

Ю. А. ЛИТМАНОВИЧ

РОТОРНЫЕ ГИРОСКОПЫ

Статья написана по материалам доклада, прочитанного в рамках лекционного дня, который состоялся перед конференцией молодых ученых «Навигация и управление движением» и был посвящен современному состоянию и перспективам развития инерциальных чувствительных элементов. В ней кратко излагаются физические основы роторных гироскопов, а также рассматриваются принципиальные схемы и особенности конструкции двух типов гироскопов этого класса – электростатического и поплавкового. Материал снабжен краткими историческими справками об ученых, внесших определяющий вклад в разработку теории и создание данных приборов.

Ключевые слова: роторные гироскопы, физические основы, электростатический гироскоп, двухстепенной поплавковый гироскоп, историческая справка.

Введение

История роторных гироскопов (РГ) насчитывает уже два столетия, причем практическое их использование длится уже век, а монопольное положение продолжалось около 50 лет. Этот класс гироскопов охватывает большое число разнообразных приборов, даже неглубокое рассмотрение которых потребовало бы нескольких лекций.

Я остановлюсь на физических основах двух гироскопов роторного типа – электростатического гироскопа (ЭСГ) и двухстепенного поплавкового гироскопа (ДПГ), которые были разработаны в ЦНИИ «Электроприбор» и прошли проверку на практике. Уточню: если ЭСГ был разработан с нуля, то базовая разработка ДПГ была в 1970-е годы передана в «Электроприбор» из саратовского ПО «Корпус» и впоследствии прошла значительную модернизацию.

Физические основы

Основным физическим принципом конструкции РГ является так называемый гироскопический эффект – свойство быстровращающегося тела сохранять ориентацию оси вращения в инерциальном пространстве и сопротивляться усилиям по ее изменению. Заметим, что это одно из проявлений инерционности твердых тел как неподвижных, так и движущихся: общеизвестны явления сохранения ориентации телом, свободно подвешенным на подвижном основании, и сохранения плоскости колебаний маятником (маятник Фуко).

Литманович Юрий Аронович. Доктор технических наук, начальник отдела, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Действительный член общественного объединения «Академия навигации и управления движением».

Принято считать, что первым гироскопический эффект продемонстрировал Леон Фуко в 1852 г. В его макете диск приводился во вращение тросиком через систему шестеренок, а свободу разворота ротора относительно основания обеспечивал двухколесный карданов подвес (КП) с вертикальной осью наружной рамки. Трение в осях рамок было низким благодаря использованию нити и центрирующей иглы в наружной рамке и ножевых опор – во внутренней. Макет позволял наблюдать гироскопический эффект в течение 10 мин. При горизонтальной ориентации оси вращения ротора наружная рамка КП разворачивалась с угловой скоростью, равной вертикальной составляющей угловой скорости Земли на широте Парижа, где проводился опыт: за 10 мин разворот стрелки составлял около 2 град. Подобный опыт, но с шарообразным ротором в КП, был выполнен на 50 лет раньше Фуко немецким астрономом и математиком Иоганом Боненбергером, опубликовавшим результаты в 1817 г. Более того, «машина Боненбергера», демонстрирующая вращение Земли, по указанию Наполеона была рекомендована к изучению во французских школах. Тем не менее приоритет введения термина «гироскоп», производного от двух греческих слов – *gyros* («круг, кольцо») и *skopeō* («смотрю, наблюдаю»), принадлежит Жану Бернару Леону Фуко.

Гироскопический эффект проявляется следующим образом. Во-первых, видимым наблюдателю на Земле движением оси вращения тела (ротора) при установке его в двухосный КП (как в опыте Л. Фуко), когда ничто не мешает телу сохранять неизменной ориентацию в инерциальной системе координат (ИСК). Движение оси вращения ротора (вектора кинетического момента – ВКМ) удобно описывать годографом, демонстрирующим траекторию движения апекса (верхушки оси ротора) на картинной плоскости в осях углов азимута A и высоты h , измеренных в географической системе координат (ГСК) (аналогично тому, как задается направление на звезду в астрономии). У идеального гироскопа, выставленного параллельно оси, направленной на Полярную звезду, траекторией видимого движения ВКМ является окружность, радиус которой определяется погрешностью выставки в желаемое положение, а центр лежит в плоскости меридиана и приподнят над плоскостью горизонта на угол широты места (рис. 1, *а*). У гироскопа, чей ВКМ ориентирован в плоскости горизонта и выставлен в меридиан, видимым наблюдателю движением будет уход в азимуте со скоростью, равной вертикальной составляющей скорости вращения Земли (что было продемонстрировано Л. Фуко), и смещенными колебаниями по высоте с суточным периодом, чьи амплитуда и смещение равны разности 90° и широты места (рис. 1, *б*).

Другим проявлением гироскопического эффекта является прецессия – медленное изменение ориентации ВКМ ротора $\vec{H}$ под воздействием гироскопического момента $\vec{M}_Г$, который возникает при приложении к ротору внешнего момента $\vec{M}_{ВН}$ через систему подвеса и уравнивает этот момент. Связь угловой скорости прецессии $\vec{\omega}_{пр}$ и порождающего ее вредного момента $\vec{M}_{ВН}$ выражается формулой

$$\vec{\omega}_{пр} \times \vec{H} = \vec{M}_{ВН}. \quad (1)$$

Угловая скорость прецессии ориентирована так, чтобы совместить ВКМ с вектором внешнего момента кратчайшим путем. При вращении основания с угловой скоростью $\vec{\omega}$ возникает гироскопический момент, что вызывает видимое движение ВКМ относительно основания с угловой скоростью, также называемой скоростью

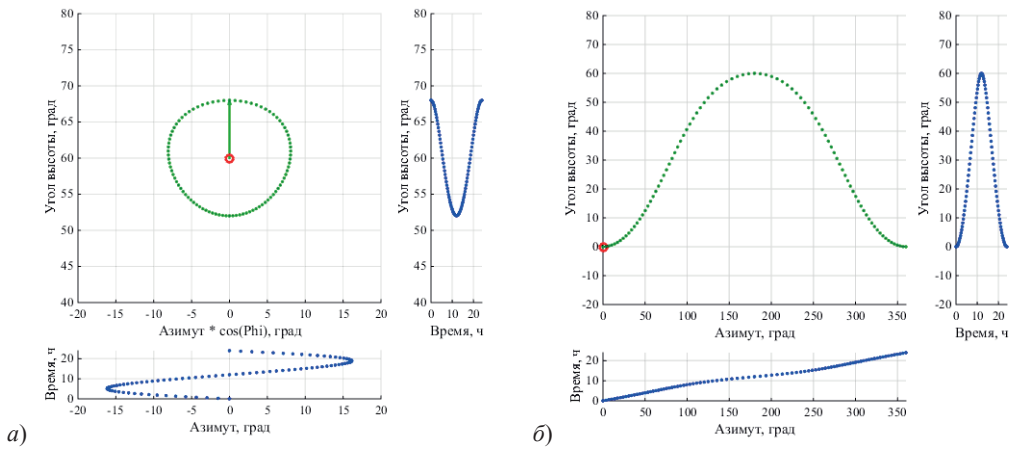


Рис. 1. Годограф, характеризующий видимое движение ВКМ для широты места 60°:

- а) ориентированного в направлении Полярной звезды с погрешностью 8°;
 б) ориентированного в плоскости горизонта и выставленного в меридиан

прецессии, обеспечивающей неизменность ориентации ВКМ гироскопа относительно ИСК. Таким образом, угловая скорость прецессии, определяемая по выражению (2), компенсирует угловую скорость вращения основания. Связь ориентации указанных векторов поясняется на рис. 2.

$$\vec{M}_Г = \vec{\omega} \times \vec{H}. \quad (2)$$

Видимый наблюдателю разворот рамок КП по углам азимута и высоты происходит благодаря реакции подшипников в узлах опор рамок, поэтому гироскопический момент также называют моментом гироскопической реакции. (К этому вопросу мы еще вернемся, когда будем говорить об особенностях гироскопов с бесконтактным подвесом.)

