

УДК 62-752.4  
ББК 22.213  
М33

Рецензенты:

д-р физ.-мат. наук, профессор Института проблем  
механики РАН *Ю.К. Жбанов*;  
д-р техн. наук, профессор МГУ им. М.В. Ломоносова *Б.С. Лунин*

**Матвеев В. А.**

М33 Гироскоп — это просто / В. А. Матвеев. — М.: Изд-во  
МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012. — 191, [1] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-3576-0

Кратко изложены принципы действия и основы теории типовых гироскопических приборов, которые эксплуатируются в настоящее время, с традиционных позиций прикладной теории гироскопов. Особое внимание уделено физическому смыслу работы гироскопов и составлению их уравнений (на базе принципа Даламбера, теоремы Резаля или уравнений Эйлера) с последующим анализом погрешностей в рамках ограниченных допущений. Содержание книги соответствует курсу лекций для бакалавров, который автор читает в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов, обучающихся по специальностям «Навигационные гироскопические системы», «Системы управления летательными аппаратами», а также для инженеров, работающих в области создания систем навигации и управления подвижными объектами. Отдельные разделы могут служить основой для выполнения научно-исследовательских работ выпускников старших классов, в частности, по программе олимпиад «Шаг в будущее», «Космонавтика».

УДК 62-752.4  
ББК 22.213

ISBN 978-5-7038-3576-0

© Матвеев В.А., 2012  
© Оформление. Издательство  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012

## ПРЕДИСЛОВИЕ

---

---

Традиционная гироскопия, построенная на базе гироскопов Фуко, постепенно сдает свои позиции, уступая микромеханическим гироскопам, создаваемым с применением кремниевой технологии, волоконно-оптическим и лазерным, волновым твердотельным и другим гироскопам, особенно в тех областях техники, где требуются миниатюризация и снижение стоимости систем управления, навигации, ориентации и стабилизации при обеспечении заданных точности, надежности, времени готовности и срока службы в сложных условиях эксплуатации. Микромеханические гироскопы получают широкое распространение при создании систем беспилотных летательных аппаратов, микроспутников, автомобилей, тактических ракет, вертолетов, роботов, компьютерных игровых приставок, в гравиметрии, геологоразведке, маркшейдерском деле и др. В то же время эксплуатация гироскопов, даже разработок более чем 25-летней давности, продолжается. Это относится к гироскопам и гиросtabilизаторам баллистических ракет, гироскопическим авиационным приборам — гироскопам, гироскопическим авиационным приборам — гироскопам, гироскопическим приборам — гироскопам, гироскопическим приборам — гироскопам, гироскопическим приборам — гироскопам (демпфирующим гироскопам), гироскопическим системам управления, навигации, ориентации и стабилизации морских и самоходных объектов, прецизионным датчикам угловой скорости бескарданных инерциальных навигационных систем и т. п. При этом основные теоретические положения создания «старых» гироскопов распространяются и на разработку гироскопов и гироскопов нового поколения.

Например, камертонный гироскоп, теория которого разработана еще в 1960-е годы, реализован в начале XXI в. на базе кремниевой технологии с применением достижений микро-

электроники и новых способов обработки информации. Так, бескарданные системы навигации, построенные на микромеханических гироскопах, моделируют гироскопические карданные системы (гировертикали, курсовертикали и т. д.).

Поскольку точность микромеханических гироскопов пока невысока, чрезвычайную актуальность приобретают проблемы алгоритмической компенсации погрешностей гироскопа в зависимости от условий эксплуатации: различных эволюций объектов (вираж, фугоидные колебания, прямолинейный полет, потеря высоты, фигуры высшего пилотажа), линейных и вибрационных перегрузок, температуры окружающей среды, давления, радиация и др.

В ряде систем допускается кратковременная коррекция выходных сигналов гироскопов от ГЛОНАСС, GPS или чувствительных элементов, показания которых зависят от характеристик физических полей (магнитных, тепловых и др.). Это приобретает особую значимость при построении интегрированных пилотажно-навигационных комплексов.

Использование достижений нанотехнологии, микрооптической технологии (волоконно-оптические волновые элементы, фотонно-кристаллические волокна) при создании волоконно-оптических гироскопов, применение принципа построения гироскопов на основе эффекта волн Дебройля позволят в дальнейшем значительно улучшить характеристики гиросистем.

Во введении рассмотрены свойства гироскопа, даны примеры составления приближенных уравнений движения гироскопов, описаны механика и принципы работы гироскопов основных типов.

В разделах 1 и 2 раскрыто понятие собственной скорости прецессии гироскопа, приведена методика выбора модели погрешности гироскопа, проанализированы погрешности свободного гироскопа при реализации подвижной системы координат.

