что наиболее предпочтительно использование пружинного гиromотора с размещением пружины внутри ротора, так как он имеет два основных достоинства:

- первое возможность достижения минимальных габаритов;
- второе масса вращающейся пружины с ротором участвует в создании кинетического момента гиromотора, который определяет эффективность гироскопа.

Задавая предельно допустимые ограничения на размеры, минимально возможный радиус ротора, можно определить по выражению:

$$R \leq D/2 - \Delta p - \delta_{вн} - b_{ши} - \delta_{вт} - \Delta_{нр} - \Delta_k \quad (1.1)$$

где D – ограничивающий диаметр (определяется отводимым местом на подвижном объекте); Δp – зазор между ротором и внутренней рамкой (0,5-1) мм; $\delta_{вн}$ – толщина внутренней рамки (2-5) мм; $b_{ши}$ – ширина подшипников; $\delta_{вт}$ – толщина фланца (0,5) мм; $\Delta_{нр}$ – зазор между рамкой наружной и корпусом (0,5) мм; Δ_k – толщина стенки корпуса (1,5 -2) мм

Конструктивные параметры задаются исходя из современных возможностей механообработки и с учетом особенностей проектирования.

Ширину ротора можно определить по выражению:

$$h \leq R_n - 2\Delta p - 2b_{ши} - 2\delta_{вт} - 2\Delta$$

где

$$R_n = R + \Delta p + \Delta_{вн} + \Delta \quad (1.2)$$

где Δ – зазор между наружной рамой и элементами внутренней рамки (0,5).

Таким образом, получаются исходные параметры для проектирования минимального размера гиromотора для трехстепенного гироскопа, применяемого в ИИСО БПЛА малого времени полета.

Для повышения точности расчета и ускорения проектировочных работ была разработана программа автоматического проектирования пружинного гиromотора [40], отличительной особенностью которой является возможность учета влияния внешних возмущающих факторов на работу пружинного гиromотора. Программа на основании геометрических параметров ротора, параметров пружины позволяет

определить время работы гиromотора в трехступенном механическом гироскопе для ИИСО БПЛА малого времени полета. На основании расчета данной программы была построена зависимость скорости вращения ротора от времени его работы для двух диаметров ротора (рисунок 1.8), эффективная зона его работоспособности определяется, как $\frac{1}{3}\Omega_{\max}$.

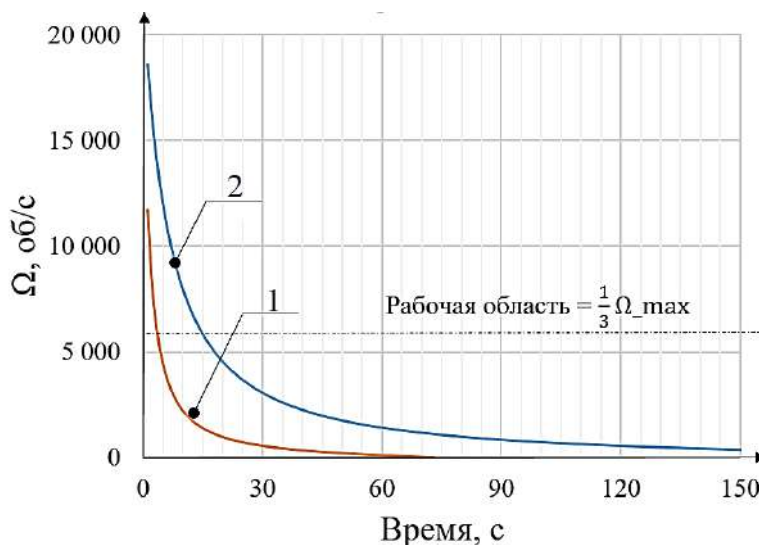


Рисунок 1.8 – Зависимость скорости вращения ротора от его диаметра

1 - диаметр ротора 25 мм; 2 - диаметр ротора 36 мм

Анализ рисунка 1.8 позволяет сделать вывод, что уменьшение диаметра ротора приводит к уменьшению скорости вращения ротора, что вызывает уменьшение времени работы и приведет к уменьшению кинетического момента, который определяет эффективность гироскопа:

$$H_{\max} = J\Omega = m_p R_j^2 \Omega \quad (1.3)$$

где J – момент инерции ротора; Ω – угловая скорость собственного вращения ротора; m_p – масса ротора; R_i – радиус инерции ротора.

Исходя из формулы (1.3) видно: величина кинетического момента определяется произведением трех величин, увеличением либо угловой скорости Ω собственного вращения ротора, либо его массы m_p , либо радиуса инерции R_j . При

этом, однако, необходимо иметь в виду, что с повышением Ω будут расти моменты сил трения в опорах главной оси и аэродинамические силы сопротивления окружающей среды M_a . При открытой конструкции гиromотора увеличение угловой скорости Ω будет кроме того, вызывать возрастание аэродинамического момента M_a . Увеличение угловой скорости Ω потребует применение в приборе гиromотора большей мощности, необходимой для обеспечения вращения ротора с заданными оборотами. В результате увеличится нагрев гироскопа, обуславливающий рост температурных деформаций его отдельных деталей, и ухудшится температурный режим работы опор главной оси.

Увеличение массы m_p ротора может быть достигнута двумя путями: либо увеличением его объема, либо увеличением массовой плотности материала, выбираемого для изготовления ротора. В обоих случаях будет возрастать нагрузка на опоры осей подвеса, а, следовательно, возрастут и моменты сил трения в них, вредно сказывающиеся на точности прибора. Кроме того, в этом случае будет также увеличиваться потребляемая мощность гиromотора. Наконец, увеличивая радиус инерции R_i ротора, будут увеличиваться габаритные размеры прибора. Вот почему невозможно чисто механически увеличивать величину кинетического момента.

Все выше перечисленное заставляет разработчиков искать пути построения ИИСО БПЛА малого времени полета на базе других гироскопических датчиков, которые могли бы заменить трехстепенные механические гироскопы.

1.3 Инерциальные датчики для ИИСО БПЛА

Появление в начале 60-х годов XX века гироскопов на новых физических принципах, в частности волновых оптических гироскопов, в класс которых входят лазерные гироскопы (ЛГ) и волоконно-оптические гироскопы (ВОГ), позволило им занять свою нишу в условиях уже сложившейся к тому времени разветвлённой индустрии производства механических гироскопов. В 1960-х гг. компания *Safran Electronics & Defense* (ранее известная как *Sagem*) первой в Европе создала ИИСО БПЛА на базе инерциальных датчиков для ракеты-носителя одноразового использования [41], что увеличило интерес к таким датчикам.

В публикации [42] отмечается, что в настоящее время кольцевые лазерные гироскопы (КЛГ), наиболее распространены в ИИСО на всех тяжёлых БПЛА большой продолжительности полета, гражданской и военной авиации, а также преобладают на БПЛА ракетах-носителях. В данной публикации также говорится, что ВОГ больше всего востребованы в различных областях гражданской промышленности, однако, отмечены случаи их применения в ИИСО БПЛА спутников или ракет-носителей.

Данные инерциальные датчики в свою очередь вытесняют системы, построенные на базе трехстепенного механического гироскопа. Однако, для ЛГ предъявляются весьма высокие и зачастую уникальные требования, как к качеству лазерного излучения, так и к совершенству оптических элементов и уровню их параметров. Поэтому для производства ЛГ характерно применение высокоточной технологии: при изготовлении высокодобротных резонаторов сложной геометрии и высокой точности (допуск 10 мкм), изготовлении сверхплоских и сверхгладких оптических поверхностей (с плоскостностью вплоть до $\lambda/100$) с целью снижения уровня напряжений в материале при оптическом контакте и с шероховатостью до $0,5^{-1}$ нм, изготовлений отражателей (зеркал или призм) с коэффициентом отражения близким к единице с точностью до 0,001 %. Термовакuumная обработка резонатора с температурами до 1200 °С, вакуумом до 10^{-8} мм рт. ст. и допуском на наличие примесей в активной среде лазера не более $2 \cdot 10^{-5}$; изготовление уникальных пьезодвигателей зеркал оптического резонатора с точностью перемещения $0,01 \lambda$ и быстродействием 100 мкс; изготовление прецизионных оптических смесителей и систем фотоэлектрической обработки создаваемого интерференционного поля и др., [42,43]. Известно так же, что точность ВОГ серьезно ухудшается в агрессивных условиях (вибрация, ударные воздействия и градиенты температуры), при этом к точности изготовления также предъявляются высокие требования [41,44]. На рисунке 1.9 приведен внешний вид опытного образца ИИСО БПЛА на лазерном гироскопе для ракеты-носителя «Циклон-4».



Рисунок 1.9 – Внешний вид опытного образца ИИСО БПЛА на лазерном гироскопе

Блок чувствительных элементов включает в себя три одноосных лазерных гироскопа (ЛГ) с виброподставкой и периметром 28 см, и три маятниковых компенсационных акселерометра (АК). Акселерометры устанавливаются в термостатируемом объеме с температурой статирования $+65^{\circ}\text{C}$. Лазерные гироскопы обеспечивают измерение угловых скоростей в диапазоне до ± 250 град/с. Акселерометры имеют динамический диапазон ± 25 g. Управление ЛГ осуществляется микропроцессорным блоком управления на основе сигнального процессора. Блок управления ЛГ обеспечивает возбуждение и управление тремя виброприводами, задание токов разряда и стабилизации периметра каждого ЛГ. Собственные частоты виброприводов ЛГ разнесены на 40 Гц и составляют 340, 380 и 420 Гц с технологическим разбросом не более 8 Гц. Управление и стабилизация температуры блока акселерометров обеспечивается микроконтроллером. Стабильность поддержания температуры составляет $\pm 0,1$ $^{\circ}\text{C}$.

Для обеспечения устойчивости компенсации температурных погрешностей в условиях механических нагрузок при полете, служит система виброударозащиты, выполненная по оригинальной схеме. При этом блок имеет Массу –35 кг, потребляемую мощность – 64 Вт и занимает объем – 25 дм³. На рисунке 1.10 показан внешний вид одноосного ВОГ ОИУС-200 (производства ООО НПК

«Оптолинк») для ИИСО БПЛА. Технические параметры которого приведены в таблице 1.4



Рисунок 1.10 – ВОГ ОИУС-200 (производства ООО НПК «Оптолинк») для ИИСО БПЛА.

Таблица 1.4 - Технические параметры ВОГ ОИУС-200

Наименование характеристики	Значение характеристик
Диапазон измеряемой угловой скорости	<500 град/сек
Случайная составляющая дрейфа нулевого сигнала при фиксированной температуре	0.6 град/час
Случайная составляющая дрейфа нулевого сигнала при изменении температуры от -40°C до 60°C:	1.5 град/час
Погрешность масштабного коэффициента	0.1
Полоса пропускания	до 400 Гц
Спектральная плотность мощности шума	0.02 град/√ч.
Питание от источника постоянного напряжения	5 В (+/-0.25 В)
Мощность, потребляемая прибором	<5 Вт (в НУ не более 3 Вт)
Масса прибора	0.22 кг
Габаритные размеры	Ø70x28 мм
Выходной сигнал	RS-485

Анализ технических параметров ЛГ и ВОГ, а также требований к технологии их производства позволяет сделать вывод, что они достаточно

дорогостоящие, имеют большие габариты и сложную технологию изготовления в сравнении с трехстепенными механическими гироскопами и для применения в ИИСО БПЛА малого времени полета, не подходят.

Бурное развитие в конце XX века промышленности и техники сформулировало перед разработчиками новую концепцию конструирования *SWaP-C* (*Size, Weight, Power and Cost* – размер, вес, мощность и стоимость) по снижению и оптимизации параметров ИИСО. Данная концепция направлена на то, чтобы сделать устройство меньше, легче, мощнее и дешевле. Реализации даже одной из этих целей обычно достаточно, чтобы сделать перспективным развитие устройства. Появление технологии микро-электромеханических систем (МЭМС), в наибольшей степени удовлетворяющих концепции *SWaP-C*, привело к созданию микромеханических гироскопов (ММГ).

Одной из первых известных в мире разработок ММГ был камертонный гироскоп, относящийся к классу кориолисовых вибрационных гироскопов (КВГ), созданный по типу вафли со слоистой структурой в США в Лаборатории Дрейпера в 1992 году. В 1996 -1997 годах ими же были проведены три испытательных запуска высокодинамичных БПЛА малого времени полета, в составе которых находились ММГ. Несмотря на то, что несколько образцов гироскопов вышли из строя, задачи испытаний по демонстрации принципиальной возможности построения на их базе ИИСО были достигнуты [45]. Стоит отметить, что и к настоящему времени США занимает лидирующие позиции в этом направлении, в том числе имея большое число государственных программ развития, например: *The DARPA Micromechanical Inertial Measurement Unit (MMIMU)*, нацеленной на создание высокоэффективного микромеханического инерциального измерительного модуля (*MEMS IMU*). Современные ММГ сочетают в себе механические и электрические компоненты крайне малых размеров (от 2 мм до 4 мм и толщиной 20 мкм). Однако основные проблемы применения ММГ в ИИСО БПЛА чувствительность к действию ускорений любой природы (в англоязычной терминологии *g-sensitivity*), высокие требования к обеспечению работоспособности при значительных пусковых нагрузках и малый диапазон измерения у большинства

датчиков. На рисунке 1.11 приведен внешний вид элементов ИИСО БПЛА малого времени полета на базе ММГ разработанный *Drapers Laboratory* совместно с *ATK* [46].

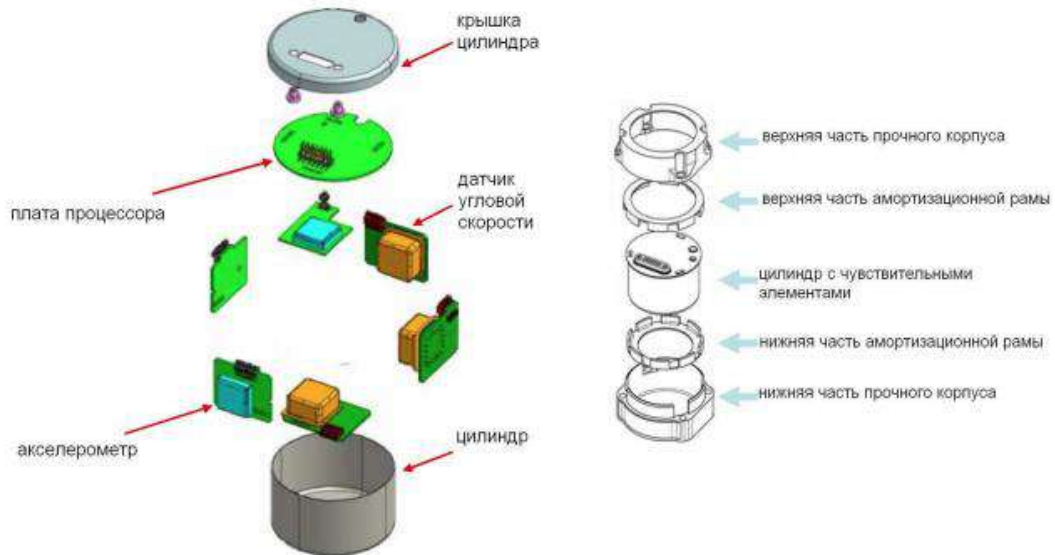


Рисунок 1.11 – Внешний вид элементов ИИСО БПЛА малого времени полета на базе ММГ разработанный *Drapers Laboratory* совместно с *ATK*

Технические характеристики измерительного ядра ИИСО БПЛА малого времени полета, состоящего из ММГ и ММА, представлены в таблице 1.5. В таких системах, как показывает анализ технической литературы, решение задачи по построению ИИСО осуществляется либо реализацией слабосвязанной, либо сильно связанной структуры.

В первом случае определение параметров ориентации объекта осуществляется по сигналам датчиков угловой скорости путем их интегрирования по известным зависимостям. Такие системы, как правило, теряют свою работоспособность в течении нескольких минут, что может привести к потери самого аппарата. Причиной подобной ситуации является низкая точность первичных измерителей (дрейф большинства микромеханических гироскопов составляет порядка нескольких десятков градусов в час).

Таблица 1.5 – Технические характеристики измерительного ядра ИИСО
БПЛА малого времени полета состоящего из ММГ и ММА

Параметр	Каналы угловой скорости	Каналы измерения линейного ускорения
Диапазон измерений	По оси 1 ± 9000 °/с. По осям 2 и 3 ± 500 °/с. Есть модификации с диапазоном измерений ± 14000 °/с по всем трем осям	От $\pm 15g$ до $100g$ по всем трем осям
Повторяемость нулевого сигнала (1σ)	≤ 100 °/ч	$\leq 10^{-3} g$
Нестабильность нулевого сигнала	≤ 6 °/ч	$\leq 0,5 \cdot 10^{-3} g$
Случайный шум	$\leq 0,5$ °/ $\sqrt{ч}$	$\leq 0,5 \cdot m/c/\sqrt{чg}$
Повторяемость коэффициента передачи (1σ)	≤ 500 ppm (для диапазона ± 1000 °/с)	≤ 1500 ppm
Масса	< 210 грамм	
Напряжение питания	5В	
Потребляемая мощность	$\leq 3,75$ Вт	

Интегрирование угловых скоростей, выдаваемых гироскопами, приводит к нарастающей погрешности определяемых параметров ориентации. Коррекция параметров ориентации в этом случае осуществляется путем комплексирования системы ориентации на базе ДУС с системой ориентации на базе акселерометров, магнитометров, пирометров и т.д. Такой способ коррекции позволяет уменьшать либо систематическую, либо шумовую составляющие погрешностей.

Другими недостатками такого способа построения ИИСО являются существенная зависимость точности вырабатываемых параметров от динамики движения объекта и потеря работоспособности при недостоверной информации с одного из датчиков.

При реализации сильно связанной структуры построения, определение параметров ориентации осуществляется путем совместной обработки всех

сигналов, поступающих от датчиков первичной информации. В этом случае возможна оценка и компенсация как систематических, так и случайных погрешностей определяемых параметрах ориентации. Однако, при этом необходима априорная информация о динамических характеристиках конкретного объекта и его системы управления, что требует проведения большого объема работ.

К сожалению, в России разработка МЭМС технологии как известно ведется с некоторым отставанием, что не позволяет реализовать подобные системы, хотя потребность в них имеется [46-48].

1.3.1 Волновой твердотельный гироскоп с объемным резонатором для ИИСО БПЛА

Последние успехи российской науки в области инерциальных датчиков связаны с созданием ВТГ с объемным резонатором. Которые по оценке специалистов в данной области на сегодняшний день являются наиболее перспективными приборами по совокупности характеристик – точности параметров, размеру конструкции, себестоимости производства для построения ИИСО БПЛА [49-52]. Важное преимущество данных гироскопов по сравнению с другими типами, это отсутствие вращающихся, оптических, лазерных и микромеханических элементов, которые накладывают существенные ограничения в гироскопических приборах. Простота и надежность ВТГ определяют его низкую себестоимость и относительно небольшие затраты ресурсов на осуществление и поддержку производства [53]. Как утверждают многие авторы ВТГ теоретически могут обеспечить более высокие по сравнению с микромеханическими датчиками, а также классическими механическими гироскопами, точностные характеристики и, в зависимости от способа возбуждения колебаний и управления ими, могут являться, как датчиками угла, так и датчиками угловой скорости [51,52].

Теоретические основы разработки ВТГ заложены в трудах отечественных и зарубежных ученых: В.Ф. Журавлева, Д.М. Климова, Ю.К. Жбанова [55 – 60], В.А. Матвеева, Б.С. Лунина, М.А. Басараба [61-64], D. Lynch [65,67], V. Apostolyuk [68-70], V.V. Chikovani [71-76], Xuezhong Wu Xiang Xi Yulie Wu Dingbang Xiao [77],

В.Я. Распопова, В.В. Матвеева [49-53,78-80, 83], К.В. Шишаков, В. В. Хворенкова [81], и др.

В России исследованиями и разработками в области ВТГ с объемным резонатором занимаются различные отраслевые предприятия РФ [51,82].

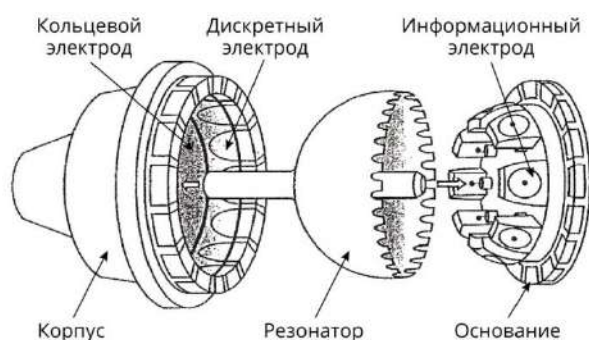
За рубежом выпуском ВТГ занимаются компании «Innalabs» (Ирландия) [83], «Delco Electronics» (США), «Northrop Grumman», «General Motors Corp.» (США), «Marconi» (Италия), «Sagem», «Badin-Crouzet» (Франция), Sumitomo Precision Products Company Ltd (Япония) и др.

В настоящее время существуют два основных направления создания волновых твердотельных гироскопов с объемным резонатором:

1) ВТГ с высокодобротным полусферическим резонатором из плавленного кварца, обладающего чрезвычайно низкими характеристиками внутреннего трения (рисунок 1.12). Эта особенность плавленного кварца позволяет достичь добротности резонатора от единиц до десятков миллионов. В этом случае стоячая волна, возбуждаемая в полусферической оболочке, существует «свободно» и не привязана к какому-либо направлению, а ВТГ функционирует в качестве гироскопического датчика угла подвижного объекта.

Стабильность и высокая добротность плавленного кварца позволяют создать ВТГ навигационного класса [81], но требуют при этом дорогостоящие технологии высокоточной обработки кварцевого стекла.

а)



б)

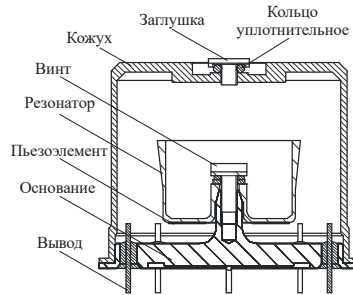


Рисунок 1.2 – ВТГ с высокодобротным полусферическим резонатором из плавленного кварца: а) – схема устройства ВТГ; б) – внешний вид основных

элементов

2) ВТГ с низкодобротным резонатором из металлического сплава. Так как металлические сплавы менее стабильны и имеют низкую добротность, чем плавленый кварц, то на основе таких резонаторов реализуются ВТГ среднего класса точности (рисунок 1.13).

а)



б)



Рисунок 1.13 – ВТГ с низкодобротным объемным резонатором из элинварного металлического сплава: а) – схема устройства ВТГ;

б) – внешний вид основных элементов

Принцип действия ВТГ с объемным низкодобротным резонатором основан на эффекте инерции стоячих волн, возбуждаемых в металлическом резонаторе, открытом еще в конце XIX века английским математиком и механиком Дж. Х. Брайаном [84]. При возбуждении стоячей волны в тонкостенной оболочке, точки ее кромки будут иметь радиальные колебания на второй форме. Точки с максимальной амплитудой радиальных колебаний называются пучностями (*antinode*), а с минимальной – узлами (*node*) (рисунок 1.14). Волновая картина колеблющейся оболочки будет отставать от поворота основания в соответствии с зависимостью [49]

$$\varphi = -\frac{2}{k^2 + 1} \int_0^t \Omega(\tau) d\tau, \quad (1.4)$$

где φ – угол отставания волновой картины, k – номер формы колебаний,

Для второй формы колебаний ($k = 2$) при постоянной угловой скорости основания имеем угол отставания волновой картины

$$\varphi = -0,4\Omega \cdot t. \quad (1.5)$$

где Ω – угловая скорость основания.

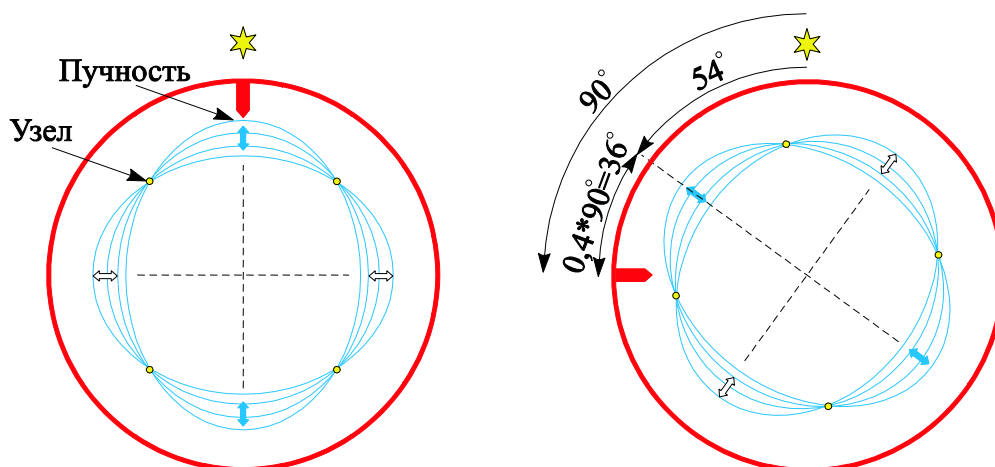


Рисунок 1.14 – Запаздывание волновой картины при повороте основания

Величина $K = 0,4$ называется коэффициентом прецессии волны, который показывает, что стоячая волна поворачивается в пространстве на угол меньший угла поворота корпуса. Например, если основание повернется относительно инерциального пространства на угол 90° , то стоячая волна (пучности и узлы) будет отставать на угол $0,4 \cdot 90 = 36^\circ$. Следовательно, относительно инерциального пространства волна повернется на 54° . В аналогичных условиях механический трехстепенной гироскоп с быстровращающимся ротором, в силу своего свойства сохранять направление главной оси неизменной в инерциальном пространстве, будет отставать от поворота основания на 90° .

Возможность применения ВТГ в ИИСО БПЛА рассматривается в работах [49,50,51,55,57,58,61,69,77,81,83,85,86] авторы отмечают, что ВТГ в настоящее время наиболее перспективные гироскопические датчики в России, при этом наиболее предпочтительное направление создания ВТГ с низкодобротным объемным резонатором из металла.

Для анализа исследований в области ВТГ проведен наукометрический анализ публикаций по данной тематике, по имеющимся в свободном доступе статьям, патентам, в ходе которого было отобрано более 100 публикация для анализа. По результатам анализа можно сделать следующие выводы:

1) В наибольшей степени исследований выполнено по ВТГ с объемным полусферическим резонатором из кварца (рисунок 1.15), данные работы описывают, как режим работы в качестве датчика угловой скорости, так и в качестве датчика угла, либо рассматривается возможность использования комбинированного режима работы;

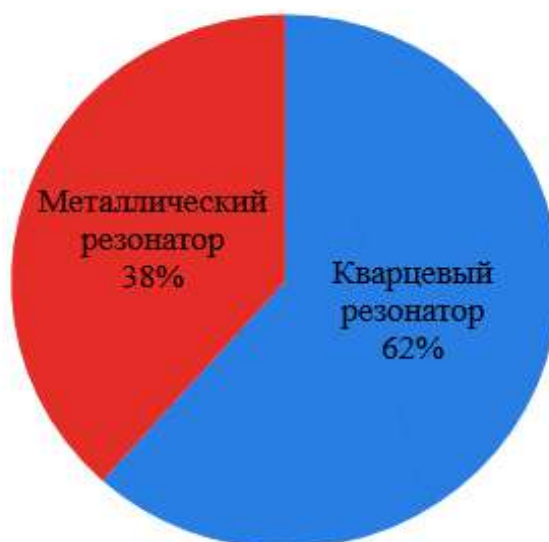


Рисунок 1.15 – Количество публикаций в зависимости от типа ВТГ

2) Рассматривая распределение публикаций по годам рисунок 1.16 можно заметить увеличения интереса в последние годы к тематике ВТГ с низкодобротным объемным резонатором из металла, что объясняется более простой технологией изготовления, расширяющей их область применения.

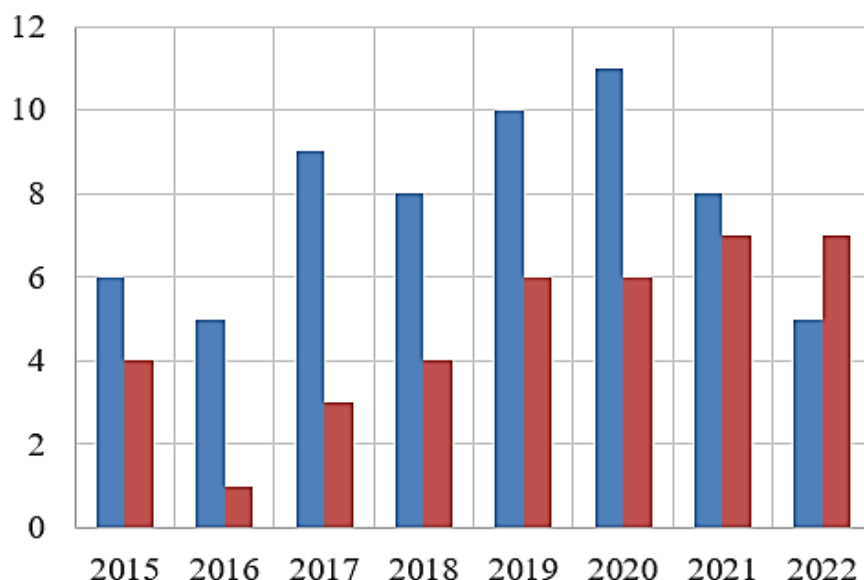


Рисунок 1.16 – Количество публикаций в зависимости от типа ВТГ по годам

3) Проведенный анализ показал, что наибольшее количество исследований по ВТГ из кварца принадлежит ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, а наибольшее количество исследований по ВТГ с низкодобротным объемным резонатором из металла выполнено Тульским государственным университетом (рисунок 1.17)

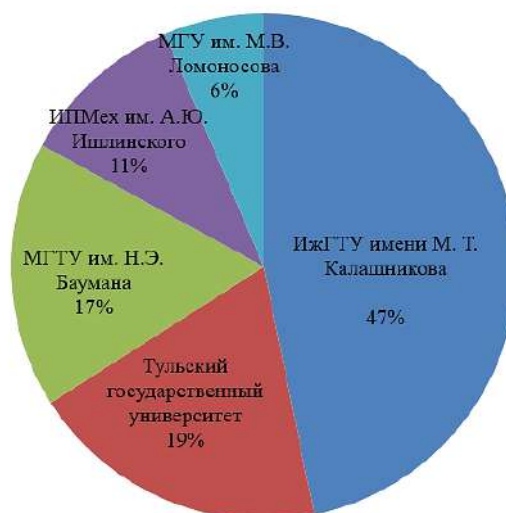


Рисунок 1.17 – Количества публикаций по тематике ВТГ в России

В ходе проведенного анализа было так же установлено, что известны два способа управления, определяющие работу ВТГ с низкодобротным объемным резонатором:

- схема управления реализующая режим работы в качестве датчика угловой скорости ВТГ-ДУС [50,65,77,78];

- схема управления, реализующая режим работы в качестве датчика угла ВТГ-ИГ [63,87,89].

Схема обеспечения работоспособности для этих двух режимов (рисунок 1.18) отличается лишь генератором, у которого ключ К1 постоянно замкнут и в контур возбуждения подается сигнал $A \sin(\omega t)$, где A - амплитуда, ω - частота подачи переменного сигнала, равная (или близкая) к собственной частоте основной формы колебаний.

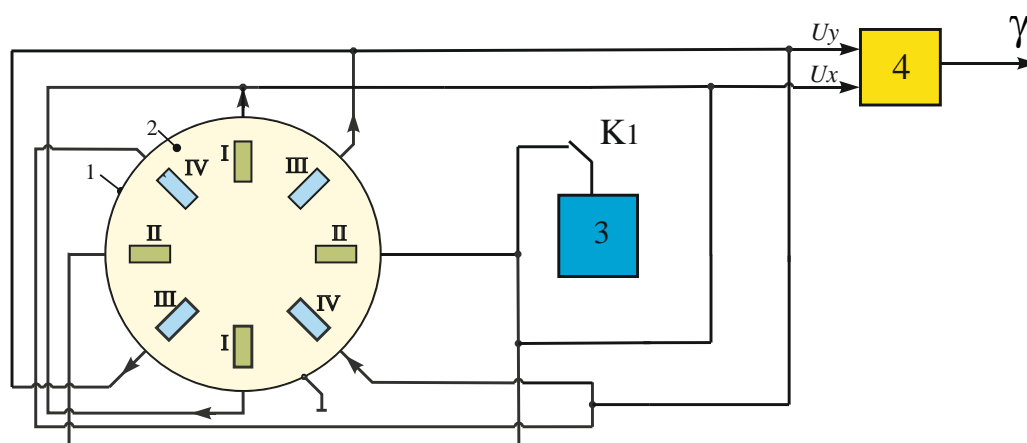


Рисунок 1.18 – Схема обеспечения работоспособности волнового твердотельного гироскопа с низкодобротным объемным резонатором: 1 – резонатор; 2 – дно резонатора с парами пьезоэлементов; 3 – генератор; 4 – демодулятор; если К1 постоянно замкнут то ВТГ работает в режиме ВТГ-ДУС

Такой режим называется позиционным возбуждением стоячей волны, когда на пару пьезоэлементов подается переменное напряжение на собственной частоте резонатора, например, вдоль пучности x_1 . Если основание, на котором находится резонатор, не вращается ($\Omega = 0$), то волновая картина неизменна (рисунок 1.19-а). При этом сигналы, снимаемые с пьезоэлементов оси узла x_2 , находящиеся под углом 45° к оси возбуждения, близки к нулю. Если основание вращается с угловой скоростью Ω , то пучность стоячей волны запаздывает от направления возбуждения на некоторый угол γ , и сигнал, снимаемый с оси чувствительности, отличен от нуля

и определяется величиной угловой скорости. После прекращения вращения резонатора пучность стоячей волны возвращается к направлению возбуждения (рисунок 1.19-б), т.е. стоячая волна как бы «привязана» к корпусу гироскопа [89,90].