Еще одно проявление гироскопического эффекта – нутация, представляющая собой высокочастотные колебания (дрожание) оси вращения ротора при ее несовпадении с главной осью, по которой ориентирован наибольший момент инерции (рис. 3).

РГ можно классифицировать по нескольким признакам.

1. Количество степеней свободы (две или три), характеризующее возможность ротора сохранять ориентацию в ИСК. Оно определяется конструкцией КП – одно- или двухколесный (рис. 4). Если в трехстепенном гироскопе вращение основания приводит к развороту рамок КП и по углам этого разворота можно определить ориентацию ВКМ относительно основания, то в двухстепенном гироскопе гироскопический момент, возникающий при вращении основания с угловой скоростью и определяемый соотношением (2), вызывает разворот рамки КП с угловой скоростью ω . Величина выходного сигнала двухстепенного гироскопа пропорциональна или проекции угловой скорости основания на измерительную ось y , или интегралу от нее (такой гироскоп называется интегрирующим).

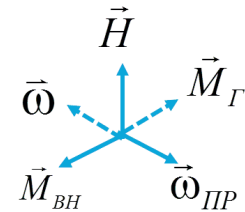


Рис. 2. Ориентация взаимосвязанных векторов

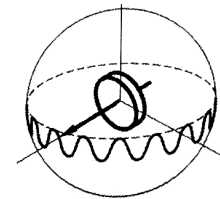


Рис. 3. Траектория движения ВКМ при нутации

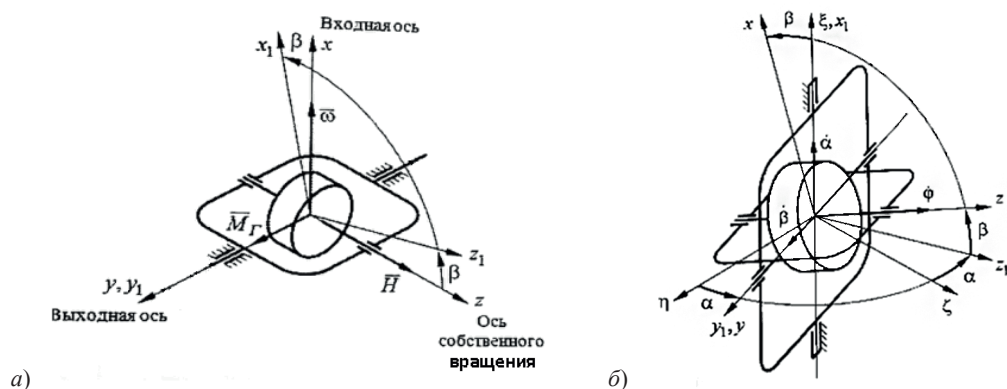


Рис. 4. Гироскоп в одноколечном (а) и двухколечном (б) КП

Заметим, что в англоязычной литературе вращение ротора вокруг оси не учитывается, поэтому гироскопы делятся на одностепенные (one-degree-of-freedom) и двухстепенные (two-degree-of-freedom).

2. Сбалансированность ротора относительно центра подвеса. Дебаланс всегда имеет место, но может быть либо остаточным – когда стремятся его избежать (в астатических гироскопах), либо предустановленным – когда задается определенное его значение (как в гирокомпасе или гироинтеграторе линейных ускорений).

3. Наличие или отсутствие датчиков моментов, использующихся для приложения к ротору моментов с целью вызвать прецессию.

Перечислим условия появления гироскопического эффекта.

Во-первых, ротор надо раскрутить (на устоявшемся жаргоне – «разогнать»). Варианты системы разгона:

- тросик (шестеренки);
- пороховой заряд;
- заведенная пружина;
- электромотор.

Тросик был применен в гироскопе Фуко, а заряд и пружина – весьма экзотические системы – применялись для некоторых короткоживущих объектов. Основным вариантом является электродвигатель или другое устройство с использованием вращающегося магнитного поля.

Второе условие – устойчивость ориентации оси вращения ротора – требует определенного соотношения моментов инерции ротора по ортогональным осям: по оси вращения момент должен быть много больше, чем по двум другим. Это обеспечивается либо формой ротора (приплюснутая, в пределе – диск), либо распределением масс (у шарообразного ротора).

И наконец, условие третье – необходима свобода разворота ротора относительно Земли (в общем случае – относительно основания, не стабилизированного в инерциальном пространстве), т.е. должен присутствовать подвес, изолирующий ротор от основания. Подвесы можно разделить на контактные, или механические (карданов, шарикоподшипниковый, упругий), и бесконтактные (газовый, электростатический, магнитный, жидкостный).

Электростатический гироскоп

ЭСГ представляет собой прибор, в котором находящийся в вакуумированной герметичной гирокамере шарообразный ротор подвешен в электрическом поле и приведен во вращение. Таким образом, подвес является бесконтактным, т.е. ротор не соприкасается с поддерживающими его и приводящими во вращение элементами.

Идею конструкции ЭСГ в 1953 г. предложил американский физик Арнольд Нордсик (Arnold T. Nordsieck), а первой к разработке устройства приступила фирма Honeywell (США).

Структурно ЭСГ можно представить в виде нескольких функциональных подсистем, компоненты которых показаны на рис. 5:

- чувствительный элемент – гирокамера с помещенным в нее ротором и нанесенными на внутреннюю сферическую поверхность электродами подвеса;
- системы подвеса ротора (электроды, блоки питания и подвеса);
- системы разгона и торможения ротора (обмотки статора);
- системы вакуумирования гирокамеры (насос);
- системы списывания информации об угловой ориентации ротора относительно гирокамеры (оптические датчики).

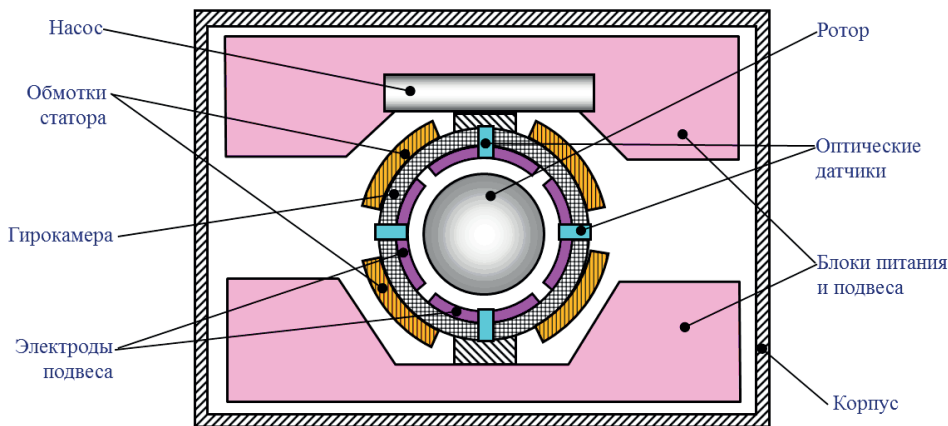


Рис. 5. Функциональная схема ЭСГ

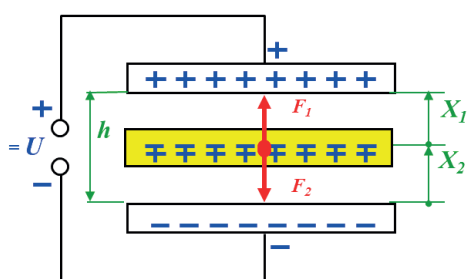
Система разгона/торможения ротора состоит из трех взаимно ортогональных индуктивных катушек, помещаемых вне гирокамеры. Путем управления током в двух катушках создается вращающее магнитное поле, благодаря чему ротор разгоняется по принципу асинхронного двигателя, а третья катушка служит для демпфирования нутационных колебаний ротора. Две первые катушки также используются для стабилизации скорости вращения в некоторых конструкциях ЭСГ. Торможение ротора осуществляют подачей постоянного тока во все три катушки.