Раздел 3 посвящен вопросам определения курсового угла объекта с помощью трехстепенного гироскопа, включая гиросполукомпас, гироскомпас и гиросорбитант.

В разделах 4 и 5 изложены вопросы измерения углов ориентации объекта относительно вертикали с помощью гироскопа: свободного гироскопа, гиромаятника, гировертикали с позиционной и интегральной коррекцией. Составлены уравнения движения гироскопа, проанализированы основные погрешности гироскопов, характерные при измерении углов крена и тангажа объекта. В частности, рассмотрен вопрос настройки на период Шулера гировертикали, не имеющей баллистической погрешности. Даны схемы, выполнен краткий анализ погрешностей гиригоризонта, гировертиканта и гириинтегратора системы управления баллистической ракеты.

В разделах 6—8 изучены вопросы измерения угловой скорости и ее интегрирования с помощью гироскопов, имеющих быстровращающийся ротор, составлены уравнения движения и проанализированы основные погрешности таких гироскопов. Приведены схемы гириприборов, построенных на базе классического двухстепенного гироскопа: интегрирующего гироскопа, датчиков угловых скоростей (ДУС) с механической и электрической пружинами, а также схема двухкомпонентного ДУС на базе трехстепенного астатического гироскопа, имеющего две перекрестные электропружины по осям карданова подвеса. Дан анализ работы двухстепенного вибрационного роторного гироскопа (ВРГ), теория которого в какой-то мере характерна для виброскопов различных типов. Успешным развитием схемы ВРГ явилась схема трехстепенного динамически настраиваемого гироскопа (ДНГ) — трехстепенного роторного вибрационного гироскопа с внутренним упругим вращающимся кардановым подвесом, у которого при динамической настройке упругие моменты торсионов компенсируются центробежным моментом инерции кольца. Составлены прецессионные уравнения, проанализированы погрешности движения ДНГ для двух режимов работы: двухканального интегрирующего (свободного) гироскопа и трехстепенного двухкомпонентного ДУС.

Разделы 9—12 посвящены вибрационным и оптическим гироскопам, которые получили широкое распространение в конце XX — начале XXI в.: это волновой твердотельный, воло-

конно-оптический, вибрационный рамочный, микромеханический гироскопы, лазерный ДУС. Кратко изложены основы прикладной теории, определены выходные характеристики и погрешности гироскопов.

Принципы работы гироскопов описаны в разделе 13. Приведены схемы и краткий анализ работы одно-, двух- и трехосных гироскопов, построение которых предполагает использование различных чувствительных элементов: двухстепенных гироскопов, поплавковых интегрирующих, микромеханических гироскопов, ДУС, ДНГ.

В целом материал книги требует внимательного прочтения, тогда он будет восприниматься в соответствии с названием: «Гироскоп — это просто».

## ВВЕДЕНИЕ

---

---

В последнее время развитие авиации, включая создание современных беспилотных аппаратов, тактических ракет, автомобильного транспорта, робототехники, малых космических летательных аппаратов, потребовало создания нового поколения миниатюрных гироскопов для систем ориентации, стабилизации и навигации. Микромеханические гироскопы (ММГ) обладают малыми массогабаритными характеристиками, имеют малое время готовности, высокие надежность и срок службы, малые энергетические затраты и низкую стоимость. Большинство развитых стран (США, Франция, Япония, Китай и др.) в настоящее время производят ММГ, различающиеся конструктивным исполнением, точностью и стоимостью [1].

При разработке и производстве ММГ используются достижения вычислительной техники и микроэлектроники, новейшие технологии, связанные, в частности, с применением монокристаллического кремния, автоматизированные системы разработки и изготовления, а при эксплуатации применяются современные системы коррекции выходной информации ММГ. В России пока отсутствует крупносерийное производство ММГ, хотя их применение имеет широкие перспективы.

История гироскопии начинается с известных опытов Л. Фуко (1852 г.), который с помощью быстровращающегося ротора, помещенного в карданов подвес, экспериментально показал наличие суточного вращения Земли. Отсюда и возникло название такого устройства — гироскоп (от греч. «ги-ро» — вращение, «скопео» — наблюдаю).

Одно из первых определений: гироскоп — это быстровращающийся ротор с одной неподвижной точкой, эллипсоид инерции которого есть эллипсоид вращения.

