

## THE DEVELOPMENT TENDENCIES OF MODERN GYROSCOPY

Yu. G. MARTYNENKO

*The short description of existing and developing types of gyro sensors and history of its evolution is given. The gyroscopes applications in the different fields of engineering are discussed. The modern gyroscopy development tendencies are analyzed.*

**Даются краткое описание существующих и разрабатываемых типов гироскопических чувствительных элементов и история их создания. Обсуждается применение гироскопов в различных областях техники. Анализируются тенденции развития современной гироскопии.**

## ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СОВРЕМЕННОЙ ГИРОСКОПИИ

Ю. Г. МАРТЫНЕНКО

Московский энергетический институт  
(технический университет)

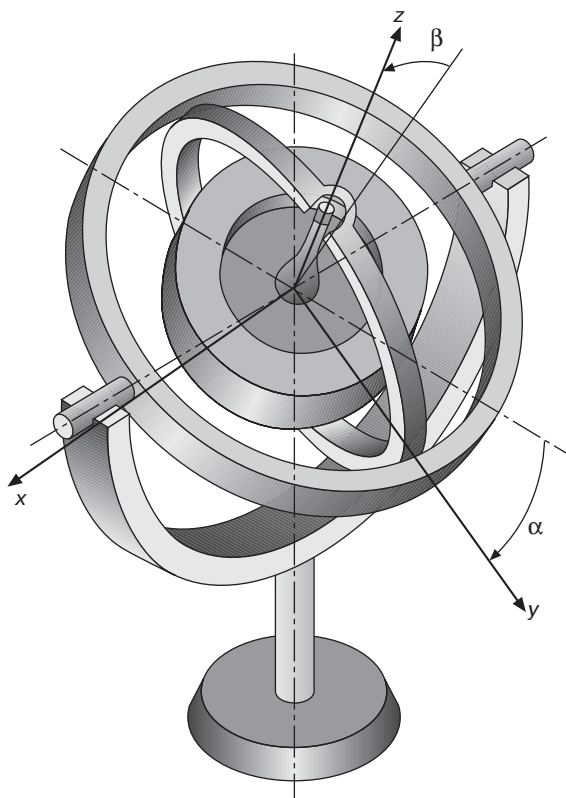
### ВВЕДЕНИЕ

Термин *гироскоп*, который можно перевести как “наблюдатель вращений” (от греч. *gýros* — круг, *gy-geiō* — кружусь, вращаюсь и *scopéo* — смотрю, наблюдаю), был предложен в 1852 году французским ученым Леоном Фуко для изобретенного им прибора, предназначенного для демонстрации вращения Земли вокруг своей оси. Фуко поместил вращающийся маховик в некоторое устройство, называемое кардановым подвесом<sup>1</sup> (рис. 1), поэтому долгое время слово *гироскоп* использовалось для обозначения быстро закрученного вращающегося симметричного твердого тела.

Согласно законам классической ньютоновской механики, скорость поворота оси гироскопа в пространстве обратна пропорциональна его собственной угловой скорости и, следовательно, ось очень быстро закрученного гироскопа поворачивается столь медленно, что на некотором интервале времени ее можно использовать в качестве указателя неизменного направления в пространстве. И хотя опыт с первым гироскопом Фуко оказался не совсем удачным, морские и военные применения гироскопов потребовали совершенствования гироскопических приборов быстро нарастающими темпами. Путь от первой демонстрационной модели до практически полезных приборов был длительным и сложным. На этом полуторавековом пути, полном напряженного поиска, встречались и блестящие озарения, и глубокие заблуждения, присущие лишь великим открытиям. Однако без этих удивительных приборов не было бы возможным использование столь привычных для нас достижений современной цивилизации типа полетов аэробусов или стартов космических кораблей.

Развитие гироскопической техники привело к тому, что гироскопами стали называть очень широкий класс приборов, и сейчас термин *гироскоп* используется для названия устройств, содержащих материальный объект, который совершает быстрые периодические движения. В результате этих

<sup>1</sup> Карданов подвес представляет собой систему твердых тел (рамок, колец), последовательно соединенных между собой цилиндрическими шарнирами. Обычно при отсутствии технологических погрешностей оси рамок карданова подвеса пересекаются в одной точке — центре подвеса. Гироскоп, у которого центр масс совпадает с центром подвеса, называется уравновешенным или свободным.



