

Кулешов Александр Викторович

**РОТОРНЫЙ ВИБРАЦИОННЫЙ ГИРОСКОП
ДЛЯ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ НОСИТЕЛЯ**

Специальность: 05.11.03 – Приборы навигации

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



Москва, 2003 г.

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом
Университете им. Н. Э. Баумана на кафедре «Приборы и системы
ориентации, стабилизации и навигации»

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор
В. В. Фатеев

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Г. М. Виноградов

кандидат технических наук
А. А. Коновченко

Ведущая организация: «Конструкторское бюро
машиностроения» г. Коломна.



Защита состоится « 26 » марта 2003 г. в 10.00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.141.11 в Московском Государственном
Техническом Университете им. Н. Э. Баумана по адресу:

г. Москва, 105005, 2-я Бауманская ул., 5.

Ваш отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью,
просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
Государственного Технического Университета им. Н. Э. Баумана.

Автореферат разослан «23» февраля 2003 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д.т.н., профессор

Власов И. Б.

Актуальность работы:

Совершенствование систем управления и стабилизации подвижных объектов в большой степени зависит от повышения точности и надежности измерителей параметров пространственного движения объекта, к которым относятся гироскопические приборы и системы. Вместе с тем в настоящее время развитие авиационной и ракетной техники требует для решения задач управления и стабилизации подвижных объектов создания миниатюрных, конструктивно простых приборов с малой массой, энергопотреблением и имеющих при этом невысокую стоимость.

Этим требованиям в значительной мере отвечают вибрационные гироскопы. По этой причине в последние годы в мире наблюдается значительный рост интереса в области разработки вибрационных гироскопов.

В классе вибрационных гироскопов выделяют подкласс роторных вибрационных гироскопов (РВГ), собственным движением в которых является вращательное движение чувствительного элемента. Приборы подобного класса предназначены для измерения переносной угловой скорости, информация о которой используется, например, для создания демпфирования в канале управления полетом носителя.

С точки зрения решения уже обозначенных задач современной авиационной и ракетной техники по построению миниатюрных, дешевых и надежных датчиков первичной информации среди роторных вибрационных гироскопов наиболее простой и надежной является схема одноканального двумерного измерителя, возможность построения которого впервые была обоснована А. И. Сучковым (Авт. свид. 108731 СССР).

Применение роторного вибрационного гироскопа на вращающемся носителе с одной парой рулей (например, на ракете класса «земля-воздух» переносного зенитного ракетного комплекса) реализует схему одноканального измерителя угловой скорости. При этом на вращающемся носителе есть возможность использовать скорость вращения носителя вокруг продольной оси в качестве собственной скорости вращения чувствительного элемента. Эта особенность роторных вибрационных гироскопов для вращающегося носителя приводит к существенному уменьшению габаритов и значительному упрощению конструкции и технологического процесса изготовления гироскопа, поскольку позволяет отказаться от двигателя ротора в приборе.

Существующие на сегодняшний день РВГ для вращающегося носителя имеют друг от друга некоторые отличия, однако, во многом они сходны и представляют собой плоский чувствительный элемент (например, в виде рамки) в одноосном подвесе, плоскость которого перпендикулярна строительной оси вращения носителя. Несмотря на то, что принцип действия по-

добных приборов не отличается от принципа действия РВГ, построенных по классическим схемам, теория работы РВГ для вращающегося носителя имеет существенные отличия от теории работы классических схем РВГ.

Во-первых, управление вращающимся носителем с одной парой рулей происходит в связанной с носителем системе координат. Для этого необходимо знать мгновенное значение угловой скорости носителя, измеренное прибором, что в отличие от классических схем РВГ, приводит к повышению требований к фазовым характеристикам выходного сигнала.

Во-вторых, малая величина скорости вращения носителя вокруг продольной оси, при которой величина кинетического момента не превышает $0,01 \text{ сНсм}$, и ее существенная нестабильность ($10 \div 20 \text{ об/с}$) создают значительные трудности при проектировании роторных вибрационных гироскопов для вращающегося носителя.

Проведенные исследования существующих приборов показали, что помимо несомненных достоинств, заключающихся в простоте, малых габаритах и массе и высокой надежности, прибор обладает существенными недостатками, которые непосредственно влияют на точность РВГ для вращающегося носителя. Теоретический анализ существующих схем подобных приборов позволил выявить причины появления этих недостатков, и их влияние на стабильность выходного сигнала прибора было доказано экспериментально.

Отличительной чертой эксплуатируемых на сегодняшний день приборов подобного класса является резонансный режим работы. При этом прямая зависимость амплитуды выходного сигнала от скорости вращения носителя вокруг продольной оси при съеме выходной информации по угловой скорости колебаний чувствительного элемента, применяемом в существующих схемах, в резонансном режиме работы определяет нестабильность масштабного коэффициента прибора на уровне нестабильности скорости вращения носителя ($\pm 30\%$).