## 1. МОДЕЛЬ ПОГРЕШНОСТИ ГИРОСКОПА

---

Под действием вредных (возмущающих) моментов гироскоп прецессирует (см. формулу (19)), утрачивая способность сохранять первоначальное положение в инерциальном пространстве. Угол  $\theta$  отклонения гироскопа за заданное время  $\Delta t$  называют дрейфом (или уходом) гироскопа:

$$\theta = \frac{M_{\text{вр}}}{H} \Delta t = \omega_{\text{ССП}} \Delta t, \quad (33)$$

где  $\omega_{\text{ССП}}$  — собственная скорость прецессии (ССП), или скорость дрейфа (ухода) гироскопа.

Практическая гироскопия до конца XX в. была связана во многом с проблемой уменьшения вредных моментов, действующих на гироскоп. Применялись опоры «сухих» гироскопов с малым трением: специальные шарикоподшипниковые, газостатические и упругие опоры, магнитные и электростатические подвесы и т. д. Созданы поплавковые гироскопы (в отличие от «сухих» гироскопов, в которых ротор вращается в герметичной камере-поплавке, помещенной в жидкость); в этом случае архимедова сила разгружает чувствительные опоры — опоры поплавка (см. рис. 20). Впоследствии разрабатываются гироскопы, не имеющие быстровращающегося ротора и карданова подвеса.

Собственная скорость прецессии (дрейфа)

$$\omega_{\text{ССП}} = \omega_0 \pm \Delta\omega_{\text{сл}}, \quad (34)$$

где  $\omega_0$  — постоянная составляющая ССП (обычно устанавливают при испытаниях гироскопа в заводских условиях или определенных режимах эксплуатации объекта);  $\Delta\omega_{\text{сл}}$  — случайная составляющая ССП.

## 2. УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ ТРЕХСТЕПЕННОГО ГИРОСКОПА В ПОДВИЖНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

---

С помощью идеального трехстепенного гироскопа можно определить углы ориентации объекта относительно инерциальной (неподвижной) СК  $O\xi\eta\zeta$ . Для установления ориентации объекта с помощью гироскопа относительно Земли реализуется подвижная СК, которая имеет переносную угловую скорость  $\bar{\omega}_e$  относительно инерциального пространства, вызванную суточным вращением Земли вокруг своей оси и движением объекта относительно Земли. Тогда при составлении уравнений гироскопа необходимо дополнительно учесть гироскопический момент  $\bar{M}_g = \bar{H} \times \bar{\omega}_e$  в его проекциях на оси СК  $Oxuz$ . В зависимости от задач ориентации и навигации применяют географическую, ортодромическую, траекторную (скоростную) и другие СК. Так, географическую  $O\xi_r\eta_r\zeta_r$  и ортодромическую  $O\xi_o\eta_o\zeta_o$  СК используют для анализа работы курсовых гироскопов (гироскопов, указателей направления ортодромии, гироскопов и т. п.).

В географической СК навигация осуществляется по локсодромии, линии равных курсов, в ортодромической СК — по ортодромии, кратчайшему расстоянию между двумя точками на поверхности Земли (по дуге радиусом  $R \approx 6372$  км). Траекторную СК  $O\xi_T\eta_T\zeta_T$  применяют для анализа гироскопов, определяющих положение объекта относительно плоскости горизонта, например углов крена и тангажа для самолетов (гировертикаль). Определим проекции  $\bar{\omega}_e$  абсолютной угловой скорости на оси подвижных базовых СК.

Оси географической СК  $O\xi_r\eta_r\zeta_r$  направлены следующим образом (рис. 35):  $O\xi_r$  — на восток,  $O\eta_r$  — на север,  $O\zeta_r$  — в зе-



### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КУРСА ОБЪЕКТА С ПОМОЩЬЮ ТРЕХСТЕПЕННОГО ГИРОСКОПА

---

---

#### Гиropолукомпас и указатель направления ортодромии

Погрешности измерения курса магнитным компасом, связанные с влиянием железных корпусов объекта и элементов конструкций, внешних магнитных полей объекта, движения объекта (линейные ускорения, колебания, повороты и т. п.), вибрации основания привели в конце XIX — начале XX в. к необходимости создания курсовых гироскопических приборов и систем (гироскопов, гиropолукомпасов и др.). Гиropолукомпас (ГПК) строится на базе трехстепенного астатического гироскопа и имеет системы горизонтальной и азимутальной коррекции (рис. 39). Система горизонтальной коррекции состоит из ЧЭ электролитического уровня — маятника и исполнительного элемента — датчика момента ДМ1, создающего момент вокруг оси  $Oy_1$  наружной рамки. Базовая СК  $O\xi\eta\zeta$  — географическая.

Принцип работы ЭУ поясняет рис. 40.

