



Поиск

Главная

Физическая энциклопедия

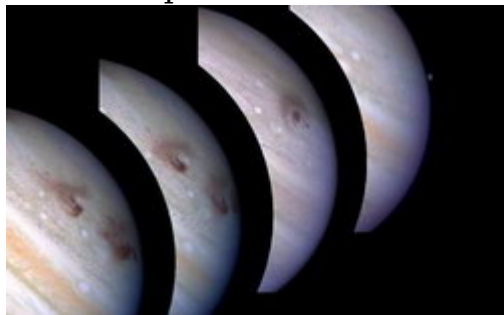
Новости науки и техники

## Физическая энциклопедия

- [Главная](#)
- [Предметный указатель](#)

Поиск

## Фотогалерея



Столкновение Юпитера с кометой Шумейкер - Леви 9



Новости науки и техники

### **НЕ ВРЕМЯ ДЛЯ КУПАНИЯ**

**В космосе нелегко оставаться чистым.**

«Мы смогли послать человека на Луну, но не в состоянии обеспечить космонавтам на Международной космической станции (МКС) возможность освежиться на протяжении их шестимесячного полета» [Далее...](#)



## **гироскоп**

**ГИРОСКОП** (от греч. гугеио - кружусь, вращаюсь и skoreo - смотрю, наблюдаю) - быстровращающееся симметричное твёрдое тело, ось вращения (ось [симметрии](#)) к-рого может изменять своё направление в пространстве. Свойствами Г. обладают вращающиеся небесные тела, артиллерийские снаряды, роторы турбин, устанавливаемых на судах, винты самолётов и т. п. В совр. технике Г.- осн. элемент всевозможных гироскопич. устройств или приборов, широко применяемых для автоматич. управления движением самолётов, судов, торпед, ракет и в ряде др. систем гироскопич. стабилизации, для целей навигации (указатели курса, поворота, горизонта, стран света и др.), для измерения угловых или поступат. скоростей движущихся объектов (напр., ракет) и во мн. др. случаях (напр., при прохождении стволов штолен, строительстве метрополитенов, при бурении скважин).

Чтобы ось Г. могла свободно поворачиваться в пространстве, Г. обычно закрепляют в кольцах т. н. карданова подвеса (рис. 1), в к-ром оси внутр. и внеш. колец и ось Г. пересекаются в одной точке, наз. центром подвеса. Закреплённый в таком подвесе Г. имеет 3 степени свободы и может совершать любой поворот около центра подвеса. Если центр тяжести Г. совпадает с центром подвеса, Г. наз. уравновешенным, или астатическим.

Изучение законов движения Г.- задача [динамики](#) твёрдого тела.

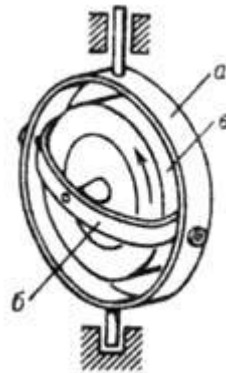


Рис. 1. Классический карданов подвес, *a* - внешнее кольцо, *б* - внутреннее кольцо, *в* - ротор.

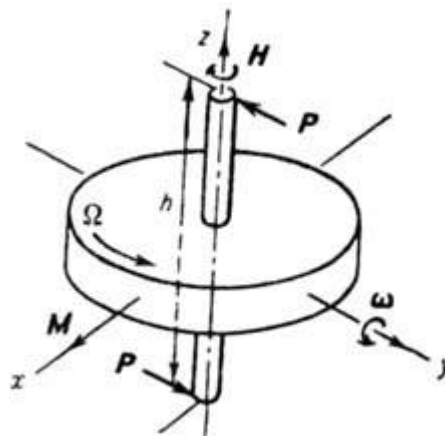


Рис. 2. Прецессия **гироскопа**. Угловая скорость прецессии  $\omega$  направлена так, что вектор собственного кинетического момента  $\mathbf{H}$  стремится к совмещению с вектором момента  $\mathbf{M}$  пары, действующей на гироскоп.

Основные свойства гироскопа. Если к оси быстровращающегося свободного Г. приложить пару сил ( $P - F$ ) с моментом  $M = Ph$  ( $h$  - плечо силы) (рис. 2), то (против ожидания) Г. начнёт дополнительно поворачиваться не вокруг оси  $x$ , перпендикулярной к плоскости пары, а вокруг оси  $y$ , лежащей в этой плоскости и перпендикулярной к собств. оси тела  $z$ . Это дополнит. движение наз. прецессией. Прецессия Г. будет происходить по отношению к *инерциальной системе отсчета* (к осям, направленным на неподвижные звёзды) с угловой скоростью

$$\omega = M/I\Omega, \quad (1)$$

где  $I$  - момент инерции Г. относительно оси  $z$ ,  $\Omega$  - угловая скорость собств. вращения Г. относительно той же оси. Величина  $H = I\Omega$  наз. собственным кинетическим моментом (или моментом количества движения) Г. Направление  $\omega$  определяется так, как показано на рис. 2. Из ф-лы (1) ясно, что прецессия происходит тем медленнее, чем больше  $\Omega$ ; на практике величина  $\omega$  бывает в миллионы раз меньше  $\Omega$ .

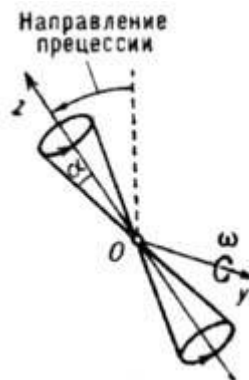


Рис. 3. Конус нутаций.

При более подробном рассмотрении оказывается, что собств. вращение и прецессия симметричного Г. могут сопровождаться т. н. нутациями - быстрыми конич. движениями оси Г. относительно изменяющегося по закону (1) направления (рис. 3). Угол конуса нутации  $2\alpha$ , как правило, бывает очень мал. Кроме того, из-за наличия неизбежных сопротивлений нутации обычно быстро затухают. Всё это позволяет при решении большинства технич. задач учитывать только прецессию Г., что и приводит к т. н. элементарной, или прецессионной, теории

гироскопич. явлений, осн. соотношением к-рой является ф-ла (1). В более общем случае, когда угол  $\alpha$  между осями собств. вращения и прецессии оказывается не равным  $90^\circ$ , эта ф-ла принимает вид

$$[\omega \cdot I \Omega] = M \text{ или } I \omega \Omega \sin \alpha = M. \quad (2)$$

При изучении поведения Г. по отношению к подвижному основанию в выражение для  $M$  должны входить и моменты сил инерции переносного движения.

