

Антонова Мария Вячеславовна

МОДЕЛЬ ПОГРЕШНОСТЕЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

05.11.03 – Приборы навигации

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized, cursive script.

Москва – 2014

Научный руководитель:

Матвеев Валерий Александрович,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Редькин Сергей Петрович,
доктор технических наук,
ЗАО «Инерциальные технологии
«Технокомплекса»

Колбас Юрий Юрьевич,
кандидат технических наук,
ОАО «НИИ «Полус» им.
М.Ф. Стельмаха»

Ведущая организация:

ОАО «Раменское приборостроительное
конструкторское бюро», Московская
область

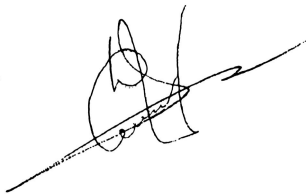
Защита диссертации состоится 16 апреля 2014 г. в 10 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д212.141.19 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, учёному секретарю диссертационного совета Д212.141.19.

Автореферат разослан «03» марта 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
к.ф.-м.н.



Семере

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



2045418

Антонова М.В. Модель погр

3009

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации. Бесплатформенные командно-измерительные приборы перспективных систем управления для ракетно-космической техники (РКТ) строятся на базе инерциальных чувствительных элементов нового поколения, в первую очередь, на волоконно-оптических гироскопах (ВОГ).

Одной из основных задач на этапе разработки ВОГ является создание математической модели погрешностей (ММП) гироскопа, которая позволяет учесть систематические составляющие ошибок в условиях конкретных применений.

В основе ММП традиционных механических гироскопов, особенно в условиях их применения в ракетно-космической и в авиационной технике, лежит зависимость скорости ухода от перегрузки. Кроме того, ММП дополняется зависимостями её коэффициентов от температуры окружающей среды, напряженности магнитного поля и т.п. Что касается ВОГ, то помимо характерных для этого типа гироскопов источников погрешностей (шумы интенсивности источника излучения, электрооптический эффект Керра, дробовые шумы фотоприёмника и др.), в отечественной и зарубежной литературе имеются сведения о влиянии на выходной сигнал температуры и магнитных полей. В публикациях специалистов фирм «Оптолинк», «Физоптика», «ПНППК», ЦНИИ «Электроприбор», занимающихся разработкой ВОГ, затрагиваются проблемы снижения температурной и магнитной чувствительности ВОГ. При этом представленные в том или ином виде модели погрешностей ВОГ содержат зависимости скорости ухода только от этих факторов.

Информация о влиянии перегрузок на выходной сигнал ВОГ в отечественных публикациях отсутствует, в то время как в зарубежной литературе содержатся сведения о заметной чувствительности ВОГ к перегрузкам. Так, D.H. Titterton и J.L. Weston из Американского института аэронавтики и астронавтики приводят сводку точностных характеристик ВОГ и указывают на скорость ухода, пропорциональную перегрузке, порядка $1 (^{\circ}/ч)/g$, и пропорциональную квадрату перегрузки, порядка $0,1 (^{\circ}/ч)/g^2$. В стандарте США IEEE Std 952-1997, регламентирующем перечень технических характеристик и методы испытаний ВОГ, чувствительность к линейным перегрузкам среди обязательных паспортизируемых параметров не значится, но указывается в качестве справочной характеристики в подразделе «Чувствительность к другим внешним факторам» для конкретных применений. При этом не описываются механизмы влияния перегрузки, и, тем более, не представляется модель таких погрешностей в аналитическом виде. Для применения ВОГ в системах управления средств выведения космических аппаратов и других объектов, испытывающих большие перегрузки, необходимо изучить влияние линейных ускорений на выходной сигнал ВОГ. Таким образом, создание ММП ВОГ, учитывающей влияние этого возмущающего фактора, является актуальной научно-технической задачей.

Цель диссертации: на основе исследований влияния перегрузок, внешних магнитных и тепловых полей на скорость ухода ВОГ разработать математическую модель погрешностей ВОГ, использование которой позволит осуществлять алгоритмическую компенсацию составляющих модели с учётом информации от акселерометров, магнитометров и термодатчиков, а также наметить основные конструктивные решения, способные ослабить влияние указанных факторов.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие задачи:

- проведён расчёт напряжений и деформаций типовой конструкции ВОГ при воздействии перегрузок;
- разработана тепловая модель ВОГ, позволяющая получить параметры поля температур элементов конструкции ВОГ;
- разработана ММП, учитывающая влияние на скорость ухода ВОГ линейных перегрузок, внешних магнитных полей, температуры и скорости её изменения;
- разработана методика экспериментального определения параметров ММП;
- проведена проверка адекватности ММП: при действии единичной перегрузки – на основе результатов многопозиционных испытаний ВОГ; при действии многократных перегрузок – на основе результатов испытаний на низкочастотной вибрации с амплитудами виброускорений до 10 g;
- разработана система конструкторско-технологических мер по снижению влияния внешних воздействий на выходной сигнал ВОГ.

Объектом исследования являются ВОГ с интегрально-оптическим фазовым модулятором и эрбиевым волоконным суперлюминисцентным источником излучения.

Предметом исследования является зависимость скорости ухода ВОГ от условий его эксплуатации.

Методы исследований. В диссертации использованы методы прикладной теории гироскопов, теории оптических систем, теории обработки сигналов, методы теории упругости, методы конечно-элементного анализа.