Кроме того, в известных приборах, в основном, имеет место электромагнитное демпфирование, обусловленное наводящимися в рамке чувствительного элемента вихревыми токами, что в резонансном режиме не обеспечивает достаточной стабильности амплитуды выходного сигнала в широком диапазоне изменения температуры окружающей среды и вызывает погрешность по амплитуде в рабочем диапазоне температур на уровне десятков процентов.

Таким образом, нестабильность масштабного коэффициента существующих приборов при измерении постоянных угловых скоростей превышает величины $\pm 60\%$.

Повышение точности и надежности современных средств вооружения, остается приоритетным направлением развития оборонной промышленности. Совершенствование датчиков пространственного движения под-

вижных объектов, к которым относятся датчики угловой скорости для вращающихся носителей, на сегодняшний день является актуальной научно-технической задачей.

Диссертация по данной теме призвана существенно повысить качество разработок в области роторных вибрационных гироскопов для вращающегося носителя и направлена на улучшение точностных характеристик роторных вибрационных гироскопов, предназначенных для управления вращающимся носителем.

Целью диссертационной работы является разработка, теоретическое и экспериментальное исследования роторного вибрационного гироскопа для вращающегося носителя.

Научная новизна.

1. Проведен теоретический анализ возможных схем роторных вибрационных гироскопов для вращающегося носителя, на основе которого разработана новая схема прибора с отрицательной обратной связью (РВГ с ОС).
2. Проведено теоретическое исследование составленной математической модели РВГ с ОС.
3. Проведено теоретическое исследование погрешностей РВГ с ОС.
4. Развита применительно к схеме РВГ с ОС теория роторных вибрационных гироскопов для вращающегося носителя.
5. Развита теория роторного вибрационного гироскопа для вращающегося носителя, совершающего угловые и круговые колебания.
6. Разработана методика проектирования РВГ с ОС.
7. Предложена методика экспериментального исследования РВГ для вращающегося носителя.

Практическая ценность работы.

На основе приведенной методики проектирования разработана конструкция и созданы макет и опытная партия РВГ с ОС. Создано специальное оборудование для проведения экспериментальных исследований роторных вибрационных гироскопов для вращающегося носителя, которое может быть использовано и при исследованиях других приборов подобного класса. Экспериментально подтверждены теоретические исследования схемы РВГ с ОС.

Результаты работы и предложенные методики проектирования и экспериментального исследования РВГ с ОС могут быть использованы и используются при создании других приборов подобного класса, а также используются в учебном процессе на кафедре «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации».

Апробация результаты работы.

Основные теоретические положения и результаты экспериментальных исследований обсуждались на:

- научных семинарах кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации» МГТУ им. Н.Э. Баумана;
- заседании ученого совета МГТУ им. Н.Э.Баумана в докладе победителей конкурса НИР имени МГТУ (Москва, 2001);
- конференции по теории колебаний и управлению, посвященной 100-летию со дня рождения Б.В. Булгакова (Москва, 2000 г.); Всероссийской научно-технической конференции «Приборы и приборные системы» (Тула, 2001 г.); XIII конференции имени Н.Н. Острякова, (Санкт-Петербург, 2002 г.);

Разработанный прибор прошел полный цикл производственных испытаний в КБМ (г. Коломна), показал полное соответствие техническим требованиям, предъявляемым к приборам подобного класса на данном предприятии, получил положительное заключение и принят к внедрению. По результатам производственных испытаний из КБМ получен отчет.

Материалы диссертации изложены в 5 научно-технических отчетах по НИР и конкурсной работе «Создание серии чувствительных элементов для управления вращающимися объектами» на соискание премии НИР имени МГТУ (2001 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 2 статьи и тезисы доклада.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Текст изложен на 231 машинописной странице, включая 78 рисунков и 8 таблиц. Список литературы содержит наименования литературных источников.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Принцип построения схемы РВГ с ОС.
2. Математическая модель РВГ с ОС в виде дифференциального уравнения движения чувствительного элемента, передаточной функции и структурной схемы прибора.
3. Математическая модель погрешности РВГ с ОС.
4. Разработка методики проектирования РВГ с ОС.
5. Разработка оборудования для экспериментального исследования РВГ для вращающегося носителя в составе динамического стенда, имитатора вращения и комплекта программных средств для управления стендом и отображения результатов эксперимента на ПЭВМ.
6. Методика проведения и результаты экспериментальных исследований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности работы, рассмотрены особенности РВГ для вращающегося носителя, определены проблемы, возникающие при разработке приборов данного класса, показаны преимущества и недостатки известных на сегодняшний день приборов, сформулированы цель диссертационной работы и основные решаемые в ходе исследований задачи, указано, в чем состоит научная новизна и какова практическая ценность полученных результатов.