**Рис. 1.** Гирископ в кардановом подвесе

движений устройство становится чувствительным к вращению в инерциальном пространстве. При таком понимании слова *гирископ* для него необязательно наличие симметричного массивного быстро вращающегося ротора, подвешенного без трения таким образом, чтобы его центр масс совпадал с центром подвеса.

Гирископические приборы можно разделить на измерительные и силовые. Силовые служат для создания моментов сил, приложенных к основанию, на котором установлен гироприбор, а измерительные предназначены для определения параметров движения основания (измеряемыми параметрами могут быть углы поворота основания, проекции вектора угловой скорости и т.д.).

### КЛАССИЧЕСКИЕ ГИРОСКОПЫ

Простейшим гирископом, с необыкновенными свойствами которого мы знакомимся еще в детстве, является волчок. Парадоксальность поведения волчка заключается в его сопротивлении изменить направление оси вращения. При действии внешней силы ось волчка (гирискоскопа) начинает двигаться (прецессировать) в направлении, перпендикулярном вектору силы. Именно в силу этого свойства вращающийся волчок не падает, а его ось описывает

конус вокруг вертикали; это движение называется регулярной прецессией тяжелого твердого тела.

Основной количественной характеристикой ротора механического гирискоскопа является его вектор собственного кинетического момента, называемого также моментом количества движения или моментом импульса:

$$\mathbf{H} = C\boldsymbol{\Omega}. \quad (1)$$

В этом уравнении  $C$  – момент инерции ротора гирискоскопа относительно оси собственного вращения,  $\boldsymbol{\Omega}$  – составляющая вектора абсолютной угловой скорости ротора, направленная по оси собственного вращения.

Медленное движение вектора собственного кинетического момента гирискоскопа под действием моментов внешних сил называется прецессией гирискоскопа и описывается векторным уравнением

$$\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{H} = \mathbf{M}. \quad (2)$$

Здесь  $\boldsymbol{\omega}$  – вектор угловой скорости прецессии,  $\mathbf{H}$  – вектор собственного кинетического момента гирискоскопа,  $\mathbf{M}$  – ортогональная к  $\mathbf{H}$  составляющая вектора момента внешних сил, приложенных к гирискоскопу.

Момент сил, приложенных со стороны ротора к подшипникам оси собственного вращения ротора, возникающий при изменении направления оси и определяемый уравнением

$$\mathbf{M}_g = -\dot{\mathbf{M}} = \mathbf{H} \times \boldsymbol{\omega}, \quad (3)$$

называется гирискоскопическим моментом.

Погрешность гирискоскопа измеряется скоростью ухода его оси от первоначального положения. Согласно уравнению (2), величина ухода, называемого также дрейфом, оказывается пропорциональной моменту сил  $M$  относительно центра подвеса гирискоскопа:

$$\omega_{yx} = \frac{M}{H}. \quad (4)$$

Уход  $\omega_{yx}$  обычно измеряется в угловых градусах в час времени.

Из формулы (4) вытекает, что свободный гирискоскоп функционирует идеально лишь в том случае, если внешний момент  $M$  равен нулю. При этом ось собственного вращения будет в точности совпадать с требуемым направлением инерциального пространства – направлением на неподвижную звезду.

Как иногда говорят моряки, хороший гирискоскоп – это “звезда в бутылке”. Не беда, что небо заволочено туманом или его скрывает многометровая толща воды, гирискоскоп, раскрученный в начале плавания, подобно путеводной звезде, будет указывать верный курс.

На практике любые средства, используемые для подвеса ротора гирискоскопа, являются причиной возникновения нежелательных внешних моментов неизвестной величины и направления. На первый



Рис. 2. “Звезда в бутылке” (рисунок И.В. Новожилова)