При наклоне корпуса ЭУ относительно плоскости горизонта (рис. 40, б) на выходе ЭУ появляется напряжение  $U_{\text{вых}} = K_9\beta$  при  $\beta \leq \beta_{\text{п}}$ ; зона пропорциональности  $\beta_{\text{п}} \approx 30'$  (рис. 40, в).

Датчик момента (см. рис. 11, б) часто строится на базе постоянного магнита (ротор), который взаимодействует с обмотками (статор) и при наличии тока  $i_{\text{ДМ}} \neq 0$  создает момент вокруг оси  $Oy_1$  наружной рамки. В качестве ДМ используют также двухфазные асинхронные двигатели, работающие в заторможенном режиме, микросины и др.

ЭУ горизонтальной системы коррекции устанавливают так, что его плоскость строго параллельна оси гироскопа  $Oz$

#### 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛОВ ОРИЕНТАЦИИ ОБЪЕКТА ОТНОСИТЕЛЬНО ВЕРТИКАЛИ С ПОМОЩЬЮ ГИРОСКОПА

---

##### Маятник

Определение с помощью маятника истинной вертикали (ИВ) места на подвижном объекте невозможно при наличии ускорения  $\dot{V}$  (рис. 46). Маятник занимает положение так называемой кажущейся вертикали (КВ), характеризуемое углом

$$\beta_k = \operatorname{arctg} \frac{\dot{V}}{g} \approx \frac{\dot{V}}{g}. \quad (66)$$

Маятник (рис. 46, а) направлен по равнодействующей инерционной силы  $m\bar{V}$  и силы тяжести  $\bar{G}$ . Уравнение движения маятника для малого  $\beta$

$$ml^2\ddot{\beta} + d\dot{\beta} + mgl\beta = m\dot{V}l + M, \quad (67)$$

где  $m, l$  — масса и длина маятника;  $d$  — коэффициент демпфирования;  $M$  — вредный момент, действующий вокруг оси подвеса.

При  $M = 0$  преобразуем уравнение (67) к стандартному виду:

$$\ddot{\beta} + 2\xi\omega_0\dot{\beta} + \omega_0^2\beta = \frac{\dot{V}}{l},$$

где  $\xi = \frac{d}{2m\omega_0 l^2}$  — относительная степень затухания колебаний маятника;  $\omega_0 = \sqrt{g/l}$  — собственная частота незатухающих колебаний маятника с периодом  $T = 2\pi\sqrt{l/g}$ .

## 5. ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ БАЛЛИСТИЧЕСКОЙ РАКЕТЫ

### Гиригоризонт и гиривертиконт

Гиригоризонт и гиривертиконт — свободные гироскопы, которые используются в системе управления БР (рис. 57). Выходной сигнал с ДУ2 (рис. 58) по углу  $\vartheta$  тангажа БР подается в систему управления, которая обеспечивает полет БР по заданной траектории (см. рис. 57) на ее активном участке (с работающим двигателем). При достижении программных значений угла  $\vartheta_{пр}$  тангажа и скорости  $\bar{V}_{пр}$  двигатель БР отключается (т.  $N$  на рис. 57). Для системы стабилизации БР в плоскости стрельбы  $P$  (по углу рыскания  $\psi$  и крену  $\gamma$ ) используют сигнала-

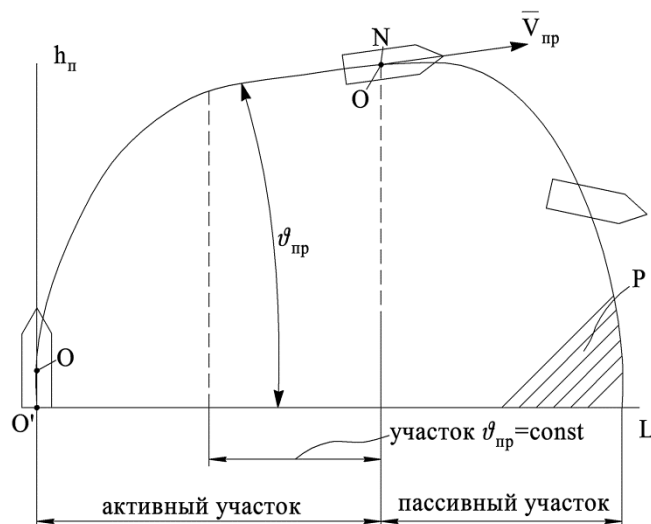
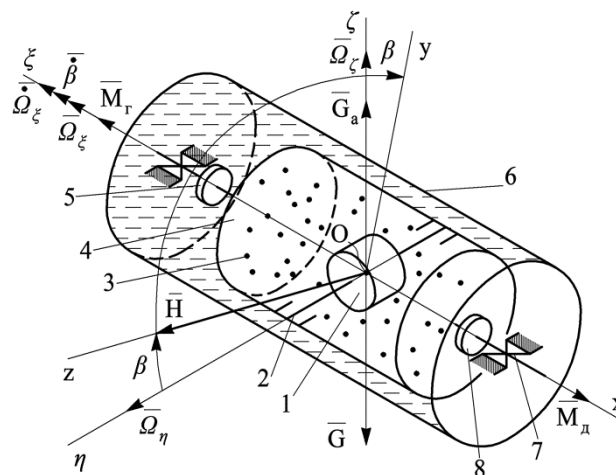