В первой главе определен характер изменения измеряемой прибором угловой скорости в реальных условиях эксплуатации, разработана новая схема РВГ с ОС и составлена математическая модель прибора в виде уравнения движения чувствительного элемента, передаточной функции и структурной схемы.

Изучение поведения одноканального вращающегося носителя относительно его центра масс в реальных условиях полета требует обеспечить работу РВГ для вращающегося носителя, как в режиме измерения постоянной угловой скорости, так и в режимах угловых и круговых колебаний. Для зенитных ракет характерными являются угловые колебания с амплитудой до 5° и частотой в диапазоне 2-10 Гц и круговые колебания с частотами, не превышающими величин $2+2,5$ Гц.

В результате проведенных исследований в направлении поиска путей увеличения стабильности амплитуды и фазы выходного сигнала определены способы достижения этой цели:

1) работа РВГ для вращающегося носителя должна осуществляться в резонансном режиме, который наиболее приемлем, поскольку предоставляет принципиальную возможность повышения чувствительности и возможность обеспечения независимости амплитуды угловых колебаний чувствительного элемента от нестабильной величины скорости вращения носителя;

2) крепление чувствительного элемента должно осуществляться в опорах свободного, а не упругого подвеса, что позволяет обеспечить стабильность резонансной настройки, даже при изменении собственной скорости вращения чувствительного элемента;

3) для минимизации влияния изменения температуры окружающей среды на демпфирование в гироскопе, а, следовательно, на амплитуду и фазу выходного сигнала, демпфирование в приборе должно осуществляться посредством отрицательной обратной связи по угловой скорости колебаний чувствительного элемента с датчиком момента магнитоэлектрического типа и с усилителем тока в цепи обратной связи.

4) для исключения влияния нестабильной величины скорости вращения носителя вокруг продольной оси на масштабный коэффициент прибора необходимо снимать выходной сигнал по угловому отклонению чувстви-

тельного элемента. В этом случае амплитуда выходного сигнала гироскопа в резонансном режиме не зависит от скорости вращения носителя. Использование для этих целей датчиков угла приводит к дополнительным усложнениям конструкции и значительным температурным погрешностям. По этой причине для съема выходной информации предложен съем сигнала по угловой скорости колебаний чувствительного элемента с помощью магнитоэлектрического датчика с последующим интегрированием снимаемого сигнала.

Подводя итоги, сделано заключение, что схема роторного вибрационного гироскопа для вращающегося носителя, позволяющая обеспечить требуемый уровень стабильности выходного сигнала, должна иметь следующий вид – см. рис.1.

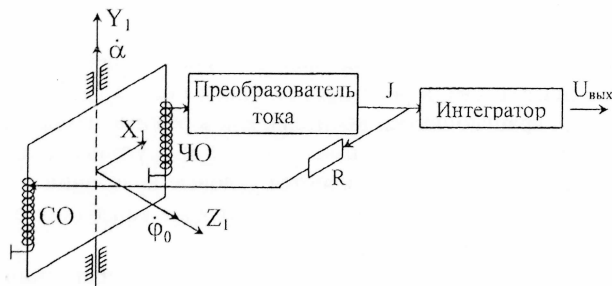


Рис.1. РВГ с демпфированием посредством обратной связи и с интегратором на выходе

Плоский неэлектропроводящий чувствительный элемент гироскопа (например, в виде рамки) должен крепиться в одноосном свободном подвесе таким образом, чтобы его плоскость была перпендикулярна строительной оси вращения носителя. На чувствительном элементе необходимо разместить две электрические обмотки, поместив их в однородное магнитное поле. Одна из обмоток – чувствительная, предназначена для измерения угловой скорости колебаний чувствительного элемента, другая – силовая, обеспечивает моментное воздействие, пропорциональное угловой скорости колебаний. Для этого обмотки необходимо соединить между собой с помощью усилителя-преобразователя тока. Сигнал с чувствительной обмотки подается на интегратор, амплитуда выходного напряжения которого будет пропорциональна углу колебаний рамки.

Отсутствие торсионного подвеса в приборе позволяет даже при нестабильной величине скорости вращения носителя обеспечить стабильность резонансной настройки: $C_1 - A_1 = B_1$, где C_1 , A_1 , B_1 – соответственно моменты инерции чувствительного элемента вокруг оси собственного вращения, оси чувствительности и оси колебаний. Однако подобное соотношение мо-

ментов инерции на практике не реализуемо, поскольку для этого необходима нулевая толщина чувствительного элемента, поэтому резонансная настройка в приборе может быть осуществлена на уровне $C_1 - A_1 = (0,9 \pm 0,95)B_1$. В результате прибор работает в зарезонансной зоне в непосредственной близости к резонансу

В ходе теоретического исследования рассмотрены вопросы устойчивости прибора с учетом влияния взаимной индукции силовой и чувствительной обмоток, определены способы уменьшения этого влияния.