Научная новизна

1. Экспериментально доказана чувствительность выходного сигнала ВОГ к линейной перегрузке на уровне, существенном для применений в РКТ.
2. Зависимость скорости ухода ВОГ от проекций перегрузки на оси ВОГ представлена в аналитической форме.
3. Установлен и экспериментально подтвержден факт наличия в ММП ВОГ нехарактерных для ММП традиционных механических гироскопов двух нелинейных составляющих, которые зависят от модуля проекции ускорения на плоскость, перпендикулярную оси чувствительности (ОЧ).
4. Дано объяснение одной из причин виброчувствительности ВОГ – возникновение при действии линейной вибрации под углом к ОЧ ВОГ

постоянной составляющей скорости ухода, сопровождающейся составляющей на удвоенной частоте вибрации, вызвано наличием в ММП специфических нелинейных составляющих, пропорциональных модулю ускорения, перпендикулярного ОЧ.

Практическая ценность работы. Использование ММП, позволяющей на основе информации от акселерометров, магнитометров и термодатчиков провести алгоритмическую компенсацию систематических составляющих ошибок, уменьшает погрешность определения входной угловой скорости в несколько раз. Предложенное для определённых типов ВОГ упрощение ММП заметно сокращает трудозатраты на проведение их калибровки.

Достоверность полученных результатов следует из хорошего соответствия аналитических расчётов, результатов численного моделирования и результатов экспериментов.

Реализация и внедрение результатов. Результаты, полученные в диссертации, использованы в ФГУП «ЦЭНКИ» - «НИИ ГИМ им. академика В.И. Кузнецова» при создании волоконно-оптических гироскопов КИНД11-240, КИНД11-221, бесплатформенного инерциального блока КИНД34-059, что подтверждено актом внедрения.

Основные результаты и положения, выносимые на защиту:

1. На основе типовой конструкции ВОГ с учётом характеристик материалов её элементов построена расчетная модель ВОГ, позволяющая оценить параметры поля температур и напряжённо-деформированного состояния элементов ВОГ при характерных условиях его эксплуатации как факторы, влияющие на точностные характеристики гироскопа.

2. Разработана ММП ВОГ, учитывающая влияние на скорость ухода ВОГ линейных перегрузок, внешних магнитных полей, температуры и скорости её изменения.

3. Алгоритмическая компенсация выходного сигнала ВОГ с использованием разработанной ММП снижает погрешность определения входной угловой скорости в несколько раз.

4. Наличие в ММП ВОГ нелинейных составляющих, зависящих от модуля проекции ускорения на плоскость, перпендикулярную оси чувствительности, позволяет адекватно описать выходной сигнал ВОГ при действии на него низкочастотной вибрации с амплитудой до 10 г.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на XVIII международной конференции по интегрированным навигационным системам, г. Санкт-Петербург, 2011 г., и 4 всероссийских научно-технических конференциях: II Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники», г. Самара, 2011 г.; Первом Всероссийском космическом инновационном конвенте, г. Углергск, 2011 г.; II научно-технической конференции «Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами», г. Москва, 2012 г.; Всероссийской конференции молодых специалистов, учёных

и студентов памяти Главного конструктора, академика АН СССР В.И. Кузнецова, г. Москва, 2013 г.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в пяти статьях, из которых три – в журналах, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и двух приложений. Работа изложена на 130 листах машинописного текста, содержит 49 рисунков и 31 таблицу. Список литературы содержит 61 библиографическую ссылку.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы исследований, формулируются цель, конкретные задачи и направления исследований, научная новизна, практическая значимость исследований, основные результаты, выносимые на защиту, а также приводятся сведения по публикациям по данной тематике в отечественных и иностранных источниках.

В первой главе приводится модель погрешностей ВОГ, построенная исходя из общих соображений о принципе действия, структуре и конструкции прибора, которые сводятся к следующим положениям:

- первоисточником влияния массовых сил на показания ВОГ могут быть только вызываемые ими деформации составных частей ВОГ и, как следствие, напряжения в волокне чувствительной катушки волоконного кольцевого интерферометра и в модуляторе и обусловленные ими оптические эффекты;

- в силу круговой симметрии катушки можно ожидать заметных различий в деформации катушки под влиянием перегрузки вдоль оси катушки (осевая перегрузка) и в плоскости, ей перпендикулярной (радиальная перегрузка), но направление линии действия радиальной перегрузки на величину вызываемой ею деформации катушки (типа овальности) при ее идеальной круговой симметрии сказываться не должно;

- диаметрально расположение модулятора на торце катушки и наличие в катушке зоны входа/выхода оптоволокну в какой-то мере нарушают круговую симметрию ВОГ, что не позволяет отрицать полностью возможность зависимости показаний прибора от направления радиальной перегрузки;

- необходимо учесть эффект взаимовлияния деформаций катушки, вызванных осевой и радиальной составляющими «косой» перегрузки, т.е. появление смещения нуля ВОГ, пропорционального произведению этих проекций перегрузки, подобного скорости ухода механического роторного гироскопа из-за неравножесткости подвеса ротора.

