

Министерство образования Российской Федерации
Балтийский государственный технический университет «Военмех»



СЕРИЯ:
"ЭЛЕМЕНТЫ АНАЛОГОВЫХ СИСТЕМ
АВТОМАТИКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ"

ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА

Учебное пособие

*Допущено
УМО ВУС ВМФ в качестве учебного пособия
по дисциплинам военно-специальной подготовки для студентов вузов,
обучающихся на военных кафедрах по программам подготовки
офицеров запаса ВМФ военно-учетных специальностей ракетного
профиля*

Санкт-Петербург
2003

Авторы: *В.А. Веселов*, канд. техн. наук, проф.; *Р.Н. Гробовой*, вед. науч. сотр.; *О.С. Ипатов*, д-р. техн. наук, проф.; *В.Г. Кузнецов*, канд. техн. наук., доц.; *В.И. Медведев*, канд. техн. наук, проф.

УДК 681.586.2 (075.8)
Г51

Веселов В.А., Гробовой Р.Н., Ипатов О.С., Кузнецов В.Г.,
Медведев В.И.

Г51 **Гироскопические** измерительные приборы и устройства:
Учебное пособие. Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2003. 122 с.
Сер.: Элементы аналоговых систем автоматики и их приме-
нение.

Данное учебное пособие серии "Элементная база аналоговых систем автоматики" адресовано студентам, обучающимся по специальностям, для которых проектирование и применение гироскопических приборов не является профилирующим. В нем в наиболее доступной форме рассмотрены принципы действия основных типов гироскопических приборов, выбранных не по принципу их современности, так как требуется специальная подготовка, а по принципу простоты их восприятия и оригинальности используемых в них технических решений. Дополнительно в ряде случаев при рассмотрении принципов действия, в качестве причинного фактора принято движение, а силовой фактор полагается следствием.

Предназначено для студентов специальности 210500 "Системы управления летательных аппаратов".

УДК 681.586.2 (075.8)

Рецензенты: кафедра аэрокосмических приборов и измерительно-
вычислительных комплексов СПб университета аэрокосмического прибо-
ростроения (зав. каф., д-р. техн. наук, проф. *М.С. Катков*); канд. техн.
наук, доц. СПбГТИ (Технического университета) *В.И. Халимон*

*Утверждено
редакционно-издательским
советом университета*

ОШИБКА! ЗАКЛАДКА НЕ ОПРЕДЕЛЕНА.

1. Трехстепенные свободные гироскопы и основные понятия в теории гироскопов.	4
1.1. Понятие гироскопа, систем координат и основные сведения механики.	4
1.2. Идеализированный трехстепенной свободный гироскоп и его применение	6
1.3. Понятия прецессии и гироскопического момента.	10
1.4. Уравнения движения трехстепенного гироскопа в кардановом подвесе	16
1.5. Уравнение движения гироскопа на подвижном основании	20
1.6. Кажущиеся уходы гироскопов.	21
1.7. Начальная установка осей гироскопа	23
1.8. Неидеализированные трехстепенные свободные гироскопы и пути их совершенствования	27
1.9. Пути снижения уходов трехстепенных гироскопов	30
1.9.1. Принудительное вращение опор подвеса	30
1.9.2. Принудительное вращение подвеса	32
2. Корректируемые трехстепенные гироскопы	33
2.1. Гироскопы	33
2.2. Курсовые гироскопы	43
2.3. Гироскопы	52
2.3.1. Гироскоп с маятниковой коррекцией	54
2.3.2. Гироскоп с механической коррекцией	61
2.3.3. Гироскопы с интегральной коррекцией	62
2.4. Гироскопы	67
3. Двухстепенные гироскопы	72
3.1. Гироскопы	72
3.1.1. Гироскоп с механической пружиной.	72
3.1.2. Гироскоп с электрической пружиной	80
3.2. Двухстепенные гироскопы для измерения углов поворота	83
3.2.1. Двухстепенной интегрирующий гироскоп (ДИГ)	83
3.2.2. Поплавковый гироскоп	87
4. Понятие о гиросtabilизаторах	90
4.1. Одноосный одногироскопный силовой гиросtabilизатор	91
4.2. Одноосный индикаторный гиросtabilизатор	94
5. Другие типы гироскопов	96
5.1. Вибрационные гироскопы	96
5.2. Динамически настраиваемые гироскопы	99
5.3. Магнитогидродинамические гироскопы	103
5.4. Лазерные гироскопы	104
5.5. Гироскопы с бескарданными подвесами	105
КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ	108
Библиографический список	