Представлен вариант электрической схемы обратной связи РВГ с ОС, на примере которого показаны факторы, определяющие стабильность демпфирования в приборе.

Во второй главе рассмотрено поведение гироскопа, показан полный вид выходного сигнала и дана оценка точностным характеристикам прибора при движении носителя с постоянной угловой скоростью вокруг поперечной оси. На основе проведенных в главе исследований определена окончательная схема обратной связи по скорости, обеспечивающая большую точность измерения угловой скорости носителя, указаны возможные способы компенсации влияния нестабильности скорости вращения носителя на фазовый сдвиг прибора.

В установившемся режиме работы прибора амплитуда и фаза выходного сигнала сложным образом зависят от скорости вращения носителя вокруг продольной оси. Зависимость амплитуды выходного сигнала от скорости вращения носителя определяется точностью резонансной настройки.

При идеальном интеграторе на выходе прибора, с учетом идеальной компенсации влияния взаимной индукции или пренебрежения подобным влиянием в силу его малости на практике и при работе прибора вблизи резонанса амплитуда выходного сигнала не зависит от скорости вращения носителя вокруг продольной оси. В этом случае, который очень близок к реальному, поскольку все сделанные допущения правомочны для выбранного режима работы прибора, стабильность выходного сигнала прибора определяется только стабильностью геометрических размеров чувствительного элемента, коэффициентами передачи силовой обмотки датчика момента, усилителя тока и параметрами интегратора. Стабильность указанных параметров измеряется долями процента, что позволяет получить достаточно высокую точность измерения угловой скорости носителя.

Зависимость фазы выходного сигнала от скорости вращения носителя вокруг продольной оси предлагается уменьшить путем введения дополнительного корректирующего звена с малой постоянной времени

Введение указанного корректирующего звена будет создавать дополнительную зависимость амплитуды выходного сигнала от скорости вращения носителя, которая противоположна по знаку влиянию неточности резонансной настройки. Таким образом, постоянную времени корректирующего

звена необходимо выбирать как компромисс между точностью компенсации фазовых погрешностей и малыми погрешностями амплитуды.

В третьей главе показано полное решение уравнения движения чувствительного элемента при движении носителя с переменной угловой скоростью вокруг поперечной оси, получены полные выражения для амплитуды и фазы выходного сигнала при наличии угловых и круговых колебаний носителя. Проведено исследование точности измерения прибором скорости угловых и круговых колебаний носителя и влияния на нее параметров схемы прибора.

Исследовать влияние угловых колебаний на точность измерения угловой скорости можно как во вращающейся системе координат, так и в невращающейся. Оба эти варианта имеют свои преимущества и недостатки.

Для исследования точностных характеристик прибора во вращающейся системе координат необходимо перевести гармоническую угловую скорость носителя из невращающейся во вращающуюся систему координат, т.е. определить ее проекцию на ось чувствительности гироскопа, в результате чего она так же, как и выходной сигнал прибора, будет иметь амплитудно-модулированный вид. Сравнение двух амплитудно-модулированных сигналов позволит дать оценку точности прибора.

При проведении исследования точности измерения скорости угловых колебаний носителя в невращающейся системе координат необходимо перевести выходной сигнал прибора из вращающейся системы координат в невращающуюся, что в результате позволит сравнить две гармонически меняющиеся величины: одна - входная измеряемая угловая скорость, другая - момент, создаваемый рулями носителя по сигналу гироскопа в невращающейся системе координат в предположении идеальности канала управления носителя. В этом случае с учетом сделанных обозначений и допущений судить о точности прибора можно по величине амплитуды момента и по величине нестабильности фазового сдвига.

Исследование точности прибора в невращающейся системе координат более простой способ, поскольку сводится к исследованию и сравнению двух гармонических сигналов, т.е. к исследованию их амплитудных и фазовых характеристик. Однако он обладает рядом недостатков - это невозможность практического подтверждения теоретических расчетов, трудности в анализе причин возникновения фазовых погрешностей, невозможность исключения из рассмотрения методических погрешностей использования вращения носителя в качестве собственного вращения чувствительного элемента. Кроме того, в подобных приборах необходимо исследовать сигнал именно в связанной с носителем системе координат, поскольку стабильность амплитуды и фазы именно этого сигнала необходимо обеспечить.

Разрешить эти проблемы можно, исследуя точность прибора во вра-

щающейся системе координат. Сложность исследования точности измерения переменной угловой скорости заключается в близости частот собственного вращения чувствительного элемента и измеряемой угловой скорости (частота угловых колебаний достигает половины величины частоты вращения носителя).