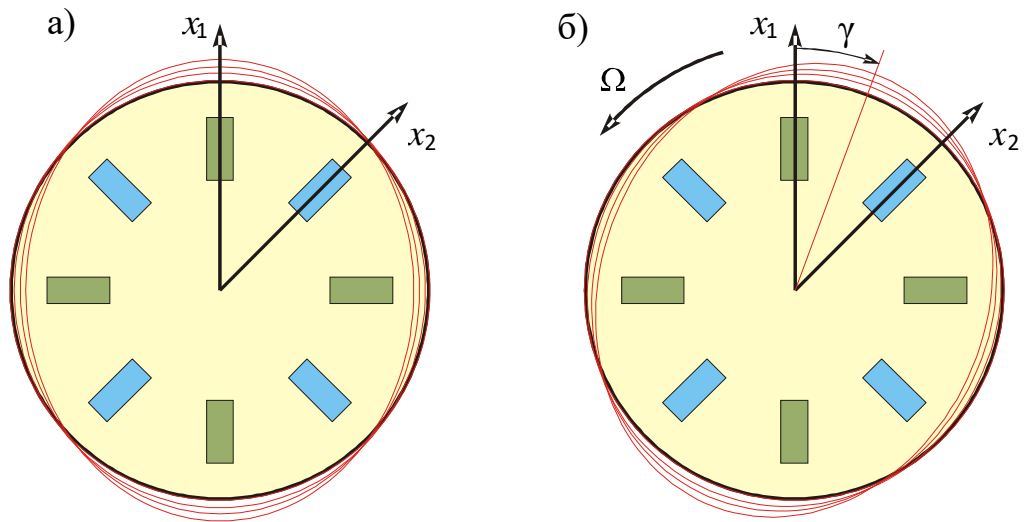


Рисунок 1.19 – К пояснения появления стоячий волны при построении ВТГ ДУС (режиме позиционного возбуждения):

а) основание неподвижно; б) основание вращается с угловой скоростью Ω

При таком режиме работы ВТГ является датчиком угловой скорости (ВТГ-ДУС) и для вычисления угла необходима последующая процедура интегрирования выходного сигнала по зависимости:

$$\gamma = \int \Omega dt, \quad (2.3)$$

где γ – определяемый угол; Ω – угловая скорость подвижного объекта.

В режиме свободной волны (рисунок 1.18) у генератора ключ К1 замкнут только в начальный промежуток времени, в течении которого в контур возбуждения подается сигнал $A \sin(\omega t)$ на диаметрально противоположные пьезоэлементы оси возбуждения x_1 , который вызывает эллиптические деформации на второй форме колебаний, в результате чего возбуждается стоячая волна. Такой режим называется режимом свободной волны, при котором вращении колеблющегося ВТГ вокруг его оси симметрии, обусловленного поворотом на угол подвижного объекта, с постоянной угловой скоростью возникают Кориолисовы

силы инерции, привязанные к запаздыванию стоячей волны. По сигналам с первого контура x_1 и второго контура x_2 , может быть вычислен угол поворота на основе соотношения:

$$\gamma = \frac{1}{2K} \operatorname{arctg} \left(\frac{Ux_2}{Ux_1} \right) \quad (1.6)$$

где K – коэффициент прецессии волны (коэффициент Брайана);

Ux_1 – сигнал с первого контура (Пучность),

Ux_2 – сигнал со второго контура (Узел).

В публикации [78,89] говорится, что для измерения большой угловой скорости подвижного объекта предпочтительно построение датчика угла на базе ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме свободной волны. Однако, как известно для металлического резонатора с добротностью 30 000 время работы в таком режиме ограничено 3-5 секундами, что недостаточно для большинства подвижных объектов.

Проведенный анализ конструкций ВТГ с низкодобротным объемным резонатором показал, что зачастую большинство имеют типовое решение в форме цилиндра или колоколообразную форму, изготовленную из различных сплавов металлов. Так в работе [91-101] приведены образцы ВТГ с цилиндрическим металлическим резонатором. Размеры корпуса, которого составляет $\varnothing 50 \times h 55$ мм, масса датчика без электроники составляет 60 грамм (рисунок 1.20). Диаметр резонатора составляет 43 мм, собственная частота резонатора 1,5 кГц. Давление под кожухом составляет около $5 \cdot 10^{-4}$ атм. Резонатор выполнен из сплава $NiCrTi$ и имеет добротность около 20 000. Отмечается, что добротность металлического резонатора может достигать 30 000 и более при использовании сплава $NiTi$, легированного Co и Mo .



Рисунок 1.20 – ВТГ с 43-мм резонатором

На рисунке 1.21 показан КВГ *Innalabs CVG17* с диаметром резонатора 17 мм. Размер датчика составляет $\varnothing 22 \times h 25$ мм, вес около 20 гр (с алюминиевой крышкой).



Рисунок 1.21 – 17-мм резонатор КВГ (*Innalabs CVG17*)

Резонатор изготовлен из легированного сплава *NiTi*, при этом добротность данного резонатора всего 10 000 так как в нем отсутствует вакуумирование, собственная частота находится в диапазоне 6.5 – 8 кГц. По заявлению производителя данный датчик выдерживает удар 9000 г при испытаниях в пневматической пушке. В публикации отмечается, что данный датчик идеально подходит для управляемых снарядов, а также небольших подводных и воздушных беспилотных аппаратов [68]. Имеет диапазон измерения ± 500 °/с и имеет нестабильность смещения нуля при постоянной температуре 2 град/ч.

В работе [99-100] описана конструкция колоколообразного ВТГ (рисунок 1.22), у которого ударопрочность составляет до 10 000 г.



Рисунок 1.22 – Колоколообразный ВТГ

На рисунке 1.23 приведен 3D вид конструкции колоколообразного ВТГ из металла Ni43CrTi. Собственная частота резонатора по 2-ой форме колебаний составляет около 6-8 кГц.

На рисунке 1.23 приведена 3D модель колоколообразного резонатора [99]. Добротность такого резонатора составляет порядка 30 000.

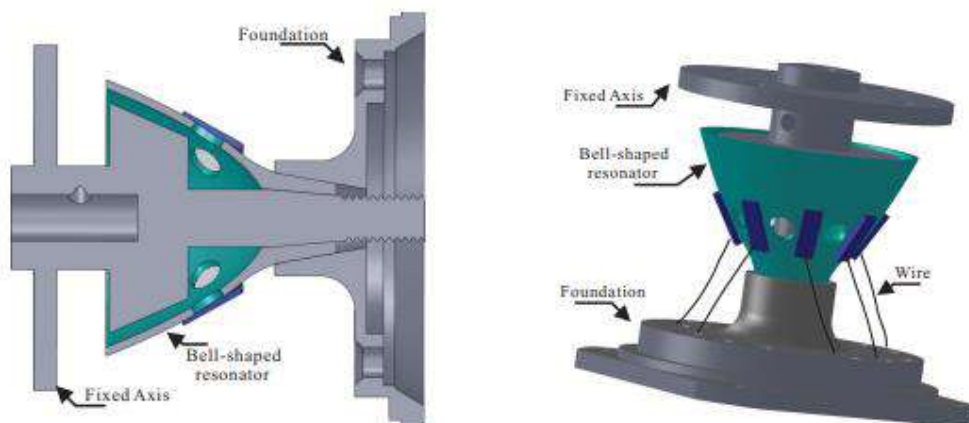


Рисунок 1.23 – 3D вид конструкции колоколообразного ВТГ

В работе [68] приведены результаты исследования ВТГ с низкодобротным объемным резонатором из латуни (рисунок 1.24) с параметрами в соответствии с таблицей 1.6. Добротность такого резонатора составила всего около 6 000.

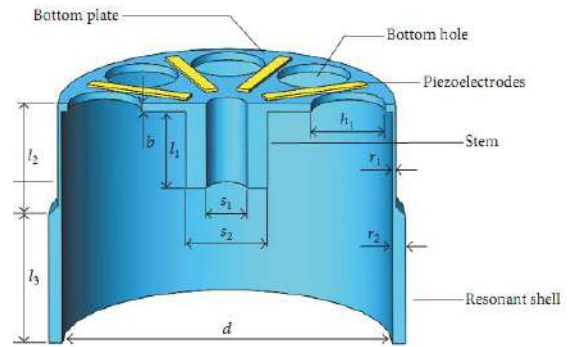


Рисунок 1.24 – ВТГ с низкодобротным объемным резонатором из латуни

Таблица 1.6 Параметры резонатора ВТГ из латуни

Параметр	Значение, мм
b	0,6
s_1	3
s_2	6
h_1	5,5
r_1	0,3
r_2	1
l_1	6
l_2	8
l_3	10
d	24,4

Из проведенного анализа видно, что конструктивно резонаторы имеют схожую конфигурацию, что подтверждается не только публикациями, но и патентами [108-118]. Как правило резонатор имеет цилиндрическую форму при этом для улучшения характеристик разработчики ищут пути по повышению добротности, за счет применения различных сплавов. Достоинством ВТГ является миниатюрная конструкция, маленькая масса, возможность работать в жестких условиях, что делает их перспективными для ИИСО БПЛА [102-105,119, 126].

1.4 Выводы

Анализируя результаты данной главы, можно сделать следующие выводы:

1. ИИСО БПЛА зачастую имеет типовую схему построения. В составе ИИСО измерительным ядром являются гироскопические и вспомогательные датчики

первичной информации (акселерометры, магнитометры, пирометры, барометры, приемники спутниковых навигационных сигналов, датчики воздушной скорости).

2. Одним из массовых БПЛА являются аппараты с малым временем полета, исчисляемым десятками секунд или несколькими минутами. При этом таким БПЛА присущи большие скорости полета, высокий уровень маневрирования и значительные динамические нагрузки. Это накладывает специальные требования к гироскопическим датчикам, используемым в составе ИИСО БПЛА, поэтому для управления их движением лучше подходят измерители непосредственно угла, а не угловой скорости.

3. Начиная с начала 40-х годов XX века в ИИСО БПЛА малого времени полета применяются трехстепенные механические гироскопы, которые к настоящему времени достигли предела по точности механообработки и их дальнейшее совершенствование не целесообразно. Применение ЛГ и ВОГ в таких системах затруднительно в виду сложности технологии изготовления и высокой стоимости по сравнению с трехстепенными механическими гироскопами. Характеристики большинства ММГ не удовлетворяют специальным требованиям, предъявляемым к гироскопическим датчикам, используемым в составе ИИСО БПЛА.

4. Наиболее перспективным гироскопическим датчиком является ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающий в режиме «свободной волны», который может позволить создать недорогой, с требуемым уровнем точности, обладающий простотой конструкции и небольшими массогабаритами датчик угла ИИСО БПЛА малого времени полета. Однако существующие решения в настоящее время не позволяют реализовать датчик угла для ИИСО БПЛА, требуются специальные меры по повышению его эффективности (улучшению его характеристик). Подробно эти вопросы рассматриваются в следующей главе.

ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ И ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛИ ВТГ С НИЗКОДОБРОТНЫМ ОБЪЕМНЫМ РЕЗОНАТОРОМ, РАБОТАЮЩИМ В РЕЖИМЕ «СВОБОДНОЙ ВОЛНЫ»

В настоящей главе приведено математическое описание и имитационное моделирование ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны». Показано что математическая модель аналогична математической модели маятника Фуко, однако имеет ряд отличий.

Приведено математическое описание и имитационное моделирование разработанного схемотехнического способа увеличения добротности резонатора, повышающего эффективность ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» в составе ИИСО БПЛА, увеличивающего время его работы. Математическое описание и имитационное моделирование разработанного способа возбуждения первичных колебаний ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» в составе ИИСО БПЛА, сокращающего время выхода на режим, за счет реализации автоколебательного контура первичных колебаний. Математическое описание и имитационное моделирование разработанного способа обработки сигнала, полученного по огибающим первичных и вторичных колебаний с контрольных точек резонатора ВТГ, обеспечивающего работоспособность во всем диапазоне углов.

Выполнена оценка предложенных технических решений с помощью имитационной модели, позволяющей учитывать контур возбуждения первичных колебаний резонатора, процесс диссипации энергии, конструктивные параметры ВТГ и выбирать оптимальные параметры блока электроники, а также показана достижимая точность вычисления угла во всем диапазоне заданных углов.

2.1 Математическая модель ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны»

Известное математическое описание функционирования ВТГ с низкодобротным объемным резонатором сводится к системе двух дифференциальных уравнений второго порядка, которые описывают

возбуждающую моду (режим возбуждения) и измерительную моду (режим чувствительности), предложенных доктором Д. Линчем (*D. Lynch*) [65]:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 + 2\xi\omega_{01}\dot{x}_1 + (\omega_{01}^2 - \Omega_z^2)x_1 &= f_0 \sin vt + 2K\Omega_z\dot{x}_2 + N_1\dot{\Omega}_z x_2, \\ \ddot{x}_2 + 2\xi\omega_{02}\dot{x}_2 + (\omega_{02}^2 - \Omega_z^2)x_2 &= -2K\Omega_z\dot{x}_1 - N_2\dot{\Omega}_z x_1, \end{aligned} \quad (2.1)$$

где x_1, x_2 – перемещения кромки резонатора в контролируемых точках рисунок, снимаемые с оси возбуждения и чувствительности; ω_{01}, ω_{02} – собственные частоты резонатора; ξ – относительный коэффициент демпфирования; Ω_z – угловая скорость основания; K – коэффициент прецессии волны (коэффициент Брайана); N_1, N_2 – коэффициенты углового ускорения; f_0, v – удельная амплитуда и частота, создаваемая системой возбуждения.

Однако данное уравнение позволяет исследовать работу ВТГ-ДУС и не подходит для исследования ВТГ – ИГ (работающего в режиме «свободной волны»). В публикациях [56, 63, 81] приведено математическое описание ВТГ работающего в режиме «свободной волны» для высокодобротного резонатора, изготовленного из кварца, однако данные уравнения так же не применимы для ВТГ с низкодобротным объемным резонатором так как имеют отличия в режиме управления свободной волной. Известны публикации [123] показывающие, что работу ВТГ в режиме «свободной волны» можно рассматривать, как обобщенный маятник Фуко, однако в публикациях не отмечены основные отличия.

Покажем, что работу ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» можно описать, аналогично уравнениям маятника Фуко.

Если гипотетически допустить, что в резонаторе ВТГ отсутствует диссипация энергии, то уравнения колебаний его кромки принимает вид:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_1 - 2K\Omega\dot{x}_2 + \omega_1^2 x_1 &= 0, \\ \ddot{x}_2 + 2K\Omega\dot{x}_1 + \omega_2^2 x_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Отличием уравнений (2.2) от уравнений маятника Фуко заключается в наличие множителя K (коэффициент Брайана), который для ВТГ отличен от единицы и принимает значение от 0,3 до 0,4 [49].

Умножив второе уравнение системы (2.2) на мнимую единицу j и сложив с первым, получим уравнение вида

$$\ddot{z} + 2jK\Omega\dot{z} + \omega_0^2 z = 0, \quad (2.3)$$

где $z = x_1 + jx_2$ – комплексная переменная.

Пусть начальные условия определяются так:

$$z(0) = z_0 = x_1^0 + jx_2^0, \quad \dot{z}(0) = 0.$$

где x_1^0, x_2^0 – начальные отклонения ЧЭ ВТГ с низкодобротным объемным резонатором.

Операторное уравнение, соответствующее дифференциальному уравнению (2.3) имеет вид:

$$(s^2 + 2j\Omega s + \omega_0^2)z(s) = (s + 2j\Omega)z_0 \quad (2.4)$$

Полагая, что $\Omega \ll \omega_0$ и переходя к оригиналу, решение уравнения (2.4) представим в виде

$$z(t) \approx z_0 e^{-jK\Omega t} \cos \omega_0 t. \quad (2.5)$$

Переходя к старым переменным, имеем

$$x_1(t) = \cos \omega_0 t (x_1^0 \cos K\Omega t + x_2^0 \sin K\Omega t), \quad (2.6)$$

$$x_2(t) = \cos \omega_0 t (x_2^0 \cos K\Omega t - x_1^0 \sin K\Omega t). \quad (2.7)$$

Находя соотношения $x_2(t)/x_1(t)$, нетрудно увидеть, что

$$\Omega(t) = \frac{1}{K} \operatorname{arctg} \left(\frac{x_2(t)}{x_1(t)} \right), \quad (2.8)$$

из чего следует возможность определения угла поворота основания $\Omega(t)$, а следовательно и возможность реализации датчика угла на базе ВТГ с низкодобротным объемным резонатором для ИИСО. Но следует заметить, что соотношение 2.8 соответствует повороту плоскости маятника Фуко. Так как ось x_2 колебаний кромки резонатора в соответствии с рисунком 2.1 располагается под углом 45° к оси x_1 (а не под углом 90° , как у маятника Фуко), то для правильной

интерпретации измерений, соотношение (2.8) необходимо снабжать множителем $\frac{1}{2}$ [127-129].

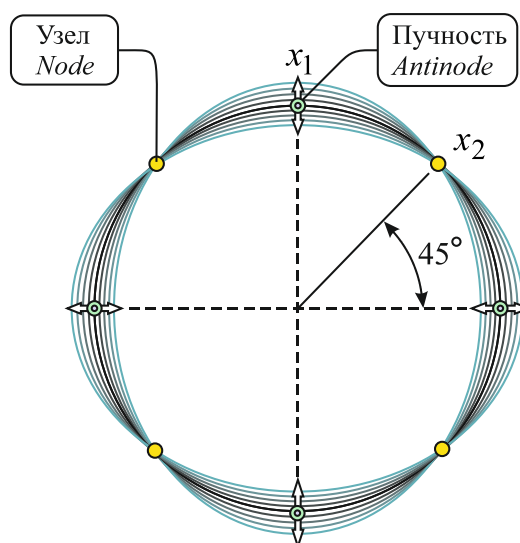
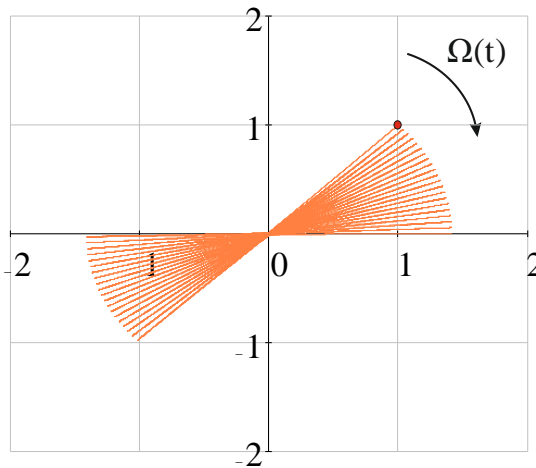


Рисунок 2.1 – К математической модели ВТГ с объемным низкодобротным резонатором

На рисунке 2.2 представлены графики в координатах x_1, x_2 результаты моделирования уравнений (2.2) для начальных условий $x_1(0) = 1$, $x_2(0) = 1$ и при вращении основания на угол $\Omega = 4.5$ °/с. Интервал моделирования задавался равным 10 с, поэтому за этот интервал времени поворот основания происходил на угол 45° . Для наглядности отображения графика частота колебаний резонатора задавалась 2 Гц. На рисунке 2.2-а коэффициент Кориолисовых сил инерции принимался равным $K = 1$, что соответствует маятнику Фуко, на рисунке 2.2-б – $K = 0,4$, что соответствует случаю ВТГ с низкодобротным объемным резонатором.

Анализируя рисунок 2.2 можно заключить, что для ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, при повороте основания на угол 45° поворот колебательной картины осуществлялся на угол $22,5^\circ$. Для маятника Фуко поворот колебательной картины во вращающейся системы координат осуществляется на угол 45° .

а)



б)

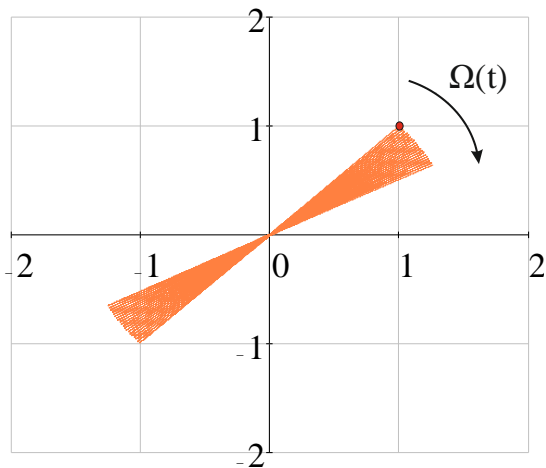


Рисунок 2.2 – Результаты моделирования уравнений (2.2):

а) – график соответствующий случаю при $K = 1$ (маятник Фуко),

б) – график, соответствующий случаю при $K=0,4$ (ВТГ с низкодобротным
объемным резонатором)

Отсюда следует, что ВТГ с низкодобротным объемным резонатором можно рассматривать, как обобщенный маятник Фуко, у которого плоскость колебаний тела в подвижной системе координат поворачивается не с угловой скоростью вращения основания, а с меньшей, определяемой коэффициентом K и с учетом расположения оси x_2 колебаний кромки резонатора под углом 45° к оси x_1 . Еще одно отличие уравнения описывающего работу ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» от уравнения маятника Фуко (2.6) и от уравнения (2.2), заключается в учете диссипации энергии, зависящей от добротности. Тогда полагая, что собственные частоты возбуждения и чувствительности совпадают выполняются неравенства: $\omega_{01}^2 \gg \Omega_z^2$, $\omega_{02}^2 \gg \Omega_z^2$ следовательно можно записать как: $\omega_{01} = \omega_{02} = \omega_0$,

Тогда математическую модель упрощено можно записать при $\Omega_z = \text{const}$ в виде:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_1 + \frac{2}{T} \dot{x}_1 + \omega_0^2 x_1 &= f_0 \sin vt + 2K_1 \Omega \dot{x}_2, \\ \ddot{x}_2 + \frac{2}{T} \dot{x}_2 + \omega_0^2 x_2 &= -2K_2 \Omega \dot{x}_1, \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

где T – постоянная времени, определяемая соотношением

$$T = 2Q / \omega_0, \quad (2.10)$$

где $Q = \frac{1}{2\xi}$ – добротность колебательного контура, ω_0 – собственная частота резонатора.

Рассматривая работу ВТГ с низкодобротным резонатором в режиме свободной волны, когда усилие f_0 создаваемое системой возбуждения действует только в начальный промежуток времени, а далее следует рассматривать свободные колебания при которых ($f_0 = 0$).

Сделав допущения о равенстве коэффициентов Корилисовых сил инерции: $K_1 = K_2 = K$. В этом случае уравнения колебаний ЧЭ ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» принимают вид:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_1 + \frac{2}{T} \dot{x}_1 - 2K\Omega \dot{x}_2 + \omega_0^2 x_1 &= 0, \\ \ddot{x}_2 + \frac{2}{T} \dot{x}_2 + 2K\Omega \dot{x}_1 + \omega_0^2 x_2 &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

Уравнений (2.11) отличается от уравнения (2.2) учетом диссипации энергии, вызванной членами $2\dot{x}_1 / T$, $2\dot{x}_2 / T$.

Проделав аналогичные преобразования, соответствующие уравнению (2.3-2.7) получим:

$$x_1(t) \approx x_1^0 e^{-t/T} \cos \omega_0 t \cos K\Omega t, \quad (2.12)$$

$$x_2(t) \approx -x_1^0 e^{-t/T} \cos \omega_0 t \sin K\Omega t \quad (2.13)$$

Тогда определение углового положения с помощью ВТГ с низкодобротным объемным резонатором можно выполнить по формуле:

$$\Omega(t) = -\frac{1}{2K} \operatorname{arctg} \left(\frac{x_2(t)}{x_1(t)} \right), \quad (2.13)$$

На рисунке 2.3 представлены графики в координатах x_1, x_2 по результатам моделирования уравнений (2.11) для начальных условий $x_1(0)=1, x_2(0)=1$, при вращении основания с угловой скоростью $\Omega = 4,5^\circ/\text{с}$ в которых учитывается диссипация энергии зависящая от постоянной времени на значение которой оказывает влияние добротность резонатора в соответствии с уравнением (2.10). Интервал моделирования задавался равным 10 с, поэтому за этот интервал времени поворот основания происходил на угол 45° . Для наглядности отображения графика частота колебаний резонатора задавалась 2 Гц и конечном значении постоянной времени $T=10$ (что соответствовала бы значению $Q \approx 150000$ при частоте первичных колебаний $\omega_0=4500$ Гц резонатора).

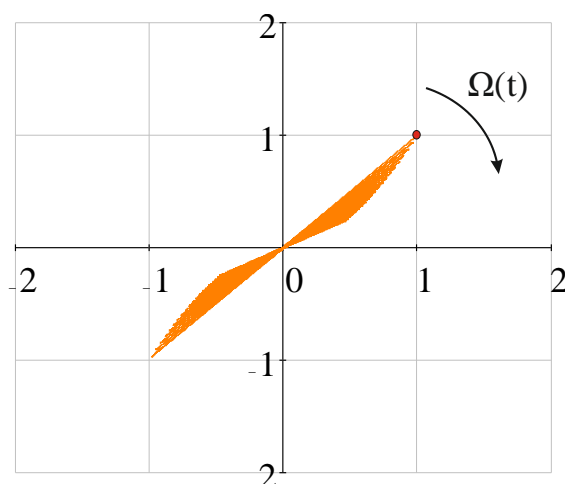


Рисунок 2.3 – Результаты моделирования уравнений (2.11) с учетом диссипации энергии в ВТГ с низкодобротным объемным резонатором

Таким образом, в режиме «свободной волны» ВТГ с низкодобротным объемным резонатором функционирует в качестве датчика угла ограниченный промежуток времени вследствие рассеяния энергии в уравнении (2.11-2.13) описываемой составляющей $e^{-t/T}$.

Значение добротности влияет не только на время работы ВТГ в режиме датчика угла, но и определяет систематическую и случайную погрешность в ВТГ ДУС [50], а также его быстродействие (реакция на угловую скорость).

Из большинства публикаций [50,97,102,121,122] известно, что увеличение добротности обеспечивается конструктивными способами, например, за счет использования материалов с малым трением: кварцевое стекло, кремний. В работе [124, 125-129] показано, что добротность волновых твердотельных гироскопов является одной из главных характеристик, для ее увеличения при конструировании необходимо учитывать особенности различных диссипативных процессов, вклад которых неодинаков и зависит от свойств материала резонатора, его конструкции, качества обработки поверхности, уровня вакуума в приборе. С помощью модели термоупругих процессов и конечно-элементного моделирования показано влияние термоупругого внутреннего трения на характеристики резонаторов ВТГ, изготовленных из различных материалов. Показано, что в кварцевом стекле по сравнению с другими конструкционными материалами термоупругое внутреннее трение очень мало. Это позволяет рекомендовать кварцевое стекло в качестве основного конструкционного материала резонаторов волновых твердотельных гироскопов. Показано, что добротность ВТГ с низкодобротным объемным резонатором из металла, всегда будет небольшой порядка 30000-50000 из-за высокой интенсивности термоупругого внутреннего трения, которое при этом является доминирующим диссипативным процессом.

2.2 Численная оценка необходимой добротности для обеспечения работы волнового твердотельного гироскопа с низкодобротным объемным резонатором

Под добротностью следует понимать – характеристику резонансных свойств колебательной системы, указывающую, во сколько раз амплитуда установившихся вынужденных колебаний при резонансе превышает амплитуду вынужденных колебаний вдали от резонанса, т. е. в области столь низких частот, где амплитуду вынужденных колебаний можно считать не зависящей от частоты. Величина добротности характеризует также и избирательность колебательной системы; чем

больше добротность, тем уже полоса частот внешней силы, которая может вызвать интенсивные колебания системы [130].

Для понимания достижимого времени функционирования ВТГ в ИИСО БПЛА на этапе проектирования необходима численная оценка требуемой добротности для обеспечения заданного времени функционирования. Известно, что огибающая амплитуд затухающих колебаний описывается соотношением [49,89]

$$x_1 = x_{10} e^{-\frac{t}{T}}, \quad (2.14)$$

где x_{10} – амплитуда вынужденных колебаний в момент «отпускания» волны, T – постоянная времени резонатора, определяемая из следующего соотношения (2.10). Если принять, что переходный процесс затухает за время равное $t_{\text{пп}} \approx 3T$, тогда добротность может быть оценена по формуле:

$$Q > \frac{t_{\text{пп}} \omega_0}{6}. \quad (2.15)$$

Например, для резонатора с собственной частотой 4500 Гц и временем функционирования 20 с добротность должна иметь значение не менее 95 000. На рисунке 2.4 приведены огибающие затухающих колебаний резонатора для различной добротности ВТГ.

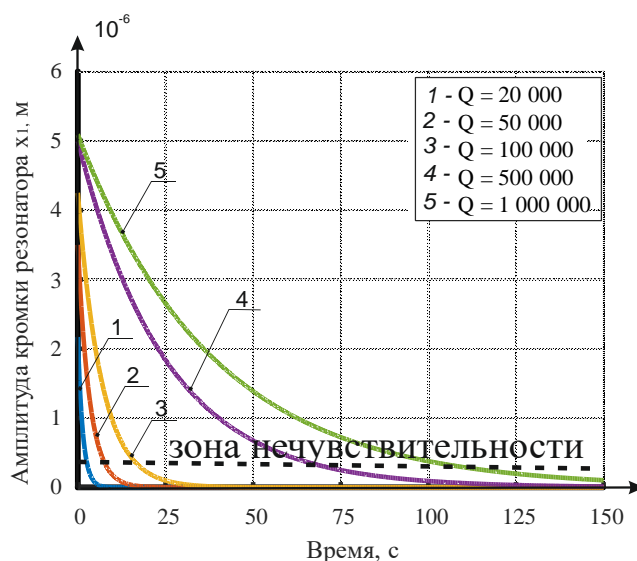


Рисунок 2.4 – Огибающие затухающих колебаний ВТГ для различной добротности

Показана зона нечувствительности, соответствующая 5 % от максимальной амплитуды, при достижении которой может быть выделен полезный сигнал на фоне шума. На основании кривых приведенных на рисунке 2.4 можно судить о требуемой добротности ВТГ для обеспечения необходимого времени функционирования в составе ИИСО подвижного объекта в том числе для БПЛА малого времени полета.

2.3 Разработка схемотехнического способа увеличения добротности ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны»

Диссипацию энергии при колебаниях ЧЭ ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» можно осуществить, если сформировать воздействие со стороны исполнительных элементов, позволяющих скомпенсировать составляющие $2\dot{x}_1 / T$, $2\dot{x}_2 / T$ в уравнениях движения (2.11).

Компенсацию можно осуществить двумя способами. В первом случае исполнительные элементы ВТГ должны формировать сигналы пропорциональные скоростям движения ЧЭ ВТГ с низкодобротным объемным резонатором \dot{x}_1 и \dot{x}_2 . В этом случае математическая модель ВТГ принимает вид

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_1 + \frac{2}{T}\dot{x}_1 + \omega_0^2 x_1 - 2K\Omega\dot{x}_2 - k_d\dot{x}_1 &= 0, \\ \ddot{x}_2 + \frac{2}{T}\dot{x}_2 + \omega_0^2 x_2 + 2K\Omega\dot{x}_1 - k_d\dot{x}_2 &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$

где k_d – коэффициент пропорциональности производных от перемещения ЧЭ.

Полная компенсация диссипации энергии будет осуществляться при выполнении равенства

$$k_d = \frac{2}{T}. \quad (2.17)$$

На рисунке 2.5 приведена структурная схема имитационного моделирования разработанного «схемотехнического способа увеличения добротности» диссипации энергии в соответствии с уравнением (2.16) за счет введения в контур

x_1 и x_2 отрицательной обратной связи с коэффициентом усиления в соответствии с уравнение (2.17).

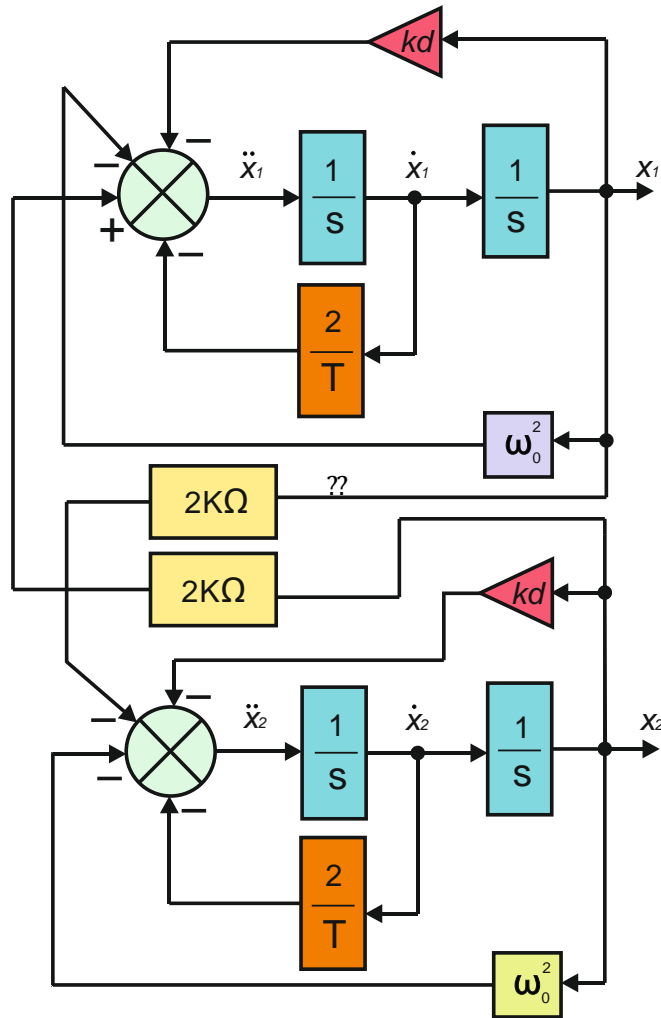


Рисунок 2.5 Структурная схема имитационного моделирования, разработанного «схемотехнического способа увеличения добротности» компенсации диссипации энергии в соответствии с уравнением 2.16

Данный схемотехнический способ должен быть реализован в блока электроники ВТГ с низкодобротным объемным резонаторов, работающим в режиме «свободной волны» в ИИСО подвижного объекта.

Недостатком данного способа является необходимость формирования производных \dot{x}_1 и \dot{x}_2 , что может привести к возрастанию шума в цепях компенсации.

Другой способ компенсации диссипации энергии связан с формированием воздействия на ЧЭ КВГ по интегралам от перемещения ЧЭ. В этом случае математическая модель КВГ может быть представлена в виде

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_1 + \frac{2}{T}\dot{x}_1 + \omega_0^2 x_1 - 2K\Omega\dot{x}_2 + k_i \int_0^t x_1 dt &= 0, \\ \ddot{x}_2 + \frac{2}{T}\dot{x}_2 + \omega_0^2 x_2 + 2K\Omega\dot{x}_1 + k_i \int_0^t x_2 dt &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

где k_i – коэффициент пропорциональности интегралов от перемещения ЧЭ.