Вид модели:

$$\Delta\omega = \omega_r \cdot a_x / g + \omega_r \cdot a_r / g + \omega_\theta \cdot a_y / g + \omega_z \cdot a_z / g + 2\omega_{rz} \cdot a_x \cdot a_r / g^2 + 2\omega_{ry} \cdot a_x \cdot a_y / g^2 + 2\omega_{rz} \cdot a_x \cdot a_z / g^2 - \Delta K \cdot N / t_{\text{инт}}, \quad (1)$$

где $\Delta\omega$ – скорость ухода;

a_x, a_y, a_z – проекции кажущегося ускорения корпуса ВОГ на его оси;

$a_r = \sqrt{a_y^2 + a_z^2}$ – радиальная составляющая кажущегося ускорения;

ω_r – составляющая скорости ухода, не зависящая от ускорения (перегрузки);

ω_p – составляющая скорости ухода, пропорциональная ускорению по ОЧ (по оси ОХ) при единичной перегрузке;

ω_e – составляющая скорости ухода, пропорциональная модулю ускорения в плоскости, перпендикулярной ОЧ при единичной перегрузке;

ω_y, ω_z – составляющие скорости ухода, пропорциональные ускорениям по осям ОУ и ОZ, соответственно при единичной перегрузке;

ω_{π} – составляющая скорости ухода, пропорциональная произведению ускорений вдоль и перпендикулярно ОЧ, при единичной перегрузке, действующей под углом 45° к оси ОЧ;

ω_x, ω_{π} – составляющие скорости ухода, пропорциональные произведению ускорений по осям ОХ и ОУ, ОХ и ОZ, соответственно при единичной перегрузке, действующей под углом 45° к оси ОХ в плоскости ОХУ, ОХZ;

g – ускорение свободного падения;

N – приращение выходного кода ВОГ за такт опроса;

ΔK – отклонение масштабного коэффициента от паспортного значения;

$t_{\text{инт}}$ – интервал интегрирования входной угловой скорости, равный такту опроса.

В модель также добавляются зависимости величины составляющей скорости ухода ω_r от напряжённости магнитного поля по осям ВОГ, отклонений температуры ВОГ от его температуры в процессе проведения калибровочных испытаний и от скорости изменения температуры ВОГ.

Рассматриваются объекты исследования: приборы ВОГ типа КИНД11-221 (далее ВОГ-1), КИНД11-240 (далее ВОГ-2), КИНД11-222 (далее ВОГ-3), разработанные в филиале ФГУП «ЦЭНКИ» – «НИИ ПМ», их основные параметры и конструктивные особенности. Приводятся параметры испытательной аппаратуры и электроизмерительных приборов.

Во второй главе рассмотрены основные механизмы влияния температуры на ВОГ. На основании выражения для скорости ухода (2) рассматриваются способы уменьшения эффекта Шьюппа.

$$\Delta\Omega(t) = \frac{n_0}{LD} \int_0^L \Delta n(z, t) (L - 2z) dz, \quad (2)$$

где Δn – малая поправка к основному показателю преломления n_0 , постоянному вдоль световода, меняющаяся вдоль световода в зависимости от координаты z и момента времени t ; L – длина волоконного контура; D – диаметр чувствительной катушки.

Приводится тепловая модель ВОГ, разработанная на основе эскизов ВОГ-1 и примененных материалов с использованием программы SolidWorks, на основе следующих методических положений:

- геометрические параметры элементов конструкции тепловой модели соответствуют номинальным размерам элементов;
- геометрическое расположение элементов, порядок сборки и тепловая связь между элементами обеспечивалась командами программы SolidWorks;
- характеристики материалов катушек ВОГ задавались по справочным источникам на примененные материалы;
- тепловые характеристики элементов обмоток световода и компаунда заполнения намотки задавались в виде условного материала (эквивалента волокна);
- теплообмен между элементами через газовую среду внутри ВОГ создавался специальными вкладышами.

В среде ANSYS Workbench проведена имитация распределения температуры по конструкции ЧЭ ВОГ в установившемся тепловом режиме (рабочая температура 55 ± 2 °С; мощность, выделяемая линейным нагревательным элементом, расположенном на верхнем экране ВОГ – 5,5 Вт). Моделирование показало, что при заданной мощности в нагревательных элементах конструкция ВОГ прогревается осесимметрично до температуры 53,9 °С.

Приводится методика определения коэффициентов температурной чувствительности ВОГ. С использованием элементов системы терморегулирования (СТР) – нагревателей и термодатчиков, установленных на блоке катушек ВОГ, и блока усилителя системы терморегулирования задавались температуры термостатирования от 30 до 50 °С с шагом 5 °С. Дополнительно проведён запуск ВОГ при его разогреве от н.к.у. до рабочей температуры 55 °С. Одновременно записывалось сопротивление контрольного термодатчика. Для тепловой изоляции ВОГ помещен в алюминиевый кожух, между ВОГ и кожухом установлены прокладки из пенопласта. Конструкция ВОГ на рабочем месте для тепловых испытаний показана на рис.1.

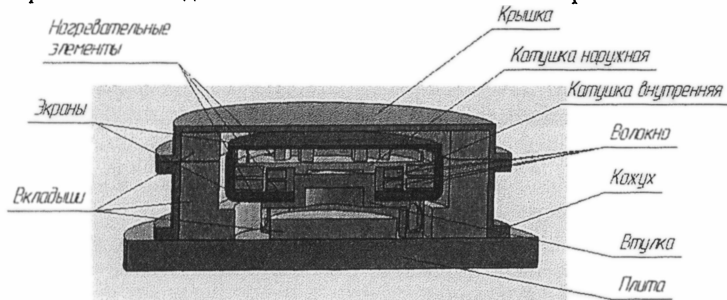


Рис. 1. Конструкция типового ВОГ (разрез в плоскости OXZ)

В результате экспериментальных исследований установлено, что смещение нулевого сигнала ВОГ зависит от температуры конструкции ВОГ в установившемся тепловом режиме и от скорости изменения температуры в установившемся режиме разогрева, когда скорость изменения температуры постоянна.