1. ТРЕХСТЕПЕННЫЕ СВОБОДНЫЕ ГИРОСКОПЫ И ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ В ТЕОРИИ ГИРОСКОПОВ

1.1. Понятие гироскопа, систем координат и основные сведения механики

Гироскопические измерительные приборы и устройства предназначены для определения углов ориентации, измерения угловых и линейных скоростей и ускорений различных подвижных объектов.

Гироскопические измерительные приборы широко применяются в качестве измерительных элементов (датчиков) систем стабилизации, навигации и управления летательных аппаратов, судов и наземных транспортных средств.

Под гироскопом в технике понимают быстро вращающийся симметричный ротор (маховик), смонтированный в специальном подвесе, обеспечивающем ротору свободу вращения вокруг двух или трех осей подвеса. Часто под гироскопом понимают совокупность ротора и подвеса. Мы и будем использовать это понятие.

Изучение гироскопов связано с описанием движения твердого тела вокруг неподвижной точки, что полагает необходимым определение соответствующих систем координат. В технике управления и в механике приняты следующие системы координат: абсолютная, инерциальная и подвижная.

Абсолютная или абсолютно неподвижная система координат была введена Ньютоном. Начало этой системы координат он полагал совмещенным с центром Солнца, а три ее воображаемых оси направленными на три "неподвижные" звезды. Хотя, как известно, и Солнце и звезды не являются неподвижными, для большинства задач, решаемых на Земле, этими чрезвычайно медленными движениями можно пренебречь. Поэтому абсолютная система координат, называемая еще гелиоцентрической, может считаться практически неподвижной.

Инерциальная система координат подвижна. Полагается, что она движется относительно абсолютной равномерно и прямолинейно. Согласно первому закону Ньютона: "всякое тело стремится сохранить состояние покоя или равномерного прямолинейного движения, пока оно не вынуждается внешними силами изменить это состояние". Тем самым понятие покоя и равномерного прямолинейного движения эквивалентны по Ньютону, т.е. эквивалентны в смысле проявления трех основных, сформулированных им, законов механики. Иными словами, в инерциальной системе координат состоятельны все три закона Ньютона, в частности, и второй

закон – закон инерции. Отсюда и название системы координат – инерциальная.

Подвижная система координат была впервые введена Эйлером. Полагается, что она движется относительно абсолютной неравномерно и непрямолинейно. Такая система координат очень удобна для изучения относительного движения тел.

Основные параметры движения вращающегося ротора (рис. 1) удобно определять в подвижной системе координат, называемой полусвязной. Такое название обусловлено тем, что, будучи связанной с ротором, эта система тем не менее, не участвует в быстром вращении вместе с ним. Обозначим принятую систему координат $OX_p Y_p Z_p$. Ось быстрого вращения ротора, ось OX_p , называется осью собственного вращения, или главной осью. Оси OY_p и OZ_p называются экваториальными. Угловая скорость

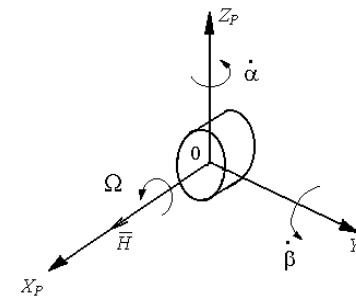


Рис. 1

вращения ротора Ω вокруг оси OX_p называется угловой скоростью собственного вращения, а угловые скорости $\dot{\beta}$ и $\dot{\alpha}$ вокруг осей OY_p и OZ_p – экваториальными угловыми скоростями. В гироскопических приборах обычно имеет место $\dot{\beta} \ll \Omega$ и $\dot{\alpha} \ll \Omega$.

Ротор, как и всякое твердое тело, обладает относительно любой оси моментом инерции $I_p = I = \sum m_i r_i^2$, где m_i – масса i -й материальной точки, r_i – радиус ее отстояния от оси вращения. Момент инерции ротора относительно главной оси $I_X = \sum m_i r_i^2$ называется осевым моментом инерции. Моменты инерции относительно двух других осей называются экваториальными.