Полная компенсация диссипации энергии будет осуществляться при выполнении равенства

$$k_i = \frac{2}{T}\omega_0^2 = \frac{1}{Q}\omega_0^3. \quad (2.19)$$

На рисунке 2.6 приведена структурная схема имитационного моделирования, разработанного «схемотехнического способа компенсации» диссипации энергии в соответствии с уравнением (2.18), за счет введения в контур x_1 и x_2 обратной связи с коэффициентом усиления в соответствии с уравнение (2.19).

Данный способ компенсации диссипации энергии эквивалентен увеличению добротности контура колебаний ЧЭ ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны». Если диссипация энергии свободных колебаний ЧЭ скомпенсирована не полностью, то постоянная времени может быть представлена следующим образом:

$$T^* = 2Q^* / \omega_0, \quad (2.20)$$

где Q^* – добротность колебательного контура ВТГ с учетом компенсации диссипации энергии (эквивалент добротности).

Для подтверждения работоспособности «схемотехнического способа компенсации» диссипации энергии в соответствии со структурной схемой имитационного моделирования по рисунку 2.18 проводилось моделирование ВТГ с низкодобротным объемным резонатором работающим в режиме «свободной волны» в среде *Matlab Simulink* при следующих параметрах: частота собственных

колебаний $\omega_0 \approx 5000 \text{Гц}$, добротность $Q = 30000$. Постоянная времени такого резонатора в соответствии с формулой (2.10) составила $T = 1.91$. Начальное отклонение ЧЭ по координате x_1 задавалось на величину $0,1 \text{ мкм}$.

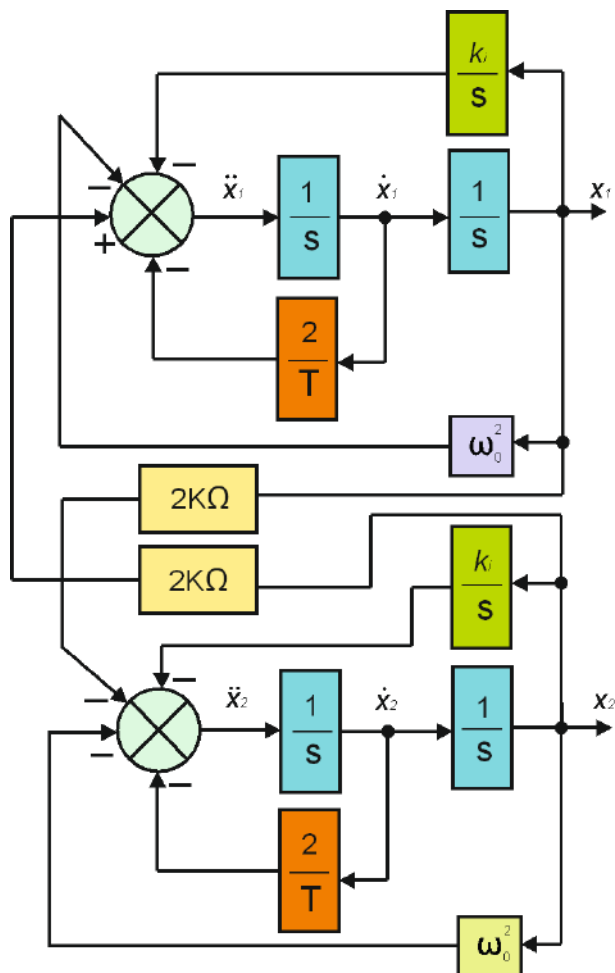


Рисунок 2.6 Структурная схема имитационного моделирования, разработанного «схемотехнического способа увеличения добротности» компенсации диссипации энергии в соответствии с уравнением 2.18

График свободных колебаний ЧЭ на неподвижном основании по координате x_1 при отсутствии «схемотехнического способа увеличения добротности» приведен на рисунке 2.7.

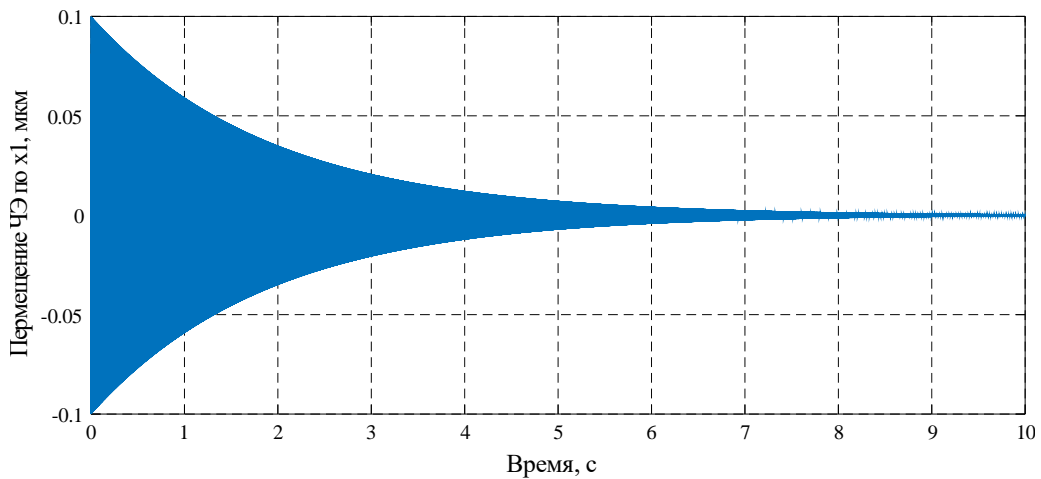


Рисунок 2.7 – Свободные колебания ЧЭ без компенсации диссипации энергии

Из анализа рисунка 2.7 видно, что без разработанного «схемотехнического способа увеличения добротности» при наличии диссипации энергии время работы ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» в составе ИИСО будет ограничено примерно 3 секундами. Столь короткий промежуток времени, не позволяет использовать ВТГ с низкодобротным объемным резонатором в составе ИИСО БПЛА даже малого времени полета.

На рисунке 2.8 приведены свободные колебания ЧЭ ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» также по координате x_1 , при использовании «схемотехнического способа увеличения добротности», но с неполной компенсацией диссипации энергии в соответствии со структурной схемой по рисунку 2.6. и при невыполнении равенства (2.19).

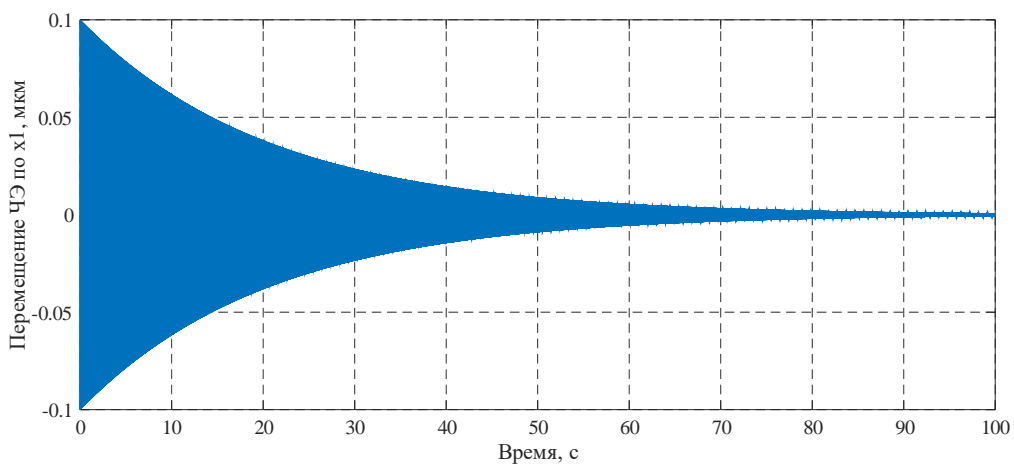


Рисунок 2.8 – Свободные колебания ЧЭ с компенсацией диссипации энергии

Значение коэффициента обратных связей принималось следующее: $k_i = 9,4 \cdot 10^8 \text{ 1/c}^3$. Новая постоянная времени с учетом компенсации диссипации составляет около $T = 21 \text{ с}$, соответствует новой эквивалентной добротности $Q^* = 3,29 \cdot 10^5$, что в 11 раз больше физическая добротность ЧЭ ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме свободной волны.

На рисунке 2.9 приведены графики удельной силы диссипации $2\dot{x}_1 T^{-1}$ (1) и сигнала компенсации $k_i \int_0^t x_1 dt$ (2).

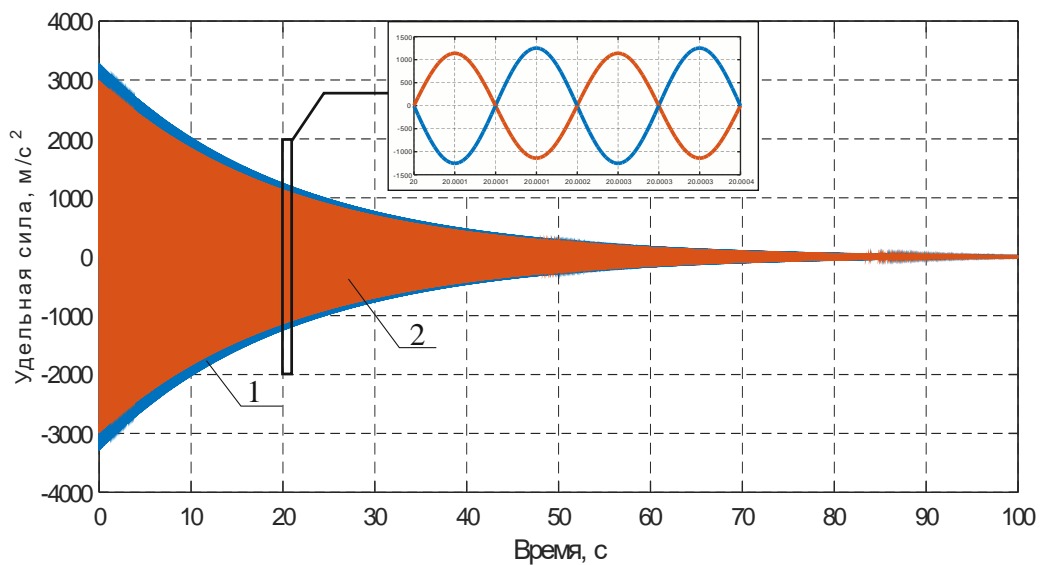


Рисунок 2.9 – Графики удельной силы диссипации $2\dot{x}_1 T^{-1}$ (1) и сигнала

компенсации $k_i \int_0^t x_1 dt$ (2)

На рисунке 2.10 приведена удельная сила диссипации $2\dot{x}_1 T^{-1}$ (график 1) и сигнал компенсации $k_i \int_0^t x_1 dt$ (график 2) при выполнении равенства (2.19).

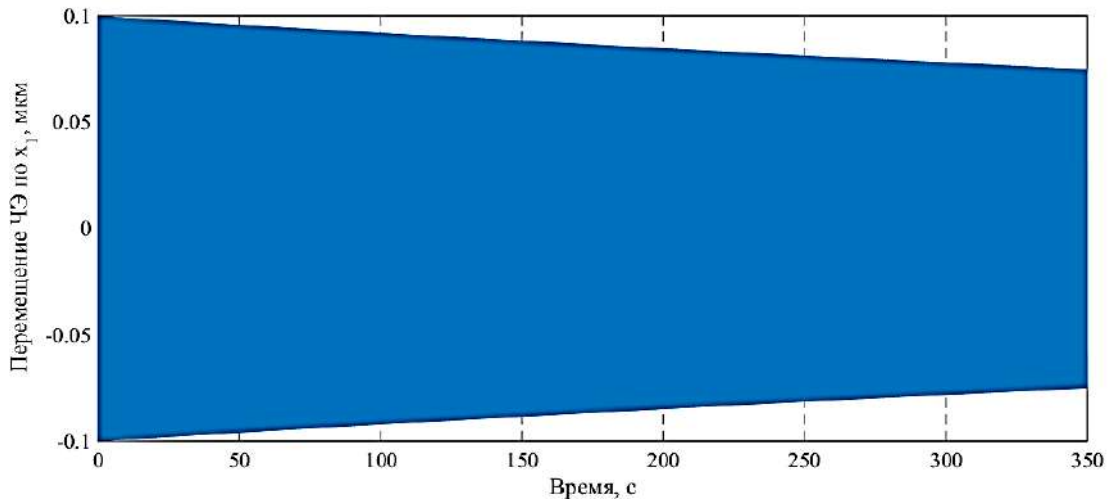


Рисунок 2.10 — Графики удельной силы диссипации $2\dot{x}_1 T^{-1}$ (1) и сигнала

$$\text{компенсации } k_i \int_0^t x_1 dt \text{ (2) при выполнении равенства (2.19)}$$

Теоретически постоянная времени при выполнении условия по формуле (2.19) составляет около $T = 1000$ с, что соответствует новой эквивалентной добротности $Q^* = 1,57 \cdot 10^7$, что в 523 раз больше физическая добротность ЧЭ ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме свободной волны. Однако в реальной системе такое значение теоретически сложно обеспечить ввиду не идеальности системы. Таким образом, предложенный схмотехнический способ может позволить увеличить время работы ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме свободной волны более чем в 20 раз [131], что необходимо подтвердить экспериментально.

2.4 Разработка автоколебательного способа возбуждения первичных колебаний ВТГ с низкодобротным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» для обеспечения минимального времени выхода на режим

Для большинства систем измерения угловых параметров важным критерием работы является не только обеспечение заданного времени функционирования, требуемой точности, но и обеспечение минимального времени выхода на режим (обеспечение работоспособности за минимальное время). В ВТГ с низкодобротным объемным резонатором время выхода на режим определяется работой контура возбуждения стоячей волны на резонансной частоте - первичные колебания.

Традиционно обеспечение режима возбуждения первичных колебаний осуществляется с помощью схемы вынужденных колебаний (рисунок 2.11) в такой схеме ключевым элементом является генератор гармонических колебаний, при этом он должен позволять изменять частоты в сотых долях герц, что является достаточно сложной задачей для реализации [49,132].

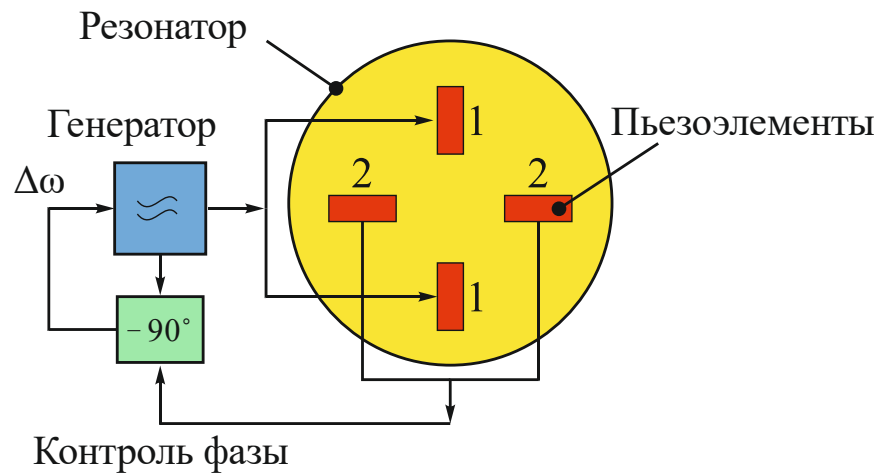


Рисунок 2.11 – Способ возбуждения первичных колебаний с помощью генератора

Так как управление амплитудой и частотой колебаний резонатора реализуется по принципу обеспечения фазового запаздывания равного 90° между задающим гармоническим сигналом на резонансной частоте (заданным с помощью генератора) и выходным сигналом, снимаемым с резонатора. Такой способ управления требует наличия высокоточных измерителей выходного сигнала (аналого-цифровых преобразователей), высокопроизводительного вычислителя (сигнальные процессоры, ПЛИС) и быстродействующего ЦАП с разрядностью не менее 12 – 14 бит [132]. При таком режиме достижимое время выхода на режим составляет более 3 с, а для высокочастотных объектов, требуется время выхода на режим не более 1 с, что не позволяет реализовать ИИСО БПЛА.

Вследствие чего поиск путей уменьшения времени выхода на режим является актуальной задачей. Одним из таких решений является использование режима автоколебаний.

Автоколебания - незатухающие колебания, поддерживаемые в диссипативной системе за счет постоянного внешнего источника энергии, причем свойства этих колебаний определяются самой системой. Автоколебания принципиально отличаются от свободных незатухающих колебаний, происходящих без действия сил, а также от вынужденных колебаний, происходящих под действием периодической силы, тем что для их поддержания не требуется периодическое воздействие извне [130]. Автоколебательная система сама управляет внешними воздействиями, обеспечивая согласованность поступления энергии определенными порциями в нужный момент времени (в такт с ее колебаниями).

Установлено, что условием возникновения автоколебаний в ВТГ с низкодобротном объемном резонатором, является сдвиг фаз в контуре равный - 180° . При этом за счет особенностей конструкции резонатора (расположения датчиков) сдвиг -90° уже существует в ней изначально. Необходимость коррекции сдвига фаз определила выбор нелинейного элемента в разрабатываемом контуре. Выбрана схема с релейным элементом с зоной неоднозначности, порогами срабатывания которого можно управлять в широких пределах.

В автоколебательной способе, возбуждения при подаче на пьезоэлементы сигнала возбуждения ВТГ знакопеременного напряжения на резонансной частоте постоянной амплитуды возникают первичные колебания. При этом амплитуда колебаний пропорциональна приложенному напряжению с учетом добротности резонатора. Пропорциональность сохраняется до определенного момента, определяемого отношением приложенного к пьезоэлементу напряжения и его деформацией. После определенной амплитуды напряжения приращение амплитуды колебаний к амплитуде напряжения начинает убывать. Используя данный факт при амплитуде колебаний менее максимально достижимой, возможно уменьшение времени выхода резонатора на режим при использовании переменной величины напряжения возбуждения.

Так в начальный момент времени данная амплитуда может быть максимально допустимой для пьезоэлементов. При этом и усилие, развиваемое

ими, будет максимальным и приводит к большей амплитуде раскачки. Для обеспечения требуемого значения амплитуды раскачки необходима обратная связь, регулирующая амплитуду напряжения возбуждения в зависимости от текущей амплитуды колебаний резонатора. При самом простом подходе необходимо реализовать пропорциональную отрицательную обратную связь между амплитудой колебаний и амплитудой прилагаемого напряжения раскачки. Структурная схема разработанного автоколебательного способа возбуждения первичных колебаний, повышающий эффективности ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» в составе ИИСО БПЛА, сокращающая время выхода ВТГ представлена на рисунке 2.12.

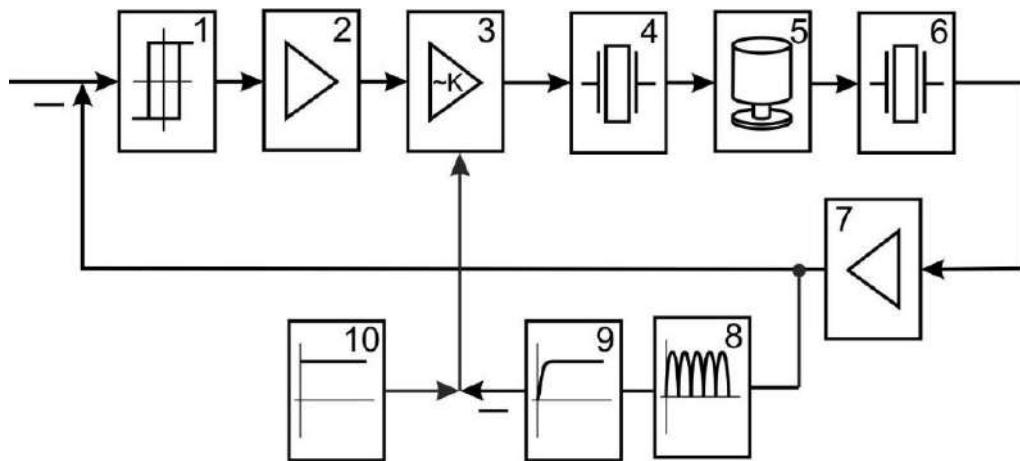


Рисунок 2.12 – Структурная схема разработанного автоколебательного способа возбуждения первичных колебаний:

1 – релейный элемент с зоной неоднозначности; 2, 7 – усилитель с постоянным коэффициентом усиления; 3 – усилитель с переменным коэффициентом усиления; 4, 6 – пьезоэлементы возбуждения и съема сигнала, соответственно; 5 – резонатор; 8 – двухполупериодный выпрямитель; 9 – фильтр; 10 – опорный сигнал напряжения

Функционирование разработанного автоколебательного способа возбуждения первичных колебаний в соответствии с рисунком 2.18 осуществляется следующим образом:

- в начальный момент времени резонатор не колеблется и при подаче напряжения шумовой сигнал цепи преобразования приводит к появлению сигнала на выходе релейного элемента 1 этот сигнал, проходя через усилитель с постоянным коэффициентом усиления 2 и усилитель с переменным коэффициентом усиления 3 поступает на пьезоэлементы возбуждения 4;
- пьезоэлементы, деформируясь, приводят к деформации резонатора 5 и появлению сигнала на пьезоэлементах съема сигнала 6;
- усилитель 7, усиливает сигнал с пьезоэлементов и подает его на вход релейного элемента 1 и двухполупериодного выпрямителя 8;
- сигнал на входе блока 1 приводит к его переключению и цикл повторяется с той лишь разницей, что знак напряжения на пьезоэлементах возбуждения будет обратный;
- сигнал с выхода выпрямителя 8 поступает на вход фильтра 9;
- на выходе фильтра амплитуда выпрямленного сигнала сравнивается с опорной амплитудой напряжения 10 и разностный сигнал подается на вход управления коэффициентом усиления усилителя 3;
- коэффициент усиления блока 3 тем больше, чем больше разница напряжений на выходах блоков 9 и 10.

При разнице равной нулю коэффициент усиления стремится к единице. За счет этого напряжение возбуждения в начальный момент времени ограничивается допустимым выходным напряжением усилителя 3, а по мере увеличения амплитуды колебаний резонатора стремится к величине формируемой усилителем 2.

За счет способа включения до момента достижения резонатором требуемой амплитуды колебаний на его обкладке будет прикладываться напряжение большей амплитуды, что и будет приводить к уменьшению времени выхода на режим. Следует отметить, что выигрыш во времени выхода будет тем больше чем меньше требуемая амплитуда раскачки по сравнению с максимально достижимой амплитудой колебаний.

Упрощенно математическая модель, описывающая разработанный автоколебательный способ возбуждения первичных колебаний ВТГ без учета вторичного контура и вращения основания, а также схмотехнического способа увеличения добротности может быть представлена в виде:

$$\ddot{x}_1 + \frac{2}{T}\dot{x}_1 + \omega_0^2 x_1 = f_0. \quad (2.22)$$

Выражение для силы в уравнении (2.22) может быть представлено в виде:

$$f_0 = \begin{cases} -K_6 U_u & \text{при } x_1 \cdot K_7 \cdot \varepsilon_{WN} > a; \\ K_6 U_u & \text{при } x_1 \cdot K_7 \cdot \varepsilon_{WN} < -a, \end{cases} \quad (2.23)$$

где K_6 – коэффициент приведения напряжения к перемещению; U_u – напряжение, приложенное к пьезоэлементам возбуждения резонатора; K_7 – коэффициент усиления усилителя 7 (приведения перемещения к напряжению); ε_{WN} – «белый шум» (*White noise*); a – порог срабатывания релейного элемента с зоной неоднозначности.

Напряжение, приложенное к пьезоэлементам возбуждения в уравнении (2.23) примет вид:

$$U_u = U_p \cdot K_2 \cdot K_3(\Delta U), \quad (2.24)$$

где U_p – напряжение на выходе релейного элемента; K_2 – коэффициент усиления усилителя 2; $K_3(\Delta U)$ – переменный коэффициент усиления усилителя 3.

Разница опорного и фильтрованного напряжений имеет вид:

$$\Delta U = U_{on} - U_{\Phi}, \quad (2.25)$$

где U_{on} – опорное напряжение, соответствующее напряжению амплитуды колебаний при напряжении возбуждения равному напряжению на выходе усилителя 2 (по амплитудным значениям); U_{Φ} – напряжение на выходе фильтра.

Напряжение на выходе фильтра второго порядка в простейшем случае может быть найдено:

$$T^2 \frac{d^2 U_{\Phi}}{dt^2} + 2\xi T \frac{dU_{\Phi}}{dt} + U_{\Phi} = KU_B, \quad (2.26)$$

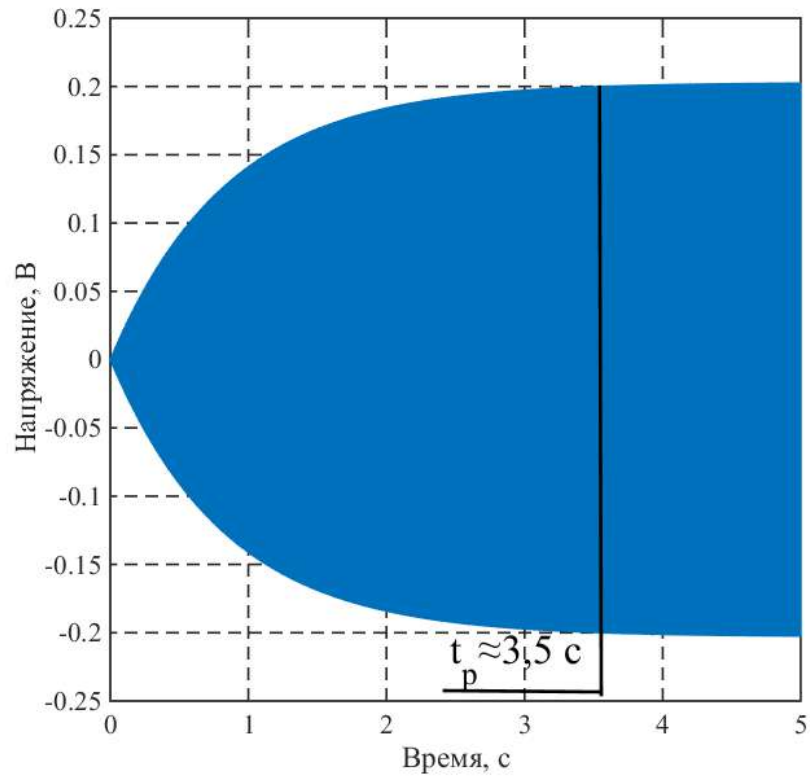


Рисунок 2.14 – Процесс выхода на режим при использовании способ возбуждения первичных колебаний с помощью генератора

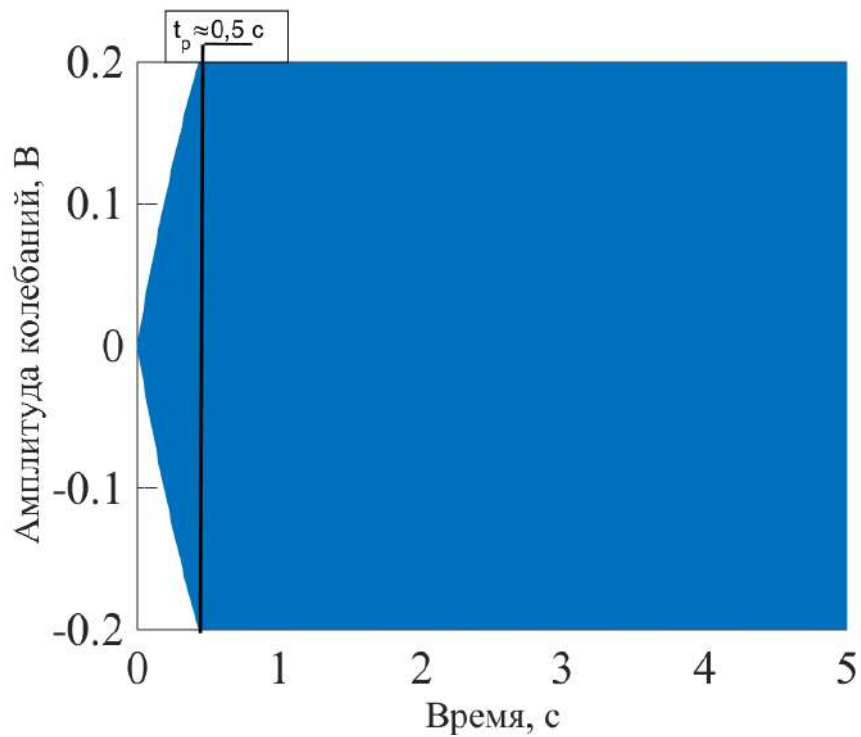


Рисунок 2.15 – Процесс выхода на режим при использовании разработанного автоколебательного способа возбуждения первичных колебаний при $K_3 = 500$

Анализ рисунков 2.14 показывает, что при использовании способа возбуждения первичных колебаний с помощью генератора время выхода на режим составляет $t_p \approx 3.5$ с, а из анализа рисунка 2.15 видно, что теоретически разработанный способ позволяет сократить время выхода на режим до $t_p \approx 0.5$ с, что подтверждает его работоспособность, более точное время выхода на режим необходимо установить экспериментально.

2.5 Разработка способа обработки сигнала, полученного по огибающим первичных и вторичных колебаний с контрольных точек резонатора ВТГ, обеспечивающего работоспособность во всем диапазоне углов

2.5.1 Математическое описание по огибающим колебаний

Функционирование ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» обеспечивается за счет амплитуды удельной силы (момента), действующего на ЧЭ, который изменяется по гармоническому закону с частотой ω_0 [133]:

$$f_0(t) = \begin{cases} f_0 \sin(vt) & \text{при } t < t_p \\ 0 & \text{при } t > t_p, \end{cases} \quad (2.28)$$

где t_p – время подачи на резонатор сигнала возбуждения.

$$f_1(t) = f_0 \sin(vt) = f_{01} \sin(vt) \sin(\omega_0 t),$$

где v – частота возбуждающей силы(момента), ω_0 – собственная частота резонатора

Данное соотношение может быть представлено в виде

$$f_1(t) = \frac{f_{01}}{2} [\cos(v - \omega_0)t - \cos(v + \omega_0)t].$$

Воздействие на ЧЭ, в виде модулированного сигнала можно представить, как реакцию на два гармонических сигнала с частотами, равными сумме и разности несущей частоты и частоты огибающих:

$$\omega_L = v - \omega_0,$$

$$\omega_R = v + \omega_0,$$

Эти гармонические сигналы являются боковыми частотами. Тогда амплитуда установившихся колебаний, вызванная гармоническим сигналом на частоте ω_L , определяется равенством:

$$x_{1L} = \frac{1}{2} \frac{f_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega_L^2)^2 + 4\xi^2 \omega_0^2 \omega_L^2}} = \frac{1}{2} \frac{f_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \nu^2 + 2\nu\omega_0 - \omega_0)^2 + 4\xi^2 \omega_0^2 (\nu - \omega_0)^2}}.$$

При выполнении условия резонансной настройки ($\omega_0 = \nu$) для низких частот изменения возбуждающего воздействия ($\omega_0 \ll \nu$), получим:

$$x_{1L} \approx \frac{1}{4} \frac{f_0 T^*}{\nu \sqrt{T^{*2} \omega_0^2 + 1}},$$

где $T^* = \frac{2Q^*}{\nu}$ – постоянная времени по огибающим амплитуд колебаний ЧЭ

с учетом значения добротности Q^* полученного с помощью схемотехнического способа увеличения добротности.

Фаза колебаний может быть определена как:

$$\phi_{1L} = -\arctg \frac{\omega_0(\nu - \omega_0)}{Q^* [\omega_0^2 - (\nu - \omega_0)^2]}.$$

Для резонансного режима, в низкочастотной области получим:

$$\phi_{1L} = -\arctg \frac{1}{T^* \omega_0}.$$

Выполняя аналогичные преобразования для определения реакции ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» на вторую боковую частоту, имеем:

$$x_{1R} \approx \frac{1}{4} \frac{f_0 T^*}{\nu \sqrt{T^{*2} \omega_0^2 + 1}}, \phi_2 = -\arctg \frac{1}{T^* \omega_0}.$$

Используя принцип суперпозиций, установившиеся колебания ЧЭ ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» представить, как сумму реакции на каждую боковую частоту

$$x_1(t) = x_{1L}(t) + x_{1R}(t) \approx A(\omega_0) \cos(\nu t - \phi(\omega_0)),$$

где

$$A(\omega_0) = \frac{1}{2} \frac{f_0 T^*}{v \sqrt{T^{*2} \omega_0^2 + 1}}, \phi(\omega_0) = -\operatorname{arctg} \frac{1}{T^* \omega_0}. \quad (2.29)$$

Из соотношения (2.29) следует, что огибающая амплитуд колебаний ЧЭ ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме свободной волны, соответствует аperiodическому звену первого порядка с передаточной функцией рисунок (2.16).

$$W_1^{oz}(s) = \frac{x_1^{oz}(s)}{f_0(s)} = \frac{T^*}{2\omega_0(T^*s + 1)} \quad (2.30)$$

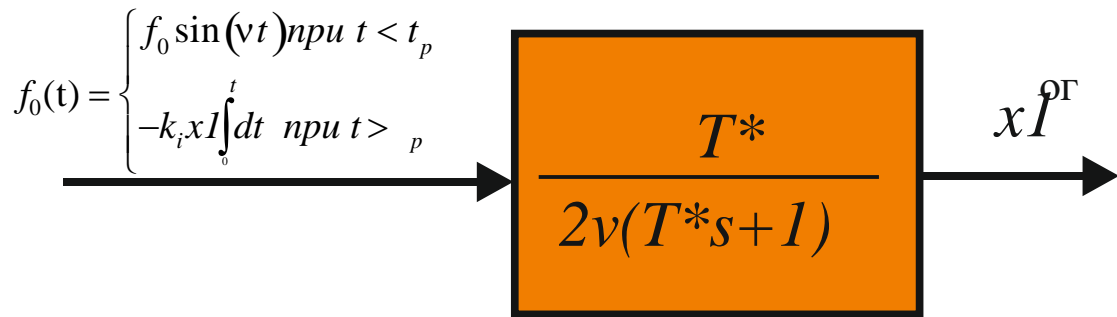


Рисунок 2.16 Структурная схема контура первичных колебаний ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной ВОЛНЫ»

В силу симметрии дифференциальных уравнений (2.29), передаточную функцию по огибающей амплитуд чувствительности резонатора представим в виде

$$W_2^{oz}(s) = \frac{x_2^{oz}(s)}{-2K_2 \Omega \dot{x}_1^{oz}(s)} = \frac{T^*}{2\omega_0(T^*s + 1)}. \quad (2.31)$$

Учитывая, что операции дифференцирования сигнала для огибающей соответствует умножению на частоту ω_0 , структурную схему ВТГ для случая резонансной настройки по огибающим амплитуд колебаний резонатора имеет вид, представленный на рисунке 2.17.

