

Секция 21

Космическая навигация и робототехника**ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ДИНАМИЧЕСКИ НАСТРАИВАЕМОГО
ГИРОСКОПА В РЕЖИМЕ ДВУХКОМПОНЕНТНОГО
ДАТЧИКА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ****С.А. Черников****МГТУ им. Н.Э. Баумана**

Рассматривается устойчивость двухкомпонентного датчика угловой скорости, построенного на базе динамически настраиваемого гироскопа. Сложность исследования устойчивости, даже при условии идентичности измерительных каналов, состоит в том, что характеристическое уравнение содержит комплексные коэффициенты. Используя известные методы исследования корней алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами, можно получить обозримые результаты для уравнений не выше третьего порядка. В рассматриваемом случае порядок уравнений может быть существенно выше.

На основе частотных методов получено простое аналитическое выражение условия устойчивости датчика угловой скорости для системы n -ного порядка.

**ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ КОНТУРА ОБРАТНОЙ СВЯЗИ
ДВУХКОМПОНЕНТНОГО МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО
ГИРОСКОПА RR-ТИПА****В.П. Подчезерцев, Ю.А. Пономарев, А.В. Кулешов****МГТУ им. Н.Э. Баумана**

Использование контура обратной связи (КОС) в измерительных каналах микромеханических гироскопов ММГ позволяет существенно повысить их точностные характеристики, т.к. исключает влияние на выходные характеристики отклонений чувствительного элемента относи-

тельно корпуса и обеспечивает необходимые запасы устойчивости и качество переходных процессов.

В микромеханических гироскопах чувствительный элемент (ЧЭ) в отличие от традиционных роторных гироскопов (кроме роторных вибрационных) связан с корпусом упругим подвесом, который создает противодействующие отклонению ЧЭ относительно корпуса моменты, сопоставимые по величине с вызывающими это отклонение гироскопическими моментами. Кроме того, к чувствительному элементу микромеханического гироскопа, представляющему собой плоский маятник, при его колебательном движении относительно осей ортогональных плоскости маятника приложены значительные газодинамические моменты, обусловленные нормальными к поверхности маятника силами от остаточной газовой среды во внутреннем объеме гироскопа. Эти моменты так же, как и упругие снижают чувствительность гироскопа к входной угловой скорости. Трудности формирования моментов обратной связи ММГ связаны с необходимостью учета вышеуказанных упругих и демпфирующих моментов и обеспечения достаточно широкой полосы пропускания получаемой механической системы, что ограничивается невысокими характеристиками емкостных датчиков момента и наличием значительного по величине уровня шумов в контуре управления.

В работе представлены результаты моделирования в системе Simulink некоторых вариантов формирования контура обратной связи для одной из разновидностей ММГ, ЧЭ которого связан с корпусом упругим подвесом обеспечивающим три степени свободы ЧЭ. Система возбуждения обеспечивает угловые колебания маятника в его плоскости с постоянной амплитудой. При вращении корпуса гироскопа с угловыми скоростями, вектор которых лежит в плоскости маятника, гироскопические моменты вызывают угловые колебания маятника вокруг осей ортогональных плоскости маятника. Эти колебания преобразуются емкостными датчиками угла в напряжение, которое подается на усилители-формирователи и далее на датчики момента.

При моделировании движения ММГ в системе Simulink вокруг измерительных осей x и y использованы уравнения движения ММГ в системе координат, связанной с корпусом, полученные в работе [1]:

$$\begin{cases} A \frac{d}{dt}(\omega_x + \dot{\varphi}_x) - (\omega_y + \dot{\varphi}_y) \omega_z - (\omega_z + \dot{\varphi}_z) \omega_y + \dot{\omega}_y \omega_z - \dot{\omega}_z \omega_y = \dot{\omega}_x \omega_z - \dot{\omega}_z \omega_x \\ B \frac{d}{dt}(\omega_y + \dot{\varphi}_y) - (\omega_x + \dot{\varphi}_x) \omega_z - (\omega_z + \dot{\varphi}_z) \omega_x + \dot{\omega}_x \omega_z - \dot{\omega}_z \omega_x = \dot{\omega}_y \omega_z - \dot{\omega}_z \omega_y \end{cases} \quad (1)$$

