

## Секция 21

**Космическая навигация и робототехника****АВТОКОЛЕБАНИЯ ТРЕХСТЕПЕННОГО ГИРОСКОПА С СУХИМ  
ТРЕНИЕМ В ОСЯХ КАРДАНОВА ПОДВЕСА НА ВРАЩАЮЩЕМСЯ  
ОСНОВАНИИ****С.А. Черников****(МГТУ им. Н.Э. Баумана)**

Известно, что в системах, где трение покоя превышает трение движения, возникают релаксационные автоколебания.

Представляя характеристику сухого трения в оси карданова подвеса в зависимости от относительной угловой скорости в виде кривой с отрицательным наклоном в области нулевых скоростей и положительным в области закритических скоростей, можно показать, что в такой системе неизбежно возникают автоколебания при угловом движении основания со скоростью, соответствующей ниспадающему участку характеристики сухого трения. При этом угловое движение основания является источником энергии автоколебаний. Механическим аналогом динамических свойств гироскопической системы в данном случае является модель Ван-дер-Поля.

Определены условия возникновения и параметры автоколебаний. При этом частота автоколебаний оказывается равной собственной частоте системы, а амплитуда определяется угловой скоростью основания. Показано, что при малых отклонениях от равновесия основное значение имеет линейный член отрицательного трения, оказывающий дестабилизирующее воздействие, что приводит к неустойчивому состоянию равновесия, и сколь угодно малые начальные возмущения вызывают постепенно нарастающие колебания. Идет процесс «раскачки», но при этом увеличивается демпфирующее влияние кубического члена в характеристике трения. Рост амплитуды колебаний замедляется, и возникает стационарный режим автоколебаний.

Предложен простой способ гашения автоколебаний. Результаты теоретических исследований подтверждаются компьютерным моделированием нелинейной гиросистемы.

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГИХ ПОДВЕСОВ  
МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ***Подчерцев В.П., Лисицын К.В.**(МГТУ им Н.Э. Баумана)*[podch@list.ru](mailto:podch@list.ru), [fox4all@yandex.ru](mailto:fox4all@yandex.ru)

Широкое применение микромеханических инерциальных чувствительных элементов в различных областях техники: автомобильной, робототехнике, мобильных коммуникаторах, профессиональных и игровых манипуляторах, в беспилотных летательных аппаратах, военной технике и т.д. требует разработки надежного и достаточно удобного в массовом производстве аппарата их расчета с учетом особенностей их технологии и условий конкретного применения. Несмотря на несомненные успехи численных методов исследования микромеханических элементов с помощью таких программных средств как ANSYS и других, в том числе и специализированных для MEMS-технологий, имеются очевидные ограничения этих методов не позволяющих определить закономерности влияния значительного числа параметров (конструктивных и технологических) на характеристики этих чувствительных элементов. Аналитические же методы анализа конструкций MEMS методами, используемыми в теории упругости, несмотря на кажущуюся привязку к конкретной конструкции, имеют достаточно обоснованную перспективу применения для большого класса этих конструкций в силу ограниченного набора упругих элементов подвеса обеспечивающего соединение инерционного чувствительного элемента с корпусом прибора.

В докладе представлены некоторые результаты аналитического исследования упругих подвесов MEMS на примере двухкомпонентного микромеханического датчика угловой скорости. Дано сравнение с результатами численного моделирования в программной среде ANSYS. Показаны аналитические соотношения определяющие взаимосвязь упруго-массовых характеристик микромеханического гироскопа с различными конструктивно-технологическими факторами.

Предложенные методы аналитического исследования упругих подвесов и их сравнение с результатами численного моделирования позволяют выработать рекомендации при проектировании микромеханических чувствительных элементов.

**МОДЕЛЬ ОШИБОК ОРИЕНТАЦИИ ГИРОПЛАТФОРМЫ  
ТРЕХОСНОГО ГИРОСТАБИЛИЗАТОРА****Ю.Г. Егоров****(МГТУ им. Н.Э.Баумана)****А.В.Ващенко, С.Б. Саввин****(ФГУП НПЦ АП им. академика Н.А.Пилюгина)**[a.vashenko@mail.ru](mailto:a.vashenko@mail.ru), [egoroviu2@yandex.ru](mailto:egoroviu2@yandex.ru), [SavvinSB@yandex.ru](mailto:SavvinSB@yandex.ru)

С целью расширения функциональных возможностей систем управления ракет-носителей применяют развороты гироскопов (ТГС). В процессе проведения разворотов гироскопов ТГС возможны ошибки ориентации, обусловленные инструментальными погрешностями ТГС.