Выходной сигнал прибора во вращающейся системе координат, как и внешнее воздействие на чувствительный элемент в случае гармонической угловой скорости представляет собой сумму двух гармоник с частотами, равными сумме и разности обозначенных ранее частот. Для того чтобы исключить из рассмотрения возможные методические погрешности, вносимые самой модуляцией измеряемой угловой скорости вращения носителя, изучение точности измерения прибором гармонически изменяющейся угловой скорости проводится, соотнося модулированный выходной сигнал прибора с модулированным входным воздействием на чувствительный элемент в связанной с носителем системе координат.

Фаза и амплитуда выходного сигнала зависят от времени, поэтому исследовать влияние частоты вращения носителя вокруг продольной оси непосредственно на эти величины невозможно. По этой причине предлагается оценивать точность измерения гармонической угловой скорости сравнением амплитуд и фаз огибающих выходного сигнала и входного воздействия в связанной системе координат, а также их фаз на несущей частоте в моменты максимума огибающей, когда полезный сигнал максимален.

В главе проведены теоретические исследования влияния частоты вращения носителя на выходной сигнал, как в невращающейся системе координат, так и по предложенной методике в связанной с носителем системе координат. Полученные одинаковые результаты позволили сделать предварительный вывод о верности предложенной методики.

Влияние частоты круговых колебаний носителя на точность измерения угловой скорости представляется зависимостью выходного сигнала прибора от входного воздействия на чувствительный элемент.

На основе проведенных теоретических исследований поведения гироскопа при наличии колебаний носителя сделаны следующие выводы:

1. Точность измерения прибором входной гармонической угловой скорости уступает точности измерения постоянной угловой скорости.
2. Амплитудная и фазовая погрешности увеличиваются с ростом частоты гармонической измеряемой угловой скорости.
3. При движении носителя с переменной измеряемой угловой скоростью увеличивается как амплитудная, так и фазовая зависимости прибора от нестабильной величины скорости вращения носителя вокруг продольной оси даже при правильном выборе параметров корректирующего звена.
4. Угловые и круговые колебания носителя приводят к появлению дополнительной погрешности, обусловленной влиянием угловых ускорений.

5. Оценить влияние частоты угловых колебаний носителя на точность гироскопа можно тремя частотными зависимостями, характеризующими относительное изменение параметров выходного сигнала в сравнении с параметрами входного воздействия на чувствительный элемент в зависимости от частоты угловых колебаний.
6. По сравнению с существующими приборами датчиков угловой скорости для вращающегося носителя РВГ с ОС обладает лучшими точностными характеристиками при измерении гармонической угловой скорости, поскольку влияние скорости вращения носителя вокруг продольной оси на выходной сигнал РВГ с ОС значительно меньше, чем в существующих приборах.

В четвертой главе рассматриваются основные инструментальные и эксплуатационные погрешности роторных вибрационных гироскопов для вращающегося носителя как характерные для всех видов роторных вибрационных гироскопов, так и обусловленные особенностями применения роторного вибрационного гироскопа на вращающемся носителе.

В соответствии с предварительным ранжированием погрешностей РВГ для вращающегося носителя определены четыре основных фактора, вызывающих гармонический выходной сигнал на полезной частоте.

1) Небаланс чувствительного элемента.

Погрешности из-за наличия небаланса чувствительного элемента возникают при постоянных поперечных перегрузках, а также при гармонических продольных перегрузках на одинарной и двойной частоте вращения носителя. Влияние небаланса сказывается только на амплитуде выходного сигнала, и поскольку амплитуда момента небаланса не зависит от измеряемой угловой скорости, с ее увеличением влияние небаланса уменьшается.

2) Угловая и круговая вибрации на двойной частоте вращения носителя.

Погрешности гироскопа, возникающие при угловой и круговой вибрациях на двойной частоте вращения носителя, определяются точностью резонансной настройки. При работе прибора в резонансе угловая вибрация на двойной частоте собственного вращения чувствительного элемента не вызывает погрешности прибора. Погрешность носит гармонический характер и при работе прибора вблизи резонанса ее изменение происходит в противофазе полезному сигналу.

3) Неточность установки прибора на носителе.

Отдельно рассматривается случай отклонения оси вращения носителя от оси, перпендикулярной плоскости чувствительности прибора, который является частным случаем круговой вибрации, когда частота круговой вибрации равна частоте собственного вращения чувствительного элемента. В этом случае чувствительный элемент отклоняется на постоянный угол, что обусловлено наличием центробежных сил, стремящихся выставить плос-

кость чувствительного элемента перпендикулярно вектору собственного вращения. Это обстоятельство требует обеспечения в приборе углов прокатки чувствительного элемента, превышающих возможную величину не точности установки прибора на носителе.