При формировании КОС возможны два варианта замыкания обратной связи:

$$M_x^{\ddot{a}i} = -K_x W_x(s) \alpha; \quad M_y^{\ddot{a}i} = -K_y W_y(s) \beta, \quad (2)$$

$$M_x^{\ddot{a}i} = -K_x W_x(s) \beta; \quad M_y^{\ddot{a}i} = K_y W_y(s) \alpha, \quad (3)$$

где (2) соответствует прямой обратной связи, а (3) перекрестной обратной связи.

Анализ этих видов обратной связи представлен в данном исследовании по результатам моделирования при различных передаточных функциях контура обратной связи $KW(s)$. Показаны достоинства и недостатки указанных видов обратной связи и даны рекомендации по вариантам формирования контура управления для представленной схемы микромеханического гироскопа.

Литература

1. Коновалов С.Ф., Подчерзцев В.П., Майоров Д.В., Пономарев Ю.А., Сидоров А.Г. Двухкоординатный микромеханический ДУС с магнитоэлектрическими датчиками обратной связи по каналам возбуждения и измерения. XVII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам, 2010 г.

ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ВОЛНОВОЙ ГИРОСКОП ДЛЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

*И.Н. Абезяев, М.В. Аракин, М.В. Большаков, С.В. Воловик
ОАО "ВПК" НПО Машиностроения"*

*А.В. Алёхин, К.А. Бахонин, В.М. Соловьёв, А.В. Требухов
ЗАО «Инерциальные технологии «Технокомплекс»*

Создание современных космических аппаратов (КА) и тенденция развития космических систем в целом предполагают всё большее применение инновационных технических решений. Это обусловлено существенным пересмотром требований к КА различного назначения в части снижения весов, увеличения сроков активного существования, повышения точности углового ориентирования, маневренности, живучести и пр.

Обеспечение этих достаточно противоречивых требований возможно только при целенаправленном развитии специальных космических технологий.

Одной из самых болезненных проблем последних лет является отсутствие прецизионных гироориентаторов для КА длительного срока существования, обладающих высокой устойчивостью к внешним воздействиям.

Уникальными свойствами в этом отношении обладают гироориентаторы на основе твердотельных волновых гироскопов (ТВГ). Эти приборы имеют значительную перспективу повышения точностных свойств вплоть до достижения показателя по дрейфу на уровне $0,0005^\circ/\text{час}$, которые возможно достичь в период 2015-2020 г. Приборы могут работать в открытом космосе в условиях радиационных поясов и воздействия ТЗЧ, способны переносить спецвоздействия практически без потери основных характеристик. По ресурсу ТВГ обладают способностью сохранять работоспособность на время в несколько раз превышающее срок активного существования самых перспективных КА.

ОАО "ВПК" НПО машиностроения" считает целесообразным установку таких гироориентаторов на перспективные КА различного назначения - в первую очередь с длительным сроком активного существования и для КА спецназначения, в том числе с повышенными энергетическими возможностями.

Большую работу по созданию ТВГ ведет предприятие ЗАО "ИТТ", являющееся дочерним предприятием ОАО "РПКБ", г. Раменское. Научную составляющую выполняемых разработок вносят ученые ИПМ РАН.

ЗАО «ИТТ» добилось высоких результатов в проводимых исследовательских и опытно-конструкторских работах. Дрейф испытанных приборов не превышает $0,02^\circ/\text{час}$.

В докладе рассматривается конструкция ТВГ и приводятся результаты экспериментальных исследований.

**МОДЕЛЬ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ
БЕСПЛАТФОРМЕННОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО БЛОКА****Ю.Г. Егоров (МГТУ им. Н.Э.Баумана)****Е.А. Мелюшева****ФГУП НПЦ АП им. академика Н.А.Пилюгина**

Рассматриваемый бесплатформенный измерительный блок (БИБ) предназначен для измерения параметров поступательного и вращательного движения разгонных ступеней и блоков космических ракет-носителей. В состав БИБ входят блоки маятниковых акселерометров и блоки оптических гироскопов, имеющие значительную избыточность измерителей.