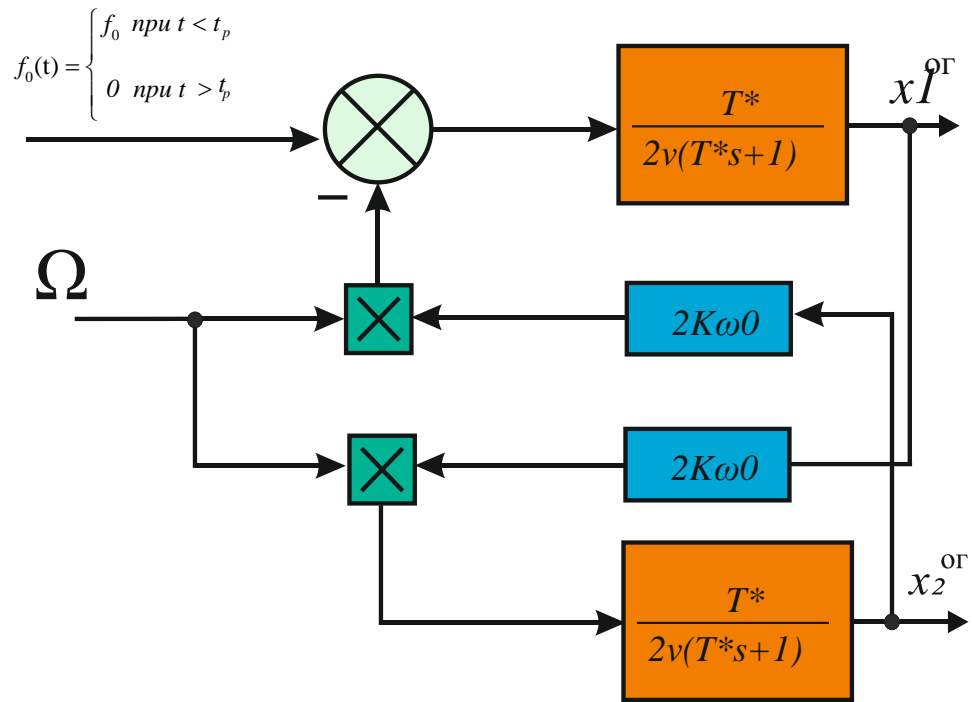


Рисунок 2.17 – Структурная схема ВТГ для огибающих амплитуд возбуждения и чувствительности при резонансной настройке

На рисунках 2.18 – 2.19 приведены графики переходных процессов огибающих амплитуд вторичных и первичных колебаний ВТГ, а также их отношение при $K=0,4$, $T=21$ с, $\nu = \omega_0 = 5700$ Гц в зависимости от угловой скорости основания (4,5), полученные на основе моделирования по структурной схеме на рисунке. 2.23.

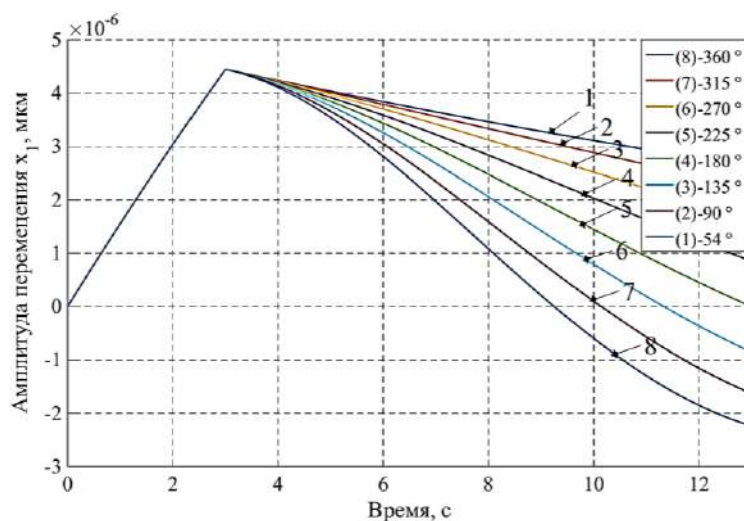


Рисунок 2.18 – Переходные процессы огибающих амплитуд возбуждения при различном угле поворота основания

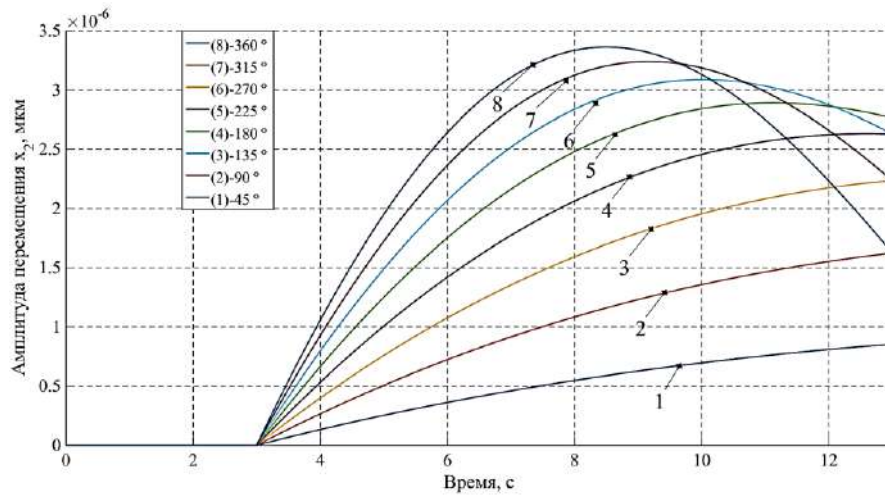


Рисунок 2.19 – Переходные процессы огибающих амплитуд чувствительности при различной угловой скорости основания

На рисунке 2.20 показан определяемый угол в соответствии с формулой (2.13) при угле поворота на 360°

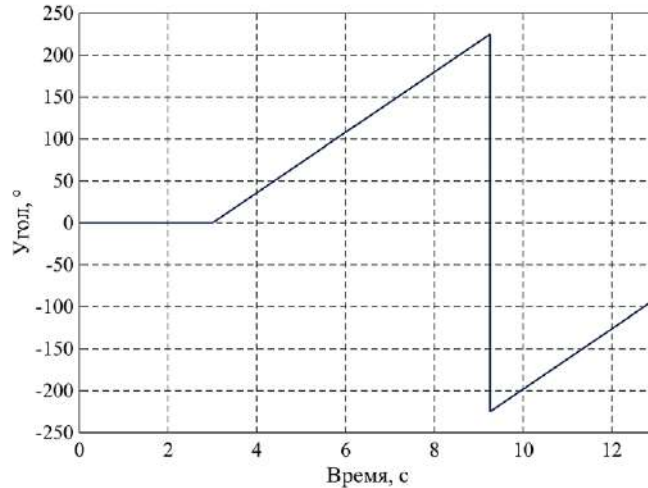


Рисунок 2.20 – Вычисленный угол по формуле (2.13)

Из анализа рисунка 2.20 видно, что использование формулы (2.13) не позволит обеспечить работоспособность ИИСО БПЛА на базе ВТГ, работающим в режиме «свободной волны» во всем диапазоне углов.

2.5.2 Математическое описание разработанного способа

Наиболее простым способом выделения информации из высокочастотного сигнала (демодуляция) является использование двухполупериодного выпрямителя, при этом в сигнале сохраняется информация об амплитуде, однако из-за данной схемы нет возможности обеспечить работоспособность ИИСО во всем диапазоне измеряемых углов, требуется правильная интерпретация. Для решения данной проблемы разработан способ обработки сигнала, полученного по огибающим первичных и вторичных колебаний с контрольных точек резонатора ВТГ, обеспечивающий работоспособность ИИСО во всем диапазоне измеряемых углов. Полученный сигнал по огибающим первичных и вторичных колебаний с контрольных точек резонатора необходимо правильно интерпретировать для измерения угла во всем диапазоне. Для этих целей необходимо знать: счетчик направления вращения, позволяющий отслеживать его по изменению фазы (10), счетчик перехода через 90° позволяющий определить в какой четверти находится свободная волна (11-12). Для правильной интерпретации углового положения необходимо определить:

- в какую сторону вращается подвижное основание (БПЛА) с установленным ВТГ в начальный промежуток времени по изменению фазы;
- в какой четверти находится «свободная волна»;
- изменилась ли фаза между контрольными точками x_1 и x_2 .

Разработанный способ работает следующим образом:

1) В начальный промежуток времени определяется направление вращения подвижного основания (БПЛА) с установленным ВТГ. При этом «свободная волна» должна находиться в I четверти, и при условии $x_1 > x_2$ фаза ($\varphi < 90^\circ$) рисунок 2.21- а) подвижное основание (БПЛА) с установленным ВТГ поворачивается по часовой стрелке, а мы наблюдаем поворот фигуры Лиссажу против часовой стрелки.

Если $x_1 < x_2$ фаза ($\varphi > 90^\circ$) основание (БПЛА) с установленным ВТГ поворачивается против часовой стрелки (рисунок 2.27 – б), а мы наблюдаем поворот фигуры Лиссажу по часовой стрелке.

2) После определения направления вращения, и при движении основания БПЛА по часовой стрелке информация, получаемая с контрольных точек x_1 и x_2 будет соответствовать движению фигуры Лиссажу с I четверти по IV четверть, при этом осуществляется переход вертикальной оси (\uparrow) затем горизонтальной оси (\rightarrow), вертикальной оси (\uparrow), то есть направление не меняется. Если получается так, что фигура Лиссажу проходит два раза подряд одну и ту же ось ($\uparrow \uparrow$), или ($\rightarrow \rightarrow$) значит направление изменилось.

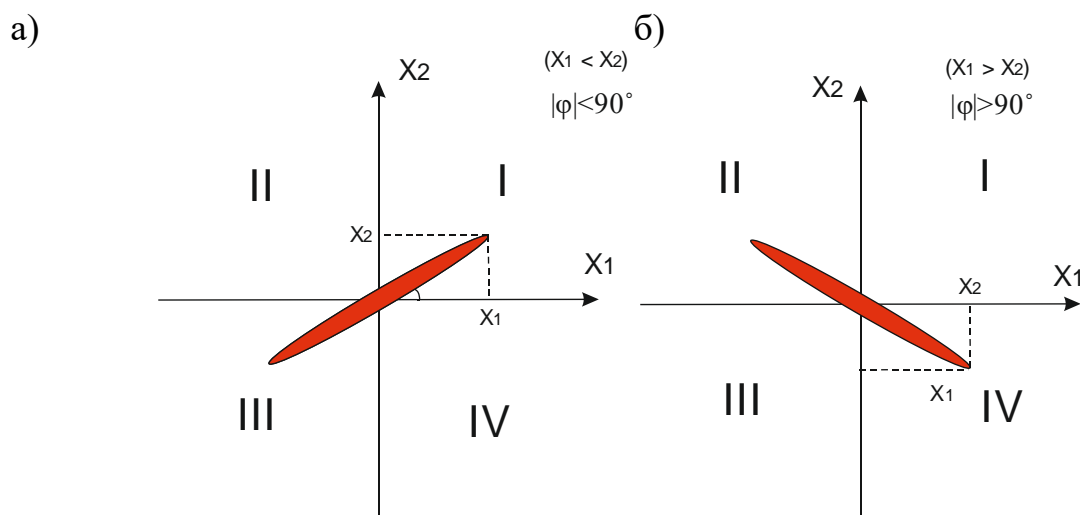


Рисунок 2.21 – Определение направления вращения основание (БПЛА) с установленным ВТГ

Это учитывается в счетчике четвертей, и в зависимости от четверти при подстановку в формулу вычисления угла (2.13) меняется знак в x_1 или x_2 . Математическое описание разработанного способа имеет следующий вид:

Высокочастотный сигнал получаемый с контрольных точек резонатора ВТГ x_1 и x_2 изменяемый по гармоническому закону и проходит процедуру демодуляции:

$$U_{PV} = \begin{cases} k_1 \cdot x_1 & \text{при } x_1 > 0; \\ -k_1 \cdot x_1 & \text{при } x_1 < 0, \end{cases} \quad (2.32)$$

$$U_{UZ} = \begin{cases} k_1 \cdot x_2 & \text{при } x_2 > 0; \\ -k_1 \cdot x_2 & \text{при } x_2 < 0, \end{cases} \quad (2.33)$$

где U_{PU} , U_{UZ} – напряжения, снимаемые с пьезоэлементов пучности и узла, соответственно; k_1 – коэффициент приведения перемещения элементов резонатора к напряжению выходного сигнала (может быть получен экспериментальным путем);

сглаживающий фильтр:

$$U_{PUf} = \frac{k_f}{T_f^2 p^2 + 2\xi T_f p + 1}; \quad (2.34)$$

$$U_{UZf} = \frac{k_f}{T_f^2 p^2 + 2\xi T_f p + 1}, \quad (2.35)$$

где k_f – коэффициент усиления, T_f – постоянная времени и ξ – относительный коэффициент демпфирования фильтра.

фазовый детектор:

$$U_{FZ} = \begin{cases} \text{sign}(k_2 \cdot x_2) & \text{при } x_1 > 0; \\ \text{sign}(-k_2 \cdot x_2) & \text{при } x_1 < 0, \end{cases} \quad (2.36)$$

где U_{FZ} – напряжение характеризующее изменение фазового угла на 90° ; k_2 – коэффициент приведения перемещения элементов резонатора к напряжению выходного сигнала.

Демодулированные сигналы получаемые с пьезоэлементов (2.33), (2.34) и сигнал фазового детектора (2.35) необходимы для вычисления угла по следующему алгоритму:

$$N_0 = \begin{cases} 1 & \text{при } U_{FZ}(0) > 0; \\ -1 & \text{при } U_{FZ}(0) < 0, \end{cases} \quad (2.37)$$

$$N = \begin{cases} -1 & \text{при } U_{UZf} > U_{PUf}; \\ 1 & \text{при } U_{UZf} < U_{PUf}, \end{cases}$$

$$s = \begin{cases} 1 & \text{npu } N = N_{-1}; \\ -1 & \text{npu } N \neq N_{-1}, \end{cases}$$

$$kv = kv + s, \quad (2.38)$$

$$kv = \begin{cases} 4 & \text{npu } kv < 1; \\ 1 & \text{npu } kv > 4, \end{cases} \quad (2.39)$$

$$\gamma = \frac{1}{2k} \begin{cases} \arctg\left(\frac{U_{UZf}}{U_{PUf}}\right) & \text{npu } kv = 1; \\ \arctg\left(\frac{U_{UZf}}{-U_{PUf}}\right) & \text{npu } kv = 2; \\ \arctg\left(\frac{-U_{UZf}}{-U_{PUf}}\right) & \text{npu } kv = 3; \\ \arctg\left(\frac{-U_{UZf}}{U_{PUf}}\right) & \text{npu } kv = 4, \end{cases} \quad (2.40)$$

где N_0 счетчик направления вращения, N счетчик перехода через 90° ; $U_{UZf} U_{PZf}$ - напряжение демодулированных сигналов характеризующее изменение в ориентации «свободной волны» в контрольных точках x_1, x_2 ; s - счетчик четвертей; kv - текущая четверть расположения свободной волны; $U_{x_{1f}}, U_{x_{2f}}$ - напряжение сигнал с контрольной точки резонатора x_1 и x_2 ; K - коэффициент Брайана= 0,4; γ - вычисленный угол [134].

2.6 Описание ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» фигурами Лиссажу

Исследование сложных колебаний можно проводить с помощью фигуры Лиссажу которая получается на основании сигналов полученных с координаты $x_1(t)$ $x_2(t)$ и в случаи идеальной настройки обеспечивается синфазность колебаний [135]:

$$\begin{aligned} x_1(t) &= a_1 \cos \omega_0 t, \\ x_2(t) &= a_2 \cos \omega_0 t, \end{aligned} \quad (2.41)$$

где a_1 и a_2 - амплитуды колебаний

При синфазности первичных и вторичных колебаний фигура Лиссажу, построенная в координатах $x_1(t)$, $x_2(t)$ будет иметь вид прямой линии (рисунок 2.22)

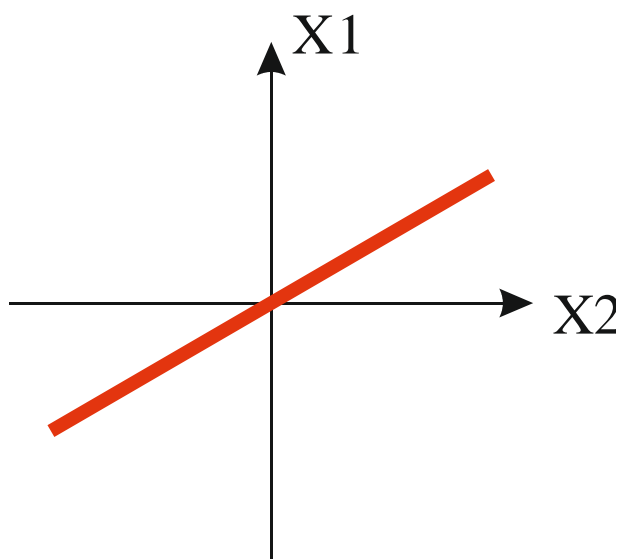


Рисунок 2.22 – Фигура Лиссажу в случае синфазности первичных и вторичных колебаний

Но учитывая тот момент, что в выходном сигнале ВТГ с низкодобротным объемным резонатором может присутствовать квадратурная составляющая решение уравнений запишем в виде:

$$\left. \begin{aligned} x_1(t) &= a_1 \cos \omega_0 t, \\ x_2(t) &= a_2 \cos(\omega_0 t - \Delta\varphi), \end{aligned} \right\} \quad (2.42)$$

где $\Delta\varphi$ - сдвиг фазы сигнала вторичных колебаний x_2 по отношению к сигналу первичных колебаний x_1 .

Перепишем уравнения (2.42) в виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{x_1(t)}{a_1} &= \cos \omega_0 t, \\ \frac{x_2(t)}{a_2} &= \cos \omega_0 t \cos \Delta\varphi + \sin \omega_0 t \sin \Delta\varphi, \end{aligned} \right\} \quad (2.43)$$

или, что тоже самое

$$\left. \begin{aligned} \frac{x_1(t)}{a_1} \sin \Delta\phi &= \cos \omega_0 t \sin \Delta\phi, \\ \frac{x_2(t)}{a_2} - \frac{x_1(t)}{a_1} \cos \Delta\phi &= \sin \omega_0 t \sin \Delta\phi. \end{aligned} \right\} \quad (2.44)$$

Возведя в квадрат левые и правые части уравнений системы уравнений (2.44), получим каноническое уравнение повернутого эллипса (рисунок. 2.23)

$$\frac{x_1^2(t)}{a_1^2} + \frac{x_2^2(t)}{a_2^2} - \frac{2x_1(t)x_2(t)}{a_1a_2} \cos \Delta\phi = \sin^2 \Delta\phi. \quad (2.45)$$

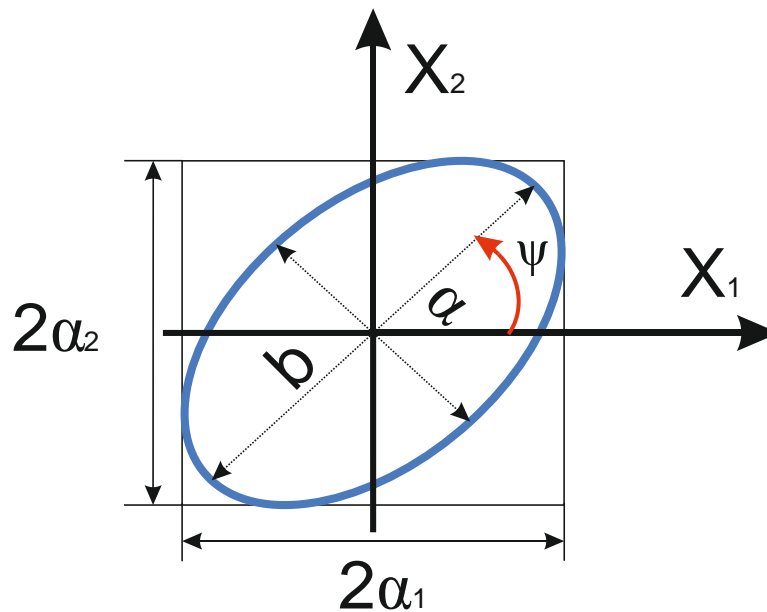


Рисунок 2.23 – Эллиптическая фигура Лиссажу, соответствующая наличию квадратурной составляющей в сигнале узла

Эллипс вписан в прямоугольник со сторонами $2a_1$, $2a_2$, а его ориентация определяется углом ψ , который может быть найден из соотношения

$$\operatorname{tg} 2\psi = \frac{2a_1a_2 \cos \Delta\phi}{a_1^2 - a_2^2} \quad (2.46)$$

Таким образом формулу (2.48) можно использовать для анализа сигнала, получаемого с контрольных точек резонатора x_1 и x_2 при проведении эксперимента, только для правильной интерпретации необходимо учитывать коэффициент Брайана.

2.7 Анализ полученных результатов

После реализации всех предложенных способов математическая модель примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_1 + \frac{2}{T}\dot{x}_1 + \omega_0^2 x_1 - 2K\Omega\dot{x}_2 + k_i \int_0^t x_1 dt &= f_0, \\ \ddot{x}_2 + \frac{2}{T}\dot{x}_2 + \omega_0^2 x_2 + 2K\Omega\dot{x}_1 + k_i \int_0^t x_2 dt &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2.47)$$

где x_1, x_2 – перемещения кромки резонатора в контролируемых точках, снимаемые с оси возбуждения и чувствительности; $2\dot{x}_1/T, 2\dot{x}_2/T$ – диссипации энергии; T – постоянная времени; ω_0 – собственная частота резонатора; K – коэффициент прецессии волны (коэффициент Брайана); Ω – угловая скорость основания; k_i – коэффициент пропорциональности интегралов от перемещения ЧЭ (реализующий схемотехнический способ увеличения добротности); f_0 – удельная сила создаваемая системой возбуждения за счет реализации разработанного способа возбуждения первичных колебаний, принимающая вид (2.23).

Таким образом, уравнение (2.47) учитывать конструктивные особенности резонатора, оказывающие влияние на собственную частоту резонатора, постоянную времени, коэффициент прецессии волны, диссипацию энергии в резонаторе. Позволяет обоснованно выбирать параметры блока электроники в котором реализуется схемотехнический способ увеличения добротности, способ возбуждения первичных колебаний и позволяет производить оценку предложенных способов. А с учетом разработанного способа обработки демодулированного сигнала, полученного по огибающим первичных и вторичных колебаний с контрольных точек резонатора x_1, x_2 позволяет анализировать функционирование ИИСО БПЛА во всем диапазоне измеряемых углов.

Важным критерием эффективности работы ВТГ в составе ИИСО БПЛА, является время его работы, время выхода на режим возможность измерения углов во всем диапазоне, но и оценка достижимой точности вычисления углового положения. Поэтому в среде *Matlab Simulink* разработана имитационная модель,

состоящая из следующих функциональных блоков, структурная схема которых приведена на рисунке 2.24:

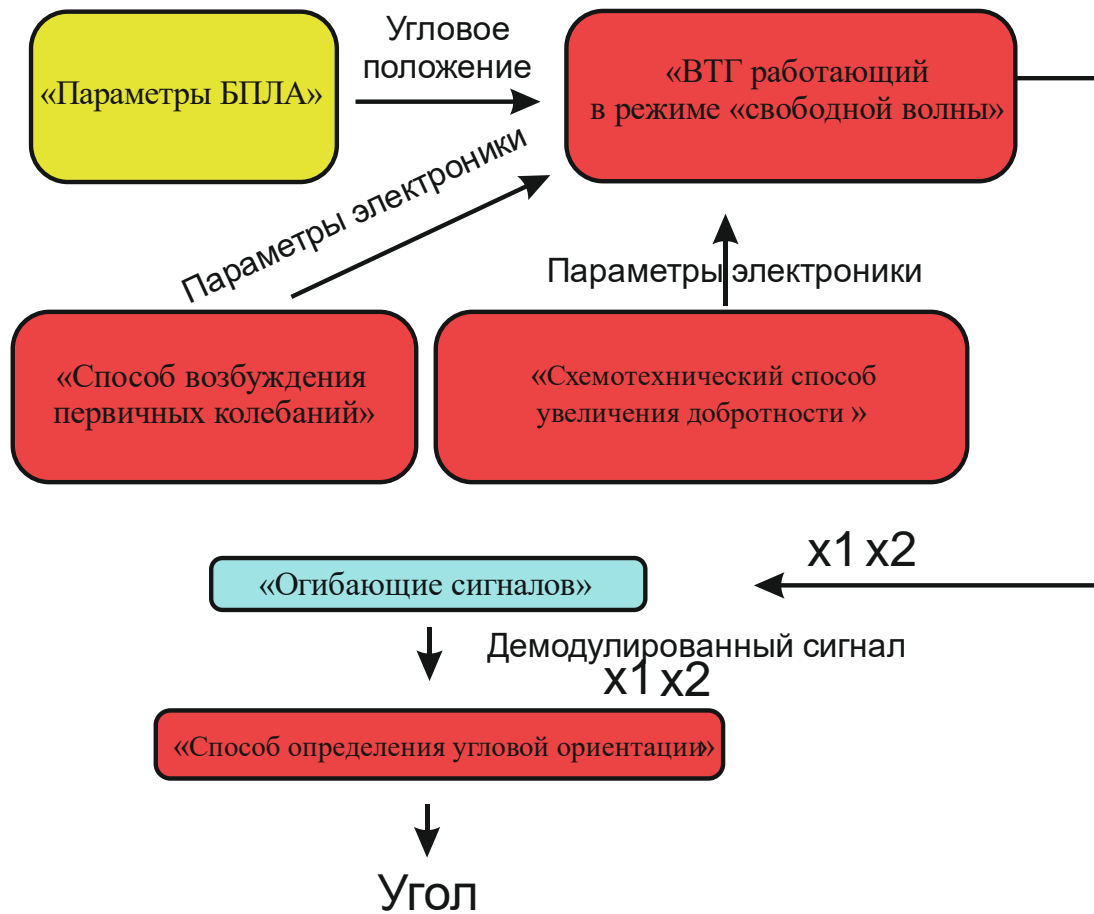


Рисунок 2.24 – Структурная схема имитационной модели

На рисунке 2.25 приведена структурная схема имитационного моделирования в среде *Matlab Simulink*. Данная имитационная модель легла в основу разработанного программного обеспечения, позволяющего оценить необходимую добротность для обеспечения работоспособности ИИСО БПЛА [136].

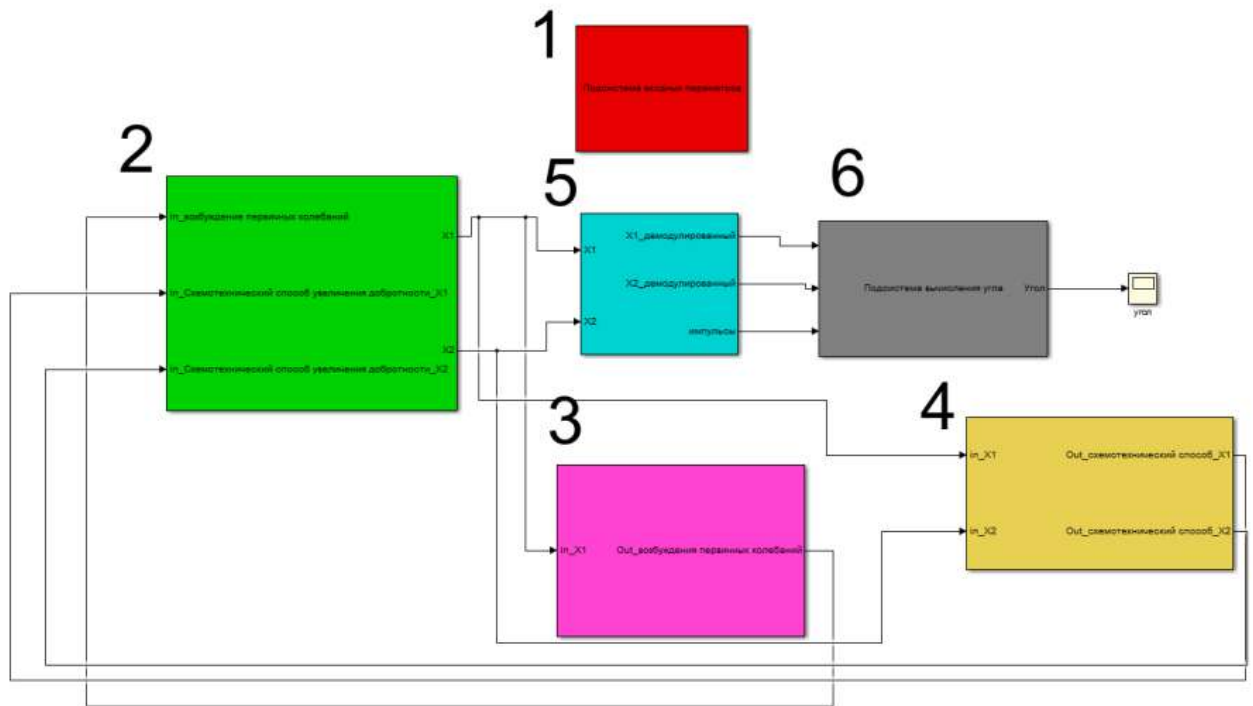


Рисунок 2.25 Имитационная модель в среде *Matlab Simulink*

1 – блок «Параметры БПЛА», 2 – блок «ВТГ работающий в режиме «свободной волны», 3 – блок «Способ возбуждения первичных колебаний», 4 – блок «Схемотехнический способ увеличения добротности», 5 – блок «Огибающие сигналов», 6 – «Способ определения угловой ориентации»

- первый блок «Параметры БПЛА» для имитационного моделирования входных параметров БПЛА. В данном блоке есть возможность задать угловую ориентацию БПЛА;

- второй блок «ВТГ работающий в режиме «свободной волны» для имитационного моделирование работы ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» без учета блока электроники. На рисунке 2.26 приведена структурная схема блока для имитационного моделирования.

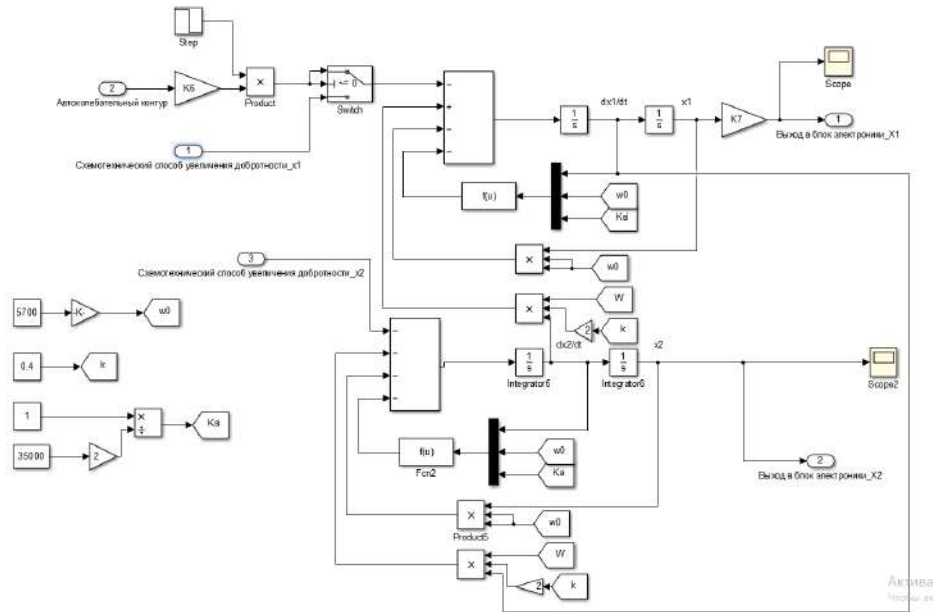


Рисунок 2.26 – Схема имитационного моделирования блока « ВТГ работающий в режиме «свободной волны»

В данном блоке есть возможность задать параметры ВТГ такие как: собственную частоту ω_0 , коэффициент демпфирования ζ , коэффициент Брайана К данный блок реализуется согласно математическому уравнению (2.47). При имитационном математическом моделировании были заданы следующие параметр резонатора ВТГ:

- собственная частота $\omega_0 = 5700 \text{ Гц}$;
- коэффициент демпфирования $\zeta = 1.42 \cdot 10^{-5}$ (при добротности $Q = 35000$);
- коэффициент Брайана $K=0.4$.
- третий блок «Способ возбуждения первичных колебаний» для имитационного моделирования разработанного способа возбуждения первичных колебаний. На рисунке 2.27 приведена структурная схема блока для имитационного моделирования.

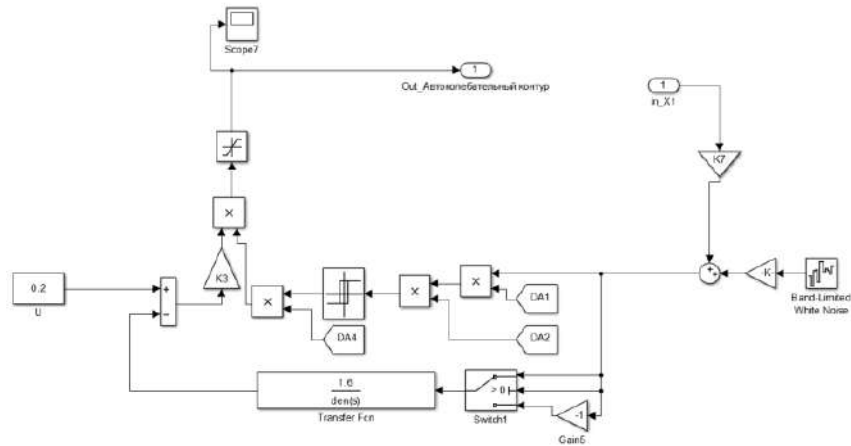


Рисунок 2.27 – Структурная схема блока «Способ возбуждения первичных колебаний»

В данном блоке есть возможность задать параметры блока электроники реализующего данный способ, такие как напряжения питания, задать параметры фильтра и коэффициентов усиления. В данном блоке реализуется выражение (2.23-2.27);

- четвертый блок «Схемотехнический способ увеличения добротности» для имитационного моделирования разработанного способа компенсации диссипации энергии. На рисунке 2.28 приведена структурная схема блока для имитационного моделирования.