Математическая модель погрешностей, определяющая зависимость скорости ухода от температуры имеет вид:

$$\Delta\omega_T = \omega_{T0} + \omega_T \cdot \Delta T + \omega_{T^2} \cdot \Delta T^2 + \omega_{dT} \cdot dT/dt, \quad (3)$$

где ω_{T0} [°/ч] – составляющая скорости ухода, измеренная на калибровочных испытаниях при некоторой фиксированной температуре T_0 ;

T – температура ВОГ (по термодатчику);

$\Delta T = T - T_0$;

ω_T [(°/ч)/°C] и ω_{T^2} [(°/ч)/(°C)²] – коэффициенты влияния на скорость ухода ВОГ первой и второй степени отклонения температуры ВОГ от ее значения при калибровке (ΔT);

ω_{dT} [(°/ч)/(°C/мин)] – коэффициент влияния на скорость ухода скорости изменения температуры ВОГ.

С использованием тепловой модели проведена оценка перепадов температур между разными зонами волокна внутри катушки при температурах разогрева конструкции, которые задавались в эксперименте. Для этого заданы разные значения мощности тепловыделения нагревательного элемента верхнего экрана ВОГ и определены при этом перепады температур волокна внутри катушки в радиальном направлении.

В третьей главе приводится анализ причин проявления эффекта Фарадея в волоконном кольцевом интерферометре и рассчитывается максимальная ошибка ВОГ-1, обусловленная этим эффектом. Рассмотрены методы уменьшения магнитной чувствительности. Рассчитан коэффициент магнитного экранирования для применённого в ВОГ-1 магнитного экрана из высоконикелевого пермаллоя марки 79 НМ.

Приведена разработанная методика определения чувствительности ВОГ к магнитному полю, которая основана на определении коэффициентов влияния по результатам проведения магнитных испытаний. В ходе проведения испытаний ВОГ устанавливался таким образом, чтобы он находился внутри колец Гельмгольца (вертикальной и горизонтальной пары колец), задающих магнитные поля в двух направлениях. Контрольно-проверочная аппаратура ВОГ устанавливалась вне колец Гельмгольца и влиянию магнитного поля не подвергалась. Величина внешнего магнитного поля измерялась датчиком микротесламетра, который располагался на корпусе прибора. При каждом значении задаваемого магнитного поля записывался выходной сигнал ВОГ, находилось среднее значение измеренной угловой скорости и отклонение ее от начального значения, измеренного в условиях компенсации внешних магнитных полей.

Приведены результаты испытаний ВОГ-1 (в магнитных экранах) и ВОГ-2 (в магнитных экранах и без них) при воздействии магнитного поля последовательно по трём осям прибора, проекция вектора напряженности (H) которого варьировалась от $H=-300$ мкТл до $H=300$ мкТл с шагом 50 мкТл. По (4) определены коэффициенты влияния магнитного поля ω_{H_x} , ω_{H_y} , ω_{H_z} [°/ч], определяющие скорость ухода ВОГ при $H=100$ мкТл.

$$\omega_{Hd} = \Delta\omega^d / 6, \quad (4)$$

где d – индекс оси; $\Delta\omega^d = (\omega_{H=300}^d - \omega_{H=-300}^d)$ – разность средних значений угловой скорости, измеренных при воздействии магнитного поля с $H=300$ мкТл и $H=-300$ мкТл по оси ОХ, ОУ или ОZ.

Проведённые исследования показали, что у двух испытанных типов ВОГ (ВОГ-1 и ВОГ-2) обнаружена заметная магнитная чувствительность. Применённое экранирование снижает чувствительность ВОГ к магнитному полю, но все равно она остаётся на значительном уровне (до 1,8 °/ч на 100мкТл у ВОГ-2).

В связи с этим предложено использование многослойных экранов. В тех же габаритах предлагается использовать трёхслойный экран, в котором в качестве материала промежуточного экрана выбран капролон (ПА6 блочный), который является диэлектриком и облегчает конструкцию. Применение такого экрана снизит магнитное поле, действующее на ВОГ, примерно в 29 раз (по оценке без учёта технологического зазора между нижним и верхним экранами).

По результатам экспериментальных данных разработана ММП, определяющая зависимость скорости ухода от внешних магнитных полей:

$$\Delta\omega_{\alpha} = \omega_{H_x} \cdot H_x / H_E + \omega_{H_y} \cdot H_y / H_E + \omega_{H_z} \cdot H_z / H_E, \quad (5)$$

где H_x , H_y , H_z [мкТл] – проекции вектора напряженности магнитного поля на оси ВОГ;

$H_E = 100$ мкТл – нормирующий множитель, близкий по порядку величины к напряженности магнитного поля Земли;

ω_{H_x} , ω_{H_y} , ω_{H_z} [°/ч] – коэффициенты влияния магнитного поля, действующего по осям ОХ, ОУ, ОZ, на скорость ухода ВОГ.

В четвертой главе приведен расчёт деформаций и напряжений в корпусе и оптическом волокне ВОГ при действии сил инерции, вызванных ускорением вдоль диаметра корпуса ВОГ, закрепленного по нижней торцевой поверхности. Расчёт проведен с использованием разработанной модели ВОГ-1 с помощью программного продукта ANSYS.

Приведена методика определения параметров модели погрешностей (1) путём проведения многопозиционных испытаний ВОГ в поле действия единичной перегрузки. ВОГ при этом устанавливался на плиту наклонно-поворотного стенда СНП-200, который обеспечивал выставку ВОГ в нужную ориентацию с точностью $\pm 30''$. Для определения параметров ММП достаточно выставить ВОГ в 8 позиций. Однако для повышения точности определения

составляющих погрешности прибор выставлялся в 16 позиций по отношению к направлению единичной перегрузки и направлению на Север (см. Таблицу 1).