Разработана рациональная векторно-матричная математическая модель инструментальных погрешностей БИБ, учитывающая особенности использования избыточных неортогональных измерительных базисов, развитые модели инструментальных погрешностей конструктивного исполнения БИБ и инструментальных погрешностей используемых акселерометров и гироскопов.

Модель может быть использована при синтезе оптимальных программ калибровки БИБ, разработке алгоритмов и программ компенсации инструментальных погрешностей прибора в процессе применения по назначению, в том числе, при различной конфигурации измерительных базисов чувствительных элементов.

**МНОГОФУНКЦИОНАЛЬН ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАСКАДНОГО ГЕКСАПОДА
В КОСМИЧЕСКОМ ТЕЛЕСКОПЕ «МИЛЛИМЕТРОН»****Ю.Н. Артеменко****Астрокосмический центр Физического института им. П.Н.Лебедева****А.Е. Городецкий, В.В. Дубаренко, И.Л. Тарасова, А.Ю. Кучмин****Институт проблем машиноведения РАН**

Одной из важнейших проблем создания космической обсерватории «Миллиметрон» (проект «Спектр-М») является задача наведения телескопа с точностью до 0,3-0,1 угл.сек., осложняющаяся нежесткой гантелеобразной конструкцией космического аппарата (КА) и его постоянной ориентацией на Солнце. Ранее предложенные устройства для выполнения поставленной задачи на основе известных конструктивных решений, даже при наличии возможности установки высокоточного

звездного датчика, связанного с осью телескопа, не обеспечивают в полной мере требования по точности наведения.

Предлагается применить специально разработанное многофункциональное устройство, на основе каскадного гексапода, представляющего собой набор из нескольких одиночных гексаподов (платформа Стюарта), работающих, как единое целое устройство. Разработана многомассовая модель гексапода, доработана программа расчета гексапода и разработана математическая модель всего устройства, проведены расчеты жесткостных и динамических характеристик конструкции гексапода. Исходя из ограничений, налагаемых конструкцией КА, рассмотрены варианты компоновки гексапода, его укладки в транспортное положение и выдвижения в рабочее состояние, кинематика движений гексапода и его габаритно-массовые характеристики. Рассмотрены приемлемые двигатели для перемещений гексапода и конструкционные материалы, энергопотребление и тепловыделение двигателями гексапода. Разработаны алгоритмы управления каскадным гексаподом и общие принципы управления наведением телескопа.

Использование каскадного гексапода в проекте «Миллиметрон» позволяет обеспечить:

1. Выдвижение телескопа из транспортного положения в рабочее;
2. Наведение телескопа на любой пространственный угол в полусфере, ограниченной экранами системы радиационного охлаждения телескопа;
3. Сохранение неизменными положений центров масс телескопа и КА (или очень близких к ним) при наведении телескопа.
4. Коррекцию высокоточного наведения телескопа при изменении ориентации КА в процессе наблюдений;
5. Изменение координат центров масс телескопа и КА в любом направлении при сохранении пространственного угла наведения телескопа;
6. Значительное ослабление вращательных движений КА вокруг его осей и колебательных процессов в его конструкции при наведении телескопа, тем самым улучшив управляемость КА;
7. Расширение диапазона скоростей наведения телескопа;
8. Использование перемещений центров масс телескопа и КА за счет движения гексапода, как возвратно-поступательного маховика, для коррекции орбиты КА;

9. Использование в конструкции гексапода линейных электродвигателей для грубого наведения и пьезокерамических двигателей для точного наведения, работающих в широком диапазоне температур, включая криогенные, и апробированных в космосе.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОШИБОК РАЗВОРОТА ГИРОПЛАТФОРМЫ
ТРЕХОСНОГО ГИРОСТАБИЛИЗАТОРА**

А.В.Ващенко, С.Б. Савин

ФГУП НПЦ АП им. академика Н.А.Пилюгина

Ю.Г. Егоров

(МГТУ им. Н.Э.Баумана)

Трехосные гиростабилизаторы (ТГС) составляют основу инерциальных измерительных блоков систем управления ракет-носителей. С целью повышения точностных характеристик ТГС и расширения функциональных возможностей систем управления применяются развороты гироскопов (ГП) ТГС в режимах стабилизации с командной прецессией вокруг различных осей.