взгляд формула (4) тривиальна и определяет очевидные пути повышения точности гироскопа: надо уменьшить вредный момент сил  $M$  и увеличить кинетический момент гироскопа  $H$ . Однако любое существенное продвижение на этом пути требует решения сложнейших проблем как в области теории, так и в области технологии. Формула (4) дает возможность почувствовать уровень требований, стоящих перед разработчиками гироскопов. В самом деле, пусть ротор гироскопа представляет собой однородный стальной цилиндр радиуса  $r = 3$  см и высотой  $h = 2$  см. Масса такого ротора  $m = 0,458$  кг, вес  $P = 4,5H$ , момент инерции ротора гироскопа относительно оси симметрии  $C = mr^2/2 = -2,06 \cdot 10^{-4}$  кг · м<sup>2</sup>. При угловой скорости  $\Omega = 60\,000$  об/мин кинетический момент гироскопа  $H = 1,3$  Н · м · с, частота нутационных колебаний  $\nu = 1143$  Гц. При выборе угловой скорости гироскопа необходимо учитывать одно из главных ограничений, связанных с пределами прочности материала ротора из-за возникающих при вращении центробежных сил. Выбранная для рассматриваемого нами гироскопа угловая скорость достаточно велика: линейная скорость точек, расположенных на боковой поверхности ротора, равна почти 190 м/с и эти точки испытывают “перегрузку” порядка 12 000g. Если центр масс нашего гироскопа смещен от центра карданова подвеса на величину  $l = 1$  мкм, то вредный момент  $M = Pl = 4,5 \cdot 10^{-6}$  Н · м. Для сравнения: толщина лезвия безопасной бритвы составляет 80–100 мкм, то есть выбранное смещение  $l$  центра масс гироскопа приблизительно в 100 раз меньше толщины лезвия бритвы. Согласно формуле (4), уход рассматриваемого гироскопа составляет

$$\omega_{yx} = 3,46 \cdot 10^{-6} \text{ рад/с} = 0,7 \text{ }^\circ/\text{ч.}$$

Для современного уровня это достаточно большая скорость. Разумеется, такой гироскоп сможет уверенно (с погрешностью 5%) измерять скорость вращения Земли, которая составляет  $15 \text{ }^\circ/\text{ч}$ , однако если бы этот гироскоп оказался на Луне, то ему не

удалось бы обнаружить вращение Луны, происходящее в 28 раз медленнее вращения Земли.

Лучшие современные гироскопы, о которых речь пойдет ниже, имеют случайный уход на уровне  $10^{-4}$ – $10^{-5}$   $^\circ/\text{ч}$ . Чтобы почувствовать эту цифру, укажем, что ракета, полетом которой будет управлять подобный гироскоп, пролетев несколько тысяч километров, отклонится от своей конечной цели всего на несколько метров. Ось гироскопа с погрешностью  $10^{-5}$   $^\circ/\text{ч}$  совершает полный оборот на  $360^\circ$  за 4 тыс. лет! Из разобранных выше примера следует, что точность балансировки гироскопа с погрешностью  $10^{-5}$   $^\circ/\text{ч}$  должна быть лучше одной десятичной доли микрона ( $10^{-10}$  м), то есть смещение центра масс ротора из центра подвеса не должно превышать величину порядка диаметра атома водорода.

Разумеется, во времена Фуко не существовало средств для раскрутки ротора гироскопа до скоростей порядка тысячи оборотов в минуту. Только в конце XIX века было предложено использовать для разгона и поддержания вращения ротора гироскопа электрический мотор, тем самым обеспечив возможность получения больших значений кинетического момента гироскопа  $H$  и его постоянства в течение неограниченного промежутка времени. Из-за трения о воздух гироскоп Фуко быстро тормозился, да и возмущающие моменты в осях карданового подвеса очень велики. Скорость дрейфа гироскопа Фуко превышала скорость вращения Земли, и при демонстрациях в учебных кабинетах он, к большой радости студентов, мог показать, что Земля вращается в противоположную сторону.

Впервые уравновешенный гироскоп нашел практическое (к сожалению, негуманное) применение в устройстве для стабилизации курса торпеды, изобретенном в 80-х годах прошлого столетия инженером Обри. Гироскоп Обри устанавливался в кардановом подвесе так, чтобы его ось вращения была параллельна продольной оси торпеды. Ротор гироскопа приводился во вращение за несколько секунд до выстрела, когда ось торпеды была уже направлена на цель. При движении торпеды гироскоп продолжал сохранять исходное направление и при возникновении отклонений торпеды поворачивал ее рули таким образом, чтобы обеспечить неизменность курса. Аналогичные приборы в различных вариантах исполнения и под разными наименованиями в 20-х годах нашего столетия стали использовать также на самолетах для указания курса (гироскопы направления, гиropolукомпасы), а позднее для управления движением ракет.