4) Температурная погрешность.

Влияние температуры окружающей среды на точность прибора в основном определяется температурной нестабильностью индукции в зазоре магнитной системы и температурной нестабильностью элементов электронной части прибора. По этой причине величины температурных погрешностей не велики, что подтверждено проведенными расчетами.

В пятой главе приведены методика проектирования РВГ с ОС, расчет параметров макета прибора, а также описание разработанной экспериментальной установки для снятия выходных и амплитудно-частотных характеристик прибора, результаты экспериментальных исследований, сравнение результатов эксперимента с теоретическими выводами и их подтверждение.

В ходе проведенных исследований в соответствии с техническими требованиями и условиями эксплуатации был разработан и изготовлен макет роторного вибрационного гироскопа для вращающегося носителя с отрицательной обратной связью по скорости, на основании которого создана партия из пяти приборов – см. рис. 2.



Рис. 2. РВГ с ОС

Технические требования на разработку роторного вибрационного гироскопа для вращающегося носителя:

- | | |
|----------------------------------|---|
| 1. Диапазон измеряемых скоростей | - 300 град/с, |
| 2. Порог чувствительности | - 1,5 град/с, |
| 3. Масштабный коэффициент (МК) | - 30 мВ/(град/с), |
| 4. Стабильность МК | - 8% от диапазона (во 2-ой половине диапазона), |
| 5. Нулевой сигнал | - 0,6 град/с, |
| 6. Скорость вращения | - 10 - 20 об/с, |
| 7. Масса (без электроники) | - 40 г, |
| 8. Габаритные размеры | - Ф30 x 15 мм. |

Условия эксплуатации:

- | | |
|---|----------------------------|
| 1. Линейные ускорения произвольной ориентации | - 10 g, |
| 2. Линейные ускорения по оси вращения | - 75 g, |
| 3. Удар в форме синусоиды длительностью 0,5 периода | - 150 g, 6 мс, |
| 4. Случайная вибрация произвольной ориентации | - 5 g, $f=20-2000$ Гц, |
| 5. Температура окружающей среды | - $(-40 - +75)^{\circ}$ С. |

Чувствительным элементом датчика является рамка 1 – см. рис.3. Конструкция рамки бескаркасного типа состоит из чувствительной и силовой обмоток. Для обеспечения большей жесткости рамки по оси центров в

нее вклеен стержень 3 с балансировочными винтами 4.

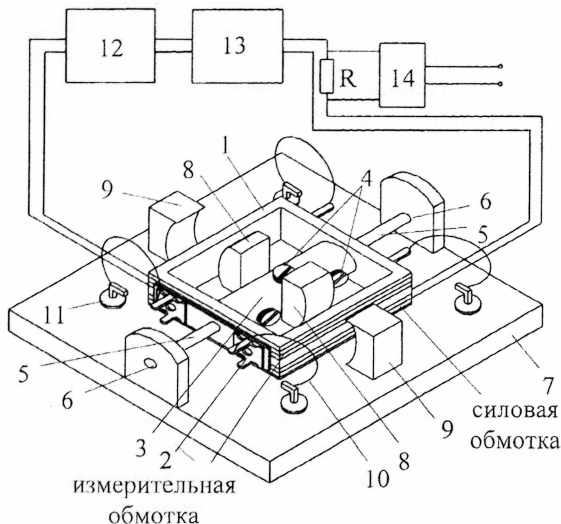


Рис.3 Кинематическая схема роторного вибрационного гироскопа для вращающегося носителя с обратной связью по скорости

На боковых сторонах рамки приклеены четыре держателя 2 по числу выводов чувствительной и силовой обмоток и две полуоси 5, на которых рамка подвешивается в центровых винтах 6 с корундовыми подпятниками в зазорах магнитной системы. После сборки рамки она подвергается статической балансировке за счет перемещения балансировочных винтов 4. Применение балансировочных винтов позволяет избежать нанесения припоя или клея на рамку и провести более точную балансировку в общей сборке по выходному сигналу датчика.

Съем сигнала в приборе осуществляется посредством магнитной системы, состоящей из основания 7 и магнитов 8 и 9, образующих рабочие зазоры. Магниты из сплава неодим-железо-бор ($\text{Nd}_{15}\text{Fe}_{77}\text{B}_8$) приклеены к стойкам основания. Основание служит магнитопроводом.

Передача сигнала с чувствительной обмотки на корпус прибора и с корпуса прибора на силовую обмотку осуществляется с помощью четырех упругих растяжек 10, которые припаяны к держателям 2 и контактам 11 на корпусе прибора.