Разработана модель ошибок ориентации гироскопов ТГС, учитывающая ошибки выставки гироскопов на гироскопе, ошибки цепи управления по каналу прецессии, уходы гироскопов, ошибки начальной ориентации гироскопов.

Модель позволяет провести оценку влияния инструментальных погрешностей ТГС на точность разворота гироскопов, а так же может быть использована для синтеза закона управления гироскопом ТГС.

**МАЛОГАБАРИТНЫЙ ГИРОСТАБИЛИЗАТОР ТЕЛЕКАМЕРЫ ДЛЯ БПЛА****А.В.Кулешов, В.В.Фатеев****(МГТУ им. Н.Э.Баумана)**[akul1974@mail.ru](mailto:akul1974@mail.ru)

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) давно и с успехом используются для решения задач, связанных с разведкой, целеуказанием, охраной границ и противодействием терроризму. В большинстве случаев решение этих задач требует создания гироскопизированных оптико-электронных систем обзора и мониторинга окружающего пространства с цифровыми телекамерами, тепловизорами, дальномерами и пеленгаторами. Такие системы позволяют с летательного аппарата (в том числе и беспилотного) осуществлять поиск, обнаружение, распознавание и сопровождение людей, спускаемых космических аппаратов, автомобилей и других подвижных объектов.

Наряду с малой массой и габаритами такие гироскопы должны сохранять высокую точность стабилизации (не хуже 1-2 угл.

мин.) и работоспособность в жестких условиях эксплуатации БПЛА (при ускорениях до 15g).

В докладе рассматривается гиростабилизатор для БПЛА, представляющий собой платформу с телекамерой в двухосном кардановом наружном подвесе с двумя установленными на ней волоконно-оптическими гироскопами и двухканальную систему стабилизации.

Во время взлета, посадки и подлета к месту съемки гиростабилизатор выставляется по корпусу и поддерживается в этом положении системой электрического арретирования.

Управление положением платформы с телекамерой во время проведения съемки осуществляется в режиме гироскопической стабилизации либо оператором вручную посредством джойстика, либо в режиме автоматического слежения за корпусом. Во втором случае на повестку дня встают вопросы обеспечения устойчивости четырехконтурной системы стабилизации и управления, которые и рассмотрены в докладе.

В докладе представлена математическая модель гиростабилизатора с замкнутым контуром управления в режиме автоматического слежения за корпусом. Приведены результаты исследования устойчивости гиростабилизатора с замкнутым контуром управления. На основе анализа этих результатов определены характер и величина влияния параметров контура управления на устойчивость гиростабилизатора. Предложены способы обеспечения устойчивости такого гиростабилизатора.

#### **ГАЗОДИНАМИКА МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

*Подчерцев В.П.*

*(МГТУ им. Н.Э. Баумана)*

[podch@list.ru](mailto:podch@list.ru)

Одной из важных проблем в технологии изготовления микромеханических приборов (ММП) является снижение возмущающих сил и моментов, приложенных к чувствительному элементу, а одним из факторов определяющих эти воздействия являются газодинамические силы и моменты, обусловленные наличием газовой среды во внутреннем объеме прибора. Наиболее очевидное средство снижения влияния газовой среды на параметры ММП и достаточно широко используемое в мировой практике – это снижение давления газа в приборе или его полное вакуумирование. Однако, в ряде случаев наличие газовой среды жела-

тельно, например, для обеспечения требуемого качества переходных процессов механической системы ММП, сохранения постоянства газовой среды за счет снижения газовыделения из элементов конструкции прибора в его внутренний объем, а также для упрощения технологии изготовления и соответствующего снижения цены изделия. Поэтому исследование газодинамики чувствительного элемента ММП достаточно актуально и позволяет выработать требования к конструкции и параметрам газовой заправки с целью обеспечения заданных характеристик прибора.

В докладе на основе анализа уравнений Навье-Стокса применительно к конструкции ММП рассмотрены основные закономерности динамики газа, определены нормальные и тангенциальные силы, приложенные к поверхности чувствительного элемента, дана оценка сжимаемости газа на упругие свойства газовой среды. Предложено решение газодинамической задачи с учетом конкретных конструктивных особенностей ММП, в частности, с использованием разделения всей исследуемой области на отдельные участки, допускающие аналитическое решение, и последующего учета граничных условий, соответствующих неразрывному течению газа, на стыке этих областей.

Рассмотренные методы анализа газодинамики микромеханических чувствительных элементов позволяют выработать рекомендации при проектировании ММП.