Рис. 57. Траектория БР

## 6. ИНТЕГРИРУЮЩИЙ ГИРОСКОП

В интегрирующем гироскопе (ИГ), построенном на базе двухстепенного гироскопа, гироскопический момент, вызванный угловой скоростью основания, уравнивается демпфирующим моментом. Первые ИГ, спроектированные до 50-х годов XX в., имели пневмодемпферы, которые обладали нестабильными характеристиками по демпфированию и не позволяли создать точные приборы.

Поэтому наибольшее распространение получили поплавковые интегрирующие гироскопы (ПИГ); автором первого патента на такой гироскоп (1943 г.) является профессор Ткачев.



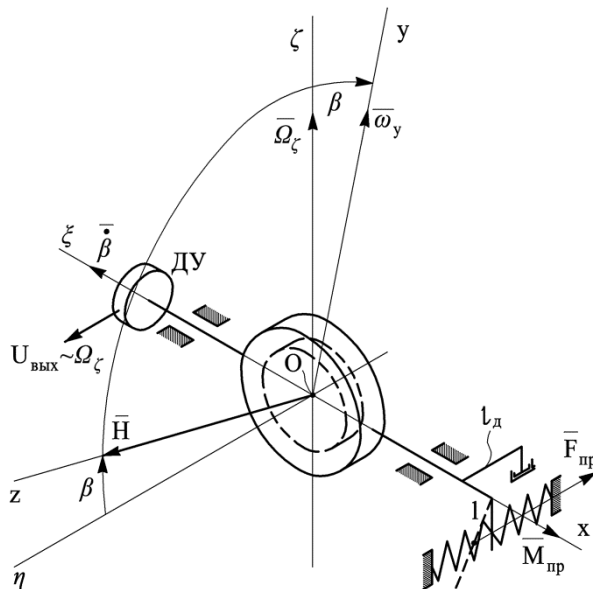
**Рис. 63.** Схема ПИГ:

1 — гидродвигатель (гиромотор); 2 — главные опоры гироскопа — опоры ротора; 3 — газовая среда (5 % He, 95 % H<sub>2</sub>); 4 — корпус поплавка; 5 — датчик угла; 6 — корпус прибора; 7 — опора поплавка; 8 — датчик момента

## 7. ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ С БЫСТРОВРАЩАЮЩИМСЯ РОТОРОМ

### Датчики угловой скорости, построенные на базе двухстепенного гироскопа

Для измерения угловой скорости  $\bar{\Omega}_z$  объекта ось гиросула двухстепенного гироскопа соединяют упругой связью с основанием (рис. 67). Вектор  $\bar{H}$  ДУС выставляют перпендикулярно к вектору  $\bar{\Omega}_z$  измеряемой угловой скорости. При отклонении гироскопа на угол  $\beta$  и действии гироскопического момента  $H\Omega_z \cos \beta$  возникает упругий момент  $K\beta$  ( $K$  — приведенная уг-



**Рис. 67.** Схема ДУС с механической пружиной

## 8. ДИНАМИЧЕСКИ НАСТРАИВАЕМЫЙ ГИРОСКОП

Динамически настраиваемый гироскоп (ДНГ) — трехстепенной астатический гироскоп (рис. 75) с внутренним упругим кардановым подвесом, в котором обеспечена динамическая настройка таким образом, что моменты упругого подвеса уравниваются за целое число оборотов ротора центробежным моментом инерции кольца карданова подвеса. Отсюда название прибора.