В процессе реализации разворотов гироскопов возникают ошибки, обусловленные инструментальными погрешностями ТГС и его чувствительных элементов (ЧЭ).

Проведены исследования ошибок разворота гироскопов ТГС в зависимости от требуемой траектории углового движения ГП, параметров систем управления командной прецессией, особенностей конструкции прибора и инструментальных погрешностей ТГС и ЧЭ. Проанализированы механизмы возникновения ошибок.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем управления угловым движением ТГС в режимах стабилизации с командной прецессией.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
БИМОРФНОГО ПЬЕЗОГИРОСКОПА**

В.П. Подчерцев, Е.А. Кондратов

МГТУ им. Н.Э. Баумана

Балочные вибрационные гироскопы (БВГ) в настоящее время нашли широкое применение в автомобильной технике, робототехнике, системах управления полетом снарядов и малоразмерных летательных

аппаратов благодаря простоте своей конструкции и технологии. Среди наиболее известных зарубежных фирм занимающихся производством таких гироскопов можно выделить корпорации MURATA, NEC TOKIN и др., а из отечественных – ЭЛПА.

Среди большого разнообразия конструктивных схем БВГ наибольшей простотой отличаются биморфные пьезогироскопы, чувствительный элемент (ЧЭ) которых состоит из двух спекаемых друг с другом противоположно поляризованных пьезокерамических пластин, работающих как в измерительном режиме, используя прямой пьезоэффект, так и в исполнительном режиме, используя обратный пьезоэффект, в системе возбуждения колебаний. Узлы колебаний этого чувствительного элемента испытывают наименьшие деформации и поэтому используются для его фиксации в корпусе гироскопа, для исключения взаимовлияния ЧЭ, корпуса и места установки корпуса. На практике, из-за технологических ограничений, непосредственно узлы колебаний не всегда используются для фиксации ЧЭ в корпусе. Кроме того, местоположение узлов колебаний балки изменяется при настройке на требуемую разность частот по осям возбуждения и измерения, да и сама связь ЧЭ с корпусом смещает узлы колебаний. В силу этих причин вопросы вибрационной связи чувствительного элемента с корпусом и виброзащита для этого типа гироскопов являются достаточно актуальными.

В данной работе представлены некоторые результаты моделирования вибрационного взаимовлияния чувствительного элемента биморфного пьезогироскопа с основанием, в том числе, и при его доработке в процессе настройки, даны конструктивные и технологические рекомендации по снижению этого влияния на выходные характеристики гироскопа.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКАЗАНИЙ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ
НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ОЦЕНИВАНИЯ
ПОГРЕШНОСТЕЙ ИХ ДАТЧИКОВ**

В.М. Терешков

МГТУ им. Н.Э.Баумана

Требования к точности авиационных бесплатформенных инерциальных навигационных систем (ИНС) и высокий уровень погрешностей доступных на рынке чувствительных элементов – гироскопов и акселерометров – принуждают к разработке особых алгоритмов построения навигационного решения. Эти алгоритмы часто содержат большое ко-

личество численных параметров, оптимальные значения которых существенным образом зависят от динамики носителя, на борту которого предполагается эксплуатация навигационной системы. Таким образом, отладка алгоритмов, повышение их надёжности и точности оказываются возможны лишь после изучения и обработки обширного массива показаний чувствительных элементов, полученных при их лётных испытаниях.

Высокая сложность и стоимость таких испытаний привели к идее имитационного моделирования сигналов инерциальных датчиков и приёмников спутниковых навигационных систем (СНС). В настоящее время на рынке представлено несколько продуктов для решения этой задачи.