Для обеспечения оптимальных условий работы подвеса рамки и защиты рабочих зазоров магнитной системы внутренняя полость герметизирована путем завальцовки кожуха с фторопластовой прокладкой.

Необходимая величина демпфирования в приборе осуществляется по-

средством обратной связи с усилителем тока 13. Цепь обратной связи состоит из чувствительной обмотки, предварительного усилителя 12, усилителя тока 13 и силовой обмотки. Наводимый в чувствительной обмотке при прокатке рамки в зазорах магнитной системы выходной сигнал после усиления в предварительном усилителе и усилителе тока поступает на силовую обмотку рамки датчика, что обеспечивает необходимый коэффициент демпфирования. Съем сигнала осуществляется путем интегрирования величины тока в обмотке датчика момента в интеграторе 14.

Для проведения экспериментальных исследований было разработано специальное оборудование в составе динамического стенда, имитатора вращения и пакета программных средств – см. рис. 4.

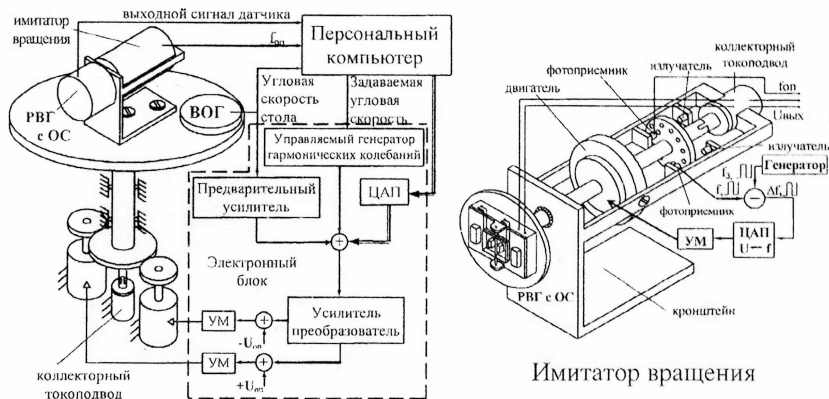


Рис.4. Кинематическая схема экспериментальной установки

Экспериментальная установка представляет собой стенд, на базе одноосного индикаторного гиросtabilизатора с волоконно-оптическим гироскопом (ВОГ) в качестве чувствительного элемента. Стенд позволяет осуществлять как постоянное, так и колебательное с регулируемой частотой и амплитудой угловой скорости движение стола. На столе стенда установлено приспособление, имитирующее вращения носителя вокруг продольной оси (имитатор вращения), на котором крепится исследуемый РВГ с ОС. Сигнал с исследуемого РВГ с ОС и информация об угловой скорости стола, определяемая более точным датчиком скорости (ВОГом), поступают в персональную ЭВМ, на монитор которой выводится выходной сигнал РВГ с ОС.

Технические характеристики имитатора вращения:

1. Диапазон изменения скоростей вращения 12+22 об/с;
2. Максимальное время регулирования 10 с;
3. Точность поддержания заданной угловой скорости 2,5%;

4. Масса (с кронштейном для крепления на стенд) _____ 3,7 кг;
5. Габаритные размеры (с кронштейном) _____ 150×150×220 мм;
6. Источник питания _____ 45 В; 1,5 А;
7. Условия эксплуатации _____ лабораторные.

Технические характеристики стенда для динамических испытаний:

1. Диапазон измеряемых скоростей _____ ± 300 град/с;
2. Максимальная частота качки _____ 5 Гц;
3. Максимальная угловая скорость качки на частоте 5 Гц _____ 50 град/с;
4. Форма колебаний стола _____ синусоидальная;
5. Точность измерения угловой скорости стола _____ 1,5%;
6. Масса _____ 40 кг;
7. Габаритные размеры _____ $\varnothing 450 \times 245$ мм;
8. Источник питания _____ 2×40 В; 10 А;
9. Условия эксплуатации _____ лабораторные.

Фотографии стенда с установленным на нем имитатором вращения и испытуемым прибором и рабочего места приводятся на рис. 5 и 6.

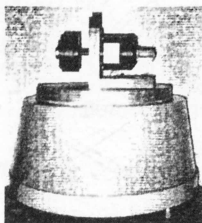


Рис. 5. Динамический стенд

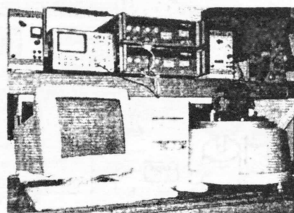


Рис. 6. Рабочее место

Вид выходного сигнала на экране персональной ЭВМ при измерении постоянной и гармонической угловых скоростей представлен на рис. 7.