Из ф-лы (1) следует, что если Г. будет полностью свободен от постоянно действующих на него сил, т. е. при  $M=0$ , ось Г. будет сохранять неизменное направление по отношению к неподвижным звёздам, т. к. тогда  $\omega=0$ . Кратковрем. воздействие на ось такого Г. пары сил с моментом  $M \neq 0$  вызовет смещение оси на малый угол, тем меньший, чем меньше  $\omega$ , т. е. чем больше будет  $H = I \Omega$ . С прекращением же этого воздействия будет опять  $M=0$ , а следовательно, и  $\omega=0$ , так что смещение оси прекратится. Т.о., ось быстровращающегося свободного Г. практически не изменяет своего направления под влиянием кратковрем. внеш. возмущений (толчков) и в этом смысле устойчива. Важным свойством свободного Г. устойчиво сохранять направление своей оси пользуются в устройствах, применяемых для автоматич. управления движением самолётов, ракет и т. п., а также в ряде навигац. и др. приборов.

Г., ось к-рого закреплена подшипниками  $a, a_1$  в кольце с неподвижной осью вращения  $bb_1$  (рис. 4), обладает двумя степенями свободы. Если это кольцо вращать вокруг оси  $bb_1$  с угловой скоростью  $\omega$ , то Г. будет совершать вынужденную прецессию. При этом со стороны Г. на подшипники  $a, a_1$  действует пара сил  $(Q, Q_1)$ , стремящаяся совместить ось собств. вращения  $aa_1$  с осью прецессии  $bb_1$  так, чтобы направления векторов  $\Omega$  и  $\omega$  совпали (правило Н. Е. Жуковского). Момент этой гироскопич. пары

$$G = I [\Omega \cdot \omega] \text{ или } G = I \omega \Omega \sin \alpha, \quad (3)$$

где  $\alpha$  - угол между осями  $aa_1$  и  $bb_1$ . Подобный гироскопич. эффект имеет место у роторов турбин, установленных на судах, при повороте судов или при качке, у винтовых самолётов при виражах и т. п. Ф-ла (3) позволяет определить возникающие при этом гироскопич. давления на подшипники.

На гироскопич. эффекте основан принцип т. н. силовой гироскопич. стабилизации (см. ниже), а также устройство ряда приборов, напр. гироскопич. указателя поворотов и др.

Уравнения движения гироскопа. Движение большинства гироскопич. систем таково, что если исключить кратковрем. переходные процессы, возникающие при ударах или при резких изменениях сил, действующих на систему, изменение ориентации осей роторов  $\Gamma$  относительно направлений на неподвижные звёзды происходит весьма медленно. При изучении такого прецессионного движения достаточно пользоваться элементарной теорией  $\Gamma$ .

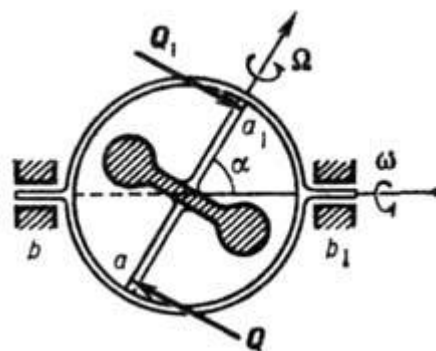


Рис. 4. Гироскоп с двумя степенями свободы.

Исследование процессов, в течение к-рых оси роторов  $\Gamma$  совершают нутации, и решение вопросов устойчивости гироскопич. систем требуют учёта кинетич. моментов всех тел, входящих в состав гироскопич. системы. Соответствующие ур-ния движения являются ур-ниями нутац. теории  $\Gamma$ . Дифференц. ур-ния нутац. теории имеют для данной гироскопич. системы более высокий порядок, чем ур-ния прецессионного движения. Однако решение задач нутац. теории упрощается тем обстоятельством, что во мн. случаях можно ограничиться рассмотрением малых движений методами теории малых колебаний.

Строго ур-ния движения  $\Gamma$  справедливы по отношению к инерциальной системе отсчёта, однако на практике движение гироскопич. систем приходится изучать по отношению к осям, связанным с тем подвижным объектом (судно, самолёт, ракета, Земля и др.), на к-ром эти системы установлены. Поэтому при составлении

ур-ний в число действующих сил надлежит включать также переносные и Кориолиса силы, инерции, обусловленные перемещением объекта. Оказывается, что удобнее всего составлять ур-ния движения Г. по отношению к системе координат  $O \xi^* \eta^* \zeta^*$  с началом в центре  $O$  подвеса гироскопич. системы и с осями, не изменяющими своей ориентации относительно направлений на неподвижные звёзды, т. е. перемещающимися по отношению к инерциальной системе отсчёта поступательно. В этом случае кориолисовы силы инерции вообще отсутствуют, а все силы инерции переносного движения антипараллельны ускорению центра  $O$  в его движении относительно инерциальной системы отсчёта.

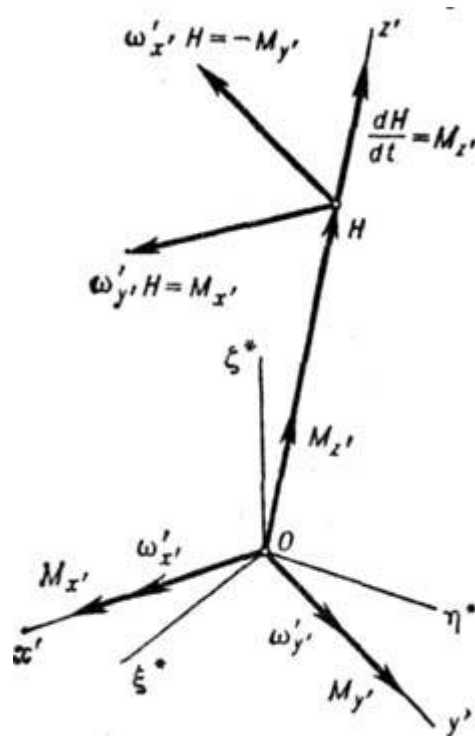


Рис. 5. Приложение теоремы механики системы о кинетическом моменте к установлению уравнения прецессионного движения ротора гироскопа. Скорость конца вектора собственного кинетического момента принимается геометрически равной главному моменту совокупности сил, приложенных к ротору.