Эти системы предполагают ручной ввод всех параметров моделей ошибок датчиков. Ключевой вопрос об их идентификации в эксперименте остаётся открытым. Эта проблема приобретает особое значение, поскольку величины погрешностей чувствительных элементов в условиях движения носителя могут отличаться от тех же величин, измеренных в покое или указанных производителем в спецификации, что может быть связано с особым температурным режимом эксплуатации, вибрацией основания и т.п.

Предлагаемая концепция полунатурного моделирования ИНС имеет своей целью построение замкнутого программного комплекса имитации показаний датчиков навигационной системы, свободного от названных недостатков. Она включает:

- имитацию пространственной траектории летательного аппарата, а также идеализированных сигналов гироскопов, акселерометров и приёмника СНС на этой траектории;
- выбор модели погрешностей чувствительных элементов, необходимой и достаточной для адекватного представления характеристик бесплатформенного инерциального измерительного блока низкого или среднего класса точности;
- проведение натурных испытаний ИНС в режиме коррекции от СНС на автомобиле;
- автоматизированное выявление статистических параметров погрешностей датчиков ИНС и СНС в соответствии с выбранной моделью по результатам натурных испытаний;

– генерацию сигналов ошибок датчиков как случайных процессов с полученными ранее статистическими параметрами и их наложение на идеальные показания.

Ценность такой методики, сочетающей численную имитацию траектории летательного аппарата с натурным экспериментом по определению погрешностей чувствительных элементов ИНС, состоит в создании без помощи специальных стендов тех условий движения и вибрации носителя, которые близки к условиям эксплуатации авиационных ИНС.

ПРИМЕНЕНИЕ СИГМА-ТОЧЕЧНОГО ФИЛЬТРА КАЛМАНА В ИНТЕГРИРОВАННОЙ ИНЕРЦИАЛЬНО-СПУТНИКОВОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ

М.А. Ильина

МГТУ им. Н.Э.Баумана

Фильтр Калмана – широко применяемый и эффективный метод оценки вектора состояния динамической системы с использованием измерений некоторых компонент вектора состояния. Классический алгоритм фильтра Калмана позволяет работать с линеаризованными моделями динамических систем, дискретизированных по времени.

Однако для существенно нелинейных динамических систем использование линеаризованной модели может быть неэффективным. Алгоритм сигма-точечного фильтра Калмана (sigma-point Kalman filter) при оценке вектора состояния системы позволяет учитывать статистические характеристики случайных величин, что даёт возможность повысить точность оценивания по сравнению с классическим алгоритмом.

В работе рассматриваются особенности применения сигма-точечного фильтра Калмана для построения интегрированной инерциально-спутниковой навигационной системы для наземного транспортного средства. Проводится сравнение классического и сигма-точечного алгоритмов фильтра Калмана

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ КАЛИБРОВКИ
БЕСПЛАТФОРМЕННЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ
ЗАМКНУТЫМ МЕТОДОМ**

Д.Б. Пазычев

МГТУ им. Н.Э.Баумана

Автоматизированный комплекс предназначен для калибровки бесплатформенных инерциальных навигационных систем среднего класса точности.

Комплекс состоит из специализированного оборудования, позволяющего размещать навигационную систему с заданной ориентацией и изменять ее в процессе работы комплекса по заданному закону, а также специального программного обеспечения, рассчитывающего ошибки навигационной системы на основании ее выходных сигналов в процессе калибровки.

Процедура калибровки разделена на ряд последовательных этапов, расположенных в определенном порядке, в ходе которых определяются погрешности масштабных коэффициентов, неортогональностей осей и смещений нулей датчиков первичной информации навигационной системы. Каждый из этапов калибровки навигационной системы состоит из 3-х последовательных подэтапов, в ходе которых навигационная система размещается в заданном пространственном положении, производит процедуру автономной выставки и разворачивается на определенные углы относительно заданных осей. Погрешности датчиков навигационной системы определяются на основании сигналов навигационной системы по скорости.