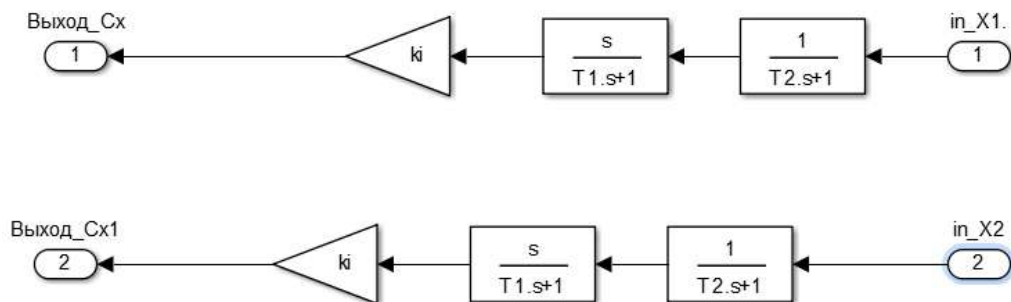


Рисунок 2.28 – Структурная схема блока «Схемотехнический способ увеличения добротности»

В данном блоке есть возможность подобрать оптимальные параметры для блока электроники реализующего обратные связи для обеспечения максимально возможного времени работы ВТГ. В данном блоке реализуется выражение обеспечивающие компенсацию диссипации энергии $k_i \int_0^t x_1 dt$ присутствующей в уравнении (2.47).

- пятый блок «Огибающие сигналов» для имитационного моделирования обработки высокочастотного сигнала, получаемого с ВТГ. На рисунке 2.29 приведена структурная схема блока для имитационного моделирования. В данном блоке есть возможность подобрать параметры фильтров бля получения огибающей выходного сигнала (демодуляции выходного сигнала) согласно уравнению (2.30, 2.31);

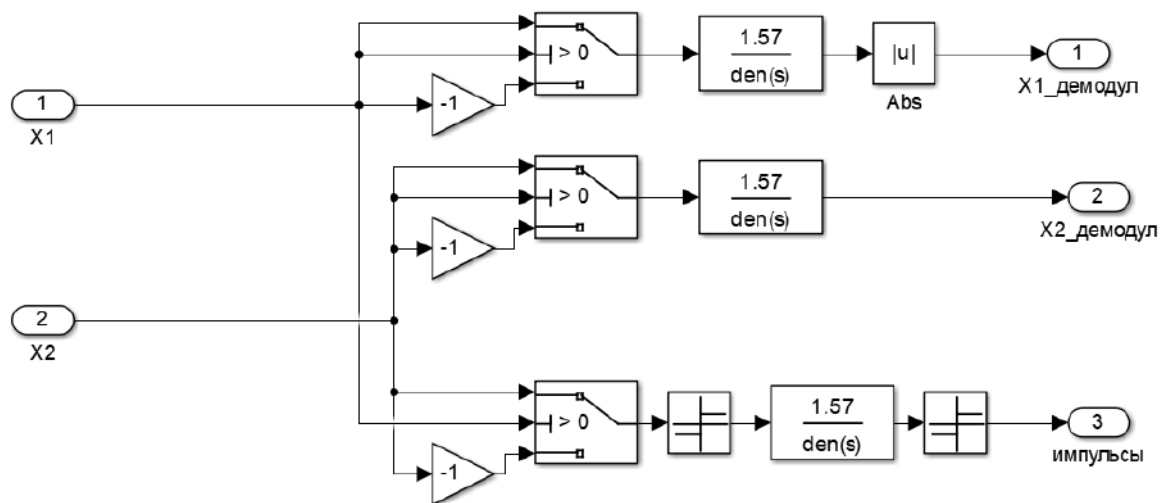


Рисунок 2.29 – Структурная схема блока «Огибающие сигналов»

- шестой блок «Способ определения угловой ориентации» для имитационного моделирования разработанного способа определения угловой ориентации. На рисунке 2.30 приведена структурная схема блока для имитационного моделирования.

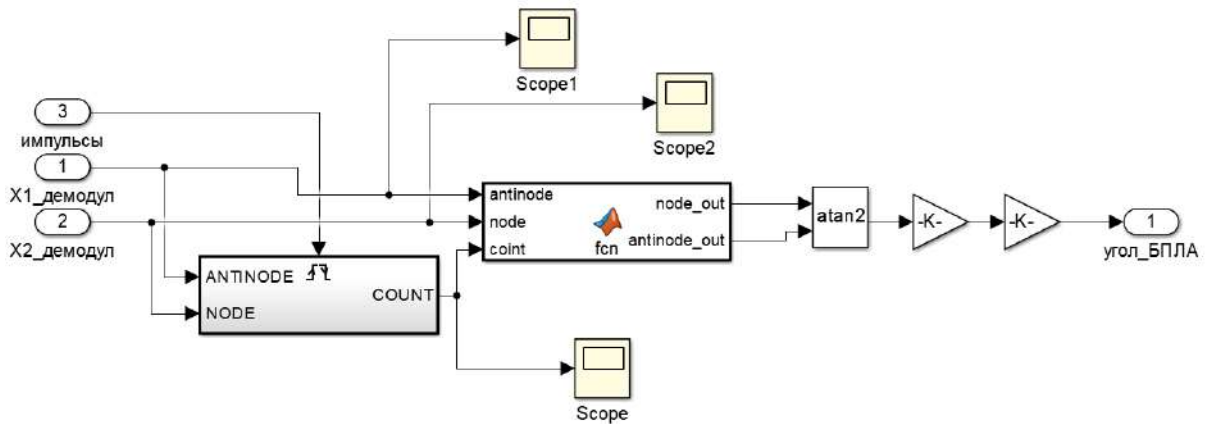


Рисунок 2.30 – Структурная схема блока «Способ определения угловой ориентации»

В данном блоке реализуется разработанный способ определения углового положения, позволяющий функционировать ИИСО БПЛА во всем диапазоне углов. В блоке реализуется выражение (2.32-2.40). На основании данного алгоритма реализована программа для исследования ВТГ, работающего в режиме свободной волны [125].

2.7.1 Методика имитационного моделирования ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» в составе ИИСО БПЛА

Имитационное моделирование осуществляется следующим образом:

1) В начальный момент реализуется работа блоков «Способ возбуждения первичных колебаний» и блока «ВТГ работающий в режиме «свободной волны» тем самым подбираются параметры блока электроники, которые позволят обеспечить минимальное время выхода на режим. Время моделирование не менее 5 с. Наблюдаемый параметр изменение сигнала по x_1

2) Реализуется работа блоков «Способ возбуждения первичных колебаний» и блока «ВТГ работающий в режиме «свободной волны», а также блока «Схемотехнический способ увеличения добротности» и подбираются параметры блока электроники для обеспечения максимального времени функционирования в

режиме «свободной волны». Время моделирование не менее 60 с. Наблюдаемый параметр изменение сигнала по x_1 ;

3) Реализуется работа блоков «Способ возбуждения первичных колебаний» и блока «ВТГ работающий в режиме «свободной волны», а также блока «Схемотехнический способ увеличения добротности», блока «Параметры БПЛА», блока «Огибающие сигналов», блока «Способ определения угловой ориентации». Подбираются параметры для построения огибающей выходного сигнала (демодуляция). Время моделирование не менее 60 с. Наблюдаемый параметр изменение сигнала по x_1, x_2 , демодулированный сигнал по x_1, x_2 , вычисленное угловое положение;

Результатом моделирования являются подобранные параметры для блока электроники обеспечивающего минимальное время готовности ВТГ, максимальное время работы, подобранные параметры для демодуляции выходного сигнала, вычисленное угловое положение БПЛА.

2.7.2 Определение времени работы ВТГ и времени выхода на режим

На рисунке 2.31 приведен вид выходного сигнала измеренного по x_1 определяющий выход на режим ВТГ (достижение заданной амплитуды входного напряжения в 0,2 В).

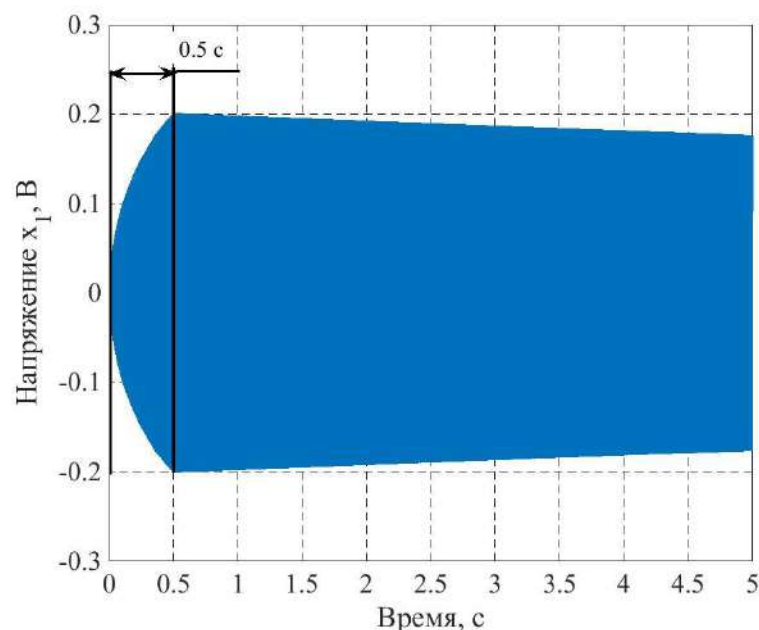


Рисунок 2.31 –Выход на режим ВТГ работающего в режиме свободной волны

Результаты моделирования (рисунок 2.31) показывают, что время выхода на режим осуществляется за $t_p = 0.5$ с. На рисунке 2.32 показан вид выходного сигнала измеренного по x_1 определяющий время работы ВТГ в режиме свободной волны.

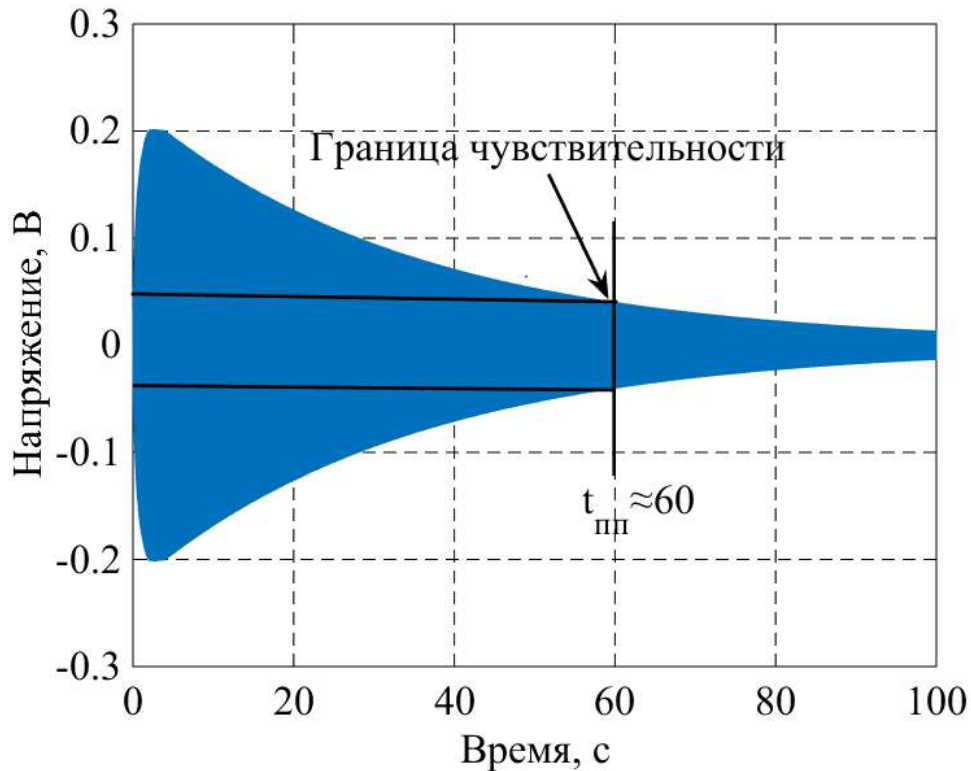


Рисунок 2.32 –Время работы ВТГ работающего в режиме свободной волны

Результаты моделирования (рисунок 2.32) показывают, что на 60 секунде моделирования амплитуда сигнала по x_1 стала меньше амплитуды эффективной работы контура схемотехнического способа увеличения добротности (амплитуду которую можно выделить на фоне шума). Таким образом, можно сделать вывод о достижимом времени функционирования порядка $t_{mn} = 59.5$ секунд (0,5 секунды из времени моделирования занимает разгон резонатора первичными колебаниями).

2.7.3 Исследование работы ВТГ ДУ при действии угловой скорости

На рисунке 2.33 – 2.34 показан вид высокочастотного модулированного сигнала полученного с контрольных точек резонатора x_1, x_2 , и его огибающая полученная после осуществления процедуры демодуляции.

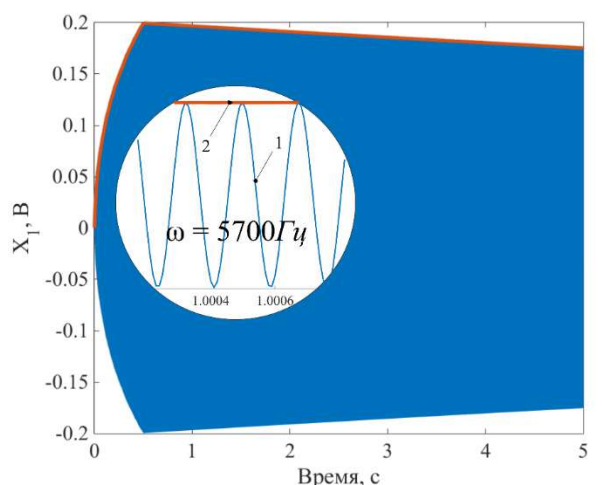


Рисунок 2.33 – Выходной сигнал с координаты x_1 ВТГ: 1) – модулированный колебаниями высокой (несущей) частоты; 2) – огибающая выходного сигнала

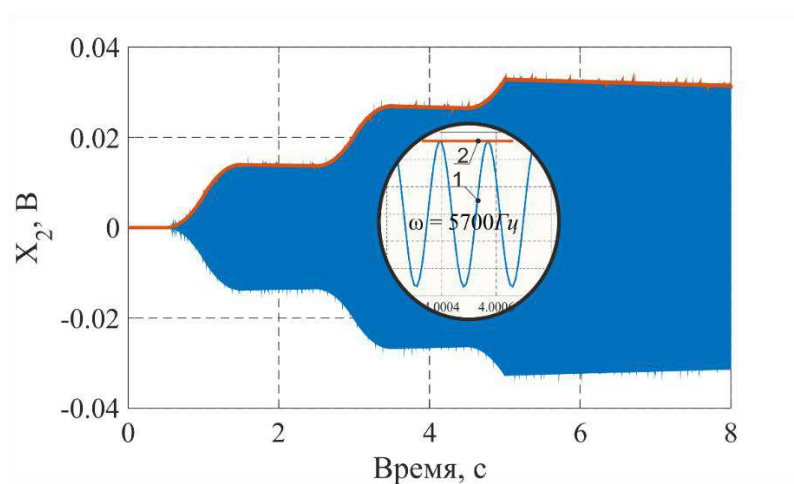
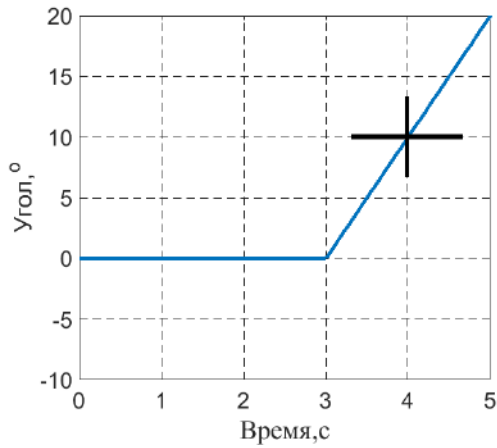


Рисунок 2.34 – Выходной сигнал с координаты x_2 ВТГ при действии угловой скорости: 1) – модулированный колебаниями высокой (несущей) частоты; 2) – огибающая выходного сигнала

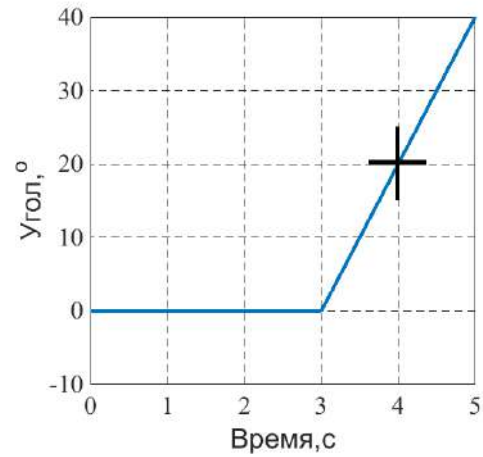
Проведено моделирование ВТГ в режиме «свободной волны» при действии угловой скорости с амплитудами $10^\circ/\text{с}$, $20^\circ/\text{с}$, $30^\circ/\text{с}$, $40^\circ/\text{с}$, $50^\circ/\text{с}$, $60^\circ/\text{с}$. Первые три секунды времени моделирования время, когда основание неподвижно и

происходит возбуждение свободной волны. При моделировании параметры обеих осей идентичны, т.е. имеют одинаковые параметры затухания колебаний в контуре (рис. 2.35).

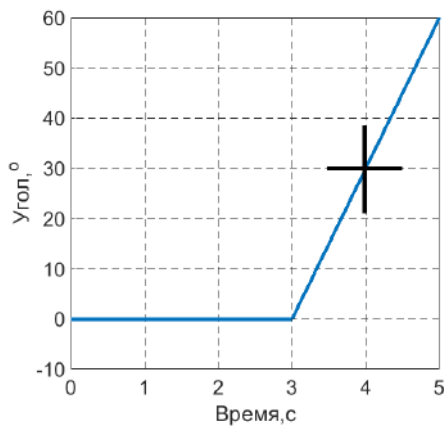
а)



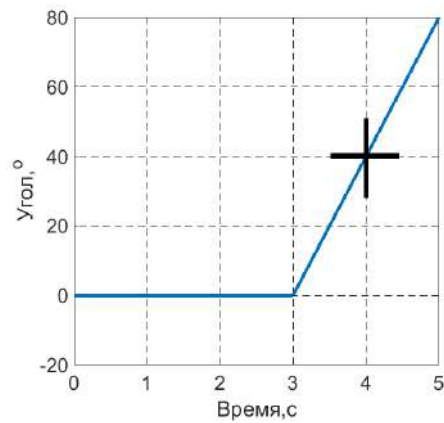
б)



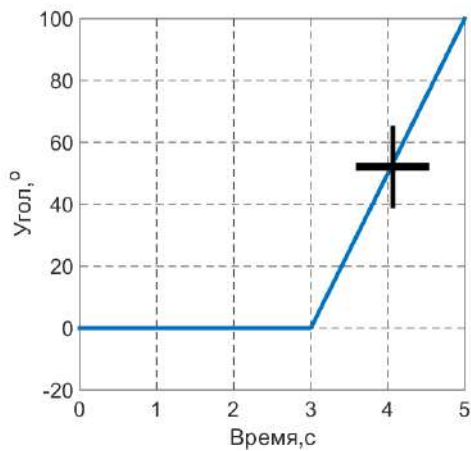
в)



г)



д)



е)

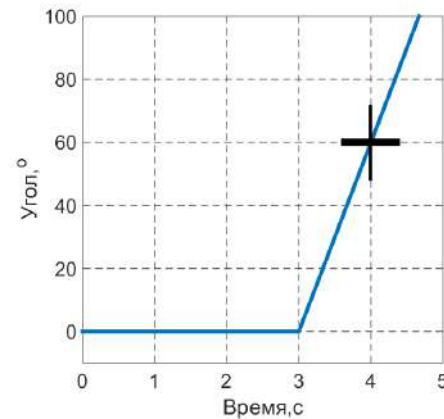


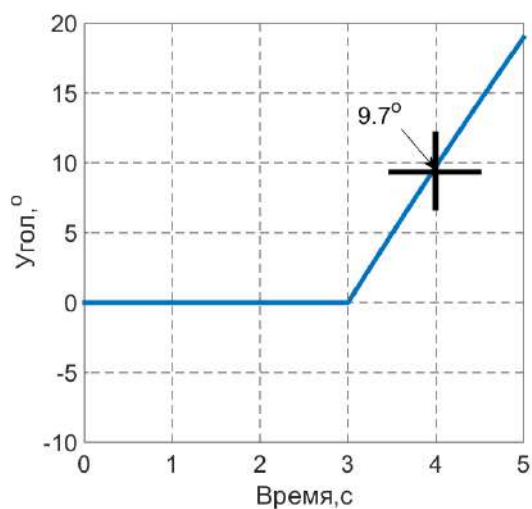
Рисунок 2.35 – Функционирование ВТГ при действии угловой скорости:

а) 10°/с, б) 20 °/с, в) 30 °/с, г) 40 °/с, д) 50 /с, е) 60°/с

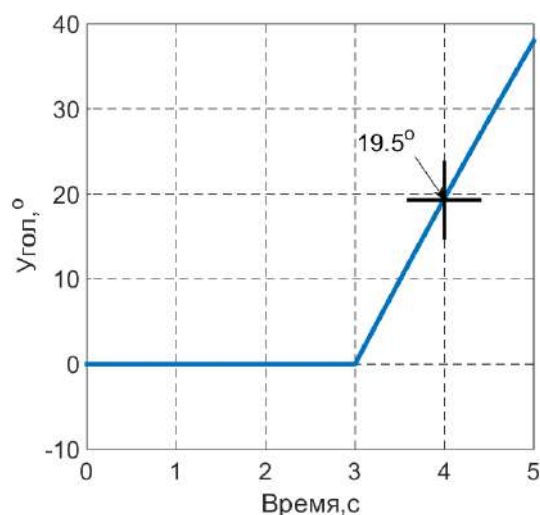
(параметры осей движения идентичны)

Из анализа рисунка 2.35 видно, что при обеспечении идентичных контуров обратных связей вычисление углового положения вычисляется точно, при этом присутствует как повторяемость, так и стабильность измерения. При условии неравенства параметров осей движения резонатора x_1 и x_2 , наблюдается не соответствие заданной и вычисленной координат углового движения. На рис. 2.36 показан измеренный угол при действии угловой скорости с амплитудами $10^\circ/\text{с}$, $20^\circ/\text{с}$, $30^\circ/\text{с}$, $40^\circ/\text{с}$, $50^\circ/\text{с}$, $60^\circ/\text{с}$ при увеличенном коэффициенте на 10% в контуре x_1 , а на рис. 2.47 измеренный угол при той же угловой скорости, но при увеличенном коэффициенте на 10% в контуре x_2 .

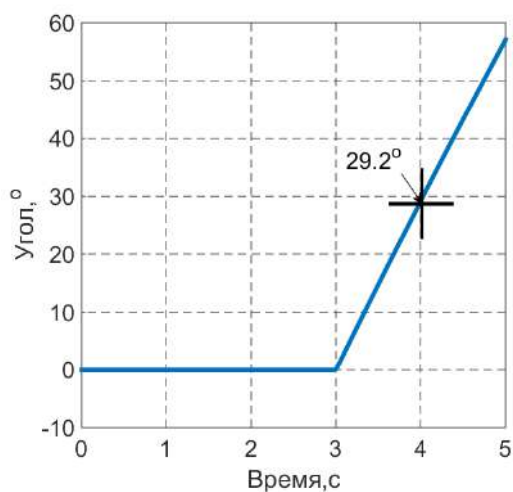
а)



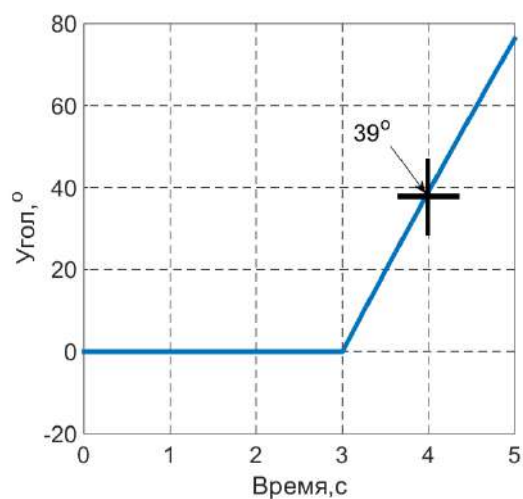
б)



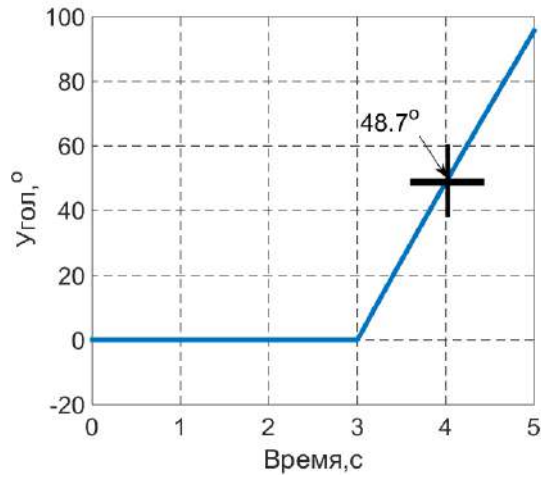
в)



г)



д)



е)

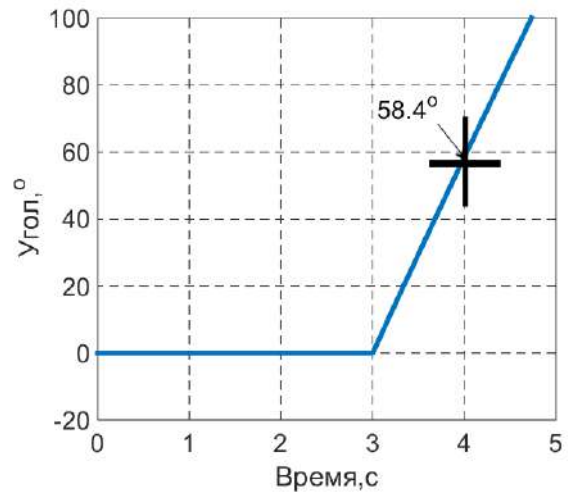
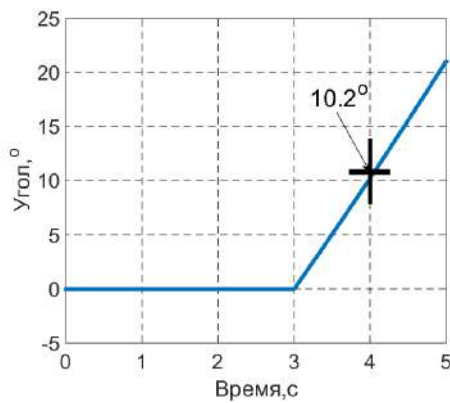


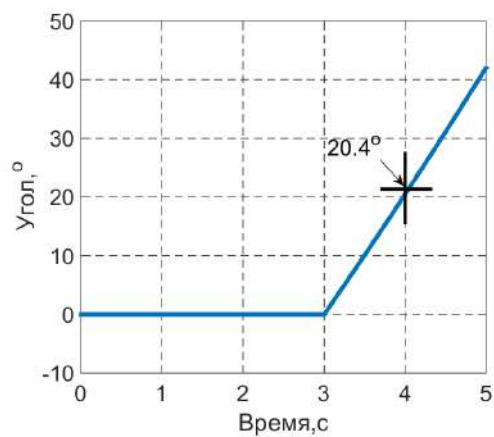
Рисунок 2.36 – Функционирование ВТГ при действии угловой скорости в случае если коэффициент отличается на 10% в контуре x_1 от контура x_2 :

а) 10 °/с, б) 20 °/с, в) 30 °/с, г) 40 °/с, д) 50 °/с, е) 60°/с

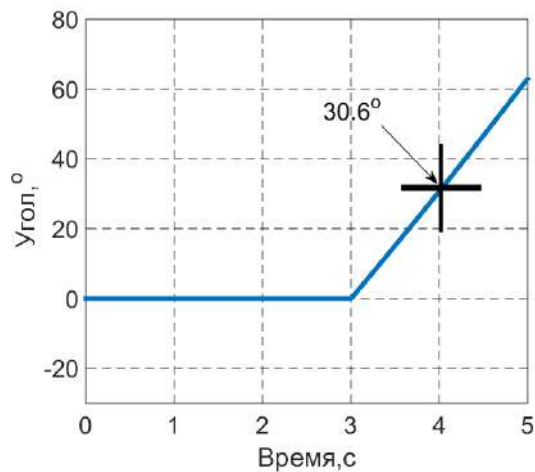
а)



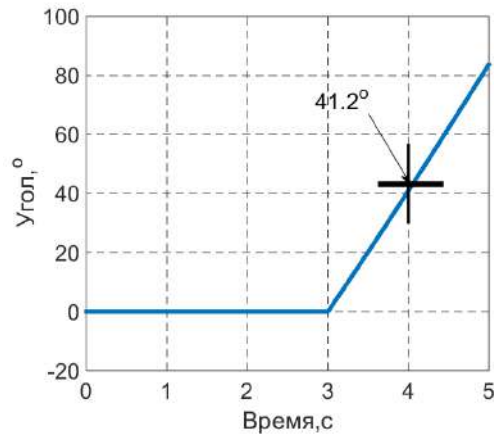
б)



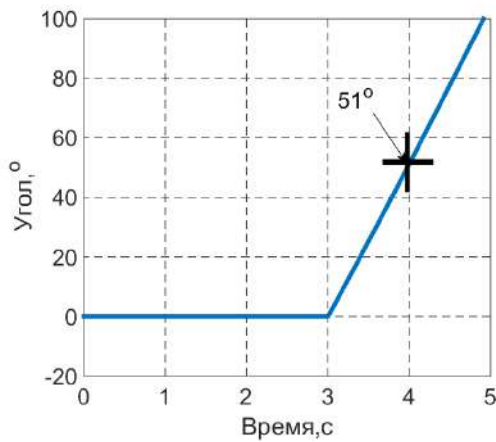
в)



г)



д)



е)

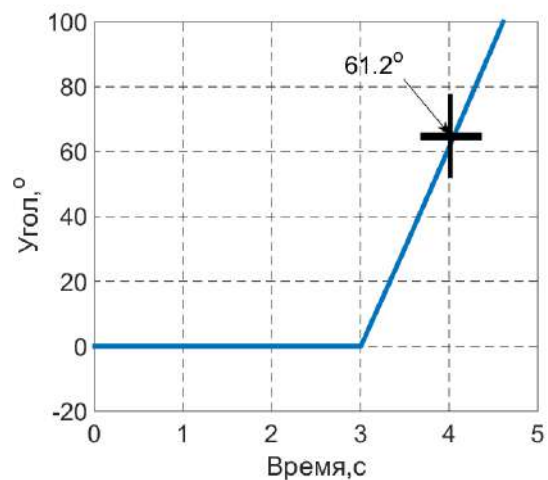


Рисунок 2.37 – Функционирование ВТГ при действии угловой скорости в случае если коэффициент отличается на 10% в контуре x_2 от контура x_1 :

а) 10 °/с, б) 20 °/с, в) 30 °/с, г) 40 °/с, д) 50 °/с, е) 60°/с

Полученные результаты рисунок 2.36-2.37 показывают не соответствие фактического вычисленного угла, углу поворота основания при заданной амплитуде угловой скорости, при этом присутствует нестабильность и отсутствует повторяемость в вычислении. Таким образом, при разработке и исследовании макета обязательно приведение параметров осей движения к единому времени выбега.

2.7.4 Исследование работы ВТГ ДУ при повороте основания

Исследования работы ВТГ при изменении углового положения основания проводилось с целью апробации разработанного способа обработки сигналов, полученных по огибающим первичных и вторичных колебаний с контрольных точек резонатора обеспечивающего работоспособность во всем диапазоне измеряемых углов. На рисунке 2.38 приведены результаты моделирования при возрастающем и нисходящем воздействии от 0° до 360° с шагом 10° и выдержкой на каждом значении 2 с. Данные результаты получены при равенстве параметров контуров обратных связей.

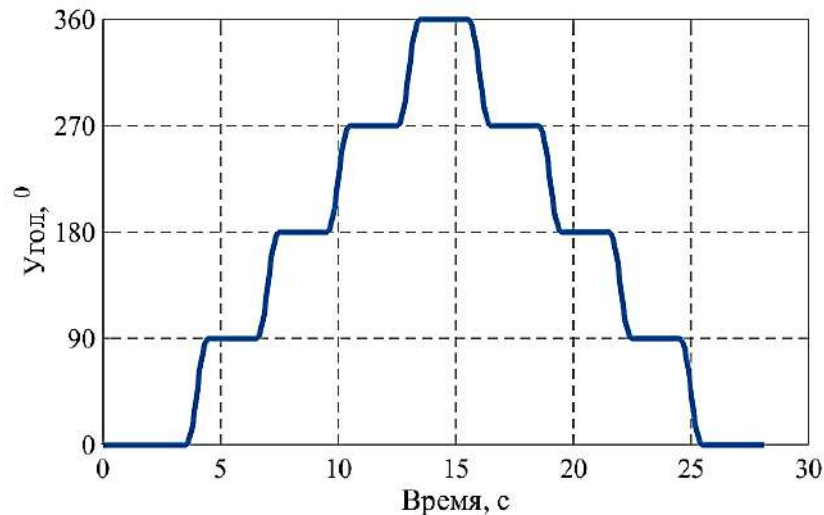


Рисунок 2.38 – Результаты моделирования при повороте основания при равенстве параметров контуров обратных связей

Анализ результатов моделирования, приведенных на рисунке 2.48 подтверждает работоспособность разработанного способа вычисления угла во всем диапазоне заданных углов.

На рисунке 2.39- 2.40 - приведены результаты моделирования при возрастающем и нисходящем воздействии от 0° до 40° с шагом 10° и выдержкой на каждом значении 2 с. При рассогласовании контуров обратных связей на 10%.