В теории Г. с достаточным для практики приближением можно за инерциальную систему отсчёта принять неврещающуюся систему координат с началом в центре Земли. Точно так же малая погрешность при подсчёте сил инерции переносного движения происходит, если за ускорение центра  $O$  подвижной неврещающейся системы координат  $\xi^*\eta^*\zeta^*$  принять его ускорение относительно земной поверхности. В этом случае вместо действующих на массы частей гироскопич. системы сил тяготения к Земле следует брать [силы тяжести](#). Для составления ур-ний движения Г. введём ещё систему осей  $Ox'y'z'$  с началом в той же точке  $O$ , что и у системы  $O\xi^*\eta^*\zeta^*$  (точка  $O$  лежит где-то на оси симметрии ротора, напр. в центре его подвеса). Ось  $z'$  системы совпадает с осью симметрии ротора, но сама система  $Ox'y'z'$  не вращается вместе с ротором, будучи связанной, напр., с кожухом Г. Тогда ур-ния прецессионного движения ротора, симметричного Г. относительно осей  $O\xi^*\eta^*\zeta^*$ , записанные в проекциях на оси  $Ox'y'z'$ , имеют вид

$$\begin{aligned}\omega'_{y'}H &= M_{x'}, \\ -\omega'_{x'}H &= M_{y'}, \\ \frac{dH}{dt} &= M_{z'}.\end{aligned}\tag{4}$$

Они выражают (рис. 5) равенство (по числ. величине и направлению) скорости конца вектора собственного кинетич. момента  $\mathbf{H}$  и гл. момента  $\mathbf{M}_0$  относительно центра  $O$  сил, приложенных к ротору. В число этих сил должны быть включены переносные силы инерции, обусловленные поступат. движением системы отсчёта  $O\xi^*\eta^*\zeta^*$ . Величины  $\omega'_{x'}$  и  $\omega'_{y'}$  - проекции на оси  $x'$  и  $y'$  угловой скорости системы координат  $Ox'y'z'$  относительно системы  $O\xi^*\eta^*\zeta^*$ , т. е. относительно направлений на неподвижные звёзды. Угловую скорость ротора относительно осей  $Ox'y'z'$  можно наз. угловой скоростью его собств. вращения. Вектор  $\mathbf{H}$  направлен по оси собств. вращения (рис. 6) ротора  $z'$ , а его модуль можно принять равным

$$H = C \frac{d\varphi}{dt},\tag{5}$$

где  $C$  - [момент инерции](#) ротора относительно его оси симметрии  $z'$  (полярный момент инерции),  $\varphi$  - угол поворота ротора относительно системы координат  $x'y'z'$ . Принимается также, что значительно превышает



величину  $\omega'_{z'}$  - проекцию  $\frac{d\varphi}{dt}$  угловой скорости системы координат на её же ось (на практике на 3-4 порядка). В большинстве случаев  $H$  можно считать постоянным, т. к. обычно [моменты сил](#), вращающих ротор, и моменты сопротивления этому вращению взаимно уравниваются. Соответственно, в 3-м из ур-ний (4) следует положить  $M_{z'}=0$ .

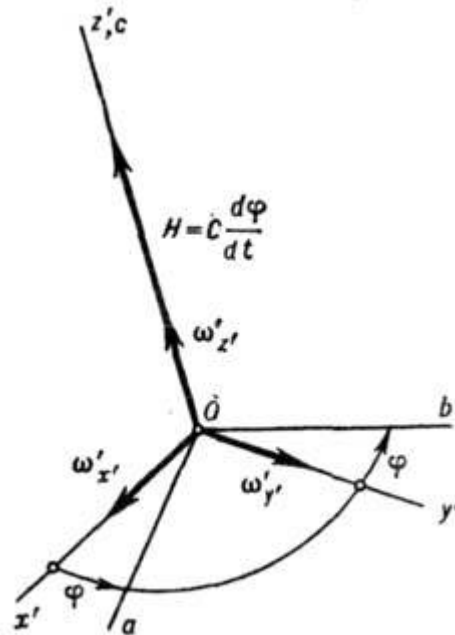


Рис. 6. Вектор собственного кинетического момента гироскопа. Система координат  $abc$  связана с ротором гироскопа; она вращается относительно системы  $x'y'z'$  с угловой скоростью  $d\varphi/dt$  вокруг оси  $z'$ , совпадающей с осью  $c$ . Момент инерции ротора относительно оси  $c$  (оси симметрии или оси собственного вращения) обозначен через  $C$ .

Более строгими ур-ниями движения ротора являются ур-ния, соответствующие нутац. теории Г., а именно:

$$\begin{aligned}
A \frac{d\omega'_{x'}}{dt} + (C - A) \omega'_{y'} \omega'_{z'} + \omega'_{y'} H &= M_{x'}, \\
A \frac{d\omega'_{y'}}{dt} + (A - C) \omega'_{z'} \omega'_{x'} - \omega'_{x'} H &= M_{y'}, \\
C \frac{d\omega'_{z'}}{dt} + \frac{dH}{dt} &= M_{z'},
\end{aligned} \tag{6}$$

где  $A$  - момент инерции ротора относительно к-л. оси, перпендикулярной его оси симметрии и проходящей через центр  $O$  (экваториальный момент инерции). В ур-ниях (6), в отличие от ур-ний (4), принято, что система координат  $x'y'z'$  может иметь угловую скорость с произвольной составляющей  $\omega'_{z'}$  вдоль оси симметрии ротора  $z'$ . В частности, эту систему можно связать с самим ротором. Тогда ур-ния обращаются в общеизвестные ур-ния Эйлера движения твёрдого осесимметричного тела (см. *Эйлера динамические уравнения*), осложнённые наличием в правых частях упоминавшихся выше переносных сил инерции.

Ур-ния (4) и (6) пригодны для изучения движения ротора  $\Gamma$ , не стеснённого кардановым подвесом, напр. в случае шарового  $\Gamma$ . (см. ниже), и вообще свободных тел (снаряд, небесные тела, искусств. спутники, космич. корабли). При наличии же карданова подвеса в состав сил, образующих моменты относительно осей  $x'$  и  $y'$ , т. е. в выражения для  $M_{x'}$  и  $M_{y'}$ , войдут неизвестные силы - нормальные реакции подшипников оси ротора. Для исключения этих сил, представляющих воздействие внутр. кольца подвеса (кожуха) на ротор, следует совместно с ур-ниями движения ротора рассматривать также и ур-ния движения элементов подвеса  $\Gamma$ .

При составлении ур-ний прецессионного движения  $\Gamma$  в кардановом подвесе изменение кинетич. моментов элементов подвеса не учитывается. Поэтому совокупность сил, приложенных, напр., к внутр. кольцу подвеса (кожуху), следует считать статически эквивалентной нулю (уравновешенной). Т. о., вместо ур-ний движения внутр. кольца фактически составляются ур-ния равновесия всех приложенных к нему сил, т. е. сил взаимодействия с внеш. кольцом, ротором  $\Gamma$  и его основанием, сторонних (внеш.) сил и сил инерции переносного движения. То же относится и к силам, приложенным к внеш. кольцу карданова подвеса.