Гироскопы нашли применение при прокладке туннелей для метро и железнодорожного транспорта (наземные маркшейдерские гирокомпасы), при выяснении формы буровых скважин (инклинометры), а также в качестве компасов сухопутной артиллерии. Они используются при стабилизации стволов танковых орудий и в орудийных прицелах

зенитной артиллерии. При первом практическом применении прицелов этого типа (Сперри-14) во время второй мировой войны зенитные пушки одного из военных кораблей сбили 32 самолета противника в течение одного боя.

С гироскопическими явлениями приходится считаться и при конструировании машин, в состав которых входят быстро вращающиеся роторы. Так, в стабилизацию вертикального положения велосипеда основной вклад вносят гироскопические моменты колес, гироскопический эффект у винтовых самолетов и вертолетов оказывает существенное влияние на их угловое движение.

Не все технические приложения гироскопов оказались удачными. Нерациональными оказались изобретенные в начале XX века гироскопические успокоители качки кораблей из-за неблагоприятных силовых воздействий, которые они оказывали на корпус, и однорельсовые гироскопические железные дороги из-за сложности и дороговизны.

## НОВЫЕ ТИПЫ ГИРОСКОПОВ

Постоянно возрастающие требования к точным и эксплуатационным характеристикам гироскопических приборов стимулировали ученых и инженеров многих стран мира не только к дальнейшим усовершенствованиям классических гироскопов с вращающимся ротором, но и к поискам принципиально новых идей, позволяющих решить проблему создания чувствительных датчиков для индикации и измерения угловых движений объекта в пространстве.

В настоящее время известно более ста различных явлений и физических принципов, которые позволяют решать гироскопические задачи. Выданы многие тысячи патентов и авторских свидетельств на соответствующие открытия и изобретения. И даже их беглое перечисление представляет собой невыполнимую задачу. Поэтому остановимся только на самых интересных направлениях, с помощью которых получены наиболее значительные практические результаты. При этом надо учесть, что уровень развития гироскопии оказывал существенное влияние на обороноспособность, поэтому во времена холодной войны гироскопы разрабатывались в обстановке строжайшей секретности и информация о полученных результатах хранилась за семью печатями.

В табл. 1 приведены последние данные о достигнутых точностях для различных типов гироскопов. Дадим расшифровку понятий, использованных в табл. 1.

### Гироскопы с воздушной опорой

В этих гироскопах разработчики заменили шариковые подшипники, используемые в традиционном кардановом подвесе, газовой подушкой, что

Таблица 1

Гироскопы на шариковых подшипниках											
Гироскопы с воздушной опорой											
ПГ											
ДНГ											
КЛГ											
ВОГ											
ВТГ											
ММГ											
ЭСГ											
МСГ											
Точность, °/ч $10^{-6}$ $10^{-5}$ $10^{-4}$ $10^{-3}$ $10^{-2}$ $10^{-1}$ $10^0$ $10^1$ $10^2$											

полностью устранило влияние износа материала опор во время работы и позволило почти неограниченно увеличить время службы прибора. Жесткость аэродинамического подвеса не меньше, чем обычных шариподшипников. К недостаткам газовых опор следует отнести довольно большие потери энергии и возможность внезапного отказа при случайном контакте поверхностей опоры между собой.

### Поплавковые гироскопы

Поплавковый гироскоп (ПГ) представляет собой классический роторный гироскоп, в котором для разгрузки подшипников подвеса все подвижные элементы взвешены в жидкости с большим удельным весом так, чтобы вес ротора вместе с кожухом уравновешивался гидростатическими силами. Благодаря этому на много порядков снижается сухое трение в осях подвеса и увеличивается ударная и вибрационная стойкость прибора. Герметичный кожух, выполняющий роль внутренней рамки карданового подвеса, называется поплавком. Конструкция поплавка должна быть максимально симметричной. Ротор гироскопа внутри поплавка вращается на воздушной подушке в аэродинамических подшипниках со скоростью порядка 30–60 тыс. оборотов в минуту. ПГ с большим вязким трением жидкости называется также интегрирующим гироскопом.