Кратко поясним принципы действия основных подсистем ЭСГ.

Система подвеса ротора

Система подвеса ротора в электрическом поле функционирует следующим образом. При поднесении заряженного тела к незаряженному проводнику на поверхно-

стях последнего появляются электрические заряды: на ближайшей к телу поверхности – заряды противоположного знака, а на дальней – того же знака. В результате между телами возникают силы притяжения. На первый взгляд, этот эффект можно использовать для взвешивания (левитации) проводящего тела, если поместить его между пластинами конденсатора, одна из которых заряжена положительно, а другая отрицательно. Однако поскольку силы притяжения пропорциональны квадрату напряжения между телом и пластинами и обратно пропорциональны квадрату расстояния между ними, а потенциал тела меняется пропорционально расстоянию до пластины, то силы, возникающие с разных сторон тела, оказываются равными по величине вне зависимости от величины напряжения на конденсаторе и расстояния между телом и пластинами. Таким образом, суммарная сила воздействия на тело в такой схеме оказывается равной нулю, а следовательно, заставить проводящее тело левитировать в поле тяготения не удастся (рис. 6).



$$F_i \sim |\Delta U_i|^2 / X_i^2 = U^2 / h^2$$

$$|\Delta U_i| = U \cdot X_i / h$$

$$i = 1, 2$$

$$F_{\Sigma} = F_1 - F_2 = 0$$

Рис. 6. Схема силового воздействия на тело, помещенное между пластинами конденсатора:
 ΔU_i – напряжения между телом и каждой пластиной

Чтобы силовое воздействие на тело было отлично от нуля, необходимо добавить еще пару электродов. Схема практической реализации подвеса по одной оси показана на рис. 7. На одну пару электродов подают постоянное опорное напряжение U_{on} со знаком «–», а на вторую пару – со знаком «+». Управляющее напряжение ΔU_{yn} подают только на вторую пару электродов, причем для одного электрода величину напряжения прибавляют к величине опорного напряжения, а для другого электрода – вычитают из нее. В результате потенциал ротора остается нулевым при изменении управляющего напряжения, а суммарная сила, действующая на него со стороны электродов, становится линейно зависимой от управляющего напряжения. Подбором напряжения ΔU_{yn} можно добиться уравнивания веса тела электростатическими силами, однако такое равновесие будет неустойчивым: при любом смещении тело начнет двигаться к одному из электродов. Это положение отражает суть теоремы Ирншоу – одной из основных теорем электростатики.

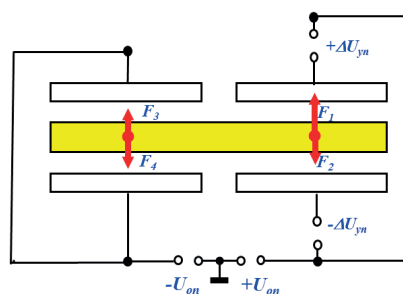


Рис. 7. Схема ненулевого силового воздействия на тело, находящееся между пластинами конденсатора

Чтобы удерживать тело в равновесном положении, нужно управлять напряжением на электродах, т.е. вводить следящую систему, которая по результатам измерений зазора между телом и электродами соответствующим образом меняла бы на-

пряжение подвеса. На рис. 8 представлена схема управления для удержания ротора в центре подвеса по одной оси (в качестве дополнительных электродов, обеспечивающих нулевой потенциал ротора, выступают электроды другой оси, которые на схеме не приведены). В измерителе положения ротора 1 после измерения емкости между ротором и электродами вырабатывается напряжение, пропорциональное отклонению ротора от центра. Далее в корректоре 2, реализующем ПИД-регулирование, вырабатывается напряжение управления, которое усиливается высоковольтными усилителями 3 и затем добавляется к опорному напряжению для одного из электродов (и вычитается из опорного напряжения для другого электрода). Величина опорного напряжения для ЭСГ, применяемого в условиях Земли, составляет порядка 1000 В.

Электростатические силы являются относительно слабыми: как видно из графика на рис. 9, для удержания ротора весом 15 г при эффективной площади электрода 3 см² необходимо напряжение подвеса порядка 1000 В. Слишком большое напряжение приводит к электрическому пробою, поэтому перегрузочная способность такого гироскопа не очень велика.

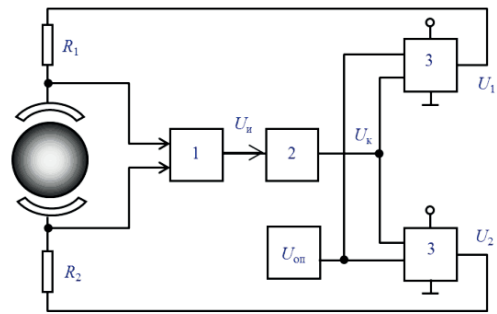


Рис. 8. Схема одноосного управляемого подвеса

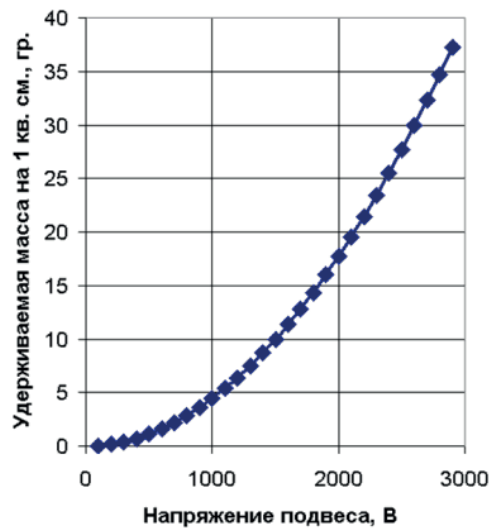


Рис. 9. Зависимость массы тела, удерживаемого электростатическим подвесом, от напряжения при площади электродов 1 см²

Система вакуумирования

Для создания глубокого вакуума (уровня 10⁻⁶ мм рт.ст.) в герметичном объеме гироскопа используют либо геттерно-ионный насос (ГИН), либо магнито-разрядный насос (МРН). Схема работы ГИН показана на рис. 10. Из разогретого электрическим током катода вылетают электроны, которые ускоряются анодным напряжением (450 В) и выбивают из анода молекулы размещенного там геттерного вещества (геттер — вещество-газопоглотитель). Эти молекулы осаждаются на корпусе насоса и поглощают молекулы газа в нем (вступают с ними в химическую связь). Кроме того, молекулы газа ионизируются от пролетающих электронов и также осаждаются на корпусе насоса. Интенсивность откачки газов зависит от величины анодного напряжения: чем оно выше, тем больше активных молекул геттера распыляется внутри насоса и тем сильнее поглощается газ. Для управления интенсивностью работы насоса используют регулятор, который стабилизирует анодный ток, измеряемый милли-