После исключения нормальных реакций осей подвеса ур-ния прецессионного движения  $\Gamma$  в кардановом подвесе приводятся к виду

$$\begin{aligned}\omega'_{y'} H &= m_{x'} + l_{x'} + (K + k) \sec \beta - (M - l_{z'}) \operatorname{tg} \beta, \\ -\omega'_{x'} H &= m_{y'} + l_{y'} + L, \\ \frac{dH}{dt} &= m_{z'} + M.\end{aligned}\quad (7)$$

Здесь  $m_{x'}$ ,  $m_{y'}$ ,  $m_{z'}$  - суммы моментов относительно осей  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$  соответственно всех сторонних сил и сил инерции переносного движения, действующих на ротор;  $l_{x'}$ ,  $l_{y'}$ ,  $l_{z'}$  - аналогичные суммы, относящиеся к внутр. кольцу подвеса (кожуху);  $M$  - сумма моментов относительно оси  $z'$  сил, действующих на ротор со стороны внутр. кольца (кожуха), т. е. сил, вращающих ротор, и сил сопротивления этому вращению (сил трения);  $L$  - сумма моментов относительно оси  $y'$  (или  $\eta_1$ ) кожуха (рис. 7) сил воздействия внеш. кольца карданова подвеса на внутр. кольцо (кожух);  $K$  - сумма моментов относительно оси  $\xi_1$  (или  $\xi$ ) внеш. кольца сил воздействия основания Г. на это кольцо;  $k$  - аналогичная сумма моментов сторонних сил, действующих на внеш. кольцо;  $\beta$  - угол поворота внутр. кольца (кожуха) относительно внешнего. Он принимается положительным, если система координат  $x'y'z'$ , связанная с внутр. кольцом (кожухом), повернута относительно системы координат  $\xi_1\eta_1\zeta_1$ , связанной с внешним кольцом подвеса, против хода часовой стрелки (наблюдение за поворотом производится со стороны положит. части оси  $y'$  или  $\eta_1$ ). При  $\beta=0$  оси этих систем соответственно совпадают.

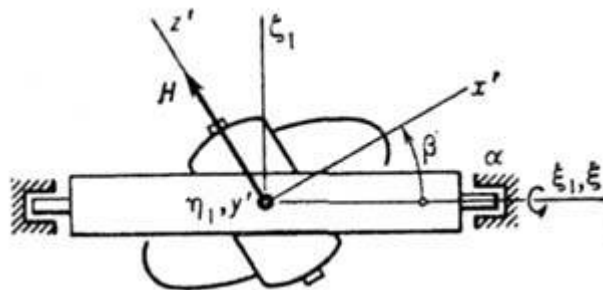


Рис. 7. Схема гироскопа в кардановом подвесе. Система координат  $x'y'z'$  связана с внутренним кольцом подвеса, система  $\xi_1\eta_1\zeta_1$  - с внешним, а  $\xi\eta\zeta$  - с основанием гироскопа (на рис. показана лишь ось  $\xi$ ).

Для определения величин  $\omega_{x'}, \omega_{y'}, \omega_{z'}$ , следует знать угловые скорости: основания Г. относительно системы координат  $\xi^*\eta^*\zeta^*$ , внеш. кольца карданова подвеса по отношению к основанию и внутр. кольца по отношению к внешнему. Имеют место след. ф-лы:

$$\begin{aligned}\omega_{x'} &= u_{\xi} \cos \beta + u_{\eta} \sin \alpha \sin \beta - u_{\zeta} \cos \alpha \cos \beta + \frac{d\alpha}{dt} \cos \beta, \\ \omega_{y'} &= u_{\eta} \cos \alpha + u_{\zeta} \sin \alpha + \frac{d\beta}{dt}, \\ \omega_{z'} &= u_{\xi} \sin \beta - u_{\eta} \sin \alpha \cos \beta + u_{\zeta} \cos \alpha \cos \beta + \frac{d\alpha}{dt} \sin \beta,\end{aligned}\quad (8)$$

где  $u_{\xi}, u_{\eta}, u_{\zeta}$  - проекции угловой скорости основания Г. на оси, связанной с основанием системы координат  $\xi\eta\zeta$ . Ось  $\xi$  этой системы совпадает с осью внеш. кольца подвеса. Угол поворота внеш. кольца относительно основания обозначен через  $\alpha$  (рис. 8). При  $\alpha=0$  оси систем координат  $\xi\eta\zeta$  и  $\xi_1\eta_1\zeta_1$  соответственно совпадают. Положит. направление отсчёта угла  $\alpha$  такое же, как и угла  $\beta$ . Ур-ния (7) и (8) позволяют решать большинство вопросов, связанных с одnogироскопными гироскопическими системами в рамках прецессионной теории гироскопа.

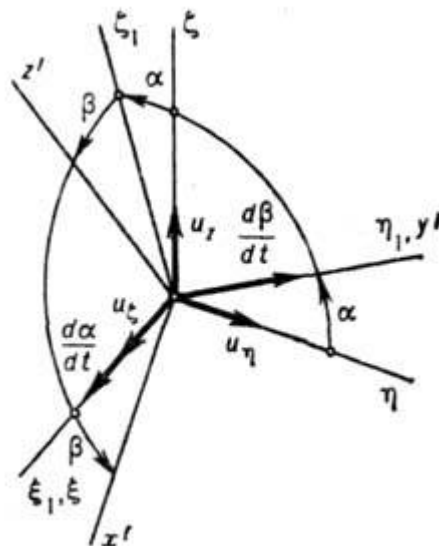


Рис. 8. К подсчёту абсолютной угловой скорости внутреннего кольца карданова подвеса (система координат  $x'y'z'$ ). Вектор  $\frac{d\alpha}{dt}$  - относительная угловая скорость внешнего кольца ( $\xi_1\eta_1\zeta_1$ ) относительно основания ( $\xi\eta\zeta$ ),  $\frac{d\beta}{dt}$  - угловая скорость внутреннего кольца относительно внешнего.

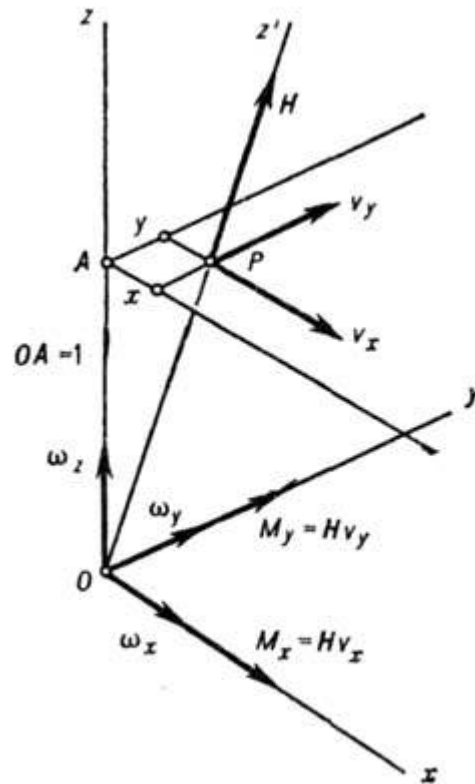


Рис. 9. Полюс гироскопа (точка P) и связь составляющих его скорости  $v_x$  и  $v_y$  относительно неврещающейся системы координат  $\xi^*\eta^*\zeta^*$  (на рис не показана) с суммами  $M_x$  и  $M_y$  моментов сил, действующих на ротор гироскопа и его внутреннее кольцо (кожух).