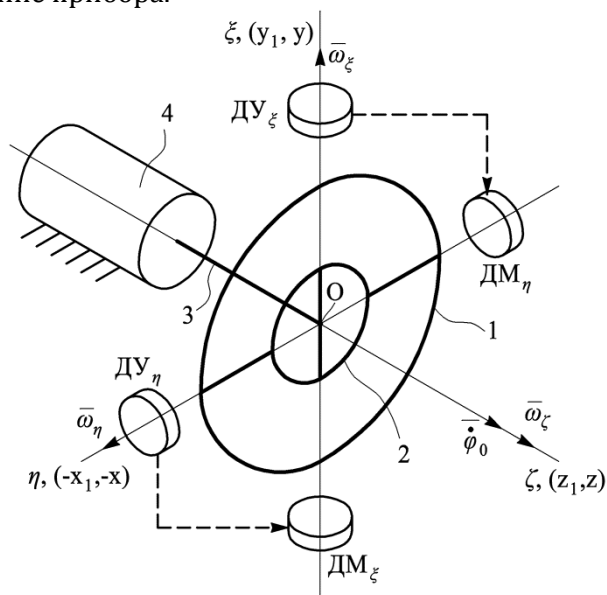
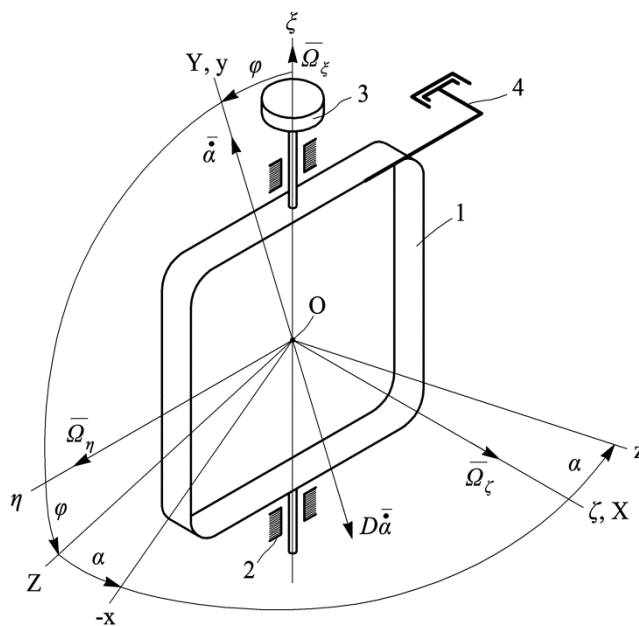


Рис. 75. Схема ДНГ

Согласно рис. 76, оси СК  $O\xi\eta\zeta$  связаны с корпусом,  $Ox_1y_1z_1$  — с кольцом,  $Ox_2y_2z_2$  — с ротором. Двигатель 4 (см. рис. 75) приводит во вращение вал 3 с угловой скоростью  $\dot{\varphi}_0$ ,

## 9. ВИБРАЦИОННЫЙ РАМОЧНЫЙ ГИРОСКОП

В вибрационном рамочном гироскопе (см. рис. 22) чувствительный элемент — рамка — имеет одну степень свободы относительно корпуса, вращаясь в камневых опорах (рис. 84). Кинетический момент рамки образуется вследствие вращения объекта (ракеты) вокруг продольной оси со скоростью  $\Omega_z = \dot{\varphi}$  (обычно 10...20 об/с). На корпусе рамки имеются обмотки, которые находятся в поле постоянных магнитов, поэтому при

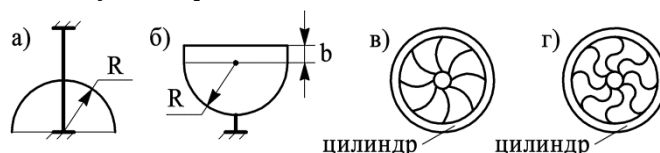


**Рис. 84.** К выводу уравнений ВРГ:

1 — рамка; 2 — камневая опора; 3 — датчик угла  $D\alpha$ ; 4 — демпфирующее устройство

## 10. ВОЛНОВОЙ ТВЕРДОТЕЛЬНЫЙ ГИРОСКОП

В конце XX в. распространение получил волновой твердотельный гироскоп (ВТГ). Основным элементом ВТГ является резонатор в форме полусферы (рис. 86, *a* и *б*) или цилиндра (рис. 86, *в* и *г*). Для прецизионных ВТГ полусферический резонатор и элементы его крепления (ножки) изготавливают из одной монолитной заготовки плавленного кварца (см. рис. 86, *a*). Модульная конструкция резонатора, состоящая из двух деталей — полусферы и ножки, имеет большие технологические погрешности. Крепление резонатора осуществляется с помощью ножек полусферы (см. рис. 86, *a* и *б*), упругих элементов (см. рис. 86, *в* и *г*), которые могут быть выполнены в форме архимедовой спирали или синусоиды. Для ВТГ средней точности резонаторы изготавливают из фтористой бронзы, дюралюминия с малым конструкционным демпфированием. При изготовлении резонаторов микромеханических гироскопов (см. рис. 86, *в* и *г*) используется кремниевая технология.