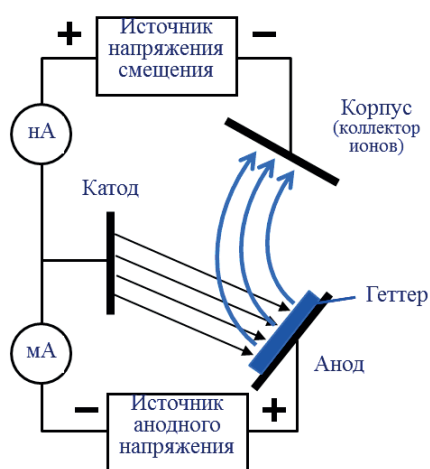


Рис. 10. Принцип работы ГИН

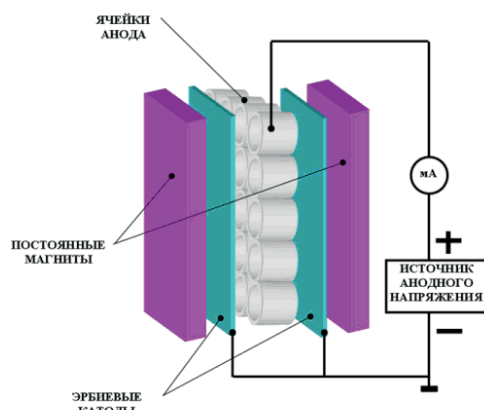


Рис. 11. Принцип работы МРН

амперметром, на требуемом уровне за счет регулирования тока, разогревающего катод. Уровень вакуума в насосе контролируют наноамперметром, регистрирующим ионный ток между катодом и корпусом насоса. Величина ионного тока пропорциональна уровню вакуума. Чтобы к ионному току не примешивался ток электронов из катода (он вносил бы погрешность в определения вакуума), на корпусе создают отрицательный относительно катода потенциал величиной в несколько десятков вольт.

Принцип работы МРН следующий (рис. 11). Между анодом в виде сквозных ячеек и катодом, выполненным из пластин геттерного материала, подается напряжение 2 КВ. Оно заставляет электроны, которые в небольшом количестве всегда присутствуют между анодом и катодом, сильно ускориться. Из-за магнитного поля, создаваемого двумя постоянными магнитами, их движение носит спиралевидный характер, что существенно увеличивает длину их пробега между анодом и катодом. В результате электроны сталкиваются с молекулами газа в насосе и ионизируют их, выбивая из них другие электроны. Этот процесс идет лавинообразно. Ионы газа, ускоряясь в электрическом поле, ударяют по катоду и прилипают к нему, при этом они выбивают из катода молекулы геттера, которые соединяются с молекулами

активных газов и, надежно удерживая их, осаждаются на аноде и стенках насоса. Инертные газы, напрямую не взаимодействующие с геттером, осаждаются на катоде и стенках насоса из-за ионизации и потом «замуровываются» новыми внешними слоями геттера. Ток в анодной цепи оказывается пропорциональным уровню вакуума в насосе.

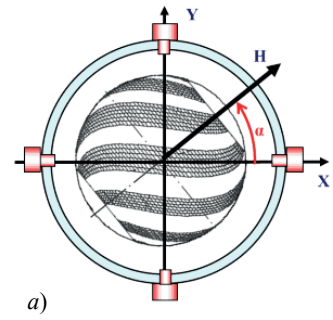
Система списывания ориентации ротора

Если установить гироскоп с бесконтактным подвесом (в нашем случае ЭСГ) в двухосный КП, то возникающее при вращении основания видимое движение ротора не создаст гироскопического момента, поскольку контакт ротора с элементами подвеса отсутствует. Следовательно, не будет и разворота рамок КП, измерение которого дает информацию об ориентации ВКМ относительно основания. Искомые данные можно получить непосредственно измерением параметров ориентации ротора относительно гироскопической камеры.

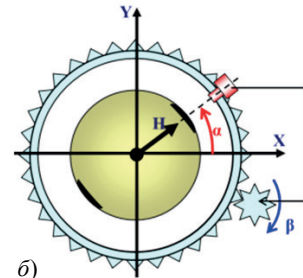
По принципу действия система списывания ориентации ротора относительно гирокамеры может быть емкостной либо оптической, по построению – прямого действия (бескарданная) или компенсационного (карданная с обратной связью). В последнем случае измеряемые датчиком угла ЭСГ сигналы рассогласования положения ротора и гирокамеры в двух ортогональных плоскостях поступают на датчики момента на осях рамок КП, обеспечивающие согласование осей ротора и гирокамеры (рис. 12, б). Заметим, что такой принцип регистрации входных сигналов широко используется в разных измерителях, в частности в гироскопах других типов.

Поясним принцип работы оптической бескарданной системы списывания (рис. 12, а). На ротор бескарданного ЭСГ наносят контрастный рисунок в виде серии полос под определенным углом к экваториальной плоскости ротора. На гирокамере устанавливают по трем ортогональным осям три пары оптических датчиков (на рис. 12, а показаны две), которые позволяют реализовать три измерительные оси системы списывания. Если измерительная ось находится в плоскости экватора ротора, то оба датчика фиксируют синусоидальные сигналы с одинаковой фазой. Отклонение оси от плоскости экватора вызывает смещение фаз между сигналами двух датчиков, зависящее от угла отклонения. Регистрация наклона к плоскости экватора ротора любых двух измерительных осей позволяет однозначно определить ориентацию ротора относительно гирокамеры, а следовательно, и основания.

В карданном варианте ЭСГ схема системы списывания много проще: на полюс ротора наносят контрастный рисунок в виде полудиска, а на гирокамере устанавливают один оптический датчик из четырех сегментов (рис. 13). Комбинируя сигналы с сегментов, мы можем определить знак и величину смещения полюса от центра датчика.



а)



б)

Рис. 12. Списывание угловой ориентации ротора:
а) в бескарданном варианте ЭСГ;
б) в карданном

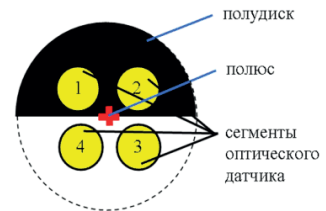


Рис. 13. Схема системы списывания карданного ЭСГ

Ротор

В ЭСГ используются роторы двух типов – сплошные (в бескарданных системах ориентации космических аппаратов дистанционного зондирования Земли) и полые (в карданных инерциальных навигационных системах (ИНС) для морского применения).

Форма и конструкция роторов обусловлены необходимостью создать главный момент инерции, для полого ротора важно также обеспечить сферичность наружной поверхности с учетом действия центробежных сил на рабочей скорости вращения.

Главный момент инерции для сплошного ротора создается путем вставки в районе экваториальной плоскости четырех дисков из более плотного материала, которые

снаружи закрываются пробками из основного материала ротора (рис. 14, *а*). Для полого ротора изготавливают оболочки переменной толщины: в районе экватора она больше (рис. 14, *б*).

При изготовлении ротора ЭСГ используют множество уникальных технологий, важнейшими из которых являются:

- диффузионная сварка полусфер полого ротора;
- балансировка и формообразование ротора с субмикронной точностью;
- нанесение контрастного рисунка со сверхчеткими границами;
- нанесение антифрикционного покрытия для безаварийной посадки.

Основные характеристики роторов для двух вариантов ЭСГ сведены в таблицу.