В таблице 1 введены обозначения: «45° (N; -g)» – ОЧ ВОГ (ось ОХ) в позициях 13...16 отклонена на угол 45° от направления на Север вверх; «45° (N; +g)» – ось ОУ в позиции 13 и ось ОZ в позиции 16 отклонены на угол 45° от направления на Север вниз; «45° (S; -g)» – ось ОУ в позиции 15 и ось ОZ в позиции 14 отклонены на угол 45° от направления на Юг вверх.

Таблица 1.

Позиции ВОГ при испытаниях

№ п.п	Ориентация осей ВОГ			Иллюстрация
	ОХ	ОУ	ОZ	
1	N	W	-g	
2	N	+g	W	
3	N	E	+g	
4	N	-g	E	
5	+g	N	E	
6	+g	W	N	
7	+g	S	W	
8	+g	E	S	
9	-g	E	N	
10	-g	S	E	
11	-g	N	W	
12	-g	W	S	
13	45° (N; -g)	45° (N; +g)	W	
14	45° (N; -g)	W	45° (S; -g)	
15	45° (N; -g)	45° (S; -g)	E	
16	45° (N; -g)	E	45° (N; +g)	

Исходя из выражений для выходного сигнала ВОГ в соответствии с ММП в каждой позиции, в результате решения получившейся системы из 16 уравнений (с избыточностью) предложены следующие формулы для расчета параметров ММП:

$$\omega_r = \frac{K (N^6 + N^8 + N^9 + N^{12})}{4T};$$

$$\omega_p = \frac{K (N^{11} - N^6 + N^{10} - N^7 + N^9 - N^5)}{6T} - \omega_{3x};$$

$$\omega_{\sigma} = \frac{K (N^1 + N^3 + N^2 + N^4)}{4T} - \omega_r - \omega_{3x};$$

$$\omega_{\sigma'} = \frac{K (N^4 - N^2)}{2T} + \omega_{3x} \cdot g^z;$$

$$\begin{aligned}\omega_{\Sigma} &= \frac{K (N^1 - N^3)}{2T} + \omega_{3e} \cdot \mathcal{G}^y; \\ \omega_{\nu r} &= \frac{K (N^{14} + N^{16})}{2T} - \omega_{\tau} - \frac{\omega_{3e} + \omega_{3z} + \omega_{er} + \omega_{\rho}}{\sqrt{2}}; \\ \omega_{\nu y} &= \frac{K (N^{15} - N^{13})}{2T} - \frac{\omega_{ey}}{\sqrt{2}}; \\ \omega_{\nu z} &= \frac{K (N^{14} - N^{16})}{2T} - \frac{\omega_{ez}}{\sqrt{2}},\end{aligned}$$

где N^i – приращение выходного кода ВОГ за такт опроса в i -ой позиции ($i=1...16$); T – интервал интегрирования входной угловой скорости; K – масштабный коэффициент ВОГ, определённый при испытаниях на скоростном стенде.

Углы отклонения ОЧ оцениваются по формулам:

$$\begin{aligned}\mathcal{G}^y &= \frac{K (N^6 - N^8 + N^9 - N^{12})}{4T\omega_{3z}}; \\ \mathcal{G}^z &= \frac{K (N^5 - N^7 + N^{11} - N^{10})}{4T\omega_{3z}}.\end{aligned}$$

Приведены результаты многопозиционных испытаний девяти приборов типа ВОГ-1 (выполнялись два - три запуска каждого из приборов). Запуски проводились в одних и тех же условиях без переустановки прибора. Получены параметры математической модели погрешностей в каждом запуске, а также средние значения параметров ММП и их отклонения в каждом запуске от среднего значения. Поскольку параметры ω_{ey} , ω_{ez} , $\omega_{\nu y}$, $\omega_{\nu z}$ находятся на уровне нестабильности нулевого сигнала в запуске и их оценки из-за этого меняются случайным образом, то сохранять их в модели погрешностей, призванной учитывать систематические ошибки, нецелесообразно. Получена упрощённая ММП ВОГ:

$$\Delta\omega = \omega_{\tau} + \omega_{\rho} \cdot a_x / g + \omega_{\sigma} \cdot a_r / g + 2\omega_{\pi} \cdot a_{\epsilon} \cdot a_r / g^2. \quad (6)$$

Эта модель применена к имеющимся результатам испытаний. Рассчитанные (средние по нескольким запускам) параметры ММП для всех приборов, а также разброс ошибок $(\omega - \omega_3)$ выходного сигнала ВОГ в испытательных позициях и разброс ошибок после учёта ММП $\omega - \omega_{\text{ММП}}$ приведены в таблице 2. Величина ошибки $(\omega - \omega_3)$ рассчитана как разность выходного сигнала ВОГ и проекции угловой скорости вращения Земли на его ось чувствительности в соответствующей позиции; $(\omega - \omega_{\text{ММП}})$ - как разность выходного сигнала ВОГ и величины сигнала, рассчитанной с использованием ММП.

Таблица 2.