**Рис. 86.** Резонаторы ВТГ:

*a* — полусферический; *б* — полусферический с цилиндрической кромкой высотой *b*; *в, г* — цилиндрические микромеханического гироскопа

Возбуждение осуществляется на собственной частоте  $\omega_0 = \nu_0 = 2\pi f_0$ . Для цилиндрического резонатора

$$f_0 = \frac{\nu_0}{2\pi} = l(K) \frac{h}{2\pi R^2} \sqrt{\frac{E}{2(1 + \mu)\rho}}, \text{ Гц,}$$



## 11. ОПТИЧЕСКИЕ ГИРОСКОПЫ

### Волоконно-оптический гироскоп

Оптические гироскопы строятся на базе пассивного кольцевого интерферометра (источник излучения — лазер — находится вне оптического контура) и активного интерферометра (кольцевой лазер с оптическим резонатором).

Рассмотрим принцип действия пассивного интерферометра (рис. 92), представляющего собой замкнутый кольцевой световод, в котором луч от внешнего источника (лазера) 4 разделяется с помощью оптического устройства 3 на два (1 и 2) встречно-направленных луча.

Интерферометр имеет регистрирующее устройство, состоящее из оптического смесителя лучей 1, 2 и фотоприемника 5,

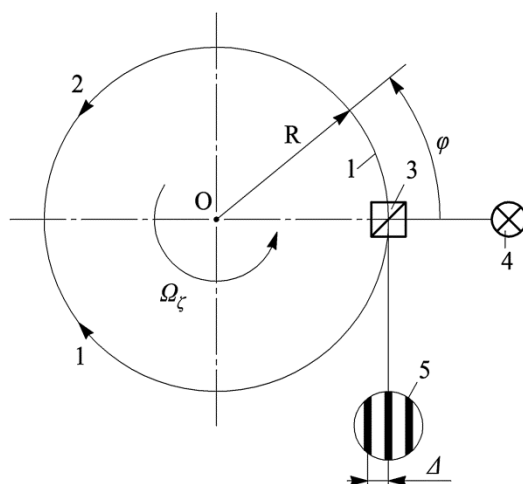


Рис. 92. Схема пассивного интерферометра

## 12. МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ГИРОСКОП РАМОЧНОГО ТИПА

---



---

Во введении рассмотрен принцип измерения угловой скорости и линейного ускорения с помощью микромеханического гироскопа рамочного типа. Конструкция МГР (см. рис. 24) построена на базе кремниевой технологии. В качестве датчика момента используется «гребенчатый привод», датчик угла — емкостного типа [1].

Найдем более точные аналитические соотношения МГР, поясняющие его работу в режиме ДУС.

Выберем СК  $O\xi\eta\zeta$ , связанную с корпусом; СК  $Ox_1y_1z_1$  связана с наружной рамкой карданова подвеса, СК  $Oxyz$  — с внутренней рамкой (рис. 97). Углы  $\alpha$ ,  $\beta$  поворота наружной и внутренней рамок относительно корпуса считаем малыми.

Проекции абсолютных угловых скоростей на оси СК  $Oxyz$ :

$$\begin{aligned}\Omega_x &= \dot{\beta} + \Omega_\xi \cos \alpha - \Omega_\zeta \sin \alpha; \\ \Omega_y &= (\dot{\alpha} + \Omega_\eta) \cos \beta + \sin \beta (\Omega_\zeta \cos \alpha + \Omega_\xi \sin \alpha); \\ \Omega_z &= (\Omega_\zeta \cos \alpha + \Omega_\xi \sin \alpha) \cos \beta - (\dot{\alpha} + \Omega_\eta) \sin \beta.\end{aligned}$$

При малых  $\alpha$  и  $\beta$ ,  $\Omega_\zeta = \Omega$ ,  $\Omega_\eta = \Omega_\xi = 0$

$$\Omega_x \approx \dot{\beta} - \Omega\alpha; \quad \Omega_y \approx \dot{\alpha} + \Omega\beta; \quad \Omega_z \approx \Omega - \dot{\alpha}\beta \approx \Omega.$$

Для составления уравнений движения внутренней рамки (наружную рамку считаем невесомой) воспользуемся теоремой Резаля (в методических целях). Для твердого тела, имеющего неподвижную точку, линейная скорость  $\vec{V}_q$  конца вектора момента количества движения  $\vec{Q}$  (кинетического момента тела) равна моменту внешних сил  $\vec{M}$ :  $\vec{V}_q = \vec{M}$ . Скорость  $\vec{V}_q = \vec{V}_r + \vec{V}_e$ , где  $\vec{V}_r$  — относительная скорость (локальная про-

### 13. ГИРОСТАБИЛИЗАТОРЫ

Для стабилизации объекта при действии на него возмущений (внешних моментов) вокруг одной оси, на плоскости или в пространстве применяют гироскопические стабилизаторы.