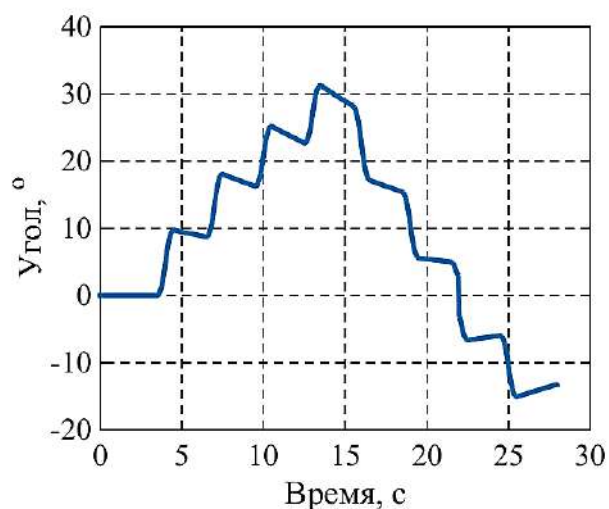


Рисунок 2.39 – Результаты моделирования при повороте основания при рассогласовании параметров контуров обратных связей (x_1 больше на 10%)

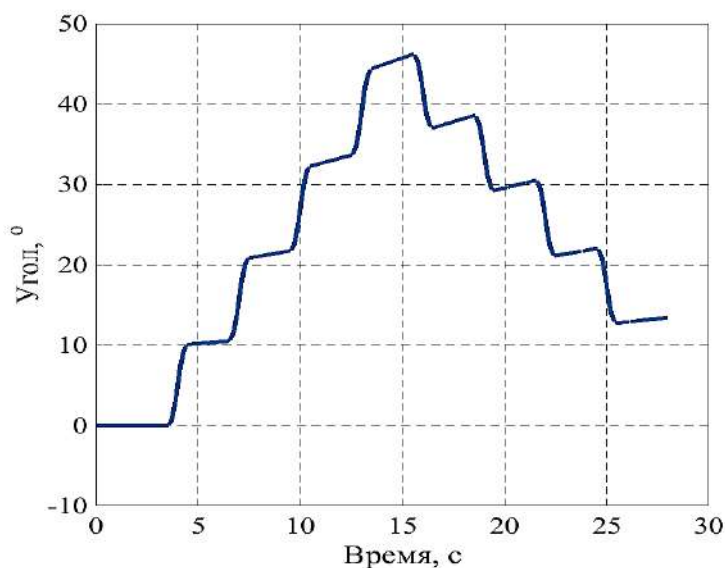


Рисунок 2.40 – Результаты моделирования при повороте основания при рассогласовании параметров контуров обратных связей (x_2 больше на 10%)

Анализ приведенных результатов рисунок 2.39- 2.40 говорит об необходимости обеспечения идентичных контуров управления.

2.8 Выводы

Анализируя результаты данной главы, можно сделать следующие выводы:

1) Работу ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» можно рассматривать, как обобщенный маятник Фуко. Однако необходимо учитывать, что колебаний кромки резонатора оси x_2 располагается под углом 45° к оси x_1 (а не под углом 90° , как у маятника Фуко), а так же необходимо учитывать коэффициент Брайана для правильной интерпретации углового положения.

2) Для обеспечения времени функционирования ВТГ в режиме «свободной волны» более 20 с, что в свою очередь позволить реализовать с таким же временем работы датчик угла для ИИСО БПЛА необходимо обеспечить добротность более 95 000, что невозможно за счет конструкции в низкодобротных объемных резонаторах ВТГ из элинварных металлических сплавов.

3) Разработанный схемотехнический способ увеличения добротности позволяет повысить эффективность ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» за счет компенсации диссипации энергии тем самым, увеличивается, времена работы до 20 раз по сравнению с существующими решениями. Данный способ реализуется в блоке электроники ВТГ.

4) Разработанный способ возбуждения первичных колебаний, позволяет повысить эффективность ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» в составе ИИСО БПЛА, за счет реализации автоколебательного способа тем самым сокращается время выхода ВТГ на режим не менее чем в 7 раз по сравнению с существующими решениями.

5) Разработанный способ обработки сигналов, полученных по огибающим первичных и вторичных колебаний с контрольных точек резонатора, позволяет повысить эффективность ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» в составе ИИСО БПЛА, за счёт обеспечения работоспособности во всем диапазоне измеряемых углов.

6) Разработанные математическая и имитационная модели ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» в составе ИИСО БПЛА, отличаются учетом контура возбуждения первичных колебаний резонатора ВТГ в автоколебательном режиме, учетом процессов компенсации диссипации энергии в резонаторе ВТГ, а также возможностью функционирования ИИСО во всем диапазоне измеряемых углов.

7) Работоспособность предложенных способов подтверждена результатами имитационного моделирования.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ РАБОТА НА МАКЕТНОМ ОБРАЗЦЕ ВТГ ДЛЯ ИИСО БПЛА

В настоящей главе представлен созданный макетный образец ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающий в режиме «свободной волны» в котором отражены заявленные способы повышения его эффективности для применения в ИИСО БПЛА. Описана установка для исследования характеристик разработанного ВТГ для ИИСО БПЛА. Разработанное программное обеспечение экспериментальной установки и предложенная методика экспериментальных исследований. Приведены и проанализированы результаты работы макета ВТГ в нормальных климатических условиях на высокоточном стенде. Практически подтверждена работоспособность заявленных способов повышения эффективности ВТГ работающего в режиме «свободной волны»

Целью исследований ВТГ для ИИСО БПЛА является подтверждение работоспособности разработанных способов (см. глава 2) сопоставление результатом проведенного математического описания и имитационного моделирования с экспериментальными результатами.

В ходе подготовки к экспериментальному исследованию ВТГ для ИИСО БПЛА решались следующие задачи: разработка и создание макета блока электроники для ВТГ, разработка методики экспериментальных исследований, обработки полученных данных, анализа полученных результатов; создание комплексной программы, обеспечивающей работу макета ВТГ, проведения экспериментальных исследований, а также анализ полученных в ходе исследований результатов.

3.1 Разработка макетного образца ВТГ для ИИСО БПЛА

Аппаратная реализация схемотехнического способа увеличения добротности ВТГ может быть осуществлена следующим образом (рисунок. 3.1), данный способ запатентован [121].

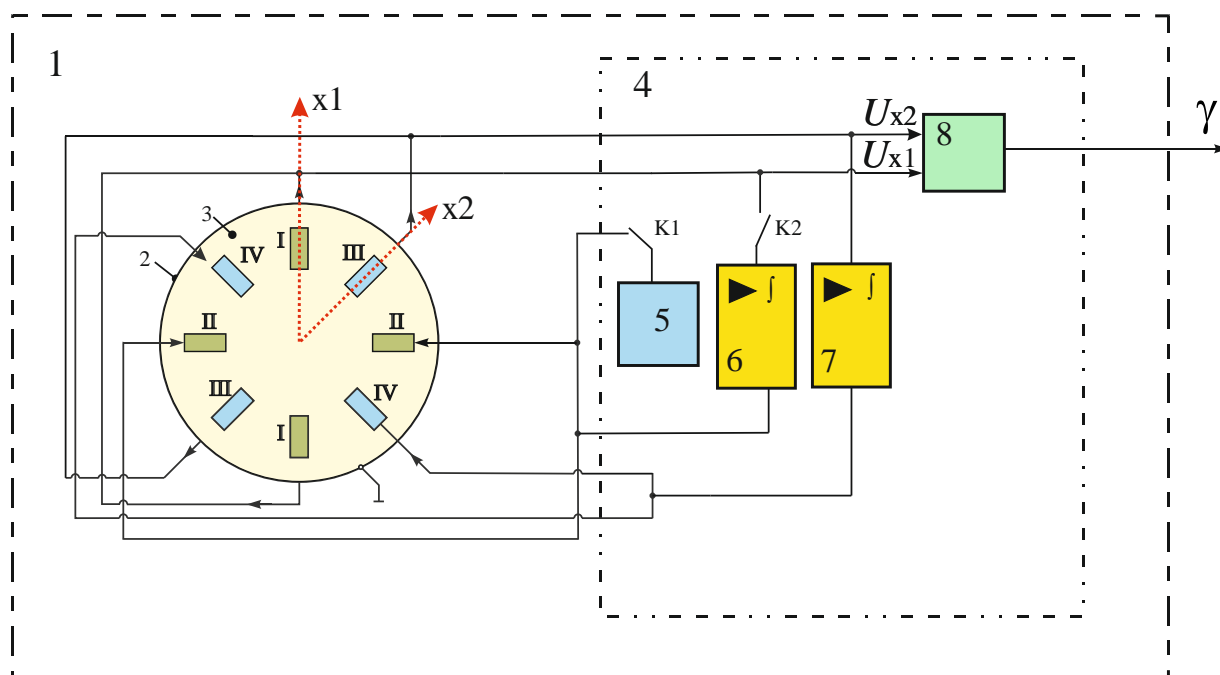


Рисунок 3.1 – Структурная схема реализации схмотехнического способа увеличения добротности ВТГ с низкодобротным объемным резонатором работающего в режиме «свободной волны» в ИИСО

1- ВТГ с низкодобротным объемным резонатором для ИИСО; 2- низкодобротный объемный резонатор; 3 – дно резонатора; 4 – блок электроники; 5 - генератора синусоидальных сигналов; 6,7 – блок компенсации диссипации энергии; 8 – демодулятор

Работа при этом ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» при реализации схмотехнического способа увеличения добротности, осуществляется следующим образом. В начальный момент времени блок электроники 3, входящий в состав ВТГ с низкодобротным объемным резонатором для ИИСО 1, подаёт управляющий сигнал на ключ К1, который замыкается, и с генератора синусоидальных сигналов 4 на диаметрально противоположные пьезоэлементы I-I подаётся сигнал в виде синусоидального напряжения, где A - амплитуда, ω – частота подачи переменного сигнала, равная (или близкая) к собственной частоте основной формы колебаний резонатора. Вследствие изгибных деформаций дна 3 резонатора ВТГ 2 возникает изгибающий момент, который вызывает эллиптические деформации на второй

форме колебаний, в результате чего возбуждается стоячая волна с четырьмя областями, ориентированными вдоль пары пьезоэлементов I-I и II-II и четырьмя областями, расположенными вдоль пары пьезоэлементов III-III и IV-IV. После выхода на режим (реализованного за счет схемы управления первичными колебаниями) ключ K1 размыкается, а ключ K2 замыкается. Тем самым реализуется схемотехнический способ увеличения добротности, при этом сигнал с пары пьезоэлементов I-I поступает на интегрирующий усилитель 6, расположенный в первом контуре и далее поступает на пару пьезоэлементов II-II. Аналогично сигнал с пары пьезоэлементов III-III поступает на интегрирующий усилитель 7, расположенный во втором контуре и далее поступает на пару пьезоэлементов IV-IV. После замыкания ключа K2 ВТГ 1 приходит в рабочее состояние (режим «свободной волны»), и при вращении колеблющегося резонатора ВТГ 2 вокруг его оси симметрии, обусловленного поворотом на угол БПЛА, с постоянной угловой скоростью возникают кориолисовы силы инерции, привязанные к запаздыванию стоячей волны. Полученный сигнал с первого контура и второго контура, сдвинутый по фазе на минус 90 градусов поступает в демодулятор 8, где осуществляется демодуляция сигналов и вычисление угла в ИИСО на основе соотношения (2.13)

Интегрирующий усилитель может быть реализован на операционном усилителе по схеме (рисунок 3.2).

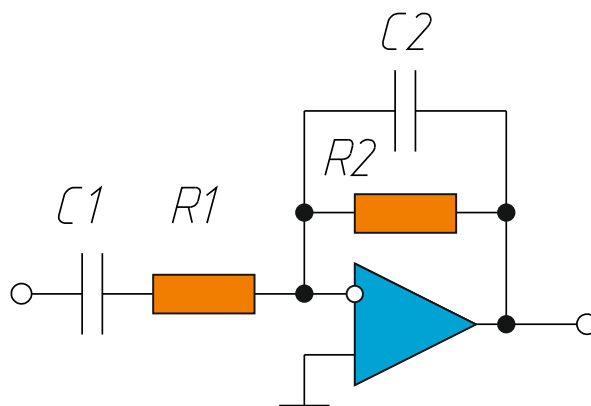


Рисунок 3.2 – Схема интегрирующего усилителя

Интегрирующий усилитель по схеме на рисунке 3.2 описывается передаточной функцией вида

$$W_{oc}(p) = \frac{Kp}{(T_1p+1)(T_2p+1)}. \quad (2.21)$$

где $T_1 = R_1C_1$, $T_2 = R_2C_2$ – постоянные времени, $K = R_2C_1$ – коэффициент усиления. В ходе расчета для резонатора имеющего собственную частоту $\omega_0 \approx 5700 \text{ Гц}$ для передаточной функции были подобраны следующие коэффициенты $R_1 = 1 \text{ кОм}$, $R_2 = 470 \text{ кОм}$, $C_1 = 0,2 \text{ мкФ}$, $C_2 = 3,33 \text{ нФ}$, тогда постоянные времени примут следующие значения $T_1 = 0,1 \text{ мс}$, $T_2 = 1,6 \text{ мс}$.

На рисунках 3.3-3.4 приведены амплитудная и фазовая частотные характеристики для подобранных коэффициентов интегрирующего усилителя.

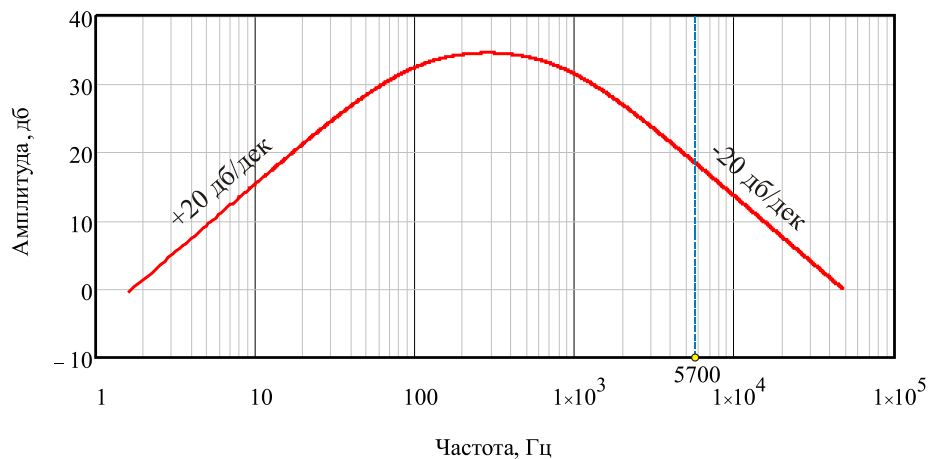


Рисунок 3.3 – Амплитудная частотная характеристика

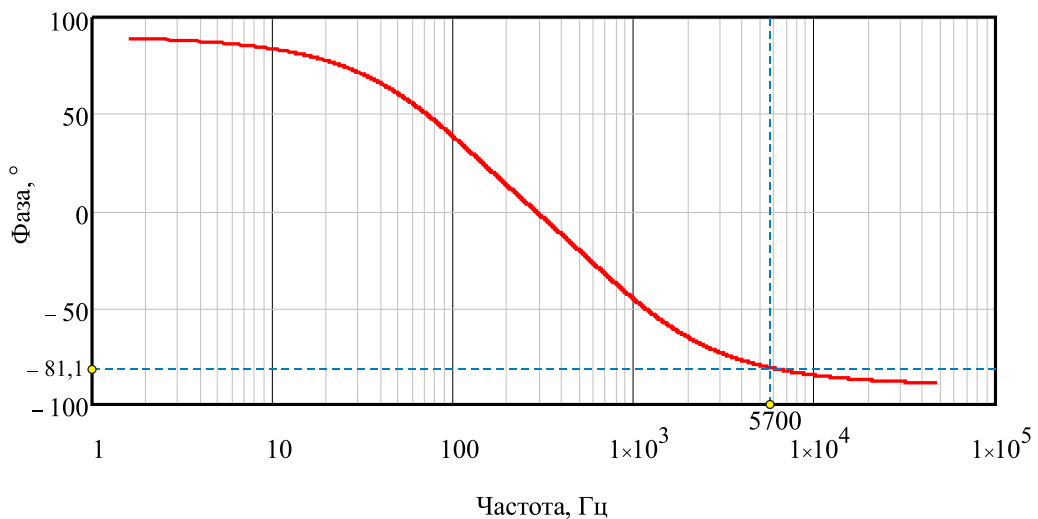


Рисунок 3.4 – Фазовая частотная характеристика

Из анализа рисунка 3.3 следует, что собственная частота резонатора лежит на спаде амплитудной частотной характеристики с наклоном -20 дБ/дек, что соответствует интегрирующему звену, которое реализует в уравнении (2.21).

Аппаратная реализация автоколебательного способа ВТГ показана на рисунке 3.5 реализованная в соответствии с уравнением (2) [4].

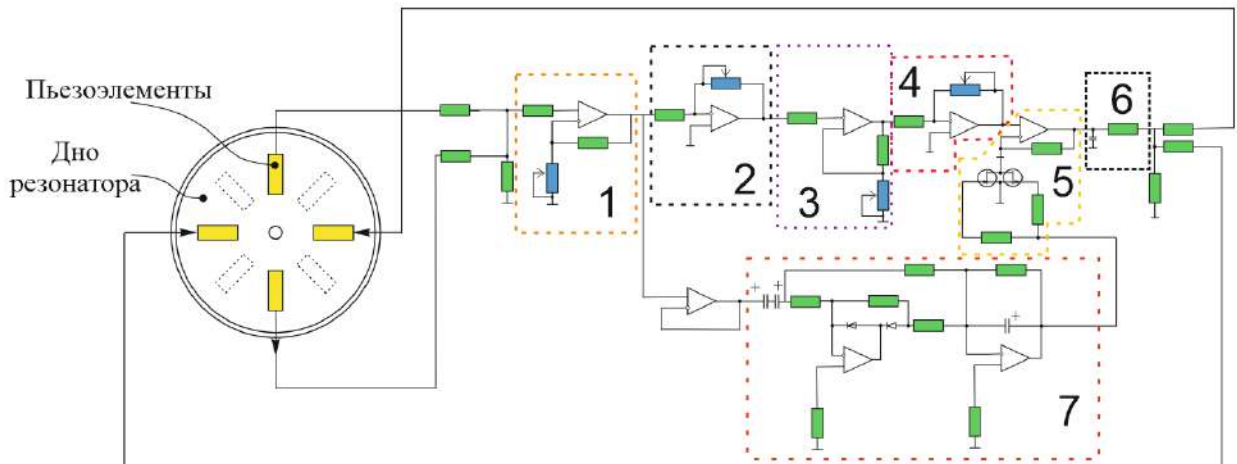


Рисунок 3.5 – Аппаратная реализация автоколебательного способа раскачки первичных колебаний: 1 – входной каскад усилителей; 2 – усилитель канала раскачки; 3 – релейный элемент с зоной неоднозначности; 4 – усилитель с $k < 1$; 5 – усилитель с переменным коэффициентом усиления; 6 – фильтр нижних частот; 7 – выпрямитель и фильтр

Пьезоэлементы, показанные пунктирной линией, используются для съема информации об угловой скорости основания и в данной работе не рассматриваются. На рисунке показана реализация данного способа на аналоговых элементах с применением операционных усилителей.

Постоянная составляющая в цепи обратной связи устраняется низкочастотной частью фильтра.

Для подтверждения работоспособности заявленных способов была разработана 3D модель макетного образца печатной платы с размещенной элементной базой (рисунок 3.6).

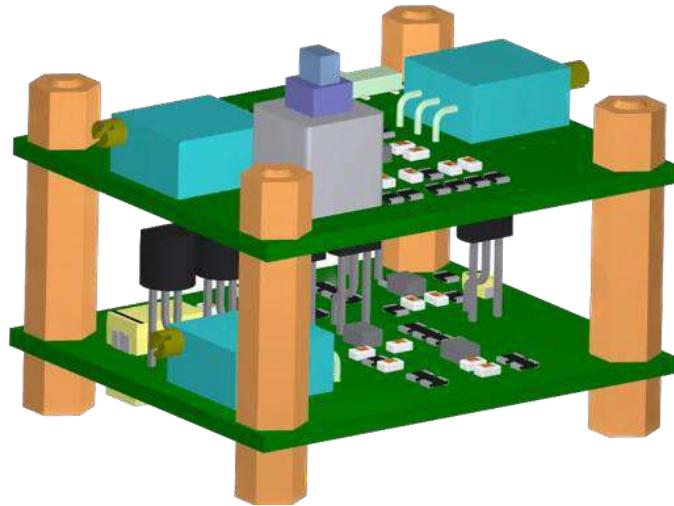


Рисунок 3.6 – 3D модель разработанной печатной платы с размещенной элементной базой

На последующем этапе осуществлялся процесс монтажа элементной базы и коммутация с чувствительным элементов, ВТГ с металлическим цилиндрическим резонатором диаметром 22 мм разработанного на кафедре «Приборы управления» Тульского государственного университета г. Тула совместно с АО Мичуринским заводом «Прогресс» (рисунок 3.7).

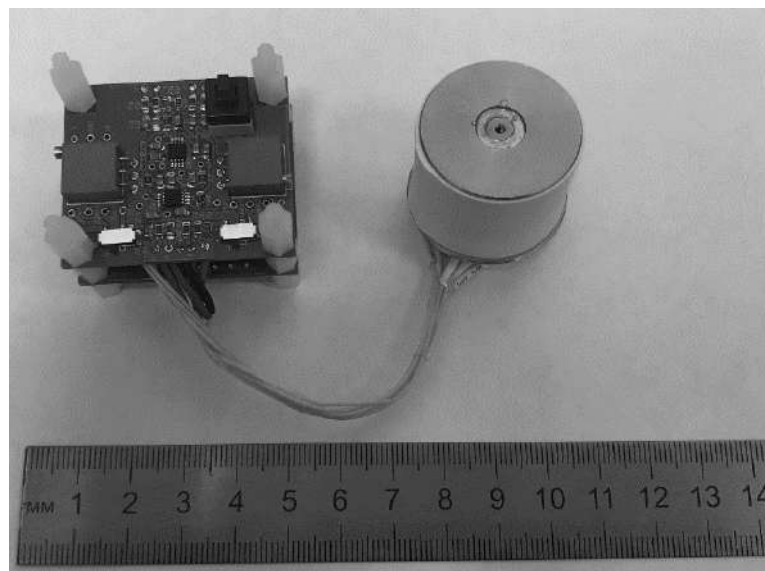


Рисунок 3.7 – Макетный образец ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» для ИИСО БПЛА

Как видно из рисунка 3.7 макетный образец имеет достаточно компактные габариты.

3.2 Экспериментальная установка для исследования ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» для ИИСО БПЛА

Блок схема экспериментальной установки для исследования ВТГ для ИИСО БПЛА представлена на рисунке 3.8

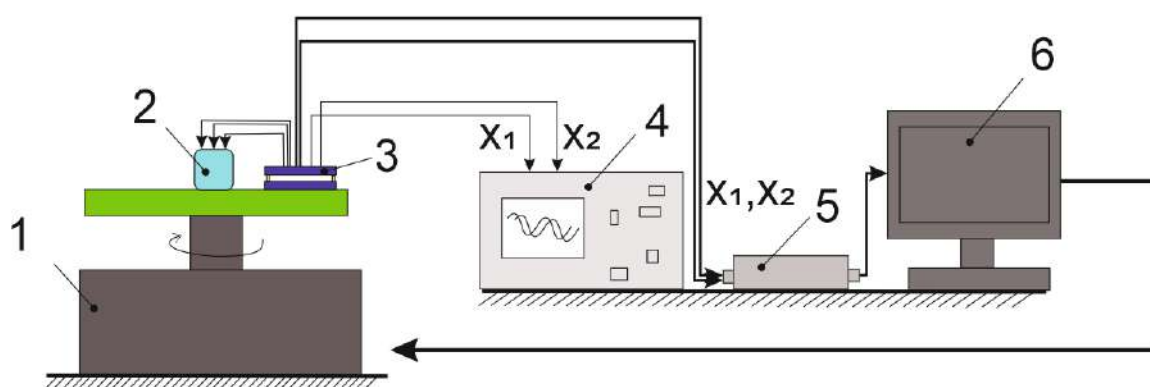


Рисунок 3.8 – Экспериментальной установки для исследования ВТГ для ИИСО БПЛА: 1 – поворотный стенд; 2 ВТГ; 3 – блок электроники; 4 – цифровой осциллограф с возможностью записи на USB носитель; 5 – двухканальный цифровой USB осциллограф с возможностью записи сигнала на ПК; 6 – ПК со специализированным программным обеспечением

В качестве поворотного стенда использовался одноосевой имитатор движения Acuitas AG TES-3V TM рис. 3.8. Под управлением персонального компьютера (ПК) установочный стол стенда Acuitas AG TES-3V TM с жестко зафиксированным исследуемым макетным образцом ВТГ способен поворачиваться вокруг вертикальной оси по запрограммированному алгоритму. При этом как измерение, так и обработка заданного движения осуществляется с очень высокой степенью точности, Основные технические характеристики одноосевого имитатора движения Acuitas AG TES-3V TM приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 Характеристики Acuitas AG TES-3V TM

Параметр	Значение
Угловое разрешение	<0,04 угл. сек
Точность измерения угла	< 4 угл. сек
Точность воспроизведения угла	<2 угл. сек
Диапазон скоростей	± 1500 град/с
Разрешение по скорости	< 1 угл. сек/сек
Точность поддержания скорости при осреднении за один оборот	0,001%
Максимальное угловое ускорение	До 10 000 град/сек ²

На рисунке 3.9 приведен внешний вид экспериментальной установки для исследований макетного образца ВТГ на столе одноосевого имитатора движения Acuitas AG TES-3V TM



Рисунок 3.9 - Одноосевой имитатор движения Acuitas AG TES-3V TM

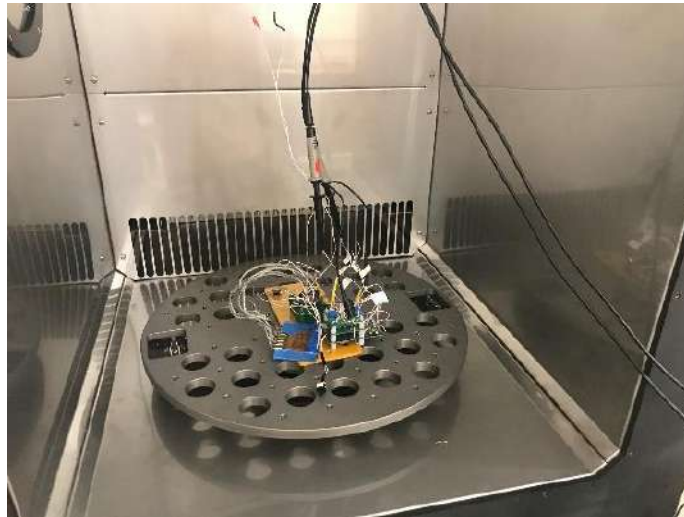


Рисунок 3.9 – Макетный образец ВТГ с блоком электроники, закрепленный на плите одноосевого имитатора движения *Acuitas AG TES-3V TM*

Сигналы для анализа получаемые с контрольных точек резонатора ВТГ x_1, x_2 поступают на цифровой осциллограф, на котором в процессе реального времени есть возможность наблюдать за сигналами или осуществить запись временного отрезка на USB носитель, также есть возможность с помощью портативного осциллографа записывать в реальном времени сигнал на ПК для последующего анализа.

3.3 Программное обеспечение для исследований ВТГ для ИИСО БПЛА

Для проведения экспериментальных исследований макета ВТГ для ИИСО БПЛА использовалось стандартное программное обеспечения одноосевого имитатора движения *Acuitas AG TES-3V TM*, а также разработанное программное обеспечение в средах *Mathcad* и *Matlab*. Текстовые файлы данных переданные на ПК по средствам *USB* носителя или непосредственно через *USB* интерфейс подгружались в *Mathcad*, в котором было разработано специальное программное обеспечение для обработки и анализа полученных данных. Файлы большого объема данных подгружались в *Matlab*, где также было разработано специальное программное обеспечение позволяющее обрабатывать большой объем данных, производить демодуляцию выходного сигнала и последующую обработку контрольных точек резонатора, и вычислять угловое положение. Разработанные программы позволяют сопоставлять результаты имитационного моделирования с

результатами экспериментальных исследований, а также имеют возможность визуализации полученных результатов в виде графиков и их сохранение в файл в виде текстовых значений

3.4 Методика и условия экспериментальных исследований

Исследование свойств и характеристик макета ВТГ для ИИСО БПЛА производилось следующим образом. В начале проводились предварительные работы по настройке макета ВТГ для ИИСО БПЛА настройка контура обратных связей в реализованном схмотехническом способе увеличения добротности (для обеспечения максимального времени функционирования) настройка автоколебательного контура возбуждения первичных колебаний (для обеспечения минимального времени выхода на режим). Для того чтобы осуществить правильно настройку контуров обратных связей определялась собственная частота резонатора. Далее установочный стол станда *Acuitas AG TES-3V TM* с жестко зафиксированным исследуемым макетным образцом ВТГ приводился в нейтральное положение, когда исходный угол поворота его стола вокруг вертикальной оси считается равным нулю.

На первом этапе определялась собственная частота второй формы колебаний стоячей волны, путем подачи на пьезоэлементы возбуждения гармонического сигнала с генератора (рисунок 3.10).

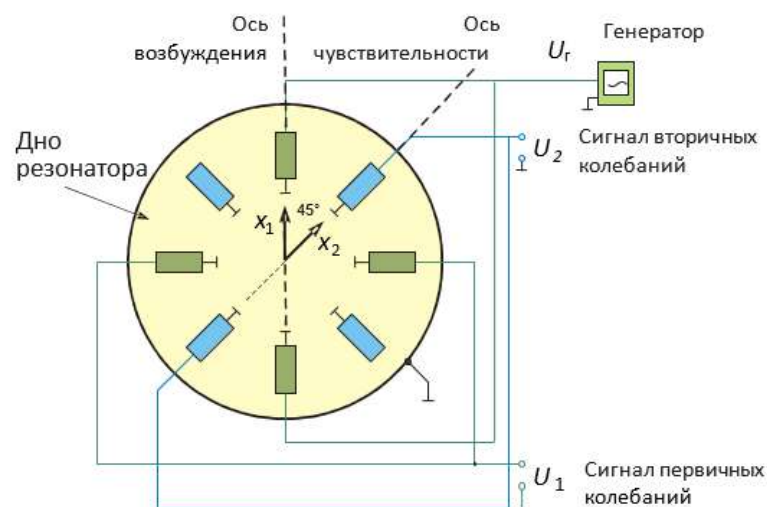


Рис. 3.10. Схема для экспериментального определения собственной частоты резонатора необходимой для подбора элементной базы

С пары пьезоэлементов, ориентированных под углом 90° к оси возбуждения, снимался сигнал, несущий информацию о первичных колебаниях резонатора (отклик резонатора на возбуждение с генератора). Изменяя частоту колебаний сигнала генератора, добиваются, чтобы фазовое запаздывание сигнала первичных колебаний составило минус 90° по отношению к сигналу генератора. При достижении такого фазового запаздывания ЧЭ находится в резонансе, и частота сигнала генератора соответственно совпадает с собственной частотой резонатора. Полученное значения является собственной частотой второй формы колебаний резонатора ω_0 . Далее определяется постоянная времени резонатора и оценивается его добротность по полученным графикам затухающих колебаний ВТГ.

На последующем этапе реализуются работа разработанного блока электроники ВТГ с реализованным контуром схемотехнического способа увеличения добротности резонатора и автоколебательного контура возбуждения первичных колебаний с подобранной элементной базой для определенной собственной частоты резонатора. На осциллографе анализируются графики полученные с координаты x_1 и производится подстройка контура схемотехнического увеличения добротности ВТГ для обеспечения максимального времени затухающих колебаний. После настройки контура, график затухающих колебаний записывается на USB носитель для последующей обработки и анализа в программе *Mathcad* где реализован соответствующий алгоритм, позволяющий построить огибающую затухающих колебаний и определить постоянную времени и оценить полученную добротность. Аналогично проходит настройка автоколебательного способа возбуждения первичных колебаний только анализируются графики процесса возбуждения колебаний по координате x_1 последующая процедура обработки производится также в среде *Mathcad*.

После настройки контуров обратных связей проводится исследование по оценке работоспособности разработанного способа обработки сигналов, полученных по огибающим первичных и вторичных колебаний с контрольных

точек резонатора ВТГ, обеспечивающего работоспособности во всем диапазоне измеряемых углов следующим образом:

- после возбуждения свободной волны в ВТГ и выхода его на режим, анализируются сигнал в координатах x_1, x_2 описывающие фигуру Лиссажу по средствам осциллографа и записываются данные со второго осциллографа непосредственно на ПК в файл для последующего анализа в программе *Matlab* - затем с помощью специализированного программного обеспечения стенда *Acuitas AG TES-3V TM* реализуется программа испытаний в соответствии с таблицей 3.2 .

Таблица 3.2 Программа испытаний

Шаг стенда,	Время выдержки на каждом шаге ,	Файл записи
0°	10с	<i>Step_0_360.csv</i>
10°		
20°		
30°		
40°		
-30°		
-20°		
-10°		
0°		

- после завершения испытаний в программу *Matlab* подгружается файл (*Step_0_360.csv*) и производится процедура его обработки, результатом выполнения программы является графическое отображения вычисленного угла.

Исследование ВТГ работающего в режиме «свободной волны с помощью фигур Лиссажу осуществляется следующим образом:

- при возбуждается свободная волна в ВТГ и после выхода его на режим, анализируются сигнал в координатах x_1, x_2 описывающие фигуру Лиссажу по средствам осциллографа и записываются в файл для последующего анализа в *Mathcad*. Запись сигналов осуществляется в следующей последовательности:

- первый файл запись после выхода на режим (соответствующая нулевому положению имитатора одноосного станда *Acuitas AG TES-3V TM* с установленным ВТГ);

- последующие файлы записываются после поворота имитатора одноосного станда *Acuitas AG TES-3V TM* в соответствии с программой, представленной в таблице 3.3.