Как и всякое движущееся тело, вращающийся ротор обладает моментом количества движения. В случае вращения ротора с угловой скоростью $\overline{\Omega}$ момент количества движения с достаточной для технических приложений точностью определяется соотношением $\overline{H} = I_X \overline{\Omega}$. В механике принято называть эту величину кинетическим моментом ротора (гироскопа), являющимся векторной величиной. В технических приложениях считают, что его направление совпадает с направлением угловой скорости $\overline{\Omega}$ собственного вращения ротора, как показано на рис.1. В действительности направление полного момента количества движения ротора отлича-

ется от угловой скорости собственного вращения. Однако этот разностный угол очень мал. В соответствии с изложенным, в последующем, в большинстве технических приложений, он будет полагаться равным нулю, т.е. вектор \bar{H} будет изображаться совмещенным по направлению с вектором $\bar{\Omega}$.

При изучении движения твердых тел принято пользоваться понятием силового фактора. В случае поступательного движения таковым фактором является сила \bar{F} . Как известно, приложение силы \bar{F} в течение времени Δt к поступательно движущемуся телу приводит к изменению его количества движения в соответствии с соотношением $\bar{F} = \Delta(\bar{mv}) / \Delta t$ где \bar{mv} – количество движения твердого тела; m – масса движущегося тела, \bar{v} – скорость его движения. Применительно к вращательному движению силовым фактором является момент сил, т.е. $\bar{M} = \sum r_i \bar{F}_i$, где r_i – плечо приложения i -й силы, F_i – сила, приложенная к i -й точке твердого тела. Согласно второму закону Ньютона, как и в случае поступательного движения, воздействие силового фактора \bar{M} на вращающееся тело должно изменить его количество движения в соответствии с аналогичным соотношением $\Delta \bar{M} = \Delta(\bar{H}) / \Delta t$.

Третий же закон Ньютона применительно к вращающемуся телу, должен, очевидно, звучать следующим образом: момент действия должен быть равен моменту противодействия.

1.2. Идеализированный трехстепенный свободный гироскоп и его применение

В 1758 г. Эйлер решил уравнения движения твердого тела вокруг неподвижной точки при условии совпадения центра масс с неподвижной

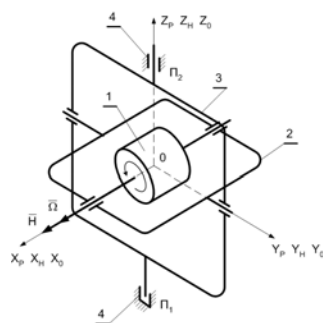


Рис. 2

точкой и равенства нулю моментов всех сил, приложенных к твердому телу. Найденное решение характеризует свойство твердого тела сохранять направление вектора количества движения относительно абсолютного пространства неизменным.

В 1852 г. Леон Фуко предложил схему прибора, названного им гироскопом, в которой по существу, оказались реализованными результаты исследований Эйлера. Схема прибора, предложенная Фуко, представлена на рис. 2.

Основой прибора является быстро вращающийся ротор 1. Его скорость вращения равна $\bar{\Omega}$. Ротор обладает кинетическим моментом $\bar{H} = I_X \bar{\Omega}$. Смонтирован он в специальном подвесе, названном кардановым. Подвес состоит из внутренней 2 и внешней рамки 3. Конструктивно прибор выполняется так, что ось ротора перпендикулярна оси внутренней рамки, а последняя, в свою очередь, перпендикулярна оси наружной рамки. Все три оси пересекаются в одной точке O . Центр масс прибора совмещен с точкой подвеса O . Ротор с внутренней рамкой подвеса называют гиросузлом.

На рис.2 показаны три системы координат: $OX_p Y_p Z_p$ – система координат, связанная с ротором (с гиросузлом); $OX_n Y_n Z_n$ – система координат, связанная с наружной рамкой; $OX_0 Y_0 Z_0$ – система координат, связанная с основанием 4, (на рис. 2 показаны только подшипники P_1 и P_2). В начальный момент времени все три системы координат совмещены.