Параметры упрощённой ММП

№ прибора Параметры ММП	001	002	003	004	005	006	007	009	09245
$\omega_r, ^\circ/\text{ч}$	-1,830	-0,053	-0,739	-0,277	0,266	-0,183	0,395	-0,477	-0,061
$\omega_p, ^\circ/\text{ч}$	-0,871	-0,363	-1,196	-1,303	-1,290	-1,290	-1,213	-1,335	-1,209
$\omega_{\sigma}, ^\circ/\text{ч}$	-0,962	-0,674	-1,184	-1,325	-1,158	-1,339	-1,321	-1,338	-0,846
$\omega_{\text{вр}}, ^\circ/\text{ч}$	0,229	0,532	0,423	0,513	0,536	0,520	0,511	0,552	-0,004
$\mathcal{G}', \text{ рад}$	-0,001	-0,007	0,003	-0,002	0,006	0,000	-0,003	-0,002	0,005
$\mathcal{G}^{\ddagger}, \text{ рад}$	0,004	-0,001	0,004	-0,001	0,004	-0,004	-0,001	0,001	0,002
$\omega - \omega_3, ^\circ/\text{ч}$	от	-2,86	-0,81	-2,18	-1,68	-1,13	-1,53	-1,01	-1,98
	до	-0,93	0,34	0,63	1,10	1,66	1,12	1,64	1,04
$\omega - \omega_{\text{мп}}, ^\circ/\text{ч}$	от	-0,18	-0,05	-0,20	-0,08	0,04	-0,02	-0,05	-0,14
	до	0,18	0,05	0,23	0,09	0,15	0,02	0,03	0,25

Как видно из таблицы 2, учёт параметров ММП при расчёте измеренной угловой скорости уменьшает погрешность в определении входной угловой скорости для всех испытанных приборов в несколько раз. Кроме того, для определения четырёх параметров ММП (6) и углов отклонения оси чувствительности от её номинального положения достаточно шести уравнений и, соответственно, шести ориентаций прибора при испытаниях, что значительно сокращает время проведения калибровки по сравнению с использованием ММП (1).

Учитывая, что ММП (6) сформирована по результатам испытаний в поле действия единичной перегрузки, для проверки адекватности ММП в условиях многократных перегрузок, проведены испытания ВОГ на низкочастотной вибрации с виброперегрузками до 10 ед. Приводятся результаты испытаний при действии вибрации: 1) по ОЧ (синусоидальная вибрация на частоте 40 Гц с амплитудами виброперегрузки (A_M), равными 1; 2; 4; 6 и 8 ед.; на частоте 7 Гц с $A_M = 0,5$ ед. и на частоте 15 Гц с $A_M = 1$ ед.); 2) под углом 70° к ОЧ (синусоидальная вибрация на частоте 40 Гц с $A_M = 1; 2; 4; 6$ и 8 ед.); 3) перпендикулярно к ОЧ ВОГ (синусоидальная вибрация на частоте 15 Гц с $A_M = 0,5; 1; 1,5; 2; 5; 8$ и 10 ед.). Испытания показали, что при действии вибрации вдоль оси чувствительности, где «работает» линейная составляющая ММП $\omega_p \cdot a_x / g$, амплитуда переменной составляющей выходного сигнала ВОГ на частоте вибрации пропорциональна амплитуде виброперегрузки, а на постоянную составляющую вибрация практически не влияет. При действии

вибрации под углом к оси чувствительности, наличие в ММП нелинейной составляющей $\omega_{cr} \cdot a_r / g$ (где $a_r = \sqrt{a_x^2 + a_z^2}$) приводит к появлению постоянной составляющей скорости ухода ВОГ ΔW_{cp} , линейно зависящей от перегрузки.

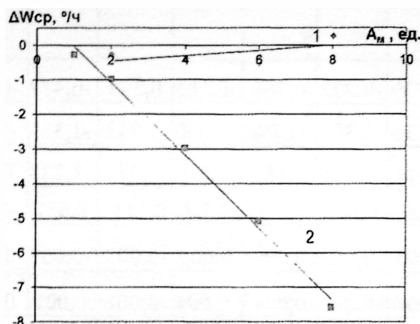


Рис. 2. Результаты виброиспытаний ВОГ-1 (1-вибрация по ОЧ; 2 - вибрация под углом 70° к ОЧ)

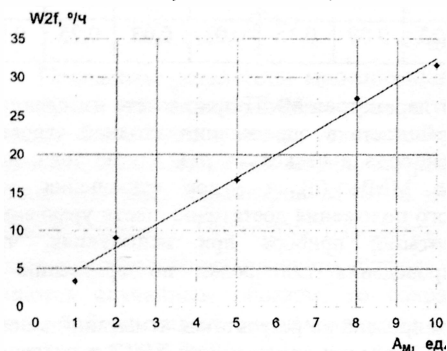


Рис. 3. Зависимость выходного сигнала ВОГ-3 на двойной частоте вибровозмущений от виброперегрузки

связи с чем было проведено моделирование ВОГ, закрепленного аналогично креплению ВОГ на вибростенде, а именно картина напряженно-деформированного состояния ВОГ при действии на него сил инерции, вызванных ускорением в осевом направлении. Моделирование показало, что с возрастанием ускорения увеличиваются как сами деформации и напряжения в волокне, так и их разности в осевом направлении. Путём анализа результатов моделирования и эксперимента, можно сделать вывод о практически линейной зависимости переменной составляющей сигнала ВОГ от параметров напряженно-деформированного состояния волокна.

Так, при вибрации под углом 70° к оси чувствительности ΔW_{cp} возрастает с ростом виброперегрузки от 2 до 8 ед. на 7,3 °/ч, тогда как при действии вибрации по ОЧ не превышает 0,6 °/ч при возрастании перегрузки в тех же пределах (см. рис. 2).

При вибрации по оси ОЗ, перпендикулярной к ОЧ, когда составляющие ММП $\omega_p \cdot a_x / g + 2\omega_{cr} \cdot a_x \cdot a_r / g^2$ обнуляются и «работает» только $\omega_{cr} \cdot a_r / g$, переменная составляющая выходного сигнала ВОГ изменяется по гармоническому закону на частоте, вдвое превышающей частоту вибровозмущения (см. рис. 4), причём амплитуда этой составляющей (W_{2f}) растёт пропорционально виброперегрузке (см. рис. 3).