В случае, когда можно пренебречь моментами трения  $K$  и  $L$  в осях подвеса и считать равными нулю моменты  $k$ ,  $m_z$ ,  $l_z$  и  $M$ , уравнения прецессионной теории Г. в кардановом подвесе значительно упрощаются и допускают следующую геометрич. интерпретацию. Вводится вспомогат. система координат  $xuz$  с началом в центре

подвеса Г. (рис. 9). На расстоянии, равном единице от начала координат, строится плоскость, параллельная координатной плоскости  $xu$ . Через  $x$  и  $y$  обозначаются координаты точки  $P$  пересечения вектора  $H$  с упомянутой плоскостью (полюс Г.). Тогда ур-ния прецессионного движения Г. можно представить в виде:

$$\begin{aligned} H v_x &= M_x, \\ H v_y &= M_y, \end{aligned} \quad (9)$$

где  $v_x$  и  $v_y$  - проекции на оси  $x$  и  $y$  скорости точки  $P$  в её движении по отношению к системе координат  $O\xi^* \eta^* \zeta^*$ . Модуль  $H$  в данном случае - пост. величина. Предполагается, что направление  $H$  мало отклоняется от направления оси  $z$ , в результате чего координаты  $x$  и  $y$  точки  $P$  малы по сравнению с единицей и с большой точностью равны углам отклонения от координатных плоскостей  $yz$  и  $xz$  вектора  $H$  или, что то же, оси собств. вращения гироскопа  $z$ .

Величины  $M_x$  и  $M_y$ , к-рые находятся в правых частях ур-ний (9), представляют собой суммы моментов относительно осей  $x$  и  $y$  сторонних сил и переносных сил инерции, действующих на механич. систему: ротор - внутри. кольцо (кожух) Г.

Если обозначить через  $\omega_x$ ,  $\omega_y$ ,  $\omega_z$  проекции на оси  $x$ ,  $y$ ,  $z$  угловой скорости системы координат  $x y z$  относительно невращающейся системы  $\xi^* \eta^* \zeta^*$ , то ур-ния (9) можно представить в виде

$$\begin{aligned} H \left( \frac{dx}{dt} - y\omega_z + \omega_y \right) &= M_x, \\ H \left( \frac{dy}{dt} + x\omega_z - \omega_x \right) &= M_y. \end{aligned} \quad (10)$$

Полученные ур-ния удобны для исследования поведения однороторного гироскопич. маятника (гировертикали) при смещениях основания, на к-ром они расположены. В первом случае ось  $z$  направляется на север, а во втором - вертикально.

Ур-ния движения Г. в кардановом подвесе, соответствующие нутац. теории, можно также вывести, пользуясь [Лагранжа уравнениями](#) 2-го рода. При этом следует рассматривать движение механич. системы, состоящей из

ротора и элементов подвеса Г. по отношению к невращающейся системе координат  $\xi^*\eta^*\zeta^*$  с началом в центре карданова подвеса, и принять углы  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\varphi$  за обобщённые координаты упомянутой механич. системы. Составив ур-ния для её кинетич. энергии, с помощью ур-ний Лагранжа 2-го рода можно получить ур-ния движения, позволяющие изучать поведение Г. в разл. гироскопич. устройствах.

Устойчивость гироскопа. Г. с тремя степенями свободы, находящийся под длит. воздействием сил, устойчив не всегда. Напр., вертикальный ("спящий") волчок, испытывающий воздействие силы тяжести (рис. 10), устойчив только при выполнении условия

$$(I\Omega)^2 > 4APa, \quad (11)$$

где  $P$  - вес Г.,  $a$  - расстояние его центра тяжести от точки опоры  $O$ ,  $A$  - момент инерции Г. относительно оси  $Ox$ . При невыполнении этого условия ось Г. будет удаляться от вертикали, совершая петлеобразные движения. Аналогичное условие имеет место и для устойчивости прецессионного движения Г. Напр., устойчивость при движении в воздухе вращающегося артиллерийского снаряда приближённо определяется ф-лой Н. В. Маиевского, к-рая совпадает с (11), если в ней под  $P$  понимать силу сопротивления воздуха, а под  $a$  - расстояние от центра масс  $C$  до точки  $O$  пересечения линии действия силы  $P$  с осью снаряда (рис. 11). Г. с двумя степенями свободы (рис. 4) всегда неустойчив; при толчке, дающем момент относительно оси  $bb_1$ , такой Г. начнёт вращаться вместе с кольцом вокруг этой оси.

**Гироскопы в технике.** Применяемые в технике Г. представляют собой тела вращения (роторы), имеющие обычно форму маховика с утолщенным ободом или шара массой от неск. г до десятков кг. Быстрое вращение Г. (со скоростью до 60 000 об/мин и более) обычно достигается тем, что ротор Г. делают вращающейся частью (ротором) быстроходного электродвигателя пост. или переменного тока. Иногда вращение Г. поддерживается струёй воздуха - ротор Г. является одновременно ротором возд турбинки. К основанию прибора (устройства) Г. крепится с помощью той или иной системы подвеса. Наиболее употребителен карданов подвес с ротором, заключенным в кожух. Для уменьшения сопротивления вращению в ряде случаев кожух делается герметичным и заполняется водородом. Это способствует также предотвращению коррозии металлич. частей и окисления смазки. В нек-рых приборах кожух, заключающий в себе ротор Г., погружают в жидкость. Подшипники кожуха (поплавка) при этом почти полностью разгружаются и момент трения скольжения в них



уменьшается до стотысячных долей. Н\*см. Применяются также проволочные (торсионные) подвесы и подвесы на возд. плёнке, напр. у т.н. шара-гироскопа (рис. 12).

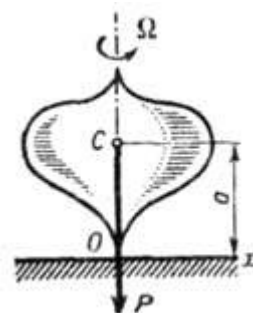


Рис. 10. "Спящий" волчок.