Таблица 3.3 Программа испытаний

Шаг станда	Первый записанный файл	Последующий записанный файл
0°	<i>StaticStep_0.csv</i>	<i>Step_0.csv</i>
10°	<i>StaticStep_10.csv</i>	<i>Step_10.csv</i>
20°	<i>StaticStep_20.csv</i>	<i>Step_20.csv</i>
30°	<i>StaticStep_30.csv</i>	<i>Step_30.csv</i>
40°	<i>StaticStep_40.csv</i>	<i>Step_40.csv</i>
50°	<i>StaticStep_50.csv</i>	<i>Step_50.csv</i>
60°	<i>StaticStep_60.csv</i>	<i>Step_60.csv</i>
70°	<i>StaticStep_70.csv</i>	<i>Step_70.csv</i>
80°	<i>StaticStep_80.csv</i>	<i>Step_80.csv</i>
90°	<i>StaticStep_90.csv</i>	<i>Step_90.csv</i>

То есть в соответствии с данной программой запись проводится следующим образом в начальный момент времени после возбуждения ВТГ записывается файл, соответствующий нулевому положению на неподвижном основании затем станд, делает шаг поворота в соответствии с таблицей 3.3 после этого записывается следующий файл, соответствующий шагу, заданному на станде. После этого вся итерация повторяется (возбуждение резонатора ВТГ запись нулевого положения, запись заданного шага). Полученные результаты подгружаются в Mathcad для анализа углового положения.

3.5 Результаты экспериментальных исследований макета ВТГ для ИИСО БПЛА

Для исследуемого макетного образца была определена собственная частота второй формы колебаний стоячей волны, путем подачи на пьезоэлементы возбуждения гармонического сигнала с генератора амплитудой 0,5 В, вид выходного сигнала представлен на рисунке 3.11

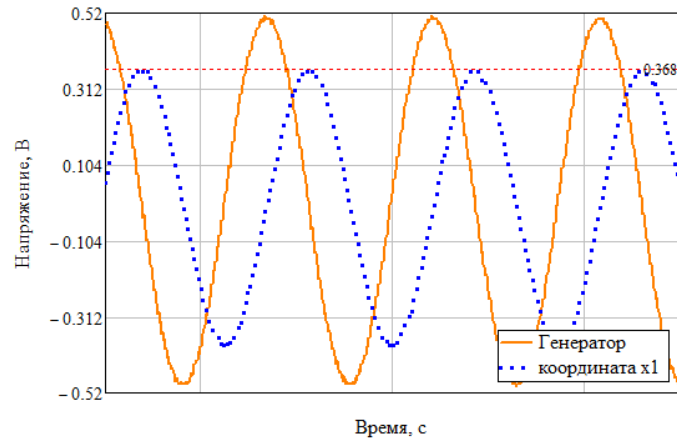


Рисунок 3.11 – Вид выходного сигнала с генератора и получаемый с координаты x_1

Амплитуда сигнала по координате x_1 в резонансе составила 0,368 В. На рисунке 3.12 показан график возбуждения колебаний по координате x_1 с помощью генератора и построенная огибающая сигнала в Mathcad.

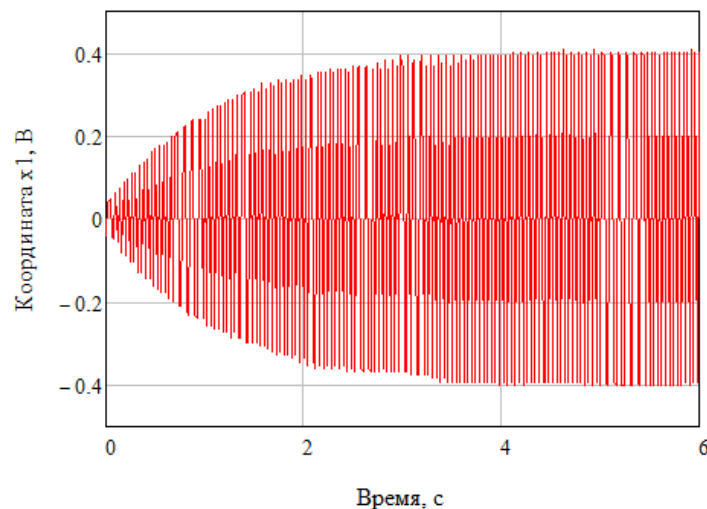


Рисунок 3.12 – График возбуждения колебаний по координате x_1 с помощью генератора

Из анализа графика рисунка 3.12 видно, что время выхода на режим при использовании генератора составляет 3.5 с. Из эксперимента собственная частота колебаний в резонансном режиме составила ($\omega_0 = 5700$ Гц) . На рисунке 3.13 показан сигнал затухающих колебаний по координате x_1 и его огибающая построенная в соответствии с формулой (2.14), которая составила значение $T \approx 1$.

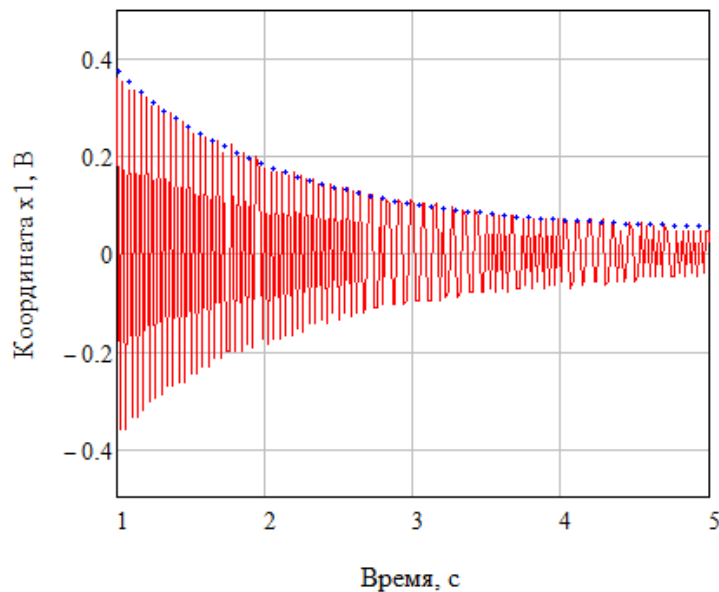


Рисунок 3.13 – Сигнал затухающих колебаний по координате x_1 и его огибающая

В соответствии с формулой (2.15) была определена добротность резонатора без учета разработанного схемотехнического способа увеличения добротности. Для вычисления параметров $\omega_0 = 5700$ Гц и постоянной времени $T \approx 1$ значение добротности составило $Q \approx 18000$. После определения собственной частоты резонатора ω_0 была выполнена настройка блока электроники реализующего схемотехнический способ увеличения добротности и автоколебательный способ возбуждения первичных колебаний. На рисунке 3.14 приведена осциллограмма возбуждения колебаний по координате x_1 получаемая с макетного образца ВТГ для ИИСО БПЛА с помощью разработанного автоколебательного способа возбуждения первичных колебаний.

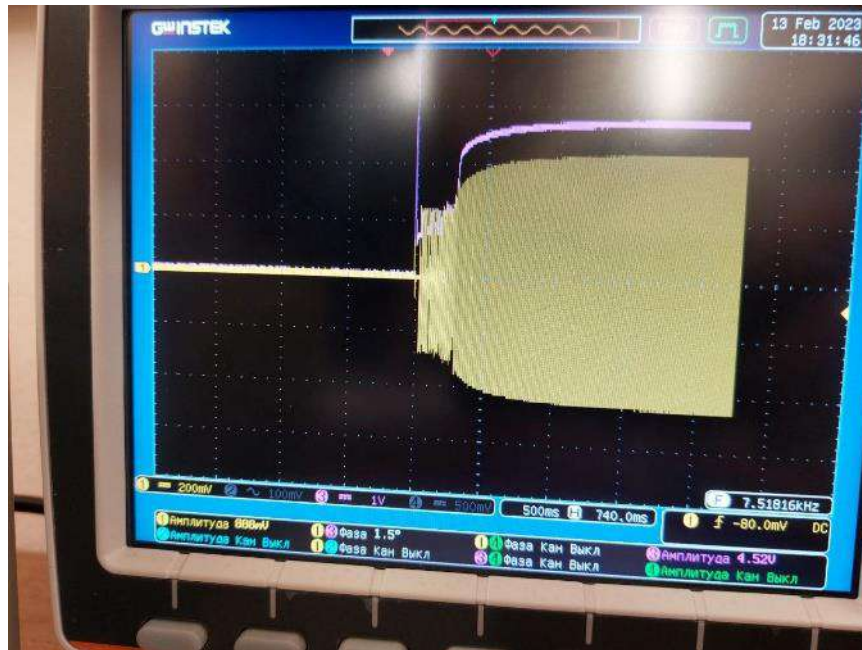
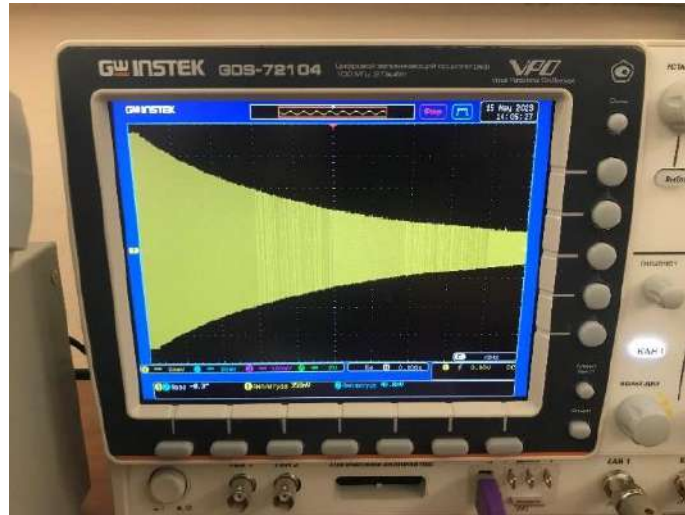


Рисунок 3.14 – Осциллограмма возбуждения колебаний по координате x_1 получаемая с макетного образца ВТГ для ИИСО БПЛА с помощью разработанного автоколебательного способа возбуждения первичных колебаний при $K=500$.

Анализ графиков на рисунок 3.14 позволяет сделать вывод о работаспособности разработанного автоколебательного способа возбуждения при котором удалость достигнуть время выхода на режим за 0.5 с (шаг клетки на рисунке 3.14 равен 0.5 с).

На рисунке 3.15 приведена осциллограмма затухающих колебаний по координате x_1 на неподвижном основании получаемая с макетного образца ВТГ для ИИСО БПЛА и с компенсацией диссипации (с помощью разработанного схемотехнического способа увеличения добротности). Шаг клетки на осциллографе составляет 10 с.



На рис. 3.15 – Осциллограмма затухающих колебаний по координате x_1 на неподвижном основании получаемая с макетного образца ВТГ для ИИСО БПЛА и с компенсацией диссипации (с помощью разработанного схемотехнического способа увеличения добротности).

На рисунке 3.16 приведена осциллограмма затухающих колебаний по координате x_1 на неподвижном основании получаемая с макетного образца ВТГ для ИИСО БПЛА без компенсации энергии колебаний и с компенсацией диссипации (с помощью разработанного схемотехнического способа увеличения добротности).

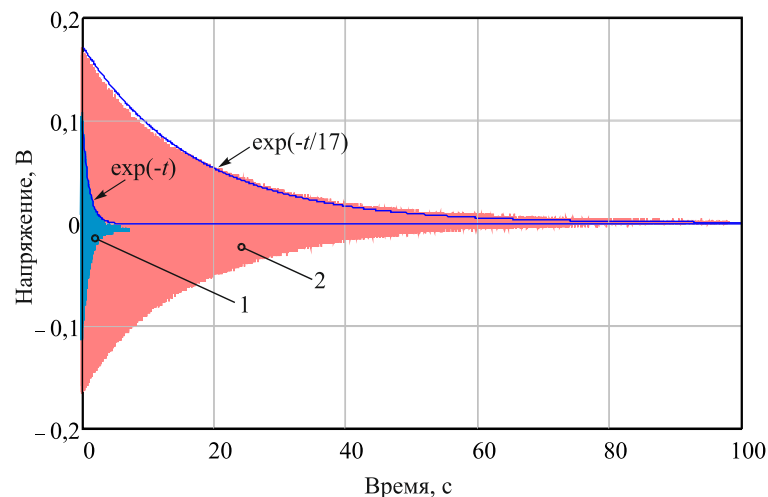


Рисунок 3.16. Графики затухающих колебаний резонатора: без компенсации (1) и с компенсацией диссипации энергии (реализованный схемотехнический способ увеличения добротности) (2)

Из анализа рисунка 3.16 постоянная времени резонатора при реализации разработанного схмотехнического способа увеличения добротности составила $T \approx 17$ с, что соответствует эквивалентной добротности 307091. Таким образом, выигрыш в добротности составил 17 раз, во столько же раз возрастает время функционирования, которое составляет величину порядка $3T \approx 54$ с, данный результат сходится с результатами инициационно моделирования. Для увеличения времени функционирования макетного образца ВТГ для ИИСО БПЛА необходимо увеличивать амплитуду раскачки первичных колебаний.

3.6 Экспериментальные исследования макетного образца ВТГ для ИИСО БПЛА на подвижном основании

Для подтверждения работоспособности предложенного способа обработки сигналов, полученных по огибающим первичных и вторичных колебаний с контрольных точек резонатора, обеспечивающего работоспособности во всем диапазоне измеряемых углов была произведена запись непрерывного по времени сигнала с помощью цифрового USB осциллографа в соответствии с программой (см. таблицу 3.2). Обработка полученного файла, данных содержащего сигналы с ВТГ осуществлялась в программе *Matlab* в соответствии с разработанным способом. На рис. 3.21 -3.22 приведен высокочастотный сигнал получаемый с координаты x_1 и x_2 , а также их огибающие построенные в программе *Matlab*.

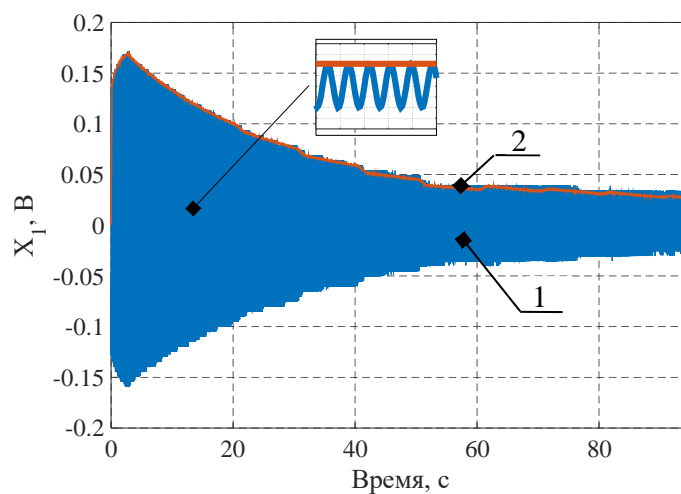


Рисунок 3.21 – Сигнал получаемый с координаты x_1

1 – высокочастотный сигнал; 2- огибающая сигнала

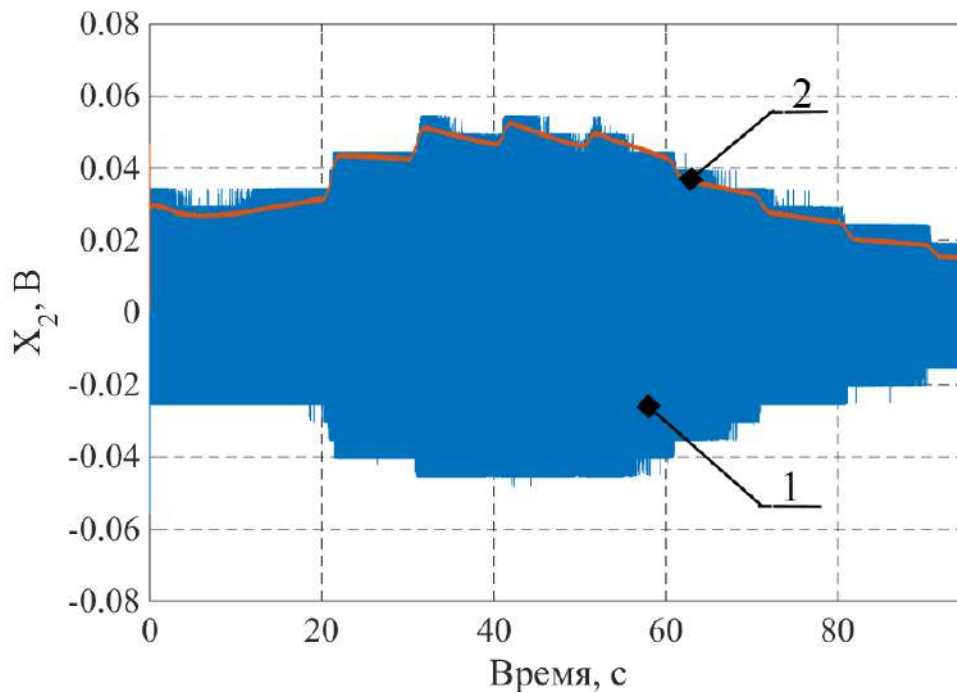


Рисунок 3.22 – Сигнал получаемый с координаты x_2

1 – высокочастотный сигнал; 2- огибающая сигнала
(демодулированный сигнал)

Из анализа графиков рисунок 3.21 – 3.22 видно, что вследствие низкой амплитуды выходного сигнала (менее 0,2 В, что обусловлено блоком электроники), в выходном сигнале присутствует шумовая составляющая оказывающая негативное воздействие в процессе вычисления углового положения.

На рисунке 3.23 приведен график вычисленного углового положения в соответствии с разработанным алгоритмом обработки сигнала, полученного по огибающим с контрольных точек резонатора (вращение станда осуществляется с 20 с).

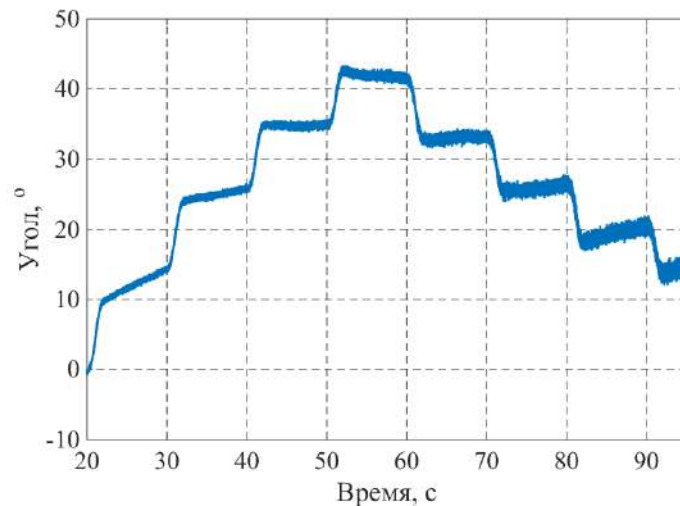


Рисунок 3.23 - График вычисленного углового положения при повороте основания на угол $0^{\circ}..45^{\circ}$, $-45^{\circ}..0^{\circ}$ с шагом 10° в соответствии с разработанным алгоритмом обработки демодулированного сигнала, полученного по огибающим с контрольных точек резонатора

Анализ графика, приведенного на рисунке 3.23 подтверждает результаты имитационного моделирования, что при обеспечении неидентичных контуров обратных связей присутствует ошибка в вычислении углового положения. При этом, как видно из графика, необходимо уменьшать коэффициент обратных связей в контуре по x_2 . Наличие прямых участков на графике свидетельствует, о наличие разночастотности в резонаторе в определенном угловом положении вызванной неточностью балансировки. К сожалению, точность балансировки в готовом образце оценить не представляется возможным, так как он имеет герметичный кожух. Дальнейшие исследования будут направлены на обеспечение идентичных контуров обратных связей (корректировку). Для ускорения времени настройки и исключения из результатов эксперимента шумовой составляющей, анализ вычисленного углового положения проводится с помощью фигур Лиссажу. На рисунке 3.17 приведена осциллограмма фигуры Лиссажу, полученная после возбуждения свободной волны на неподвижном основании

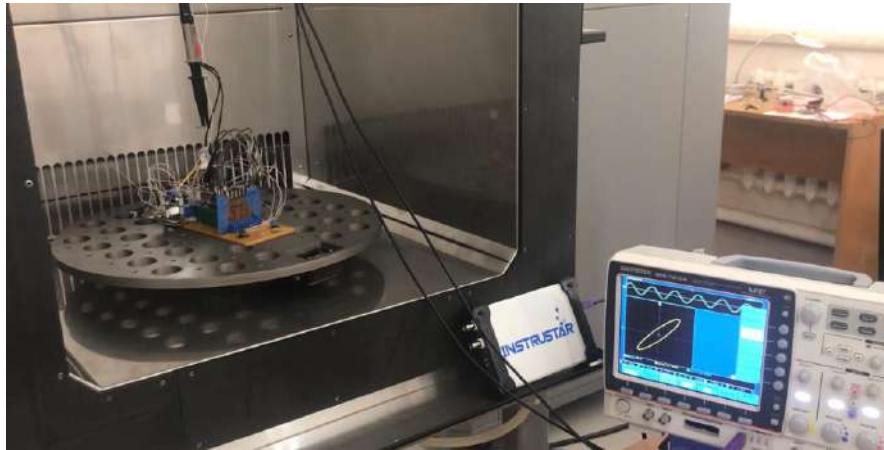


Рисунок 3.17 – Осциллограмма фигуры Лиссажу полученная после возбуждения свободной волны на неподвижном основании

На рисунке 3.18 приведены графики фигур Лиссажу, полученная после возбуждения свободной волны выжидание на каждом интервале до вращения не менее 5 с и последующем повороте на фиксированные углы в соответствии с программой испытаний (см. табл. 3.3) и обработанные с помощью программы Mathcad в соответствии с разработанным алгоритмом.

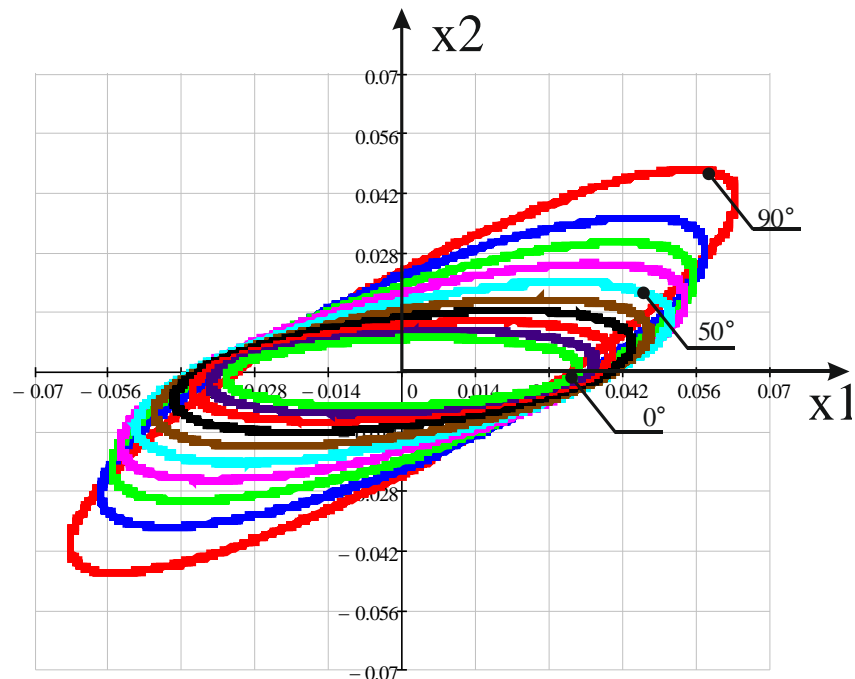


Рисунок 3.18 – Графики фигур Лиссажу, полученные возбуждения свободной волны и при повороте на фиксированные углы в соответствии с программой испытаний (см. табл. 3.3)

На рисунке 3.19 приведен график вычисленного угла поворота полученный после обработки фигур Лиссажу, а на рис. 3.20 приведен график погрешности вычисления угла.

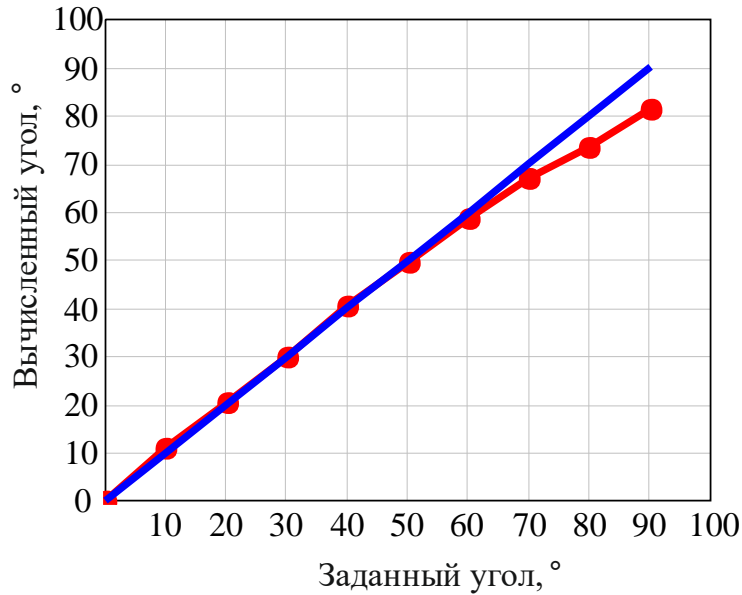


Рисунок 3.19 – График измеренного угла поворота с помощью ВТГ для ИИСО БПЛА

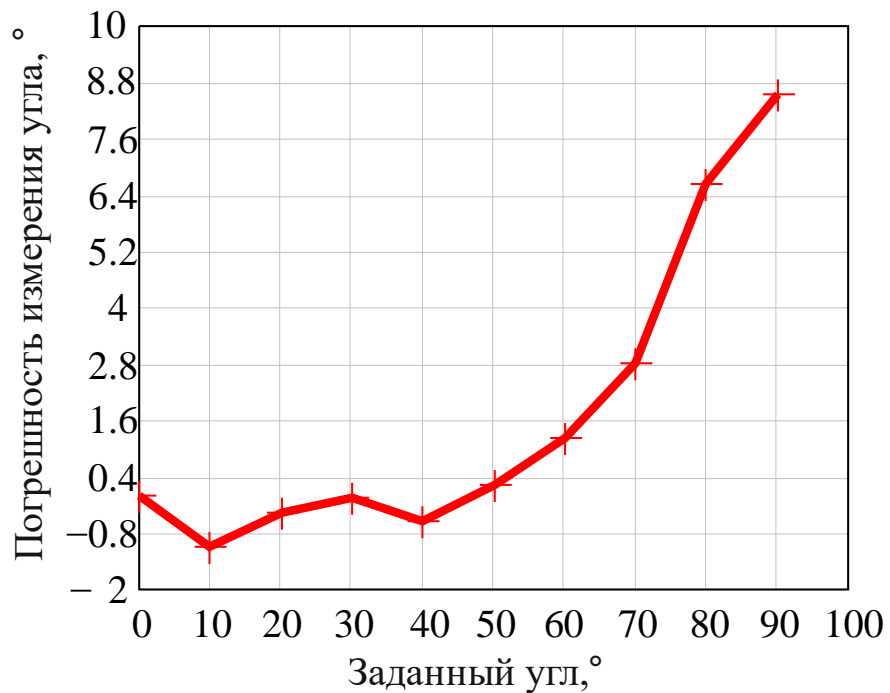


Рисунок 3.20 – График погрешности измерения угла

Анализ рисунков 3.19 – 3.20 подтверждает возможность использования ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» в качестве датчика угла для ИИСО БПЛА. После обеспечения идентичных контуров, обратных связей удалось достигнуть точность вычисления углового положения $\pm 0,5^\circ$ при повороте на угол до 50° . При увеличении угла свыше 50° наблюдается ухудшение точности до $+ 7^\circ$, вызванной предположительно неточностью балансировки.

Так же установлено, что для обеспечения заданной точности следует обеспечить идентичные контура обратных связей реализующие схемотехнический способ увеличения добротности ВТГ, а также обеспечить высокую степень балансировки. Для повышения точности и работоспособности предложенного способа вычисления углового положения во всем диапазоне заданных углов, необходимо увеличить напряжение выходного сигнала (ограничение выходного сигнала в макетном образце обусловлено блоком электроники). Проведенные исследования ограничены поворотом на угол 90° конструкцией разработанного макетного образца, так как при увеличении диапазона заданных углов необходимо использовать коллекторный узел стенда, а при амплитуде $0,2\text{ В}$, это невозможно обеспечить.

3.7 Выводы

Проведенные испытания макетного образца ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» подтверждают работоспособности разработанных способов, адекватность выполненного математического описания и имитационного моделирования. На основании проведенных испытаний установлено, время работоспособности ВТГ в составе ИИСО БПЛА составит 54 с , время выхода на режим составляет $0,5\text{ с}$. Подтверждена возможность измерения угла во всем диапазоне углов, при этом установлено, что на точность измерения оказывают настройка идентичности контуров обратных связей, реализующих схемотехнический способ увеличения добротности, а также балансировка резонатора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены результаты аналитических, имитационных и экспериментальных исследований позволяющие повысить эффективность ВТГ для ИИСО БПЛА и подтверждающие перспективность его применения в ИИСО БПЛА малого времени полета для замены механических трехстепенных гироскопов.

1. Проведен анализ существующих схем построения ИИСО БПЛА, в составе которых применяются гироскопические датчики, реализованные на различных физических принципах. Обоснована актуальность проблемы, цель и сформулированы задачи работы.

2. Разработаны математическая и имитационная модели ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» в составе ИИСО БПЛА, отличающиеся учетом контура возбуждения первичных колебаний резонатора ВТГ в автоколебательном режиме, учетом процессов компенсации диссипации энергии в резонаторе ВТГ, а также возможностью функционирования ИИСО во всем диапазоне измеряемых углов. 3. Позволяющая подбирать оптимальные параметры блока электроники. Проведено имитационное моделирование с целью анализа работоспособности разработанных способов.

3. Разработан способ повышения эффективности ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» в составе ИИСО БПЛА, увеличивающий время его работы до 20 раз. За счет разработанного схемотехнического способа увеличения добротности.

4. Разработан способ повышения эффективности ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» в составе ИИСО БПЛА, сокращающий время выхода ВТГ на режим в 7 раз. За счет использования разработанного способа выхода на режим реализующего автоколебательный контур.

5. Разработан способ повышения эффективности ВТГ с низкодобротным объемным резонатором, работающим в режиме «свободной волны» в составе ИИСО БПЛА, обеспечивающий работоспособность ИИСО во всем диапазоне

измеряемых углов. За счет использования разработанного способа обработки сигнала, получаемого по огибающим первичных и вторичных колебаний с контрольных точек резонатора.

6. Разработан макет ВТГ для ИИСО БПЛА программно-алгоритмическим обеспечением, а также проведены его экспериментальные исследования с целью подтверждения достоверности теоретических результатов работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полтавский, А. В. Информатизация образования: семантика термина "беспилотный летательный аппарат" / А. В. Полтавский, Н. К. Юрков, С. С. Семенов // Труды международного симпозиума "Надежность и качество". – 2018. – Т. 1. – С. 301-302.
2. Шевченко, А. В. Обзор состояния мирового рынка робототехники для сельского хозяйства. Ч. 1. Беспилотная агротехника / А. В. Шевченко, Р. В. Мещеряков, А. Н. Мигачев // Проблемы управления. – 2019. – № 5. – С. 3-18.
3. Шевченко, А. В. Обзор состояния мирового рынка робототехники для сельского хозяйства. Ч. 2. Беспилотные летательные аппараты и роботизированные фермы / А. В. Шевченко, Р. В. Мещеряков, А. Н. Мигачев // Проблемы управления. – 2019. – № 6. – С. 3-10
4. Костин, А. С. Анализ рынка беспилотных летательных аппаратов в России и мире / А. С. Костин, Н. В. Богатов // Аэрокосмическое приборостроение и эксплуатационные технологии: Сборник докладов Первой Международной научной конференции, Санкт-Петербург, 14–22 апреля 2020 года. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, 2020. – С. 125-130.
5. Федосеева Н.А., Загвоздкин М.В. Перспективные области применения беспилотных летательных аппаратов/ Федосеева Н.А., Загвоздкин М.В.// Научный журнал. - 2017. - № 9 (22). - С. 26-29.
6. Королева, Н. В. Состояние и перспективы развития рынка беспилотных авиационных систем гражданского назначения / Н. В. Королева, А. С. Левченко // Актуальные научные исследования в современном мире. – 2016. – № 11-2(19). – С. 77-79.
7. Собищанский, С. А. Классификация комплексов с беспилотными летательными аппаратами и варианты их применения в войсках национальной гвардии Российской Федерации / С. А. Собищанский, В. Р. Фрезе // Военно-правовые и гуманитарные науки Сибири. – 2020. – № 1(3). – С. 17-23.

8. Костин, А. С. Классификация гражданских беспилотных летательных аппаратов и сферы их применения / А. С. Костин // Системный анализ и логистика. – 2019. – № 1(19). – С. 70-80.

9. Безруков С. И., Гумелев В. Ю., Пархоменко А. В., Филиппов Д. А. Классификация беспилотных летательных аппаратов (в контексте современных войн в арабском мире) / Безруков С. И., Гумелев В. Ю., Пархоменко А. В., Филиппов Д. А. // Оригинальные исследования. – 2020. – № 4. – С. 66-81.

10. Алалуев, Р. В., Малютин, Д. М., Матвеев, В. В., Машнин, М. Н., [и др.]. Микросистемы ориентации беспилотных летательных аппаратов / Р. В. Алалуев, Д. М. Малютин, В. В. Матвеев, М. Н. Машнин [и др.] – 2011: под ред. В.Я. Распопов. – Москва: Машиностроение, 2011 – 180 с.

11. Ермаков Р. В., Львов А. А., Новиков А. Р., Лившиц Д. Ю. Использование нейронной сети для построения алгоритма стабилизации беспилотного летательного аппарата вертолётного типа / Ермаков Р. В., Львов А. А., Новиков А. Р., Лившиц Д. Ю. // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. – 2020. – № 4. – С. 13-20.

12. Ермаков Р. В., Львов А. А., Серанова А. А. [и др.] Анализ отказобезопасности пилотажно-навигационного комплекса беспилотного летательного аппарата / Ермаков Р. В., Львов А. А., Серанова А. А. [и др.] // Труды международного симпозиума "Надежность и качество", 2019. – С. 286-289.