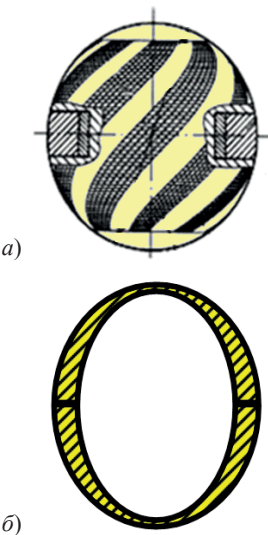


Рис. 14. Форма сплошного (*а*) и полого (*б*) роторов ЭСГ

Характеристики роторов ЭСГ

Характеристика	Ротор	
	сплошной	полый
Диаметр, мм	10	50
Обеспечение главного момента инерции	Вставки на экваторе	Внутренний профиль
Внешняя поверхность	Сфера	Эллипсоид
Применение	Бесплатформенные системы ориентации	Карданные ИНС
Рисунок на поверхности	Растровые полосы	Полудисковые метки на полюсах
Изготовление	Из единой заготовки	Сварка двух полусфер
Погрешность изготовления, мкм	0,05	0,05

На рис. 15 показаны фотографии обоих вариантов ЭСГ, где видны все рассмотренные выше системы. Ввиду сложности изготовления и больших финансовых затрат такие приборы смогли создать лишь 3 страны – США, Франция и СССР (ЦНИИ «Электроприбор»), и только 2 из них – США и Россия – поддерживают данную технологию.

Работы по ЭСГ с полым ротором начались в 1966 г. под руководством А.С. Анфиногенова, выпуск штатных приборов был организован с 1980 г. На основе полученного опыта в 1992 г. под руководством Б.Е. Ландау была начата разработка ЭСГ со сплошным ротором, в 2002 г. стартовал выпуск штатных приборов.

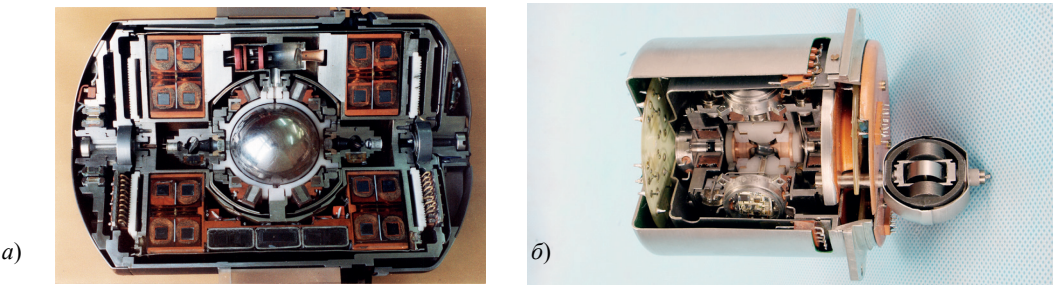


Рис. 15. ЭСГ с полым (*а*) и сплошным (*б*) ротором (в разрезе) [3], созданные ЦНИИ «Электроприбор»

Модель дрейфа ЭСГ

При отсутствии трения в опоре (это характерно для бесконтактного подвеса) и минимизации трения о воздух за счет глубокого вакуума основными причинами дрейфа ЭСГ являются:

- неидеальность формы ротора на рабочей частоте, обуславливающая, в частности, несовпадение центра тяжести и центра подвеса вдоль главной оси ротора (осевой дисбаланс);
- изменение формы ротора, вызванные температурой;
- неравножесткость подвеса по осям гирокамеры;
- остаточные магнитные поля.

Высокую стабильность ЭСГ обеспечивают системы стабилизации температуры, частоты вращения ротора и уровня вакуума, а также следующие технические решения:

- экранирование от магнитных полей;
- вращение корпуса (гирокамеры) ЭСГ для компенсации вредных моментов в осях.

Модель дрейфа, описывающая влияние указанных факторов, имеет аналитический вид; ее параметры стабильны и могут быть вычислены при стендовой калибровке. Для высокоточных приложений их можно уточнять при каждом пуске. Определяющий вклад в построение модели дрейфа внесли теоретические работы профессора Ю.Г. Мартыненко об исследовании уходов ЭСГ, вызванных несферичностью ротора и неидеальностью подвеса.

Наиболее сложная модель дрейфа у бескарданного ЭСГ, в котором ротор может занимать произвольное положение относительно гирокамеры. Модели для каждой из осей СК, связанной с корпусом ЭСГ, идентичны. Приведем пример модели для составляющей дрейфа по оси x :

$$\begin{aligned} \omega_x = & k_0 h_1 \left[-(1 - h_1^2) h_1^2 + h_2^4 + h_3^4 \right] + k_1 \left[-(1 - h_1^2) V_1 + h_1 h_2 V_2 + h_1 h_3 V_3 \right] + \\ & + k_2 h_1 \left[-(1 - h_1^2) V_1^2 + h_2^2 V_2^2 + h_3^2 V_3^2 \right] + k_3 h_1 \left[-(1 - h_1^2) h_1 V_1 + h_2^3 V_2 + h_3^3 V_3 \right] + \\ & + k_4 h_1 \left[-(1 - h_1^2) h_1^2 V_1^2 + h_2^4 V_2^2 + h_3^4 V_3^2 \right] + h_1 (\mu_{12} h_2^2 - \mu_{31} h_3^2) + h_2 h_3 v_{23}, \end{aligned}$$

где h_1, h_2, h_3 – направляющие косинусы ВКМ в осях корпуса; V_1, V_2, V_3 – управляющие напряжения подвеса; k_i ($i = 0-4$) – коэффициенты, характеризующие неидеальность формы ротора; μ_i, v_i – коэффициенты, обусловленные неравножесткостью подвеса.

Для карданного ЭСГ, используемого в составе морских ИНС, модель можно привести к упрощенному виду:

$$\omega_{X_\Gamma} = m_0,$$

$$\omega_{Z_\Gamma} = n_1 \cos h + n_2 \sin 2h,$$

где X_Γ, Z_Γ – оси, лежащие в плоскости экватора ротора, ориентация которых неизменна относительно плоскости горизонта; h – угол высоты ВКМ над плоскостью горизонта; m_0, n_1, n_2 – коэффициенты модели дрейфа ЭСГ.

Коэффициент n_1 характеризует дрейф от осевого дисбаланса ротора и, как следует из рис. 16, определяется следующим соотношением:

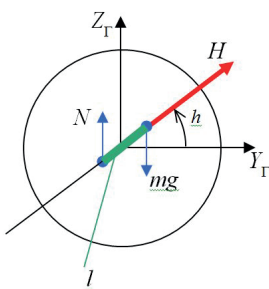


Рис. 16. К пояснению возникновения момента от осевого дисбаланса: N – сила, действующая со стороны подвеса; H – ВКМ ротора

$$n_1 = lmg,$$

где l – осевой дисбаланс ротора; m – масса ротора; g – ускорение силы тяжести.

Зная коэффициенты модели дрейфа $\vec{\omega}$, мы можем прогнозировать ориентацию ВКМ ЭСГ $\vec{H}$ относительно ИСК, интегрируя уравнение прецессионного движения в векторной форме:

$$\dot{\vec{H}} = \vec{\omega} \times \vec{H}.$$

Потенциальные возможности ЭСГ

В разговоре об ЭСГ нельзя не упомянуть эксперимент, проведенный в 2004–2005 гг. в ходе космической миссии Gravity Probe B для подтверждения некоторых положений общей теории относительности (ОТО) и продемонстрировавший уникальную точность гироскопа с электростатическим подвесом ротора.

Согласно ОТО, континуум «пространство–время» рядом с массивным вращающимся телом, каким является Земля, как бы прогибается и закручивается. Вследствие этого ориентация оси вращающегося ротора, на который не действуют никакие возмущающие моменты, должна за год отклониться от своего начального направления примерно на 7 угл. с в плоскости меридиана (т.н. геодезический эффект). В земных условиях проверить это невозможно, поэтому был разработан специальный космический аппарат – спутник, запущенный на полярную орбиту высотой 642 км. На спутнике разместили 4 ЭСГ (основные инструменты для проверки ОТО) и телескоп для измерения отклонения осей ЭСГ от первоначального направления на звезду (рис. 17). Весь измерительный блок был помещен в сосуд Дьюара, заполненный жидким гелием, объемом почти 2,5 м³ для создания криогенной температуры порядка 2 °К.