#### **АЭРОГРАВИМЕТР**

***А.В. Быковский, А.В.Полынков***  
***(МГТУ им. Н.Э.Баумана)***

Существующие подходы к изучению гравитационного поля Земли включают в себя космические, морские, авиационные и наземные методы измерения ускорения силы тяжести. Построение картины гравитационного поля Земли с использованием гравиметров, установленных на космических ЛА (например, криогенных высокоточных гравиметров), позволяет построить глобальную карту гравитационных аномалий с погрешностью не менее 4... 5 мГал и разрешением 3... 5 км. Такой подход используется в основном для научного исследования гравитационного поля Земли. Практические приложения, например, для поиска полезных ископаемых требуют более высокой точности (до 0.1 мГал) при разрешении до 500 м. Наиболее перспективным является использование малогабаритных аэрогравиметров, способных работать в большом

диапазоне ускорений (от 0.1 мГал до 200000 мГал). Летательный аппарат, на борту которого устанавливается гравиметрическая система, может иметь ускорения в диапазоне частот от нуля до 2000 Гц.

В работе рассматриваются практические вопросы разработки и испытаний малогабаритного аэрогравиметра, устанавливаемого на гиросtabilизированную платформу. Приведены результаты исследования системы термостатирования аэрогравиметра, долговременной стабильности и разрешающей способности гравиметра, влияние вибрации на выходной сигнал гравиметра. Разработанный аэрогравиметр имеет размеры (с трехконтурной системой термостатирования): диаметр – 90 мм, высота корпуса – 110 мм. Масса прибора – 700 грамм. Потребляемая мощность при температуре окружающей среды 20 °С не более 10 Вт.

**ДИНАМИКА ВОЛНОВОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА  
В РЕЖИМАХ СВОБОДНЫХ И ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ  
ПРИ МЕДЛЕННО ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ПАРАМЕТРАХ  
ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ**

***С.В. Астахов***

***(Национальный Исследовательский Университет МЭИ)***

[nccl@mail.ru](mailto:nccl@mail.ru)

Волновой твердотельный гироскоп является одним из наиболее перспективных датчиков инерциальной информации, успешно применяемых в настоящее время в составе систем ориентации, навигации и управлении подвижных объектов. В основе принципа действия устройства лежит эффект инерции упругих волн колебаний симметричного тела, в качестве которого выступает тонкий осесимметричный резонатор, который изготовлен из материала с малым коэффициентом потерь при колебаниях. Нелинейные колебания резонатора и погрешности в его изготовлении приводят к раздвоению частот изгибных колебаний, что в свою очередь сказывается на волновой картине колебаний резонатора, а также точности прибора.

В целях повышения точности предложены новые математические модели свободных и вынужденных колебаний, с учетом нелинейных упругих свойств материала резонатора и медленно изменяющихся параметров функционирования гироскопа. Данные модели в отличие от линейных позволяют объяснить явления, наблюдаемые в ходе экспе-

римента: срыв колебаний, уходы прибора из-за небольшого расщепления частоты, зависимость частоты от амплитуд колебаний и др.

Используя метод малого параметра, техническую теорию оболочек, принципа Гамильтона – Остроградского, получены уравнения малых колебаний в режиме вынужденных и свободных колебаний. При выводе уравнений динамики тонкого упругого резонатора учитывалась физическая нелинейность упругих свойств материала. Получены дифференциальные уравнения движения для медленно изменяющихся амплитуд и фаз колебаний резонатора. Построены графики зависимости волновой картины прибора в элементах орбиты в режиме свободных колебаний и амплитудно-частотные характеристики в режиме вынужденных колебаний. Сделаны выводы о влиянии нелинейной упругости материала резонатора на точность прибора и предложены методы и алгоритмы ее повышения. Для этого была разработана новая методика, алгоритмическое и программное обеспечение точностных испытаний прибора для оценки параметров математической модели.

#### **МОДЕЛЬ ОШИБОК БЛОКА АКСЕЛЕРОМЕТРОВ**

**Мьинт Хтун Наинг**  
**(МГТУ им. Н.Э.Баумана)**  
[mhnainq44@gmail.com](mailto:mhnainq44@gmail.com)

В состав бесплатформенных инерциальных навигационных систем (БИНС) входят триады акселерометров. В выходях данных триады акселерометров имеются ошибки, вызванные инструментальными погрешностями акселерометров. Инструментальные погрешности акселерометров влияют на выходные ошибки БИНС в определении навигационных параметров. Одним из основных условий создания БИНС является обеспечение их высокоточной калибровки, заключающейся в определении инструментальных погрешностей акселерометров с необходимой точностью.