Т.о., проведенные испытания полностью подтверждают разработанную ММП (6). Это свидетельствует о том, что ВОГ реагирует на линейные движения основания по отражённым в этой ММП зависимостям.

Механизмы влияния перегрузки на ВОГ требуют дополнительных исследований, в

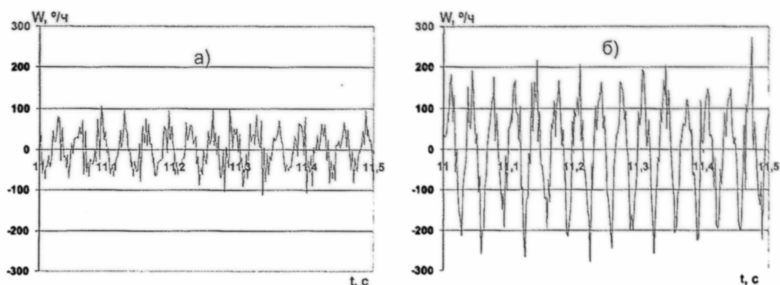


Рис. 4. Результаты испытаний ВОГ-3 при действии вибрации по оси OZ на частоте 15 Гц с различными амплитудами виброперегрузки: а) 2 ед.; б) 8 ед.

По разработанной ММП (6) сделаны следующие выводы:

- отсутствие в (6) параметров $\omega_{\delta y}$, $\omega_{\delta z}$, $\omega_{\delta y}$, $\omega_{\delta z}$ говорит о том, что направление радиальной перегрузки не сказывается значимым образом на величине вызываемой ею деформации катушки, несмотря на нарушающие круговую симметрию особенности конструкции ВОГ (диаметральное расположение модулятора на торце катушки и наличие в катушке зоны входа/выхода оптоволокон);

- ММП содержит линейную составляющую, зависящую от ускорения по оси чувствительности, и нелинейные составляющие, нехарактерные для традиционных механических гироскопов, зависящие от модуля ускорения в плоскости, перпендикулярной оси чувствительности (ω_{δ}), и произведения ускорений вдоль и перпендикулярно оси чувствительности X ($\omega_{\delta x}$). Наличие этих составляющих в модели было подтверждено как в поле действия единичной перегрузки, так и при многократных вибрационных перегрузках;

- наличие в ММП квадратичной составляющей $\omega_{\delta x}$ говорит об эффекте взаимовлияния деформаций катушки, вызванных осевой и радиальной составляющими «косой» перегрузки, подобном уходу механического роторного гироскопа из-за неравномерности подвеса ротора. Однако, в отличие от ММП роторного гироскопа, один из сомножителей, а именно проекция ускорения на плоскость катушки, входит в формулу погрешности в виде модуля.

С учётом влияния на скорость ухода ВОГ всех трёх рассмотренных видов возмущающих факторов, интегральная математическая модель погрешностей ВОГ записана в следующем виде:

$$\Delta\omega = \omega_{\delta 0} + \omega_{\delta} \cdot \Delta T + \omega_{\delta^2} \cdot \Delta T^2 + \omega_{\delta T} \cdot dT / dt + \omega_{\delta x} \cdot H_x / H_E + \omega_{\delta y} \cdot H_y / H_E + \omega_{\delta z} \cdot H_z / H_E + \omega_{\delta} \cdot a_x / g + \omega_{\delta} \cdot a_y / g + 2\omega_{\delta x} \cdot a_x \cdot a_y / g^2 - \Delta K \cdot N / t_{\text{ном}}$$

где $\Delta\omega$ [°/ч] – скорость ухода;

$\omega_{\tau 0}$ [°/ч] – составляющая скорости ухода, не зависящая от ускорения и от внешнего магнитного поля, измеренная на калибровочных испытаниях при некоторой фиксированной температуре T_0 ;

T – температура ВОГ (по термодатчику);

$\Delta T = T - T_0$;

ω_{τ} [(°/ч)/°C] и $\omega_{\tau'}$ [(°/ч)/(°C)²] – коэффициенты влияния на скорость ухода ВОГ первой и второй степени отклонения температуры ВОГ от ее значения при калибровке (ΔT);

$\omega_{\sigma\tau}$ [(°/ч)/(°C/мин)] – коэффициент влияния на скорость ухода скорости изменения температуры ВОГ;

H_x, H_y, H_z [мкТл] – проекции вектора напряженности магнитного поля на оси ВОГ;

$H_E = 100$ мкТл – нормирующий множитель;

$\omega_{Hx}, \omega_{Hy}, \omega_{Hz}$ [°/ч] – коэффициенты влияния магнитного поля, действующего по осям ОХ, ОУ, ОZ, на скорость ухода ВОГ;

a_x, a_y, a_z [м/с²] – проекции кажущегося ускорения корпуса ВОГ на его оси;

$a_r = (a_x^2 + a_y^2 + a_z^2)^{1/2}$ [м/с²] – радиальная составляющая кажущегося ускорения;

g [м/с²] – ускорение свободного падения;

ω_p [°/ч] – составляющая скорости ухода, пропорциональная ускорению по ОЧ, при единичной перегрузке;

ω_{σ} [°/ч] – составляющая скорости ухода, пропорциональная модулю ускорения в плоскости, перпендикулярной ОЧ, при единичной перегрузке;

$\omega_{\sigma\sigma}$ [°/ч] – составляющая скорости ухода, пропорциональная произведению ускорений вдоль и перпендикулярно ОЧ, при единичной перегрузке, действующей под углом 45° к оси ОЧ;

N [е.м.р.] – приращение выходного кода ВОГ за такт опроса;

ΔK ["/е.м.р.] – отклонение масштабного коэффициента от паспортного значения;

$t_{\text{инт}}$ [с] – интервал интегрирования входной угловой скорости, равный такту опроса.