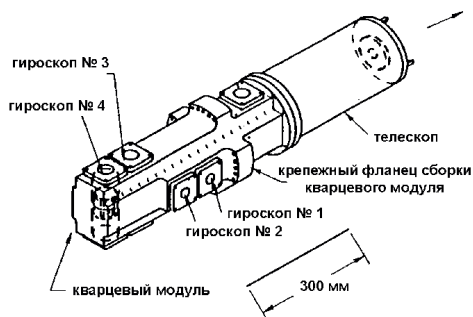


Рис. 17. Конструкция измерительного блока

Основной деталью каждого ЭСГ служил кварцевый ротор, представляющий собой шар диаметром 38 мм. Кварц был выбран потому, что он почти не расширяется и не сжимается при перепадах температур. Полировка шаров заняла несколько лет. В итоге были получены самые идеальные сферы, когда-либо созданные человеком, – их отклонение от идеального шара составляло не более 25 нм. Если бы такой шар был размером с Землю, перепад высот между самой глубокой впадиной и самым высоким пиком был бы порядка 8 м.

Для определения ориентации оси шара использовали явление сверхпроводимости. Шар покрыли слоем ниобия толщиной 1 мкм, который при сверхнизкой температуре становится сверхпроводником. При раскрутке такого шара возникает эффект Лондона: внутри сверхпроводника появляется магнитное поле, вектор которого направлен строго по оси вращения. Вокруг шара разместили петли считывания, соединенные со SQUID-магнитометрами (это очень чувствительные детекторы магнитного поля, которые могут зафиксировать поворот оси гироскопа на угол в 0,5 миллисекунды дуги). Ротор разгоняли потоком гелия до 60–80 Гц, уровень вакуума составлял 10^{–12} Па.

Космический аппарат вращался вокруг продольной оси с постоянной скоростью, что обеспечивало автокомпенсацию дрейфа гироскопов. Достигнутая нестабильность дрейфа по результатам постобработки оценивалась на уровне 10^{-11} град./ч.

Двухстепенной поплавковый гироскоп

Поскольку одной из основных причин уходов РГ является трение в опорах КП, возрастающее с ростом давления на опору (т.е. с увеличением веса ротора), естественным было желание разгрузить опору путем взвешивания тела в жидкости. Однако быстровращающийся ротор поместить в жидкость нельзя, невозможна и одновременная разгрузка опор внутреннего и наружного колец карданова подвеса, поэтому была предложена единственная реализуемая схема, предполагающая размещение гиromотора в герметичном поплавке, который может поворачиваться вокруг своей оси, таким образом выполняя функцию рамки. Такой гироскоп помимо свободы вращения вокруг своей оси имеет только свободу разворота вокруг оси поплавок вместе с ним, поэтому является двухстепенным. Пригодные для практического использования ДПГ были разработаны в 60-е гг. прошлого века. Вместе с трехстепенными гироскопами на бесконтактном воздушном подвесе на протяжении четверти века они были основными инерциальными датчиками в морской навигации, а в ракетной технике остаются таковыми до настоящего времени. Приоритет в изобретении и создании ДПГ принято приписывать Ч.С. Дрейперу (США), возглавлявшему лабораторию в Массачусетском технологическом институте (The Charles Stark Draper Laboratory), однако имеются свидетельства, что первым идею создания такого гироскопа предложил Л.И. Ткачев в 1943 г.

Соответствующая вязкость жидкости обеспечивает линейный характер зависимости угла поворота поплавка от приращения угла поворота основания, поэтому при работе ДПГ в режиме, когда выходным сигналом гироскопа является сигнал его датчика угла (ДУ), гироскоп называют интегрирующим (рис. 18). В этом режиме ДПГ применяется для стабилизации платформы, где он установлен, в инерциальном направлении, реализуемом с помощью ВКМ. Стабилизация осуществляется при установке платформы в КП по сигналу ДУ, подаваемому на датчик момента (ДМ) рамки КП. Гироскоп можно использовать и в управляемом режиме, когда на его ДМ подается заданный сигнал для получения желаемой ориентации платформы (например, стабилизация в ГСК у ИНС полуаналитического типа).

Следует учесть, что, помимо полезного сигнала о развороте поплавок относительно корпуса прибора вокруг оси z , сигнал ДУ будет также реагировать на разворот основания относительно поплавок по оси поплавок y . Это влияние можно исключить в схеме двух- или трехосной стабилизации платформы по сигналам ДУ двух или трех ДПГ с ортогонально ориентированными входными осями.

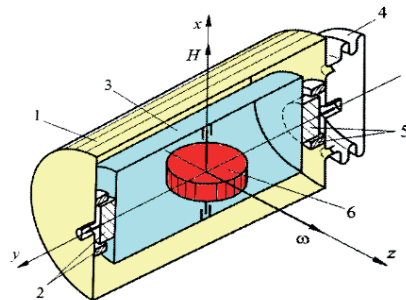


Рис. 18. Схема интегрирующего поплавкового гироскопа:
1 – корпус; 2 – ДУ; 3 – поплавок; 4 – сильфон;
5 – ДМ; 6 – ротор; z – входная ось;
 y – выходная ось

ДПГ может использоваться и как датчик угловой скорости (рис. 19). Для реализации такого режима сигнал с ДУ, измеряющего угол разворота поплавок β , подается на ДМ уже самого гироскопа. Таким образом, реализуется компенсационная схема, где сила тока на ДМ будет пропорциональна проекции измеряемой угловой скорости ω .

Конструкция прибора (рис. 20) включает:

- герметичный сварной корпус, на внутренней поверхности которого размещены четыре пары широких электродов двухосного электростатического подвеса, служащего в данном случае для уменьшения силового воздействия на опоры поплавковой камеры при разворотах корпуса гироскопа;
- цилиндрическую поплавковую камеру, установленную внутри корпуса на прецизионных камневых опорах;
- размещенный в поплавковой камере гистерезисный гиросмотор обращенного типа с газодинамической опорой ротора, имеющей покрытие из нитрида титана;
- индукционный ДУ рамочного типа;
- электромагнитный ДМ;
- зазор между корпусом и поплавковой камерой, заполненный фторорганической жидкостью большой плотности, предназначенной для гидростатической разгрузки камневых опор и создания демпфирующего момента;

