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 c 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 схемотехнического 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

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.

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