ПГ до настоящего времени остается одним из наиболее распространенных типов гироскопов и, безусловно, будет широко применяться в ближайшие годы, так как основывается на хорошо отработанных технологиях, мощной производственной базе. Но новые разработки ПГ, по-видимому, целесообразны, поскольку дальнейшее повышение точности встречает труднопреодолимые препятствия и вряд ли будет экономически оправданным.



### Динамически настраиваемые гироскопы

Динамически настраиваемые гироскопы (ДНГ) принадлежат к классу гироскопов с упругим подвесом ротора, в которых свобода угловых движений оси собственного вращения обеспечивается за счет упругой податливости конструктивных элементов (например, торсионов). В ДНГ в отличие от классического гироскопа используется так называемый внутренний карданов подвес (рис. 3), образован-

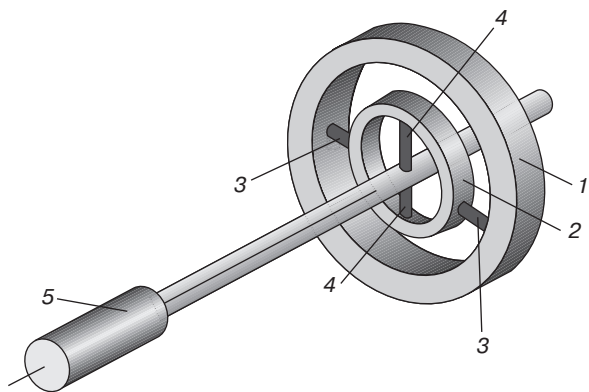


Рис. 3. Динамически настраиваемый гироскоп

ный внутренним кольцом 2, которое изнутри крепится торсионами 4 к валу электродвигателя 5, а снаружи — торсионами 3 к ротору 1. Момент трения в подвесе проявляется только в результате внутреннего трения в материале упругих торсионов. В динамически настраиваемых гироскопах за счет подбора моментов инерции рамок подвеса и угловой скорости вращения ротора осуществляется компенсация упругих моментов подвеса, приложенных к ротору. Условие динамической балансировки ДНГ, открытое в 1963 году, имеет вид

$$\Omega^2 = 2k(B + C - A)^{-1}, \quad (5)$$

где  $\Omega$  — угловая скорость вращения ротора,  $k$  — коэффициент угловой жесткости торсионов по внутренней 4 или наружной 3 осям подвеса ротора,  $A$ ,  $B$ ,  $C$  — осевой и экваториальные моменты инерции внутреннего кольца.

К достоинствам ДНГ следует отнести их миниатюрность, высокую стабильность показаний, относительно невысокую стоимость.

### Кольцевые лазерные гироскопы

Кольцевой лазерный гироскоп (КЛГ), называемый также квантовым гироскопом, создан на основе лазера с кольцевым резонатором, в котором по замкнутому оптическому контуру одновременно распространяются встречные электромагнитные волны. Длины этих волн определяются условиями генерации, согласно которым на длине периметра

резонатора должно уложиться целое число волн, поэтому на неподвижном основании частоты этих волн совпадают. При вращении резонатора лазерного гироскопа путь, проходимый лучами по контуру, становится разным и частоты встречных волн становятся неодинаковыми. Волновые фронты лучей интерферируют друг с другом, создавая интерференционные полосы. Вращение резонатора лазерного гироскопа приводит к тому, что интерференционные полосы начинают перемещаться со скоростью, пропорциональной скорости вращения гироскопа. Интегрирование по времени выходного сигнала лазерного гироскопа, пропорционального угловой скорости, позволяет определить угол поворота объекта, на котором установлен гироскоп.

К достоинствам лазерных гироскопов следует отнести прежде всего отсутствие вращающегося ротора, подшипников, подверженных действию сил трения. В настоящее время серийно выпускаются лазерные гироскопы, имеющие точность на уровне  $2 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-1}$  °/ч.

### Волоконно-оптические гироскопы

Значительные достижения в области разработки и промышленного выпуска световодов с минимальным значением погонного затухания и интегральных оптических компонентов привели к началу работ над волоконно-оптическим гироскопом (ВОГ), представляющим собой волоконно-оптический интерферометр, в котором распространяются встречные электромагнитные волны. Наиболее распространенный вариант ВОГ — многовитковая катушка оптического волокна. Достигнутые в лабораторных образцах точности ВОГ приближаются к точности КЛГ. ВОГ из-за простоты конструкции является одним из наиболее дешевых среднеточных гироскопов, и можно ожидать, что он вытеснит КЛГ в диапазоне точностей  $10^{-2}$  °/ч и ниже.