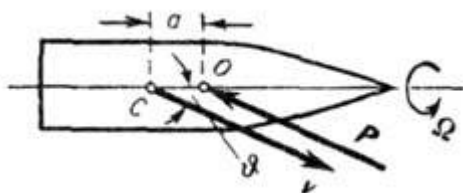


Рис. 11. К устойчивости вращающегося снаряда.

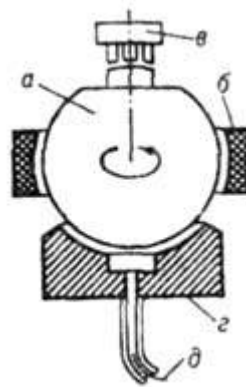


Рис. 12. Шар-гироскоп Сперри на воздушном подвесе, *а*-стальной ротор, *б*-статор, создающий вращающее магнитное поле; *в* - датчик, посредством сигналов к-рого производится "слежение" за осью шара на качающемся основании (корабле); *г* - бронзовая чаша, отделённая от шара воздушным слоем толщиной порядка сотых долей мм, *д* - подача сжатого воздуха для поддержки шарагироскопа.

Важным элементом мн. гироскопич. приборов является уравновешенный Г. с тремя степенями свободы. Для повышения точности прибора требуется максимально уменьшать величину момента  $M$ , возникающего вследствие трения в осях подвеса и несовпадения центра тяжести ротора с центром подвеса, т. к., согласно ф-ле (1), этот момент вызывает прецессию (уход) оси ротора. Момент трения в подвесах точных (прецизионных) Г. обычно уменьшают применением высококачеств. шариковых подшипников. Вследствие вибраций подвеса или возвратно-вращат. движений внеш. обоймы шарикоподшипников момент трения в ряде случаев удаётся сделать значительно меньше момента силы тяжести. Уменьшение момента силы тяжести достигается соответствующей балансировкой Г. Требуемая при этом точность совмещения центра масс Г. с геом. центром подвеса очень велика. Так, для Г. ср. размеров массой ок. 1 кг, имеющего угловую скорость вращения ротора порядка 30 000 об/мин, смещение центра масс от осп подвеса на 1 мк вызывает прецессию со скоростью ок. 1 град/ч. Земля вращается со значительно большей угловой скоростью - 15 град/час. Следовательно, подобным Г. можно легко обнаружить факт вращения Земли. Однако для решения ряда технич. вопросов, напр. навигации судов и ракет, требуется еще более высокая точность балансировки, т. к. скорость ухода оси Г. относительно неподвижных звёзд порядка 1 град/ч оказывается чрезмерно большой. Улучшая балансировку и уменьшая трение в осях, а также увеличивая кинетич. момент  $H$ , удаётся в

соответствии с ф-лой (1) достичь медленного ухода оси и обеспечить тем самым необходимую точность работы разл. гироскопич. приборов, в частности приборов управления движением баллистич. ракет и систем инерциальной навигации.

В обычных Г. имеются два разл. вида подшипников: подшипники, в к-рых совершает быстрое вращение ротор, и подшипники подвеса. Подшипники оси собств. вращения ротора должны обладать достаточной жёсткостью, высокой долговечностью при работе на больших скоростях вращения. Подшипники же подвеса работают при малых угловых скоростях и осн. требование к ним - иметь возможно меньшее трение.

Среди современных типов Г., в к-рых проблема опор решается иначе, чем в классич. схеме "ротор в кардановом подвесе", следует упомянуть т. н. динамически настраиваемый Г. В нём быстровращающийся ротор посредством упругих связей и промежуточных инерц. элементов крепится к валу. Спец. подбором параметров (условие динамич. настройки) добиваются равенства нулю (в среднем) моментов, вызывающих прецессию оси ротора в пределах малых углов её отклонения от оси вала ротора. В результате ось ротора практически оказывается неподвижной в инерциальном пространстве. Преимуществом этих Г. является отсутствие специфич. моментов трения в подшипниках подвеса, а также возможность увеличения кинетич. момента ротора при неизменных габаритах прибора.

Стремление получить Г. более высокой точности привело к созданию электростатич. и магн. подвесов. В этих Г. быстровращающийся шар поддерживается электрич. или магн. полем в вакууме. Т. к. из камеры, в к-рой находится вращающееся тело, газ полностью выкачан, то тело практически не испытывает трения и может вращаться по инерции в течение неск. нед.

В случае электростатич. подвеса поверхность шара выполняется из [диэлектрика](#), и поддерживающее электрич. поле индуцирует на нём электрич. заряды противоположного знака, в результате чего всегда возникает притягивающая сила. Для подвешивания тел это свойство непосредственно использовать нельзя, т. к., согласно [Ирншоу теореме](#), статич. равновесие тел, притягивающихся друг к другу по закону обратных квадратов, всегда неустойчиво. Для создания устойчивого подвеса используют регулируемое поле. То же самое имеет место и для магн. подвесов, когда ротор выполняется из ферромагнетика. Если же ротор изготавливать из диамагн. материала, то подвес может быть устойчивым и без дополнит. регулирования магн. поля (пассивный подвес). Эта схема подвеса нашла применение в т. н. криогенном Г., в к-ром в условиях

сверхнизких темп-р материал шара - ниобий - переходит в сверхпроводящее состояние, при этом он становится идеальным [диамагнетиком](#). Внутри такого материала магн. поле не проникает. Само поле создаётся токами, циркулирующими в сверхпроводнике без потерь.

Перспективными датчиками инерциальной информации являются лазерный Г. и волновой твердотельный Г., принцип действия к-рых основан на инерционности образующихся в них стоячих волн - электромагнитных в лазерном Г. и упругих в твердотельном. В лазерных Г. используют два луча света от источника [когерентного](#) излучения, распространяющиеся в противоположных направлениях по замкнутому кольцевому контуру. При вращении основания, на к-ром установлен Г., между лучами возникает разность фаз, что позволяет обнаружить это вращение и найти его угловую скорость или угол поворота.

Волновой твердотельный Г. состоит из полого резонатора, к-рый представляет собой оболочку вращения (сферическую, цилиндрическую и т. д.), системы возбуждения стоячих волн и системы съёма информации о положении узлов и пучностей стоячих волн. При повороте основания Г. на угол  $j$  [стоячая волна](#) поворачивается на угол  $kj$ , где  $0 < k < 1$  постоянная, зависящая от свойств материала, формы резонатора, а также числа узлов и пучностей стоячей волны. Измеряя угол поворота стоячей волны, можно вычислить угол поворота основания. См. также [Квантовый гироскоп](#).

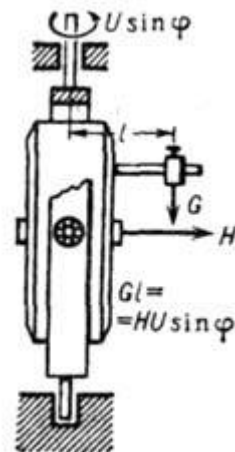


Рис 13. Гирискон направления.