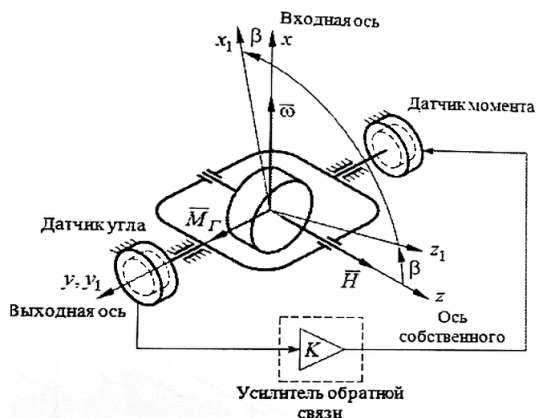


Рис. 19. Схема ДПГ в режиме датчика угловой скорости: x – входная ось

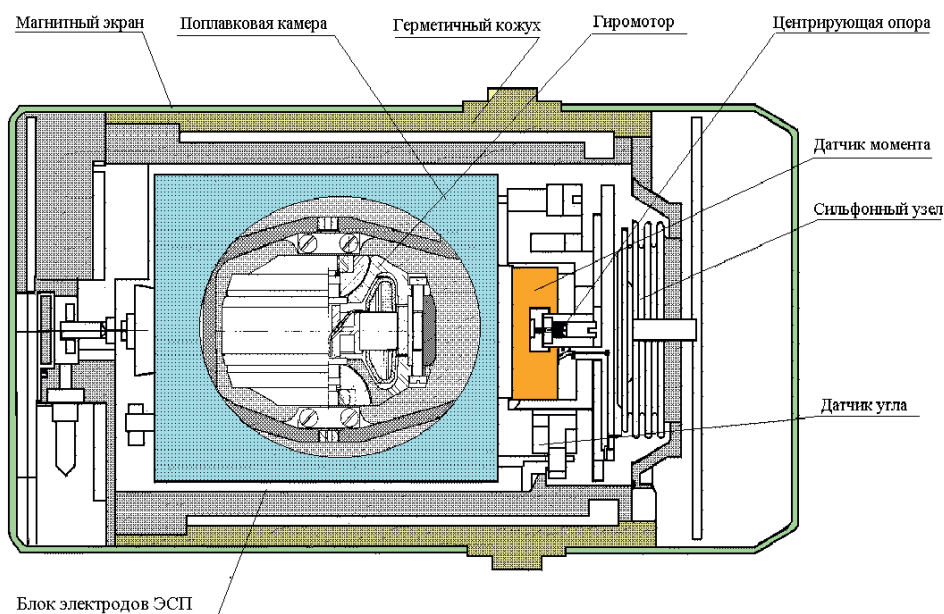


Рис. 20. Конструкция ДПГ

- закрытый сильфон, уменьшающий влияние изменения давления окружающей среды;
- встроенные платы электроники для системы термостабилизации и предварительного усилителя сигнала ДУ и плату управления электростатическим подвесом. При создании ДПГ удалось решить множество сложнейших задач, в частности осуществить подбор жидкости с большой и очень стабильной вязкостью, а также термостабилизацию с точностью до сотых долей градуса, реализовать конструкцию электростатического подвеса поплавка. Выпускаемые гироскопы продемонстрировали высокую надежность и перегрузочную способность.

Дрейф гироскопа определяется вредными моментами:

- $M_{\text{пост}}$ – сумма моментов, не зависящих от ускорения (в основном это момент тяжения токоподводов, а также реактивные моменты ДМ и ДУ, которые учитываются при регулировании ДПГ и паспортизируются);
- $M_{\text{дисб}}$ – момент, зависящий от первой степени ускорения (момент дисбаланса поплавковой камеры, вызванный смещением ее центров тяжести и плавучести относительно выходной оси; он контролируется и корректируется с помощью балансировочных винтов и в отрегулированном приборе должен быть ниже фиксированного остаточного уровня);
- M_{a2} – моменты, зависящие от второй степени ускорения (моменты конвективной природы, вызываемые температурными градиентами в поддерживающей жидкости; момент от неравножесткости подвеса поплавковой камеры; гидродинамические моменты, возникающие из-за неравномерных перемещений камеры в зазоре и от податливости газодинамической опоры ротора (здесь не учитываются));
- $M_{\text{демпф}}$ – демпфирующий момент, возникающий при вращении поплавковой камеры относительно корпуса (практически равен нулю за счет жесткости обратной связи, удерживающей поплавковую камеру в нулевом положении при любых воздействиях).

Заключение

Роторные гироскопы стали первыми инерциальными датчиками, позволившими человеку автономно, независимо от внешней среды решать насущные задачи навигации – вначале определять курс, а впоследствии и местоположение. Реализованные приборы этого типа можно с уверенностью отнести к высшим достижениям в области механики. Со временем их конструкции совершенствовались за счет развития других областей техники. Сегодня гироскопы этого типа являются наиболее точными инерциальными датчиками и сохраняют первенство в тех приложениях, где это качество является приоритетным.

Благодарности

Автор выражает благодарность сотрудникам «Электроприбора» А.А. Галактионову и Е.А. Махаеву за помощь в подготовке материала.

ЛИТЕРАТУРА

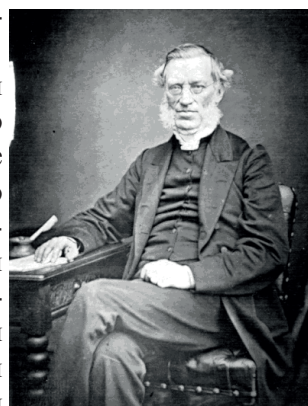
1. Лукьянов Д.П., Распопов В.Я., Филатов Ю.В. Прикладная теория гироскопов. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2015.
2. История создания электростатического гироскопа. Памяти главного конструктора А.С. Анфиногенова / науч. ред. В.Г. Пешехонов. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2011.
3. Ландау Б.Е. Электростатический гироскоп со сплошным ротором. СПб.: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2020.
4. Андрейченко К.П. Динамика поплавковых гироскопов и акселерометров. М.: Машиностроение, 1987. 253 с.
5. Пешехонов В.Г. Уникальный гироскоп обеспечил проверку общей теории относительности // Гироскопия и навигация. 2007. № 4(59). С. 111–114.

Приложение

Самуэль Ирншоу¹ (Samuel Earnshaw), 1805–1888

Английский священник, математик и физик, внес большой вклад в развитие теоретической физики.

В 1827 г. окончил Колледж Св. Иоанна в Кембриджском университете. В 1842 г. в сборнике трудов Кембриджского философского общества опубликовал статью «О природе молекулярных сил, регулирующих структуру светового эфира», в которой сформулировал теорему о неустойчивости равновесия конфигураций точечных зарядов. Является автором ряда научных трудов и статей по физике и математике, а также богословских трактатов, где излагал свои взгляды на объединение науки и религии. Его исследования оказали значительное влияние на развитие теорий поля и предшествовали ряду открытий в области электромагнетизма и квантовой физики.



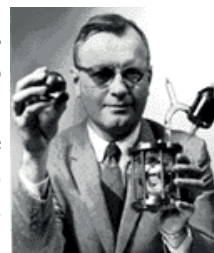
Арнольд Нордсик² (Arnold T. Nordsieck), 1911–1971

Американский физик-теоретик.

В 1932 г. окончил Университет штата Огайо и получил степень магистра физики. В 1935 г. защитил докторскую диссертацию по ядерной физике под руководством Р. Оппенгеймера.

В 1935–1937 гг. стажировался в Лейпцигском университете, где совместно со своим руководителем Ф. Блохом решил одну из проблем квантовой электродинамики – устранение расхождений в инфракрасном диапазоне.

В 1950 г. в Иллинойском университете сконструировал прототип аналогового компьютера – дифференциальный анализатор на синхромоторах, используя электронные устройства времен Второй мировой войны стоимостью 700 долларов. Было



¹ https://ru.wikipedia.org/wiki/Ирншоу,_Самуэль

² <https://www.questionai.com/knowledge/kx4pHJRRJP-arnold-nordsieck>

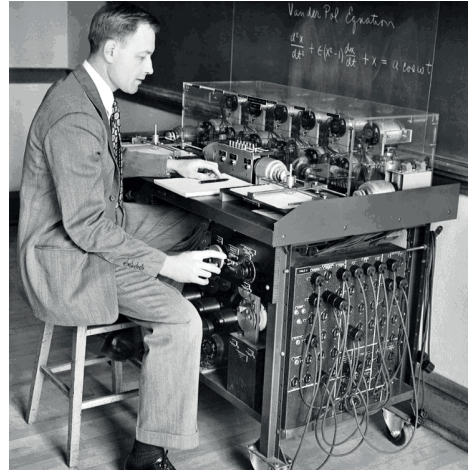
изготовлено несколько рабочих копий прибора, в том числе для Ливерморской национальной лаборатории и Университета Пердью.

В 1953 г. разработал концепцию электростатического гироскопа, который выпускала, в частности, компания Honeywell (США). На фото он снят с макетным образцом в руках.