### Волновые твердотельные гироскопы (ВТГ)

В основе функционирования волнового твердотельного гироскопа (ВТГ) лежит физический принцип, заключающийся в инертных свойствах упругих волн в твердом теле. Упругая волна может распространяться в сплошной среде как жесткое тело, не изменяя своей конфигурации. Такая частице-подобная волна называется солитоном и рассматривается как модельное воплощение корпускулярно-волнового дуализма: с одной стороны, это волна, с другой — неизменность конфигурации приводит к аналогии с частицей. Однако эта аналогия в некоторых явлениях простирается и дальше. Так, если возбудить стоячие волны упругих колебаний в осесимметричном резонаторе, то вращение основания, на котором установлен резонатор, вызывает поворот стоячей волны на меньший, но известный угол. Соответствующее движение волны как целого называется прецессией. Скорость прецессии стоячей

волны пропорциональна проекции угловой скорости вращения основания на ось симметрии резонатора.

Резонатор ВТГ представляет собой тонкую упругую оболочку вращения, сделанную из плавленого кварца, сапфира или другого материала, обладающего малым коэффициентом потерь при колебаниях. Обычно форма оболочки — полусфера с отверстием в полюсе, поэтому ВТГ называется в литературе полусферическим резонаторным гироскопом. Один край резонатора (у полюса) жестко прикреплен к основанию (ножке). Другой край, называемый рабочим, свободен. На внешнюю и внутреннюю поверхности резонатора, около рабочего края, напыляются металлические электроды, которые образуют вместе с такими же электродами, нанесенными на окружающий резонатор кожух, конденсаторы. Часть конденсаторов служит для силового воздействия на резонатор. Вместе с соответствующими электронными схемами они образуют систему возбуждения колебаний и поддержания их постоянной амплитуды. С ее помощью в резонаторе устанавливают так называемую вторую форму колебаний, у которой стоячая волна имеет четыре пучности через каждые  $90^\circ$ . Вторая группа конденсаторов служит датчиками положения пучностей на резонаторе. Соответствующая (весьма сложная) обработка сигналов этих датчиков позволяет получать информацию о вращательном движении основания резонатора.

К достоинствам ВТГ относятся высокое отношение точность/цена, способность переносить большие перегрузки, компактность и небольшой вес, низкая энергоемкость, малое время готовности, слабая зависимость от температуры окружающей среды.

Полученные к настоящему времени результаты испытаний опытных экземпляров ВТГ позволяют рассчитывать, что ВТГ найдет свою нишу в области датчиков средней точности.

### Вибрационные гироскопы

Вибрационные гироскопы основаны на свойстве камертона, заключающегося в стремлении сохранить плоскость колебаний своих ножек. Теория и эксперимент показывают, что в ножке колеблющегося камертона, установленного на платформе, вращающейся вокруг оси симметрии камертона, возникает периодический момент сил, частота которого равна частоте колебания ножек, а амплитуда пропорциональна угловой скорости вращения платформы. Поэтому, измеряя амплитуду угла закрутки ножки камертона, можно судить об угловой скорости платформы. Патент на вибрационный гироскоп принадлежит некоторым видам двукрылых насекомых, обладающих парой стержнеобразных придатков, называемых жужжальцами, которые вибрируют в полете с размахом до  $75^\circ$  и частотой около 500 Гц. При повороте туловища возникают колебания жужжалец в другой плоскости. Эти колебания воспринимаются особыми чувствительными клет-

ками, расположенными в основании жужжалец и подающими команду на выравнивание корпуса насекомого. Система похожа на автопилот, в датчиках которого вращательное движение заменено на колебательное как на более естественное и экономичное для биологических систем.

Первые разработчики вибрационных гироскопов предрекали близкую смерть классическим гироскопам с вращающимся ротором. Однако более глубокий анализ показал, что вибрационные гироскопы отказываются работать в условиях вибрации, которая практически всегда сопровождает места установки приборов на движущихся объектах. Непреодолимой оказалась и проблема нестабильности показаний из-за сложностей высокоточного измерения амплитуды колебаний ножек. Поэтому идея чистого камертонного гироскопа так и не была доведена до прецизионного прибора, однако она стимулировала целое направление поисков новых типов гироскопов, использующих либо пьезоэлектрический эффект, либо вибрацию жидкостей или газов в хитро изогнутых трубках и т.п.