В работе приведены результаты работы комплекса при калибровке бесплатформенной инерциальной навигационной системы построенной на базе волоконно-оптических гироскопов и кварцевых акселерометров.

**ВЛИЯНИЕ РАСТЯЖИМОСТИ СРЕДИННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТОНКОГО
ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕЗОНАТОРА НА ПОГРЕШНОСТИ
ВОЛНОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА**

Д.В. Михайлов, И.В. Меркурьев, В.В. Подалков
Московский энергетический институт
(технический университет)

Рассматривается волновой твердотельный гироскоп (ВТГ) с тонким цилиндрическим резонатором, жестко закрепленным на подвижном основании. Для достижения навигационной точности ВТГ поставлена задача исследования эффектов, связанных с растяжимостью срединной поверхности резонатора. Для описания упругих колебаний тонкой цилиндрической оболочки использованы уравнения В.З.Власова. Поставлена и решена краевая задача, найдены собственные формы и частоты колебаний цилиндрического резонатора с различными краевыми условиями закрепления и геометрическими характеристиками резонатора. В многомодовом приближении исследовано влияние углового движения основания на волновую картину колебаний резонатора. Проведено сравнение параметров волновой картины колебаний с математической моделью колебаний резонатора, построенной с использованием гипотезы о нерастяжимости срединной поверхности. В докладе приведены результаты стендовых испытаний ВТГ с тонким цилиндрическим резонатором на равномерно вращающемся основании в циклическом режиме свободных и вынужденных колебаний в целях экспериментального определения частот колебаний и значений масштабного коэффициента.

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗГОНА И КВАЗИУСТАНОВИШЕГОСЯ РЕЖИМА
ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПЛАНАРНОГО УСТРОЙСТВА**

А.С. Степанов, В.Ф. Устинов
Московский энергетический институт
(технический университет)

В работе исследуется модель микродвигателя, состоящая из несомого металлизированного лепестка (ленты) с малой изгибной жесткостью, закрепленной на подвижной пластине (слайдере) [1].

Линейные перемещения системы осуществляется путем создания требуемых напряжений на обкладках конденсатора переменной емко-

сти, образованного проводящей лентой и неподвижным электродом [2].

Режим разгона представляет собой серию последовательной подачи импульсов напряжения на обкладки конденсатора. Для исследования разгона и квазиустановившегося режима слайдера в рамках принятой модели рассматриваются две фазы движения – активная и пассивная.

Активная фаза включает в себе перемещение пластины за один шаговый режим. Определяются силы, действующие на слайдер, оценивается электростатическая нагрузка, решается нелинейная краевая задача о деформациях ленты, моделируемой тонким гибким стержнем. Полученные уравнения относятся к классу сингулярно – возмущенных, и для построения их решения используется метод асимптотического разложения [3].

В пассивной фазе определяется период релаксации упругой ленты. В качестве модели ленты рассматривается невесомый упругий лепесток с сосредоточенным на правом конце точечным грузом, масса которого равна массе ленты. На пассивной стадии решается краевая задача, посредством которой определяются силы, действующие на слайдер и точечную массу. Исследуется динамика слайдера и относительное движение точечного груза.

Путем варьирования продолжительности импульса и сосредоточенной массы ленты оценивались такие параметры, как длительность релаксации лепестка, время и средняя скорость выхода слайдера на квазиустановившийся режим.

Литература

1. Степанов А.С., Устинов В.Ф. Моделирование динамики электростатического планарного микродвигателя // Вестник МЭИ. – 2010. № 4. – С. 12-19.
 2. Косцов Э.Г., Багинский И.Л., Бухганец Д.И., Кащеев Э.Л. Электростатический двигатель для быстродействующих микромеханических устройств // Микросистем. техн.– 2004. N 4. – С. 2-7.
 3. Васильева А.Б., Бутузов В.Ф. Асимптотические разложения решений сингулярно возмущённых уравнений.–М.:«Наука»,1973.–272 с.
-