В 1955 г. создал компьютерную систему принятия решений для корабельных радаров противовоздушной обороны.

В 1960-е гг. сформулировал методы решения нелинейных уравнений Больцмана в задачах газодинамики. Опубликовал ряд работ по численным методам.

В университетах Калифорнии и Иллинойса учреждены стипендии его имени.



Дифференциальный анализатор
на синхромоторах

Чарльз Старк Дрейпер¹ (Charles Stark Draper), 1901–1987

Американский ученый и инженер, стоял у истоков создания инерциальной навигации.

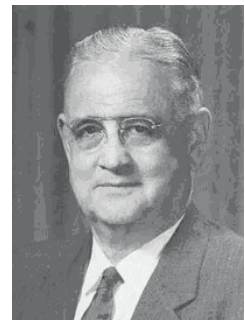
В 1926 г. получил степень бакалавра наук в области электрохимии в Массачусетском технологическом институте, в 1928 г. – степень магистра, а в 1938 г. защитил докторскую диссертацию по физике.

В 1930 г. основал в Массачусетском технологическом институте Лабораторию измерительных приборов, которая в 1973 г. стала независимой некоммерческой организацией.

В 1955 г. опубликовал вместе с соавторами работу, где были описаны конструкция и применения поплавкового гироскопа (C.S. Draper, W. Wrigley, L.R. Grohe “The floated Integrating Gyro and Its Applications to Geometrical Stabilization Problems on Moving Bases”).

В 1961 г. под его руководством для космической программы «Аполлон» был сконструирован бортовой управляющий компьютер, который контролировал движение и навигацию лунных модулей. Лаборатория Ч. Дрейпера создавала также системы навигации для военной промышленности.

В 1981 г. был введен в Национальный зал славы изобретателей за многочисленные изобретения и значительный вклад в науку. В 1989 г. в США учреждена премия Чарльза Дрейпера, присуждаемая за значительные инженерные достижения, оказавшие сильное влияние на общество, улучшившие качество жизни и облегчившие доступ к информации.



C. S. Draper

¹ <https://www.lemelson.mit.edu/resources/charles-draper>

Лев Иванович Ткачев¹, 1916–1974



Российский и советский ученый, специалист в области навигации и автоматики.

В 1939 г. окончил Московское высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана (ныне Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана), в 1944 г. защитил там кандидатскую диссертацию, а в 1969 г. – докторскую, посвященную проблемам инерциальной навигации.

В 1943 г. в Саратове выступил с докладом в Ленинградском государственном университете, находившемся там в эвакуации, и предложил идею поплавкового гироскопа, а также описал предварительную проработку гиростабилизатора на его основе.

В 1949 г. опубликовал в журнале Академии наук СССР «Прикладная математика и механика» статью, в которой изложил принципы построения бесплатформенных ИНС и ИНС со звездно-стабилизированной платформой.

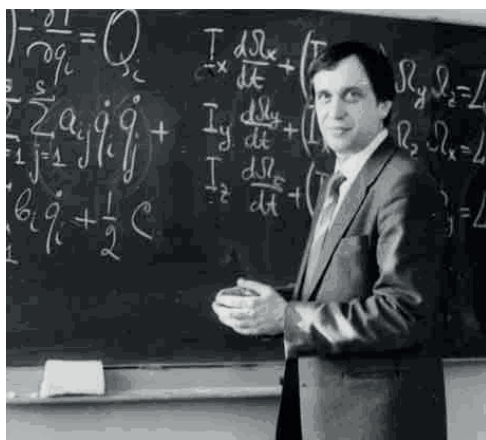
В 1955 г. возглавил лабораторию в ОКБ-52 (ныне АО «ВПК «НПО машиностроения») по проектированию поплавкового гироскопа и ИНС.

В 1973 г. выступил на I Всемирном конгрессе по астронавтике в Баку, на котором присутствовали Ч. Дрейпер и У. Ригли, с докладом по инерциальной навигации. В 1976 г. У. Ригли сделал посвященный Л.И. Ткачеву доклад на международном симпозиуме по навигации в Бостоне.

Л.И. Ткачев одним из первых сформулировал принципы построения систем инерциальной навигации. Гироскопы, сконструированные согласно этим принципам, использовались при освоении космоса – на корабле «Аполлон», при первой лунной миссии американских космонавтов и пр.

Опубликовал около 50 научных работ и получил 18 авторских свидетельств на изобретения.

Юрий Григорьевич Мартыненко², 1945–2012



Советский и российский ученый-механик.

В 1967 г. окончил с отличием механико-математический факультет Московского государственного университета, в 1971 г. защитил кандидатскую диссертацию на тему «Динамика гироскопа в электростатическом подвесе», а в 1978 г. – докторскую диссертацию «Гироскоп в неконтактном подвесе».

В 1970 г. опубликовал в журнале АН ССР «Механика твердого тела» статью «Уходы ЭСГ, вызываемые несферичностью ротора», положившую начало его исследованиям характеристик гироскопов с неконтактным подвесом ротора.

¹ <https://computer-museum.ru/articles/mei/6898/>

² https://ru.wikipedia.org/wiki/Мартыненко,_Юрий_Григорьевич

С 1975 г. работал на кафедре теоретической механики Московского энергетического института, в 1986–2003 гг. возглавлял ее. С 2003 г. руководил лабораторией общей механики Института механики МГУ, оставаясь также профессором кафедры МЭИ. Среди его учеников 4 доктора наук и 19 кандидатов.

Внес большой вклад в развитие мехатроники и робототехники, читал лекции в университетах России, Германии, Китая, США, Франции, Чехии и других стран. В 2000 г. удостоен почетного звания «Заслуженный деятель науки Российской Федерации».

Анатолий Сергеевич Анфиногенов, 1930–2003



Советский и российский ученый, специалист в области гироскопии.

В 1954 г. окончил Ленинградский электротехнический институт. В 1953 г. проходил преддипломную практику в «Электроприборе», а в следующем году был принят туда на работу. В 1956 г. стал старшим инженером, руководителем группы разработки усилителей на полупроводниковых элементах для следящих систем, в 1961 г. – ведущим инженером, в 1963 г. – заместителем главного конструктора трех ОКР.

В 1967 г. на предприятии была организована лаборатория по разработке ЭСГ, которую возглавил А.С. Анфиногенов. Эти исследования стали основным делом его жизни.

Дважды (уникальный случай!) ему присуждалась премия имени Н.Н. Острякова – в 1979 г. за разработку высокоточных гироскопических следящих систем и в 1996 г. за создание прецизионных ИНС на ЭСГ.

В 1990 г. защитил кандидатскую диссертацию, а в 1993 г. – докторскую. В 2001 г. А.С. Анфиногенову было присвоено звание заслуженного изобретателя РФ (142 авторских свидетельства и 4 патента).

В память о нем с 2011 г. на ежегодной конференции молодых ученых «Навигация и управление движением», проходящей в «Электроприборе», присуждается премия имени А.С. Анфиногенова за лучший доклад по гироскопической тематике.

Litmanovich, Yu.A. (Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg)
Rotary Gyroscopes, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2026, vol. 34, no. 2 (133), pp. 24–42.

Abstract. This article is based on the materials of a lecture given on the lecture day which took place before the conference of young scientists “Navigation and Motion Control”, and devoted to the current state and prospects of the development of inertial sensing elements. It briefly describes the physical principles forming the basis for rotary gyroscopes design, and presents the schematic diagrams and features of two types of gyroscopes in this class: electrostatic and floated ones. In addition, the material includes brief information about the people who made a decisive contribution to theoretical and engineering development of these devices.

Key words: rotary gyroscopes, basic physics, electrostatic gyroscope, two-degree-of-freedom floated gyroscope, historical notes.

Материал поступил 28.04.2026