### Микромеханические гироскопы

Микромеханические гироскопы (ММГ) относятся к области низких точностей (хуже  $10^{-1} \text{ }^\circ/\text{ч}$ ). Эта область традиционно считалась малоперспективной для задач управления движущимися объектами и навигации и серьезно не рассматривалась в научных и инженерных кругах. Но в последнее время ситуация резко изменилась, и в печати одно за другим стали появляться сообщения о новом классе гироскопических чувствительных элементов, получивших название микромеханических. Это одноосные гироскопы вибрационного типа, изготавливаемые на базе современных кремниевых технологий. ММГ представляет собой своеобразный электронный чип с кварцевой подложкой площадью в несколько квадратных миллиметров, на которую методом фотолитографии наносится плоский вибратор типа описанного выше камертона.

Точность полученных к настоящему времени ММГ находится на уровне  $10^2 \text{ }^\circ/\text{ч}$ , но ожидается, что ее можно будет повысить на порядок и приблизить к точности гироскопа Фуко. Решающее значение имеет исключительно низкая стоимость микромеханических чувствительных элементов. Благодаря использованию хорошо отработанных современных технологий массового производства микроэлектроники ожидаемая цена одного чувствительного элемента будет лежать в пределах от нескольких сот до единиц долларов (при улодах соответственно от  $10^1$  до  $10^3 \text{ }^\circ/\text{ч}$ ).

В свою очередь, дешевизна ММГ открывает возможность их использования в совершенно новых областях: автомобили и бинокли, телескопы и видеокамеры, “мышь” и “джойстики” персональных компьютеров, мобильные робототехнические

устройства и даже детские игрушки. Конечно, ММГ можно использовать и при совершенствовании военной техники (прицелы, “думающие” бомбы, тактическое оружие), но не эти приложения являются определяющими в экономическом плане. Имеются прогнозы, по которым производство ММГ может достигнуть ста миллионов в год при общей стоимости 4,5 млрд долл.

В настоящее время разработка первого поколения ММГ уже завершена, решаются задачи их интеграции в инерциальные измерительные модули совместно с электроникой и вычислительной техникой. Первые инерциальные модули уже появились в лабораториях.

### Неконтактные гироскопы

В отличие от ММГ неконтактные гироскопы находятся на другом полюсе среди гироскопических чувствительных элементов, так как с их помощью удалось достичь сверхвысоких точностей  $10^{-6}$ – $5 \times 10^{-4}$  °/ч. Неконтактные гироскопы имеют резервы дальнейшего повышения точности и по крайней мере в обозримом будущем будут оставаться лидерами в этом отношении.

Разработка гироскопов с неконтактными подвесами началась с середины нашего века. В неконтактных подвесах реализуется состояние левитации, то есть состояние, при котором ротор гироскопа парит в силовом поле подвеса без какого-либо механического контакта с окружающими телами [5]. Среди гироскопов с неконтактными подвесами можно выделить гироскопы с электростатическим и магнитным подвесами ротора.

В электростатическом гироскопе (ЭСГ) проводящий сферический ротор подвешен в вакуумированной полости в регулируемом электрическом поле, создаваемой системой электродов. Если поверхность ротора — идеальная сфера, то силы электрического поля, действующие по нормали к проводящей поверхности ротора, не могут создать момента относительно его центра и возникает возможность создания идеального гироскопа. Ротором электростатического гироскопа может служить бериллиевый шар диаметром 1 см, раскрученный до скорости порядка 180 тыс. оборотов в минуту. Для такого подвеса характерно практически полное отсутствие трения (при вакууме в подвесе  $10^{-8}$  мм рт.ст. постоянная времени выбега ротора за счет остатков газа имеет величину порядка 100 лет). Ничтожно малые величины возмущающих моментов сил, действующих на левитирующий в вакууме ротор, обеспечивают неограниченно долгое и надежное сохранение направления оси вращения гироскопа в пространстве. Фотография основных деталей электростатического гироскопа — ротора и кожуха — приведена на рис. 4.