13. Afonin A. A., Sulakov A. S., Mikhaylin D. A., Moskalev A. P. *The Adaptive Kalman Filter in Aircraft Control and Navigation Systems* / Afonin A. A., Sulakov A. S., Mikhaylin D. A., Moskalev A. P. // *Proceedings - 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2020 : 2, Virtual, Lipetsk, 10–13 november's 2020 . – Lipetsk: 2020. – С.121-124.*

14. Афонин А. А., Ямашев Г. Г., Шаповалов Н. А., Коломийчук С. А. Бесплатформенный гравиразведочный навигационно-гравиметрический комплекс на базе беспилотного летательного аппарата / Афонин А. А., Ямашев Г. Г., Шаповалов Н. А., Коломийчук С. А. // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: сборник трудов XXVI

международной научно-технической конференции, Алушта, 14–20 сентября 2017 года. – Алушта: Издательский дом "Медпрактика-М, 2017. – С. 107-108.

15. Каликанов, А. В. Аналитический обзор систем ориентации и навигации малоразмерных беспилотных летательных аппаратов / А. В. Каликанов // Техника XXI века глазами молодых ученых и специалистов. – 2018. – № 17. – С. 57-63.

16. Ермаков Р. В, Ульянина Ю. А, Серанова А. А. Исследование источников погрешностей навигационной системы малого беспилотного летательного аппарата / Ермаков Р. В, Ульянина Ю. А, Серанова А. А. [Текст] // Сборник трудов VI Международной научной конференции, посвященной 85-летию Ю.А. Гагарина, Саратов, 15–17 декабря 2018 года. – Саратов: Под редакцией А.А. Львова, М.С. Светлова. Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А, 2018. – С. 112-120.

17. Суворов А. Е. DARPA и наука Третьего рейха. Оборонные исследования США и Германии / А.Е. Суворов // Техносфера. – 2014 – 148 С.

18. Распопова Н.М. Импульсные гиromотory / Н.М. Распопова, В.Я. Распопов – М.: НТЦ «Информтехника», 1998. – 186 с.

19. Распопов В.Я. Гиросприборы и системы управляемых ракет ближней тактической зоны: монография. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. 248 с.

20. Горин В.И. Гироскоординаторы вращающихся по крену ракет / В.И. Горин, В.Я. Распопов; под ред. В.Я. Распопова. – М.: НТЦ «Информтехника», 1996. – 151 с.

21. Распопов В.Я. Тарасов В.К. Королев А.И. Разгон ротора гироскопа упругой лентой. // Изв. ВУЗов СССР. Приборостроение. - 1968. - т. II.-№1. С.71-76.

22. Распопов В.Я. Проектирование трехстепенных гироскопов с применением ЦВМ. - Тула: ТПИ. 1985. - 100 с.

23. Распопов В.Я. Опыт разработки гиросприборов для вращающихся по крену изделий / В.Я. Распопов, В.Н. Белобрагин, В.Д. Зайцев // Гироскопия и навигация. – 2005. - №4. – С. 57-72.

24. Распопов, В. Я. Проблемные вопросы импульсных гироскопов в историческом аспекте / В. Я. Распопов // 56-я Научно-практическая конференция

профессорско-преподавательского состава ТулГУ с всероссийским участием : Сборник докладов. В двух частях, Тула, 03–06 февраля 2020 года. Том Часть 1. – Тула: Тульский государственный университет, 2020. – С. 41-48.

25. Павлов В.А. Кудряшов Г.Н. О необходимости учета влияния технологических погрешностей при синтезе гироскопических приборов.// Вопросы синтеза гироскопических приборов. - Ленинград. 1966. - Вып.49. - С.76-84

26. Павловский М.А. Влияние погрешностей изготовления и сборки гироскопических приборов на их точность. - Киев: Киевский университет. 1973. - 191 с.

27. Распопов В.Я. Метод автоматизированного исследования динамики гироскопических приборов / Вестник МВТУ. - Приборостроение. - 1992. - №1. - С.110-118.

28. Ишлинский А.Ю. Механика гироскопических систем. - М.: Наука, 1963.- 482 с.

29. Ишлинский А.Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация.- М.: Наука, 1976. - 670 с.

30. Павлов В.А. Основы проектирования и расчета гироскопических приборов. - Л.: Судостроение. 1967. - 407 с.

31. Павлов В.А. Теория гироскопа и гироскопических приборов. - Л.: Судостроение. 1964. - 484 с.

32. Научные школы, 1980-2000 / Тул. гос. ун-т; Под науч. ред. Соколова Э. М., Васина С. А. - Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. - 367.

33. Бабичев В.И Современное состояние теории и практики импульсивных гироскопов / В.И. Бабичев, В.И. Горин, В.Я. Распопов // Оборонная техника.– 1993. - №3. – С. 40-44.

34. Бабичев В.И. Области применения и особенности бортовых гироскопических приборов управляемых ЛА ракетно-артиллерийских комплексов / В.И. Бабичев //Оборонная техника. – 1994. - №5-6. – С. 5-8.

35. Горин В.И. Научные основы разработки конструкций бортовых гироскопических приборов с импульсными гироскопами / В.И. Горин, В.Я. Распопов // Оборонная техника. – 1995. - №6. – С. 44-50.

36. Пельпор Д. С. Гироскопические системы ориентации и стабилизации. Справочное пособие. Москва: Машиностроение, 1982
37. Распопов, В. Я. Бортовые гироскопы. Исторический обзор / В. Я. Распопов // Гироскопия и навигация. – 2022. – Т. 30, № 2(117). – С. 107-119.
38. Бабичев, В. И. Разработка бортовых гироскопов противотанковых управляемых артиллерийских снарядов / В. И. Бабичев, М. В. Грязев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 9-2. – С. 9-19.
39. Каликанов, А. В. Испытание датчика Холла для определения угла крена в трехстепенном гироскопе / А. В. Каликанов, А. А. Кураев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 8. – С. 114-123.
40. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022662911 Российская Федерация. Программа проектирования пружинного гироскопа датчика угла крена: № 2022662399: заявл. 30.06.2022: опубл. 07.07.2022 / А. В. Каликанов, М. Г. Погорелов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет».
41. Делэйе, Ф. Бортовая инерциальная система координат SpaceNaute® для европейской ракеты-носителя "Ариан-6" на основе волнового твердотельного гироскопа / Ф. Делэйе // Гироскопия и навигация. – 2018. – Т. 26, № 4(103). – С. 3-13
42. Болотнов С.А., Верникина Н.М. Лазерные информационно-измерительные системы: учебное пособие. – Ч.1/ Под ред. О.В. Рожкова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 44 с.: ил.]
43. 50 лет лазерному гироскопу / Д. Лукьянов, Ю. Филатов, Ю. Голяев [и др.] // Фотоника. – 2014. – № 1(43). – С. 42-61.
44. Драницына, Е. В. Исследование зависимости выходного сигнала волоконно-оптического гироскопа от температуры в составе бескарданного инерциального измерительного модуля / Е. В. Драницына, Д. А. Егоров // Навигация и управление движением : Материалы докладов XIV конференции

молодых ученых, Санкт-Петербург, 13–16 марта 2012 года / Научный редактор: О.А. Степанов, под общей редакцией В.Г. Пешехонова. – Санкт-Петербург: Концерн "Центральный научно-исследовательский институт "Электроприбор", 2012. – С. 447-452.

45. Гай Э. Наводящиеся снаряды с инерциальной системой на микромеханических датчиках, интегрированной с GPS / Э. Гай // В сб. статей и докл.: Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации. – С-Пб.: «Электроприбор». – 2004. – С.101 – 109.

46. Богданов, М. Б. Особенности построения навигационных систем зарубежных управляемых артиллерийских снарядов / М. Б. Богданов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 11. – С. 60-67.

47. Урманов, Д. Развитию МЭМС в России необходим положительный импульс / Д. Урманов // Компоненты и технологии. – 2012. – № 10(135). – С. 10-13.

48. Беляев, В. МЭМС/МСТ в современной технике на примере автомобилестроения и авиации / В. Беляев // Нано- и микросистемная техника. – 2006. – № 5. – С. 36-44.

49. Распопов, В. Я. Волновые твердотельные гироскопы российской разработки для бортовых систем летательных аппаратов / В. Я. Распопов, В. В. Лихошерст, А. В. Каликанов // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2021. – № 4. – С. 148-153.

50. Распопов, В. Я. Датчик угловых скоростей на базе волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором для систем ориентации, стабилизации и навигации / В. Я. Распопов, В. В. Лихошерст // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2021. – Т. 22, № 7. – С. 374-382.

51. Алалуев Р. В., Волчихин И. А., Ладонкин А. В. [и др.] Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором и его применение в системах ориентации, стабилизации и навигации / Алалуев Р. В., Волчихин И. А., Ладонкин А. В. [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 8. – С. 7-21.

52. Распопов, В. Я. Волновые твердотельные гироскопы с металлическим резонатором / В. Я. Распопов, В. В. Лихошерст // Гироскопия и навигация. – 2023. – Т. 31, № 1(120). – С. 26-44.

53. Распопов В.Я., Волчихин И.А., Волчихин А.И., Ладонкин А.В., Лихошерст В.В., Матвеев В.В. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором/Под ред. В.Я. Распопова. Тула: Издательство ТулГУ, 2018. – 189 с.

54. Ермаков Р. В., Кондратов Д. В., Львов А. А. [и др.] Исследование вибрационной погрешности волнового твердотельного гироскопа с полусферическим резонатором / Ермаков Р. В., Кондратов Д. В., Львов А. А. [и др.] [Текст] // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: Сборник трудов. В 4-х томах, Уфа, 19–24 августа 2019 года. Том 1. — Уфа: Башкирский государственный университет, 2019. — С. 332-334.

55. Журавлев В.Ф., Переляев С.Е. Волновой твердотельный гироскоп – инерциальный датчик нового поколения с комбинированным режимом функционирования // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. 2016. №1. С. 425–431.

56. Климов Д.М., Журавлёв В.Ф., Жбанов Ю.К. Кварцевый полусферический резонатор (Волновой твердотельный гироскоп). М.: Ким Л.А., 2017. 194 с.

57. Журавлев В. Ф., Переляев С. Е., Бодунов Б. П., Бодунов С. Б. Миниатюрный волновой твердотельный гироскоп нового поколения для бескарданных инерциальных навигационных систем беспилотных летательных аппаратов // XXVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам : Сборник материалов, Санкт-Петербург, 27–29 мая 2019 года. – Санкт-Петербург: "Концерн "Центральный научно-исследовательский институт "Электроприбор", 2019. – С. 241-245.

58. Журавлев, В. Ф. Миниатюрный полусферический и сферический резонансный гироскоп нового поколения для бескарданных инерциальных навигационных систем беспилотных летательных аппаратов / В. Ф. Журавлев, С.

Е. Переляев // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. – 2019. – № 1. – С. 433-438.

59. Журавлёв В.Ф. Температурный дрейф волнового твердотельного гироскопа (ВТГ) // Изв. РАН. МТТ. 2018. №3. . 3–11.

60. Жбанов Ю.К. Определение качества резонатора волнового твердотельного гироскопа по эволюции его свободных колебаний // XII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб., 2005. С. 225–227.

61. Матвеев В.А., Лунин Б.С., Басараб М.А. Навигационные системы на волновых твердотельных гироскопах. М.: Физматлит, 2008. 240 с.

62. Матвеев В.А., Липатников В.И., Алехин А.В. Проектирование волнового твердотельного гироскопа. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1997. 165 с.

63. Лунин Б.С., Матвеев В.А., Басараб М.А. Волновой твердотельный гироскоп. Теория и технология. М.: Радиотехника, 2014. 176 с

64. Матвеев В.А. Гироскоп – это просто. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – 191 с.

65. Lynch D.D. HRG Development at Delco, Litton, and Northrop Grumman. In *Proceedings of The Anniversary Workshop on Solid-State Gyroscopy. 19–21 May 2008; pp. 19-21.*

66. Lynch D. *Vzglyad kompanii "NORTROPGRUMMAN" narazvitie inercialnih tehnologiy (The view of NORTHROP GUMMAN on the development of inertial technologies), Giroskopiya I Navigaciya, 2008, no. 3, pp. 102–106 (in Russian)*

67. Линч Д.Д. Разработка HRG в Delco, Litton и Northrop Grumman // Материалы юбилейного семинара по твердотельной гироскопии. Киев-Харьков: АТС Украины, 2009.

68. Apostolyk V.A *Demodulated dynamics and optimal filtering for Coriolis vibratory gyroscopes // Proc\c/ of XVII Inertional Conference on Integrated Navigation Systems (31 May – 2 June 2010. St-Petersbourg). – St.- Petersburg: «ElektroPribor». 2010. – P. 57-60*

69. Apostolyuk V.O. *Coriolis Vibratory Gyroscopes: Theory and Design* // Springer, USA, 2016. – 117 p.

70. Apostolyuk, V. *Temperature errors compensation in Coriolis vibratory gyroscopes* / V. Apostolyuk, V. Chikovani // *Механіка гіроскопічних систем.* – 2012. – No. 25. – P. 22-29. – EDN SBIEGH.

71. Chikovani V. V., Yatsenko Yu. A., Kovalenko V. A., Scherban V. I. *Digitally controlled High Accuracy Metallic Resonator CVG, Proc/ Symposium Gyro Technology, Stuttgart, 2006, pp. 4.0–4.7.*

72. Chikovani V. V., Yatzenko Yu. A., Barbashov A. S., Kovaenko V. A., Scherban V. I., Marusyk P. I. *Metallic Resonator CVG Thermophysical Parameter Optimization and Temperature Test Results, Proc. Of XIV International Conference on Integreted Navigation Systems (28–30 May 2007. St-Petersburg), St-Petersburg, "Electropribor", 2007, pp. 74–77.*

73. Chikovani V. V., Yatzenko Yu. A., Barbashov A. S. et al. *Improved accuracy metallic resonator CVG, Proc. of XV International Conference on Integreted Navigation Systems (26–28 May 2008. St-Petersburg), St-Petersburg, Publishing house of "Electropribor", 2008, pp. 28–31.*

74. Chikovani V. V., Yatzenko Yu. A., Mikoloshin I. T. *Shock and vibration sensistivity test result for metallic resonator CVG, Proc. of XVI International Conference on Integreted Navigation Systems (25–27 May 2008. St-Petersburg), St-Petersburg, Publishinghouse of "Electropribor", 2009, pp. 88–92.*

75. Chikovani V. V., Yatzenko Yu. A. *Investtigation of azimuth accuracy measurement with metallic resonator Coriolis vibratory gyroscope, Proc. of XVII International Conference on Integreted Navigation Systems (31 May – 2 June 2010. St-Petersburg). St-Petersburg, Publishing house of "Electropribor", 2010, pp. 25–30.*

76. Chumankin E. A. *Resultati proektirovaniya i ispitaniy datchika uglovoi skorosti na osnove volnovogo tverdotelnogo giroskopa (Results of designing and testing the angular rate sensor based on the wave solid-state gyro), Giroskopiya i Navigaciya, 2013, no. 2 (81), pp. 104–111 (in Russian)*

77. Wu, X.; Xi, X.; Wu, Y.; Xiao, D. *Cylindrical Vibratory Gyroscope; Springer Tracts in Mechanical Engineering (STME); Springer:Berlin/Heidelberg, Germany, 2021, 202 p.,*

78. Распопов В.Я. Теория гироскопических систем. Гиросприбор: учебное пособие для вузов/ ТулГУ-Тула: Изд-во ТулГУ, 2018. - 194 с.

79. Распопов, В. Я. Проектирование резонатора волнового твердотельного гироскопа и верификация конечно-элементной модели / В. Я. Распопов, С. В. Егоров // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 10. – С. 227-235.

80. Распопов, В. Я. Становление и развитие гироскопии в Туле / В. Я. Распопов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 10. – С. 3-28.

81. Шишаков К.В. Твердотельные волновые гироскопы: волновые процессы, управление, системная интеграция. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2018. 264 с.

82. Маслов А. А., Маслов Д. А., Ниналалов И. Г., Меркурьев И. В. Волновые твердотельные гироскопы: обзор публикаций / Маслов А. А., Маслов Д. А., Ниналалов И. Г., Меркурьев И. В. // Гироскопия и навигация. – 2023. — № Т. 31, № 1(120). . — С. 3-25.

83. Матвеев В. В. Информационно-измерительные системы ориентации, стабилизации и навигации на кориолисовых вибрационных гироскопах : автореферат дис. доктора технических наук : 05.11.16 / Матвеев Валерий Владимирович; [Место защиты: Тульский государственный университет]. - Тула, 2020. - 40 с.

84. *Bryan G.H. On the Beats in the Vibrations of a Revolving Cylinder or Bell //Proc. of Cambridge Phil. Soc. 1890, Nov. 24. Vol.VII. Pt.III. P.101-111.*

85. Переляев С.Е., Бодунов С.Б., Бодунов Б.П. Волновой твердотельный гироскоп авиационно-космического применения навигационного класса точности // XXIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. 2022. С. 172–175.

86. Переляев С.Е. Обзор и анализ направлений создания бесплатформенных инерциальных навигационных систем на волновых твердотельных гироскопах // Новости навигации. 2018. № 2. С. 21–27.

87. Распопов, В. Я. Исследование функционирования блока электроники и резонатора волнового твердотельного гироскопа в режиме датчика угловой скорости / В. Я. Распопов, В. В. Лихошерст, С. В. Егоров // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2022. – Т. 23, № 8. – С. 440-447.

88. Бодунов Б.П., Бодунов С.Б., Владимиров В.А., Игонин А.Н., Костенок Н.А. Твердотельный волновой гироскоп двухрежимной работы для космоса // XX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. 2013. С. 145–146.

89. Распопов В. Я., Матвеев В. В., Лихошерст В.В. [и др.] Волновой твёрдотельный гироскоп с металлическим резонатором для режима свободной волны / Распопов В. Я., Матвеев В. В., Лихошерст В.В. [и др.] // XXVI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам : Сборник материалов, Санкт-Петербург, 27–29 мая 2019 года. – Санкт-Петербург: "Концерн "Центральный научно-исследовательский институт "Электроприбор", 2019. – С. 168-169.

91. Переляев С.Е. Современное состояние и научно-технический прогноз перспектив применения зарубежных волновых твердотельных гироскопов (Аналитический обзор по зарубежным материалам) // Новости навигации. 2020. № 3. С. 14–28.

92. Kai Zeng, Youwang Hu, Guiling Deng, Xiaoyan Sun, Wenyi Su, Yunpeng Lu and Ji'an Duan *Investigation on Eigenfrequency of a Cylindrical Shell Resonator under Resonator-Top Trimming Methods*// *Sensors* 2017, 17, 2011

93. Zhen Lin, Mengyin Fu, Zhihong Deng, Ning Liu and Hong Liu *Frequency Split Elimination Method for a Solid-State Vibratory Angular Rate Gyro with an Imperfect Axisymmetric-Shell Resonator*/ *Sensors* 2015, 15, 3204-3223;

94. Yiming Luo, Tianliang Qu, Yan Cui, Yao pan, Menglin Yu, Hui Luo, Yonglei Jia, Zhongqi tan, Jianping Liu, Bin Zhang *Cylindrical Fused silica Resonators Driven*

by pZt thin Film electrodes with Q Factor Achieving 2.89 Million after Coating// *Scientific Reports* (2019)

95. Libin Zeng, Yiming Luo, Yao Pan, Yonglei Jia, Jianping Liu, Zhongqi Tan, Kaiyong Yang and Hui Luo. A 5.86 Million Quality Factor Cylindrical Resonator with Improved Structural Design Based on Thermoelastic Dissipation Analysis// *Sensors* 2020, 20

96.. D. Senkal, M. J. Ahamed, M. H. A. Ardakani, S. Askari and A. M. Shkel, "Demonstration of 1 Million Q -Factor on Microglassblown Wineglass Resonators With Out-of-Plane Electrostatic Transduction," in *Journal of Microelectromechanical Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 29-37, Feb. 2015.

97. Senkal, D.; Ng, E.J.; Hong, V.; Yang, Y.; Ahn, C.H.; Kenny, T.W.; Shkel, A.M. Parametric drive of a toroidal mems rate integrating gyroscope demonstrating < 20 ppm scale factor stability. In *Proceedings of the 2015 28th IEEE International Conference on MicroElectro Mechanical Systems (MEMS), Estoril, Portugal, 18–22 January 2015*; pp. 29–32.

98.. Saito, D.; Yang, C.; Heidari, A.; Najar, H.; Lin, L.; Horsley, D.A. Microcrystalline diamond cylindrical resonators with quality-factor up to 0.5 million. *Appl. Phys. Lett.* 2016, 108, 051904

99. Research on the signal process of a bell-shaped vibratory angular rate gyro / Z. Su, N. Liu, M. Fu [et al.] // *Sensors*. – 2014. – Vol. 14, No. 3. – P. 5254-5277.

100. Rozelle D. *The Hemispherical Resonator Gyro: From Wineglass to the Planets. Advances in the Astronautical Sciences.* 134. 2009. P. 1157-1178.

101. Characterization of the bell-shaped vibratory angular rate gyro / N. Liu, Z. Su, M. Y. Fu [et al.] // *Sensors*. – 2013. – Vol. 13, No. 8. – P. 10123-10150.

102. Официальный сайт компании Innalabs: [Электронный ресурс]//: URL: <https://www.innalabs.com/n-series-gyroscope> .(дата обращения 13.12.22).

103. Мейер Д., Розелле Д. Инерциальная навигационная система на основе миниатюрного волнового твердотельного гироскопа // *Гироскопия и навигация.* 2012. № 3. С. 45–54

104. Корчак, В. Американская программа "Критические военные технологии". Характеристика и анализ содержания / В. Корчак, Е. Тужиков, Л. Бочаров // Электроника: Наука, технология, бизнес. – 2013. – № 5(127). – С. 134-148.

105. Жанруа А., Буве А., Ремиллье Ж. Волновой твердотельный гироскоп и его применение в морском приборостроении // Гироскопия и навигация. 2013. № 4. С. 24–34.

106. Патент № 2785956 С1 Российская Федерация, МПК G01C 19/5691. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором: № 2021125908 : заявл. 01.09.2021: опубл. 15.12.2022 / Р. В. Алалуев, Ю. В. Ведешкин, Д. А. Вяткин [и др.]; заявитель Акционерное общество "Мичуринский завод "Прогресс".

107. Патент № 2708907 С1 Российская Федерация, МПК G01C 19/56. Твердотельный волновой гироскоп : № 2019115580 : заявл. 21.05.2019 : опубл. 12.12.2019 / А. А. Папко, А. В. Поспелов ; заявитель Акционерное общество "Научно-исследовательский институт физических измерений".

108. Патент № 2622238 С1 Российская Федерация, МПК G01C 19/56. Твердотельный волновой гироскоп : № 2016101687 : заявл. 20.01.2016 : опубл. 13.06.2017 / Н. А. Буров ; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает Государственная корпорация по атомной энергии "Росатом" (Госкорпорация "Росатом"), Федеральное государственное унитарное предприятие "Российский федеральный ядерный центр - всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.Е. Забабахина.

109. Патент на полезную модель № 154575 U1 Российская Федерация, МПК G01C 19/56. твердотельный волновой гироскоп : № 2015108695/28 : заявл. 12.03.2015 : опубл. 27.08.2015 / Г. А. Панкратов, В. Н. Перебатов, С. В. Тронин ; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает Государственная корпорация по атомной энергии "Росатом" (Госкорпорация "Росатом"), Федеральное государственное унитарное предприятие " Российский федеральный

ядерный центр - всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.Е. Забабахина ".

110. Патент № 2544870 С2 Российская Федерация, МПК G01C 19/56. Твердотельный волновой гироскоп : № 2013123547/28 : заявл. 21.05.2013 : опубл. 20.03.2015 / А. Г. Андреев, В. С. Ермаков, И. В. Гузачев [и др.] ; заявитель Открытое акционерное общество "Пермская научно-производственная приборостроительная компания".

111. Патент № 2541711 С1 Российская Федерация, МПК G01C 19/56. твердотельный волновой гироскоп : № 2013138640/28 : заявл. 21.08.2013 : опубл. 20.02.2015 / С. П. Редькин, И. В. Назаров, К. А. Бахонин [и др.] ; заявитель Закрытое акционерное общество "Инерциальные технологии "Технокомплекса" (ЗАО "ИТТ").

112. Патент на полезную модель № 146842 U1 Российская Федерация, МПК G01C 19/56. Микромеханический твердотельный волновой гироскоп : № 2014126816/28 : заявл. 02.07.2014 : опубл. 20.10.2014 / В. А. Солдатенков, Ю. К. Грузевич, В. М. Ачильдиев [и др.] ; заявитель Открытое акционерное общество "Научно-производственное объединение "Геофизика-НВ".

113. Патент на полезную модель № 123937 U1 Российская Федерация, МПК G01C 19/56. Твердотельный волновой гироскоп : № 2012121013/28 : заявл. 22.05.2012 : опубл. 10.01.2013 / В. Д. Рогинский, С. Ю. Юрманов, Р. А. Денисов ; заявитель Открытое акционерное общество "Арзамасский приборостроительный завод имени П.И. Пландина" (ОАО "АПЗ").

114. Патент № 2362975 С1 Российская Федерация, МПК G01C 19/56, G01P 9/04. твердотельный волновой гироскоп : № 2008100657/28 : заявл. 09.01.2008 : опубл. 27.07.2009 / С. М. Бражнев, И. П. Шепеть, В. В. Онуфриенко [и др.].

115. Патент № 2207510 С2 Российская Федерация, МПК G01C 19/56. твердотельный волновой гироскоп : № 2001119855/28 : заявл. 19.07.2001 : опубл. 27.06.2003 / А. А. Кардаполов, П. К. Мачехин, С. В. Кузьмин ; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие "Ижевский электромеханический завод "Купол".

116. Патент № 2182312 С1 Российская Федерация, МПК G01С 19/56. твердотельный волновой гироскоп : № 2001111933/28 : заявл. 04.05.2001 : опубл. 10.05.2002 / А. А. Кардаполов, П. К. Мачехин, С. В. Кузьмин ; заявитель Федеральное государственное унитарное предприятие "Ижевский электромеханический завод" "Купол".

117. Патент на полезную модель № 197341 U1 Российская Федерация, МПК G01С 19/56. Резонатор твердотельного волнового гироскопа : № 2019116176 : заявл. 27.05.2019 : опубл. 21.04.2020 / А. А. Скрипкин, А. В. Королев, А. А. Королев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.».

118. Патент на полезную модель № 187102 U1 Российская Федерация, МПК G01С 19/56. Резонатор твердотельного волнового гироскопа: № 2018134263 : заявл. 27.09.2018 : опубл. 19.02.2019 / А. А. Скрипкин, А. В. Королев, А. А. Королев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А." (СГТУ имени Гагарина Ю.А.).

119. Исследование возможности построения датчика угла крена на базе кориолисовых вибрационных гироскопов / А. В. Каликанов, В. Я. Распопов, В. В. Матвеев [и др.] // XXIX Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: сборник материалов, Санкт-Петербург, 30 мая – 01 2022 года. – Санкт-Петербург: "Концерн "Центральный научно-исследовательский институт "Электроприбор", 2022. – С. 204-207.

120. Распопов В. Я., Волчихин И. А., Лихошерст В. В [и др.] Проектирование волнового твердотельного гироскопа и системы ориентации и стабилизации на его основе / Распопов В. Я., Волчихин И. А., Лихошерст В. В // XXVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам: Сборник материалов, Санкт-Петербург, 25 мая – 05 2020 года. – Санкт-Петербург: "Концерн "Центральный научно-исследовательский институт "Электроприбор", 2020. – С. 273-275.

121. Распопов В. Я., Волчихин А. И., Ладонкин А. В. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором. Разработка и производство / В. Я. Распопов, А. И. Волчихин, А. В. Ладонкин [и др.] // Справочник. Инженерный журнал. – 2020. – № 3(276). – С. 11-20.

122. Мельников Р. В., Трутнев Г. А., Кривов А. В., Кадыров И. Р. Твердотельный волновой гироскоп с независимыми каналами измерения угла и угловой скорости / Р. В. Мельников, Г. А. Трутнев, А. В. Кривов, И. Р. Кадыров // Интеллектуальные системы в производстве. – 2020. – Т. 18, № 4. – С. 21-29.

123. Мингазов, Р. И. Идентификация механических погрешностей резонаторов твердотельных волновых гироскопов в режиме свободного выбега стоячих волн / Р. И. Мингазов, Ф. И. Спиридонов, К. В. Шишаков // Интеллектуальные системы в производстве. – 2022. – Т. 20, № 2. – С. 4-19.

124. Лунин Б. С., Юрин А. В., Басараб М. А. [и др.]. Термоупругие потери в конструкционных материалах резонаторов волновых твердотельных гироскопов / Лунин Б. С., Юрин А. В., Басараб М. А // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Приборостроение. – 2015. – № 2(101). – С. 28-39.

125. Лунин, Б. С. Кварцевое стекло для механических резонаторов с высокой добротностью / Б. С. Лунин, В. М. Лопатин // Неорганические материалы. – 2020. – Т. 56, № 3. – С. 305-310.

126. Каликанов А.В., Лихошерст В.В., Тимошенко А.С., Тимошенко С. П. Испытания кориолисовых вибрационных гироскопов / Каликанов А.В., Лихошерст В.В., Тимошенко А.С., Тимошенко С.П. // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2021. — № 10. — С. 255-262.

127. Каликанов А. В. Исследование волнового твердотельного гироскопа для режима свободной волны / А. В. Каликанов, В. В. Матвеев // Новые направления развития приборостроения: материалы 15-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов, Минск, 20–22 апреля 2022 г. /

Белорусский национальный технический университет ; редкол.: О. К. Гусев (пред. редкол.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 15-16.

128. Каликанов А. В. Датчик угла крена подвижного объекта на базе волнового твердотельного гироскопа / А. В. Каликанов, М. Г. Погорелов // Новые направления развития приборостроения: материалы 14-й Международной научно-технической конференции молодых ученых и студентов, 14–16 апреля 2021 г. / Белорусский национальный технический университет ; редкол.: О. К. Гусев (пред. редкол.) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 19-20.

129. Каликанов, А. В. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором, работающий в режиме свободной волны/ А. В. Каликанов, Д. С. Стрельцов, В. В. Матвеев, В. В. Лихошерст, М. Г. Погорелов, // Приборостроение-2022 : материалы 15-й Международной научно-технической конференции, 16-18 ноября 2022 года, Минск, Республика Беларусь / редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]. – Минск : БНТУ, 2022. – С. 39-40.

130. Рабинович М. И., Трубецков Д. И. Введение в теорию колебаний и волн. – НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика». – 2000. – 560 с.

131. Патент № 2787809 С1 Российская Федерация, МПК G01С 19/5691. Датчик угла крена на базе волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором : № 2022116481 : заявл. 17.06.2022 : опубл. 12.01.2023 / В. Я. Распопов, В. В. Матвеев, В. В. Лихошерст [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тульский государственный университет".

132. Абгарян, Ж. С. Реализация и исследование автоколебательного контура волнового твердотельного гироскопа / Ж. С. Абгарян, Я. В. Дулуб, В. В. Лихошерст // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 12. – С. 251-256.

133. Матвеев В. В., Погорелов М.Г, Лихошерст В. В., Каликанов А. В. [и др.] Математическое описание кориолисовых вибрационных гироскопов методом огибающих амплитуд колебаний чувствительного элемента / Матвеев В. В.,

Погорелов М.Г, Лихошерст В. В., Каликанов А. В. [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. - №9. – С.304-311.

134. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022680293 Российская Федерация. Программа для исследования волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором, работающего в режиме свободной волны : № 2022669793 : заявл. 24.10.2022 : опубл. 31.10.2022 / Д. С. Стрельцов, А. В. Каликанов, В. В. Матвеев [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет».

135. Исследование электрических колебаний методом фигур Лиссажу: методические указания к лабораторным работам / В.П. Архипов [и др.].- Казань: Изд-во КНИТУ, 2012.- 21с.

136. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617872 Российская Федерация. Программа для оценки необходимой добротности волнового твердотельного гироскопа для обеспечения его работоспособности в составе системы ориентации: № 2023616675: заявл. 05.04.2023: опубл. 14.04.2023 / А. В. Каликанов, В. В. Матвеев, В. В. Лихошерст [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет».

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2787809

Датчик угла крена на базе волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Тульский государственный университет" (ТулГУ) (RU)*

Авторы: *Распопов Владимир Яковлевич (RU), Матвеев Валерий Валерьевич (RU), Лихошерст Владимир Владимирович (RU), Каликанов Алексей Владимирович (RU), Стрельцов Дмитрий Сергеевич (RU)*

Заявка № 2022116481

Приоритет изобретения 17 июня 2022 г.

Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 12 января 2023 г.

Срок действия исключительного права на изобретение истекает 17 июня 2042 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 6908000776 | 4c4210c94a0b024145d5c7
Владелец: **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.01.2022 по 26.05.2023

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022662911

Программа проектирования пружинного гиromотора датчика угла крена

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет» (ТулГУ) (RU)**

Авторы: **Каликанов Алексей Владимирович (RU), Погорелов Максим Георгиевич (RU)**



Заявка № 2022662399

Дата поступления **30 июня 2022 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **07 июля 2022 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Документ подписан электронной подписью
Сертификат 62b8027924e1903d4feebd24145d5c7
Владимира Зубова Юрия Сергеевича
Действителен с 01.07.2022 по 25.06.2025

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2023617872

**Программа для оценки необходимой добротности
волнового твердотельного гироскопа для обеспечения
его работоспособности в составе системы ориентации**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования «Тульский
государственный университет» (ТулГУ) (RU)*

Авторы: *Каликанов Алексей Владимирович (RU), Матвеев
Валерий Владимирович (RU), Лихошерст Владимир
Владимирович (RU), Погорелов Максим Георгиевич (RU),
Васин Сергей Игоревич (RU)*

Заявка № 2023616675

Дата поступления 05 апреля 2023 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 14 апреля 2023 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННЫМ ПОДПИСЬЮ
Сертификат 65c4007781-6-78032440b824145a5c7
Владелец **Зубов Юрий Сергеевич**
Действителен с 20.05.2022 по 25.05.2023

Ю.С. Зубов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2022680293

Программа для исследования волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором, работающего в режиме свободной волны

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет» (ТулГУ) (RU)*

Авторы: *Стрельцов Дмитрий Сергеевич (RU), Каликанов Алексей Владимирович (RU), Матвеев Валерий Владимирович (RU), Лихошерст Владимир Владимирович (RU), Погорелов Максим Георгиевич (RU)*

Заявка № **2022669793**Дата поступления **24 октября 2022 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **31 октября 2022 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 68b96c77c14e49f3e94c6bd1414567c7
Подпись: **Зубов Юрия Сергеевич**
Идентификационный номер: 68b96c77c14e49f3e94c6bd1414567c7

Ю.С. Зубов