В ряде приборов используется также свойство Г. равномерно прецессировать под действием постоянно приложенных сил. Так, если посредством доплнит. груза вызвать прецессию Г. с угловой скоростью, численно равной и противоположно направленной вертикальной составляющей угловой скорости вращения Земли  $U \sin \varphi$  (где  $U$  - угловая скорость Земли,  $\varphi$  - широта места), то ось такого Г. с той или иной степенью точности будет сохранять неизменное направление относительно стран света. В течение неск. часов, пока не накопится ошибка в 1-2°, такой Г., именуемый гироазимутом, или Г. направления (рис. 13), может заменить компас (напр., на самолётах, в частности в полярной авиации, где показания магн. компаса ненадёжны). Аналогичным Г., но со значительно большим смещением центра тяжести от оси прецессии, можно определять поступат. скорость объекта, движущегося в направлении оси  $bb_1$ , с любым ускорением  $w$  (рис. 14). Если отвлечься от влияния силы тяжести, то можно считать, что на Г. действует момент  $mw l$  переносной силы инерции  $Q$ , где  $m$  - масса Г.,  $l$  - плечо. Тогда, по ф-ле (1), Г. будет прецессировать вокруг оси  $bb_1$  с угловой скоростью  $\omega = (ml/I\Omega)w$ . После интегрирования последнего равенства получаем  $v = v_0 + (I\Omega/ml)\psi$ , где  $v_0$  - нач. скорость объекта. Т. о., оказывается возможным определить скорость объекта  $v$  в любой момент времени по углу  $\psi$ , на к-рый Г. повернётся к этому моменту вокруг оси  $bb_1$ . Для этого прибор должен быть снабжён счётчиком оборотов и устройством, вычитающим из полного угла поворота угол, на к-рый Г. повернётся вследствие действия на него момента силы тяжести. Таким прибором (интегратором продольных кажущихся ускорений) определяют скорости вертик. взлёта ракеты; при этом ракета должна быть стабилизирована так, чтобы она не имела вращения вокруг своей оси симметрии.

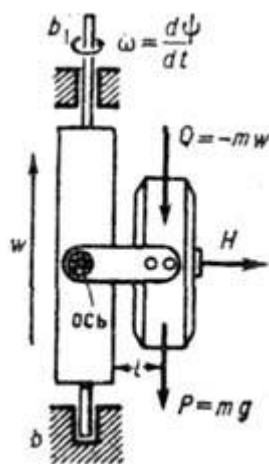


Рис. 14. Гироскопический измеритель скорости подъема ракеты.  $w$  - ускорение подъёма;  $g$  - ускорение свободного падения;  $P$  - сила тяжести,  $Q$  - сила инерции,  $H = I\Omega$  - собственный кинетический момент.

В ряде совр. конструкций применяют т. н. поплавковый, или интегрирующий, Г. Ротор такого Г. помещён в кожух - поплавок, погружённый в жидкость (рис. 15). При вращении поплавок вокруг его оси  $x$  на Г. будет действовать момент  $M_x$  вязкого трения, пропорциональный угловой скорости вращения  $\omega_x$ . Благодаря этому оказывается, что если Г. сообщить принудит. вращение вокруг оси  $y$ , то угловая скорость этого вращения  $\omega_y$  в соответствии с равенством (1) будет пропорциональна  $\omega_x$ . В результате угол поворота поплавок вокруг оси  $x$  будет, в свою очередь, пропорционален интегралу по времени от  $\omega_y$  (поэтому Г. и наз. интегрирующим). Дополнит. электр. и электромехан. устройства позволяют или измерять этим Г. угловую скорость, или сделать его элементом стабилизирующего устройства. В первом случае спец. электромагнитами создаётся момент относительно оси  $x$ , направленный против вращения поплавок; величина этого момента регулируется так, чтобы поплавок остановился. Тогда момент  $M_1$  как бы заменит момент  $M_x$  сил вязкого трения и, следовательно, по ф-ле (1), угловая скорость  $\omega_y$  будет пропорциональна величине  $M_1$ , определяемой по силе тока, протекающего по обмоткам электромагнита. Во втором случае, при стабилизации, напр., вокруг

неподвижной оси  $y$ , корпус интегрирующего Г. размещается на платформе, к-рую может вращать вокруг оси  $y$  спец. электродвигатель (рис. 16). Для объяснения принципа стабилизации предположим, что основание, на к-ром расположены подшипники платформы, само повернётся вокруг оси  $y$  на нек-рый угол  $\alpha$ . При неработающем двигателе платформа повернётся в этом случае вместе с основанием на тот же угол  $\alpha$ , а поплавков совершит поворот вокруг оси  $x$  на угол  $\beta$ , пропорциональный углу  $\alpha$ . Если теперь двигатель будет вращать платформу в обратном направлении до тех пор, пока поплавков не вернётся в исходное положение, то одновременно в исходное положение вернётся и платформа. Можно непрерывно управлять двигателем так, чтобы угол поворота поплавка сводился к нулю, тогда платформа окажется стабилизированной. Сочетание двух поплавковых Г. в общем подвесе с аналогично управляемыми электродвигателями приводит к стабилизации фиксированного направления, а трёх - к пространств. стабилизации, используемой, в частности, в схемах инерциальной навигации.

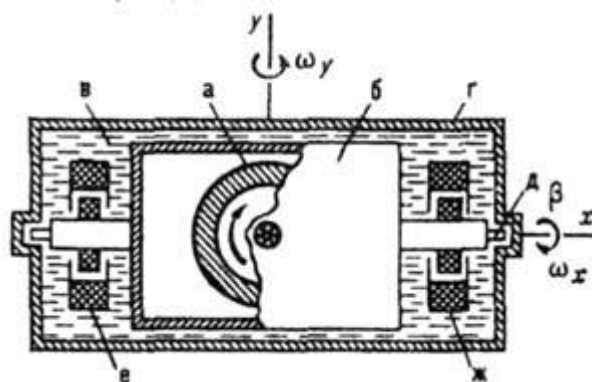


Рис. 15. Поплавковый интегрирующий гироскоп:  $a$  - ротор гироскопа;  $б$  - поплавок, в теле к-рого расположен подшипник оси ротора;  $в$  - поддерживающая жидкость;  $г$  - корпус;  $д$  - стальные цапфы в камневых опорах;  $е$  - датчик угла поворота поплавка относительно корпуса;  $ж$  - электромагнитное устройство, прилагающее момент вокруг оси поплавка.