#### Одноосный гиросtabilизатор

Рассмотрим возможность использования свободного гироскопа (СГ) в качестве стабилизатора объекта относительно одной оси  $Oy_1$  (рис. 99). При действии на объект возмущающего

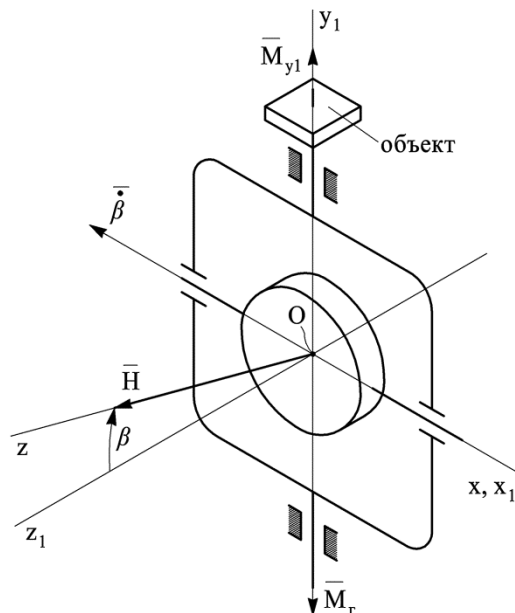


Рис. 99. Схема СГ в режиме одноосного гиросtabilизатора

## ЛИТЕРАТУРА

---

---

1. *Распопов В.Я.* Микромеханические приборы. М.: Машиностроение, 2007.
2. Гироскопические системы: В 3 ч. / Под ред. Д.С. Пельпора. М.: Высш. шк., 1986—1988.
3. *Матвеев В.А., Лунин Б.С., Басараб М.А.* Навигационные системы на волновых твердотельных гироскопах. М.: Физматлит, 2008.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие .....	3
Введение .....	7
1. Модель погрешности гироскопа.....	51
2. Уравнения движения трехстепенного гироскопа в подвижной системе координат .....	60
3. Определение курса объекта с помощью трехстепенного гироскопа .....	68
Гироскоп и указатель направления ортодромии.....	68
Гироскоп. Гироскоп .....	73
4. Определение углов ориентации объекта относительно вертикали с помощью гироскопа .....	80
Маятник.....	80
Свободный гироскоп как измеритель вертикали .....	83
Гироскоп.....	84
Гироскопическая вертикаль .....	87
5. Гироскопические приборы системы управления баллистичес- кой ракеты.....	98
Гироскоп и гироскоп .....	98
Гироскоп линейных ускорений .....	101
6. Интегрирующий гироскоп .....	110
7. Гироскопические датчики угловой скорости с быстро- вращающимся ротором .....	118
Датчики угловой скорости, построенные на базе двухстепен- ного гироскопа .....	118
Трехстепенной датчик угловой скорости, построенный на базе астатического гироскопа .....	127
Роторный вибрационный гироскоп .....	131
8. Динамически настраиваемый гироскоп .....	137
9. Вибрационный рамочный гироскоп.....	149
10. Волновой твердотельный гироскоп .....	153
11. Оптические гироскопы .....	159
Волоконно-оптический гироскоп .....	159
Лазерный ДУС.....	162
12. Микромеханический гироскоп рамочного типа.....	172
13. Гиросtabilизаторы.....	178
Одноосный гиросtabilизатор.....	178
Двухосный гиросtabilизатор.....	184
Трехосный гиросtabilизатор.....	186
Литература .....	190

*Научное издание*

**Матвеев** Валерий Александрович

**ГИРОСКОП — ЭТО ПРОСТО**

Редактор *Н.А. Фетисова*  
Технический редактор *Э.А. Кулакова*  
Художник *Н.Г. Столярова*  
Компьютерная верстка *Н.Ф. Бердавцевой*

Оригинал-макет подготовлен  
в Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Санитарно-эпидемиологическое заключение  
№ 77.99.60.953.Д.003961.04.08 от 22.04.2008 г.

Подписано в печать 22.02.12. Формат 60×90 1/16.  
Усл. печ. л. 12,0. Тираж 300 экз. Заказ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5.  
E-mail: [press@bmstu.ru](mailto:press@bmstu.ru) <http://www.press.bmstu.ru>

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана.  
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5.  
E-mail: [mgtupress@mail.ru](mailto:mgtupress@mail.ru)