В данной работе разработана рациональная векторно-матричная модель инструментальных погрешностей триады акселерометров БИНС, которая включает ошибки ориентации, ошибки выставки триады акселерометров, ошибки в масштабных коэффициентах и смещения нулей. Модель представлена в безразмерном виде и может быть использована при анализе погрешностей триады акселерометров в про-

цессе решения навигационной задачи, а также при разработке методик калибровки параметров триады акселерометров.

**АНАЛИЗ ДИНАМИКИ МИКРОМЕХАНИЧЕСКОГО  
ПЛАНАРНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА**

**А.С. Степанов, В.Ф. Устинов**

**(Национальный Исследовательский Университет МЭИ)**

[stepanov@gmail.com](mailto:stepanov@gmail.com) [UstinovVF@mpei.ru](mailto:UstinovVF@mpei.ru)

Разработка научных основ механики, интеграция нано-, микросистем и создание на этой базе микроэлектромеханических систем (МЭМС) является приоритетным направлением развития науки и техники. Одним из новых физических принципов преобразования электро-механической энергии в МЭМС является электростатический «накат» металлизированного лепестка на поверхность сегнетоэлектрической пленки.

В настоящей работе изложен анализ динамики модели микро-механического акселерометра с электростатическим «накатом».

Рассматривается модель микромеханического акселерометра, состоящая из двух тонких металлизированных лепестков, соединенных с чувствительным элементом, который включает в себя инерционную массу, сосредоточенную на конце тонкого весомого стержня. Вся структура исследуемого устройства образует конденсатор переменной емкости с одной неподвижной и двумя подвижными обкладками. Принцип действия акселерометра основывается на электростатическом «накате» лепестков на поверхность сегнетоэлектрической пленки.

Исследуемый акселерометр относится к компенсационным типам акселерометров. Действие инерционной силы, вызванной измеряемым ускорением, уравновешивается разностью напряжений подаваемых на обкладки конденсатора.

Для определения сил, действующих на чувствительный элемент в переменном поле, решается сингулярно-возмущенная краевая задача о деформации лепестков в переменном электростатическом поле.

Исследование динамики акселерометра сводится к спектральному анализу системы и ее переходных режимов.



**ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ  
АППАРАТОВ В ЕДИНОМ ИНФОРМАЦИОННОМ ПРОСТРАНСТВЕ  
ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ СТАНДАРТОВ  
ПЕРЕДАЧИ/ПРИЕМА ДАННЫХ В НАВИГАЦИОННЫХ  
СИСТЕМАХ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ РОБОТОТЕХНИКИ**

*Л.С. Раткин*

*(Агентство безопасности по инвестициям и бизнесу в России)*

[rathkeen@bk.ru](mailto:rathkeen@bk.ru)

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) относятся к перспективному классу аэрокосмических средств, равноприменимых для решения как военных, так и гражданских задач. Одной из ключевых проблем управления БПЛА является отработка согласованного взаимодействия между их группами. Данная проблема основана, в частности, на особенностях функционирования БПЛА в едином информационном пространстве.

Решение задачи оптимизации стандартов передачи/приема данных в навигационных системах необходимо по многим причинам. Например, согласованное взаимодействие БПЛА разных поколений предполагает различную скорость реакции на выполнение команд, обусловленную скоростью пропускных каналов связи и обработки информации.

В докладе рассматривается решение оптимизационной задачи в случае оперативного распознавания по ИК-сигнатурам своих и чужих БПЛА. Данная процедура применяется многократно при встрече двух БПЛА: каждый из них либо по запросу по каналу связи на пункт управления, либо методом оперативного поиска по внутренней базе данных должен оперативно определить принадлежность БПЛА. Долям секунд, затрачиваемым на выполнение этой операции при поиске, соответствует перебор от сотен до десятков тысяч ИК-сигнатур и сравнением их с исходной ИК-сигатурой по совокупности ключевых признаков.

Выводы:

1. Оптимизационная задача для обеспечения функционирования БПЛА решается в едином информационном пространстве. В зависимости от критерия возможно получение локального или глобального оптимума на участке информационного пространства любой протяженности и на любом временном интервале.

2. Целесообразно совершенствование нормативно-правовой ба-

зы для устранения правовых пробелов и противоречий, связанных со стандартизацией передачи/приема данных в навигационных системах для космической робототехники. Корректировка законодательства повысит эффективность функционирования орбитальной спутниковой группировки ГЛОНАСС и позволит сократить затраты на коммуникацию БПЛА.

---