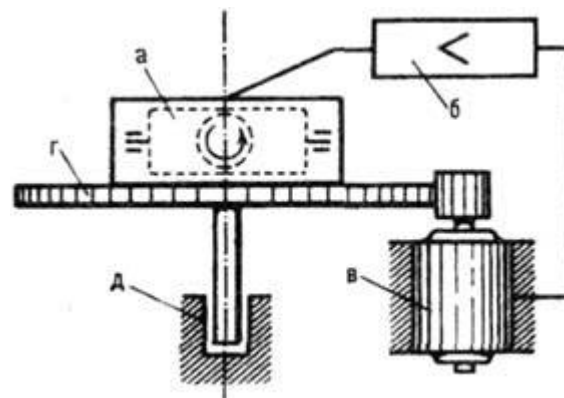


Рис. 16. Стабилизация вокруг неподвижной оси посредством поплавкового гироскопа *а* - гироскоп-поплавок; *б* - усилитель, *в* - электродвигатель; *г* - платформа, *д* - основание.



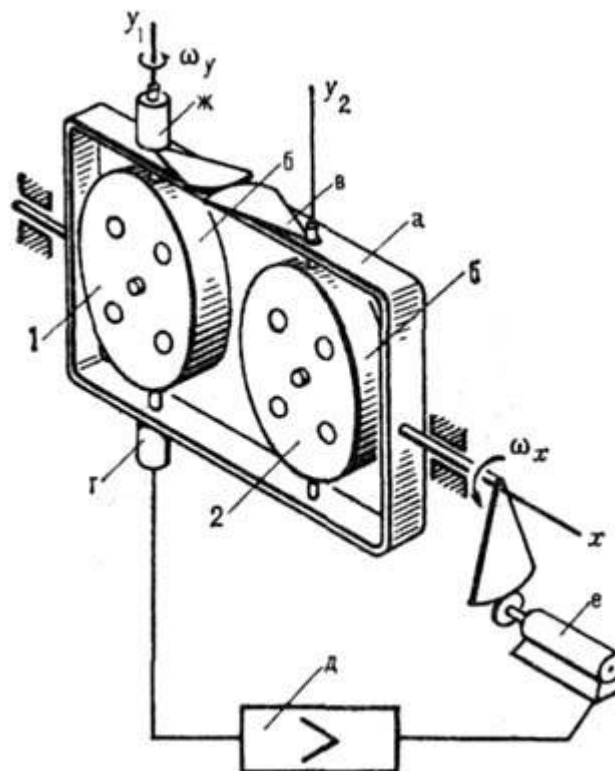


Рис. 17. Силовая гироскопическая рама: *а* - собственно рама; *б* - гироскоп; *в* - спарник; *г* - датчик угла поворота гироскопа относительно рамы; *д* - усилитель сигнала датчика; *е* - стабилизирующий двигатель; *ж* - датчик момента.

В рассмотренной системе стабилизации Г. играет роль чувствит. элемента, обнаруживающего отклонения объекта от заданного положения, а возвращение в это положение производится электродвигателем, получающим соответствующий сигнал. Подобные системы гироскопич. стабилизации наз. индикаторными (стабилизаторы непрямого действия). Наряду с этим в технике применяются системы т. н. силовой

гироскопич. стабилизации (стабилизаторы прямого действия), в к-рых Г. непосредственно воспринимают на себя усилия, мешающие осуществлению стабилизации, а двигатели играют вспомогат. роль, разгружая частично или полностью Г. и ограничивая тем самым углы их прецессии. Конструктивно такие системы проще индикаторных. Примером может служить одноосная двухгироскопич. рама (рис. 17); роторы находящихся в раме Г. вращаются в разные стороны. Допустим, что на раму подействует сила, стремящаяся повернуть её вокруг оси  $x$  и сообщить угловую скорость  $\omega_x$ . Тогда, по правилу Жуковского, на кожух 1 начнёт действовать пара, стремящаяся совместить ось ротора с осью  $x$ . В результате Г. начнёт прецессировать вокруг оси  $y_2$  с нек-рой угловой скоростью  $\omega_y$ . Кожух 2 по той же причине будет прецессировать вокруг оси  $y_2$  в противоположную сторону. Углы поворотов кожухов будут при этом одинаковы, т. к. кожухи связаны зубчатым сцеплением. Вследствие этой прецессии на подшипники кожуха 1 подействует новая пара, стремящаяся совместить ось ротора с осью  $y_1$ . Такая же пара будет действовать на подшипники кожуха 2. Моменты этих пар направлены противоположно  $\omega_x$  (что следует из правила Жуковского) и стабилизируют раму, т. е. удерживают её от поворота вокруг оси  $x$ . Однако если прецессии Г. не будут ограничены, то, как видно из ф-лы (3), при повороте кожухов вокруг осей  $y_1, y_2$  на угол  $90^\circ$  стабилизация прекратится. Поэтому на оси одного из кожухов имеется датчик, регистрирующий угол поворота кожуха относительно рамы и управляющий двигателем стабилизации. Возникающий у двигателя вращающий момент направлен противоположно моменту, стремящемуся повернуть раму вокруг оси  $x$ ; вследствие этого прецессия Г. прекращается. Рассмотренная рама стабилизирована по отношению к поворотам вокруг оси  $x$ . Повернуть раму вокруг любой оси, перпендикулярной  $x$ , можно беспрепятственно, но возникающий при этом гироскопич. момент может вызвать значит. давления на подшипники Г. и их кожухов. Сочетание трёх таких рам с взаимно перпендикулярными осями приводит к пространств. стабилизации (напр., искусств. спутника).

В силовых гироскопич. системах, в отличие от свободных Г., из-за больших моментов инерции стабилизируемых масс возникают весьма заметные колебат. движения типа нутаций. Должны быть приняты спец. меры для того, чтобы эти колебания были затухающими, иначе в системе возникают [автоколебания](#). В технике применяются и др. гироскопич. приборы, принципы действия к-рых основаны на свойствах Г.


*Лит.:* Булгаков Б. В., Прикладная теория гироскопов, 3 изд., М., 1976; Николаи Е. Л., Гироскоп в кардановом подвесе, 2 изд., М., 1964; Малеев П. И., Новые типы гироскопов, Л., 1971; Магнус К., Гироскоп. Теория и применение, пер. с нем., М., 1974; Ишлинский А. Ю., Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация, М.,

1976; его же, Механика относительного движения и силы инерции, М., 1981; Климов Д. М., Харламов С. А., Динамика гироскопа в кардановом подвесе, М., 1978; Журавлев В. Ф., Климов Д. М., Волновой твердотельный гироскоп, М., 1985; Новиков Л. З., Шаталов М. Ю., Механика динамически настраиваемых гироскопов, М., 1985.

*А. Ю. Ишлинский.*

[<< Предметный указатель >>](#)

© femto.com.ua

 [webmaster@femto.com.ua](mailto:webmaster@femto.com.ua)