Основные результаты и выводы диссертационной работы

1. Разработана методика исследования зависимости скорости ухода ВОГ от внешних факторов – линейных перегрузок, магнитных полей и температуры, использование которой позволяет определить параметры ММП.

2. Построена расчетная модель ВОГ, которая позволяет оценить параметры поля температур и напряженно-деформированного состояния элементов ВОГ при характерных условиях эксплуатации как факторы, влияющие на точностные характеристики гироскопа.

3. Экспериментально подтверждена зависимость выходного сигнала ВОГ от проекций линейной перегрузки на его оси. У девяти испытанных в поле силы тяжести образцов ВОГ составляющие скорости ухода, зависящие от ориентации относительно вертикали, достигают 1,9 %/ч. Такой уровень погрешностей является существенным для применения ВОГ в изделиях РКТ.

4. Разработана ММП ВОГ, учитывающая влияние на скорость ухода ВОГ линейных перегрузок, внешних магнитных полей, температуры и скорости её изменения. Алгоритмическая компенсация составляющих ММП с использованием информации от акселерометров, магнитометров и термодатчиков уменьшает погрешность определения входной угловой скорости в несколько раз.

5. В ММП, помимо составляющей, пропорциональной ускорению вдоль оси чувствительности ВОГ, входят нехарактерные для других типов гироскопов нелинейные составляющие, зависящие от модуля ускорения в плоскости, перпендикулярной оси чувствительности. Значимый уровень этих составляющих подтвержден результатами испытаний ВОГ не только в поле силы тяжести, но и при действии вибрационных перегрузок, по крайней мере, до 10 ед.

6. Дано объяснение одной из причин виброчувствительности ВОГ - возникновение при действии линейной вибрации под углом к ОЧ ВОГ постоянной составляющей скорости ухода, сопровождающейся составляющей на удвоенной частоте вибрации, вызвано наличием в ММП нелинейных составляющих. При этом обе эти составляющие скорости ухода пропорциональны амплитуде виброперегрузки, что подтверждено экспериментально.

7. Разработана система конструкторско-технологических мер по снижению влияния внешних воздействий на выходной сигнал ВОГ.

Публикации по теме диссертации

1. Исследование характеристик бесплатформенного инерциального блока на базе волоконно-оптических гироскопов в процессе наземной отработки / М.В. Антонова [и др.] // Гироскопия и навигация. 2012. №2 (77). С. 98-111.

2. Антонова М.В. Разработка системы термостатирования для волоконно-оптического гироскопа // Вопросы оборонной техники. Серия 9. 2010. Специальный выпуск 3(244) - 4(245). С.163-171.

3. М.В. Антонова, А.В. Корнюхин. Виброустойчивость бесплатформенного инерциального блока на базе волоконно-оптических гироскопов // Вестник МГТУ, серия «Приборостроение», специальный выпуск №5 «Информатика и системы управления». 2012. С. 210-215.

4. М.В. Антонова, А.В. Корнюхин. Повышение виброустойчивости бесплатформенного инерциального блока на базе волоконно-оптических гироскопов // Труды «РКК «Энергия» им. С.П. Королёва» «Расчёт,

проектирование, конструирование и испытания космических систем». 2012. Серия XII выпуск №4. С.45-49.

5. Экспериментальное исследование зависимостей показаний волоконно-оптического гироскопа от его ориентации относительно вертикали: Доклад / М.В. Антонова [и др.] // Научно-технический сборник «Ракетно-космическая техника». Серия XI. Системы управления ракетных комплексов. 2010. Вып.2: в 3-х частях - Часть I. С. 76-84.

6. Работы по уточнению математической модели погрешностей волоконно-оптического гироскопа / М.В. Антонова [и др.] // VIII научно-практическая конференция молодых специалистов и студентов памяти главного конструктора академика В.И. Кузнецова: Сборник докладов. 2010. С. 35-44.

7. Бесплатформенный инерциальный блок на базе волоконно-оптических гироскопов в составе навигационного прибора: наземная отработка и подготовка к лётным испытаниям / М.В. Антонова [и др.] // II Всероссийская научно-техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» («II Козловские чтения»): Сборник материалов. 2011. С.377-378.

8. М.В. Антонова, Л.З. Новиков. О некоторых результатах экспериментальной отработки малогабаритного волоконно-оптического гироскопа: Тезисы докл. // II Всероссийская научно-техническая конференция «Системы управления беспилотными космическими и атмосферными летательными аппаратами. 2012. С.81-82.

9. М.В. Антонова, Л.З. Новиков. Результаты испытаний волоконно-оптического гироскопа: Тезисы докл. // Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XXXVII академических чтений по космонавтике. 2013. С.628-629.

10. Некоторые результаты экспериментальной отработки волоконно-оптического гироскопа / М.В. Антонова [и др.] // Всероссийская конференция молодых специалистов, учёных и студентов памяти Главного конструктора, академика АН СССР В.И. Кузнецова: Сборник материалов. 2013. С. 47.

11. Волоконно-оптические гироскопы и приборы на их основе разработки филиала ФГУП ЦЭНКИ» - «НИИ прикладной механики им. академика В.И.Кузнецова» / М.В. Антонова [и др.] // Научно-техническая конференция к 75-летию кафедры «Приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации»: Сборник материалов. 2013. С. 18-21.