Гироскопы с магниторезонансным подвесом ротора (МСГ) являются в определенной степени аналогами гироскопов с электростатическим подвесом

ротора, в которых электрическое поле заменено магнитным, а бериллиевый ротор — ферритовым. Несмотря на более чем тридцатилетнюю историю разработок МСГ, он так и не стал объектом серийного производства. Причина заключается в том, что в конкуренции за достижение сверхвысоких точностей выявилось решающее преимущество ЭСГ из-за существенно меньших возмущающих моментов, возникающих при взаимодействии бериллиевого ротора с электрическим полем, чем ферритового с магнитным. Разумеется, достижение точности гироскопа в  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  °/ч — задача чрезвычайной сложности.

Современные гироскопы с неконтактными подвесами — это сложнейшие приборы, которые вобрали в себя новейшие достижения техники. Только три страны в мире в настоящее время способны производить электростатические гироскопы. Кроме США и Франции в их число входит и Россия. Опыт эксплуатации на морских объектах электростатических гироскопов, созданных в Санкт-Петербурге в ЦНИИ “Электроприбор”, подтвердил высокую точность и достаточную надежность корабельных инерциальных навигационных систем на электростатических гироскопах. В ближайшее время в США планируется запуск специального спутника, на борту которого будет установлен электростатический гироскоп, предназначенный для экспериментальной проверки общей теории относительности. Этому гироскопу предстоит измерение величины угла порядка 7” в течение одного года.

Кроме перечисленных выше типов гироскопов проводились и проводятся работы над экзотическими типами гироскопов, такими, как ионные, ядерные и т.п. Однако изложенного материала достаточно для формулирования выводов о тенденциях развития гироскопов в настоящее время.

Сегодня созданы настолько точные гироскопические системы, что дальнейшего повышения



Рис. 4

точностей многим потребителям уже не требуется, а сокращение средств, выделяемых для военно-промышленного комплекса в бюджетах ведущих мировых стран, резко повысило интерес к массовым гражданским применениям гироскопической техники, которые были ранее на периферии внимания разработчиков. Наконец, выдающийся прогресс в области высокоточной спутниковой навигации GPS сделал ненужными автономные средства навигации в тех случаях, когда сигнал со спутника может приниматься непрерывно. Не случайно один из основных докладов на последнем симпозиуме крупнейших ученых-гироскопистов был назван “Драматическое развитие гироскопической техники”. Дело в том, что разрабатываемая сейчас система навигационных спутников третьего поколения позволит определять координаты объектов на поверхности Земли с точностью до единиц сантиметров. При этом отпадает необходимость в использовании даже курсовых гироскопов, ибо сравнение показаний двух приемников спутниковых сигналов, установленных на расстоянии в несколько метров, например на крыльях самолета, позволяет получить информацию о повороте самолета вокруг вертикальной оси. Такая система оставляет не у дел десятки тысяч работников предприятий, выпускающих гироскопы для самолетов и морских кораблей.

В силу перечисленных обстоятельств эволюционное развитие гироскопической техники последних десятилетий подошло к рубежу крупных изменений, и именно поэтому внимание специалистов в области гироскопии сейчас сосредоточилось на по-

иске нетрадиционных областей применения приборов. Неожиданно открылись совершенно новые интересные задачи. Это и разведка полезных ископаемых, и предсказание землетрясений, и сверхточное измерение положений железнодорожных путей и нефтепроводов, медицинская техника и многое другое, где нас ждут новые результаты и, быть может, новые открытия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Ишлинский А.Ю., Борзов В.И., Степаненко Н.П.* Лекции по теории гироскопов. М.: Изд-во МГУ, 1983. 248 с.
2. *Шестов С.А.* Гироскоп на земле, в небесах и на море. М.: Знание, 1989. 188 с.
3. *Пешехонов В.Г.* Ключевые задачи современной автономной навигации // Гироскопия и навигация. 1996. № 1 (12). С. 48–55.
4. *Магнус К.* Гироскоп: Теория и применение. М.: Мир, 1974. 526 с.
5. *Мартыненко Ю.Г.* О проблемах левитации тел в силовых полях // Соросовский Образовательный Журнал. 1996. № 3. С. 82–86.

\* \* \*

Юрий Григорьевич Мартыненко, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой теоретической механики Московского энергетического института. Автор более 130 научных работ.