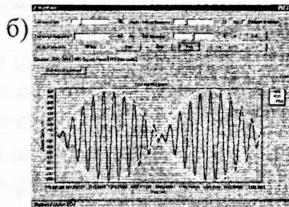
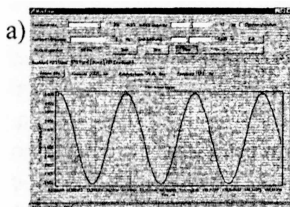


Рис. 7. Вид выходного сигнала РВГ с ОС на экране компьютера:

- а) при измерении постоянной угловой скорости;
- б) при гармонической угловой скорости

Для проведения полного спектра испытаний, включающих в себя проверку температурной стабильности прибора, использовалась термокамера на жидком азоте. Термокамера в диссертации не разрабатывалась.

Представленные в главе результаты экспериментальных исследований пяти макетов РВГ с ОС подтвердили разработанные теоретические положения и расчетные соотношения.

Достоверность проведенных в работе теоретических и экспериментальных исследований подтверждена производственными испытаниями, проведенными в КБМ (г. Коломна).

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы:

1. Проведен сравнительный анализ различных схем построения роторных вибрационных гироскопов для вращающегося носителя. В результате анализа разработана новая схема роторного вибрационного гироскопа для вращающегося носителя с отрицательной обратной связью.
2. Составлена математическая модель роторного вибрационного гироскопа для вращающегося носителя с отрицательной обратной связью по скорости в виде дифференциального уравнения движения чувствительного элемента, передаточной функции прибора и его структурной схемы. Найдено аналитическое решение для установившегося режима вынужденных колебаний чувствительного элемента как для случая постоянной, так и для случая переменной измеряемой угловой скорости.
3. Составлена математическая модель погрешностей РВГ с ОС.
4. Развита применительно к схеме РВГ с ОС по скорости теория роторных вибрационных гироскопов для вращающегося носителя.
5. Разработаны элементы теории поведения роторного вибрационного гироскопа для вращающегося носителя, совершающего угловые и круговые колебания. Определены основные закономерности, связывающие выходные параметры гироскопа с параметрами измеряемой угловой скорости. Предложена методика оценки влияния частоты угловых и круговых колебаний на точность измерения угловой скорости носителя.
6. Разработана методика проектирования РВГ с ОС. Обоснована конструктивная схема РВГ с ОС в виде рамки в одноосном свободном подвесе с обратной связью по скорости, состоящей из магнитоэлектрического датчика угловой скорости, усилителя преобразователя и магнитоэлектрического датчика момента.
7. Предложена методика экспериментального определения выходных характеристик при измерении переменной угловой скорости.
8. Разработана и создана экспериментальная установка для определения выходной и амплитудно-частотной характеристик РВГ с ОС на базе компьютеризированного одноосного индикаторного гиростабилизатора с имитатором вращения.

9. Разработана, создана и испытана в лабораториях МГТУ им. Н.Э.Баумана и в КБМ (г. Коломна) партия из пяти РВГ с ОС. Экспериментально измеренные характеристики и результаты производственных испытаний подтвердили теоретические исследования схемы РВГ с ОС.

В работе показано теоретически и подтверждено экспериментально, что применение в качестве демпфирующего воздействия на чувствительный элемент роторного вибрационного гироскопа для вращающегося носителя момента отрицательной обратной связи по скорости совместно со съемом выходной информации по угловому отклонению чувствительного элемента путем интегрирования снимаемого с магнитоэлектрического датчика угловой скорости сигнала позволяет на порядок повысить точность измерения как постоянной, так и переменной угловых скоростей.

Полученные в диссертации результаты теоретических исследований и предложенные методики проектирования и экспериментального исследования роторных вибрационных гироскопов, предназначенных для применения на вращающемся носителе, могут быть использованы при дальнейших разработках в этой области и создании других приборов данного класса.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Датчик угловой скорости для вращающегося носителя / С. Ф. Коновалов, А. В. Кулешов, М. Н. Лютый, В. П. Подчерзцев, В. В. Фатеев // Труды конференции по теории колебаний и управлению, посвященной 100-летию со дня рождения Б. В. Булгакова. - Москва, 2000: - С. 86 – 87.
2. Коновалов С. Ф., Кулешов А. В., Фролов Е. Н. Микромеханический вибрационный датчик угловой скорости для вращающегося носителя // Приборы и приборные системы: Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции. - Тула, 2001. – С. 25 – 30.
3. Фатеев В. В., Кулешов А. В., Носов Н. А. Поведение роторного вибрационного гироскопа для вращающегося носителя при наличии угловых колебаний // Вестник МГТУ. Приборостроение. – 2002. - № 3. – С. 81 – 94.

Подписано к печати 10.02.2003 г. Зак. 110т. Объем 1.0 п. л. Тир. 100 экз.
Типография МГТУ им. Н. Э. Баумана