Рассмотрим угловые движения основания в части их влияния на ротор, предположив, что подвес идеален, т.е. трение по осям подвеса равно нулю. Тогда при движении основания вокруг оси OZ_0 наружная рамка прибора будет оставаться неподвижной. При движении основания вокруг оси OY_0 вместе с основанием будет поворачиваться и наружная рамка, связанная с основанием подшипника P_1 и P_2 . Однако внутренняя рамка при этом остается неподвижной. При движении основания вокруг оси OX_0 вращение будет передаваться как наружной, так и внутренним рамкам. Таким образом, при одновременном движении основания вокруг трех упомянутых осей неподвижной окажется лишь точка пересечения осей подвеса O . При допущении отсутствия трения в опорах карданова подвеса угловые движения основания не приводят к появлению возмущающих моментов со стороны основания на ротор. Не появляются они и в случае движения основания с ускорением в связи с равенством нулю плеча приложения возникающих при этом инерционных сил – центр масс совмещен с точкой подвеса O .

Таким образом равенство нулю моментов внешних сил соответствует условиям решенных Эйлером уравнений, что означает возможность сохранения направления вектора \bar{H} относительно абсолютного пространства неизменным. Полученный результат очень важен. Он дает возможность создать на подвижном борту неподвижную относительно абсолютного пространства систему координат. Для этого достаточно до раскрутки ротора установить его ось вращения (ось OX_p) в нужном направлении, оставляя ее перпендикулярной плоскости наружной рамки (оси OZ_n) и, удерживая ротор в этом положении, раскрутить его до номинальной скорости. Теперь ротор как бы "запоминает" заданное ему относительного абсолютного пространства положение и может быть освобожден. В

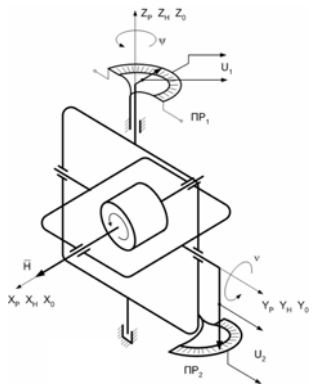


Рис. 3

дальнейшем при поворотах основания такой прибор позволяет измерять два угла поворота основания: вокруг оси OZ_0 и OY_0 .

Как следует из рис. 3, при повороте основания относительно абсолютного пространства на угол, например ψ , вокруг вертикальной оси OZ_0 вместе с основанием на тот же самый угол повернется и корпус потенциометра PP_1 . Движок его, закрепленный на наружной рамке, при этом движении основания остается неподвижным относительно абсолютного пространства в силу сохранения неизменным направления главной оси ротора OX_p . В результате с потенциометра PP_1 снимается электрический сигнал $U_1 = k\psi$.

Поворот основания относительно абсолютного пространства на угол ν вокруг горизонтальной оси OY_0 через подшипники $П_1$ и $П_2$ приведет к повороту на тот же самый угол наружной рамки. Вместе с рамкой на угол ν повернется и корпус потенциометра PP_2 , жестко связанный с ней. Движок же потенциометра PP_2 , закрепленный на внутренней рамки, останется неподвижным в силу сохранения неизменным направления главной оси ротора OX_p . Тем самым сигнал, снимаемый с потенциометра PP_2 , окажется пропорциональным углу поворота основания ν , т.е. $U_2 = k\nu$, если потенциометрические преобразователи идентичны.

Измерение третьего угла поворота основания – угла поворота относительно оси OX_0 – затруднено из-за вращательного движения ротора вокруг этой оси.

Таким образом, рассмотренный гироскопический прибор позволяет измерить два угла поворота основания. Для измерения его третьего угла необходим второй такой же прибор с главной осью, перпендикулярной главной оси первого прибора. При этом из двух чувствительных осей второго прибора для измерения третьего угла будет использоваться лишь одна.

Как следует из рис. 3, возможности измерения углов в рассмотренном приборе неодинаковы. Так пределы измерения углов поворота основания вокруг оси наружной рамки принципиально не ограничены. Ограничения могут быть внесены лишь преобразователем угловых перемещений в электрический сигнал. Что же касается поворота основания вокруг оси OY_0 , то угол поворота здесь не должен достигать 90° . Дело в том, что при $\nu = \pm 90^\circ$ происходит "складывание" рамок гироскопа (совмещение осей OX_p и OZ_0) и он из трехстепенного превращается в двухстепенной.

Наиболее распространенная схема измерения углов тангажа, крена и курса самолета представлена на рис.4.

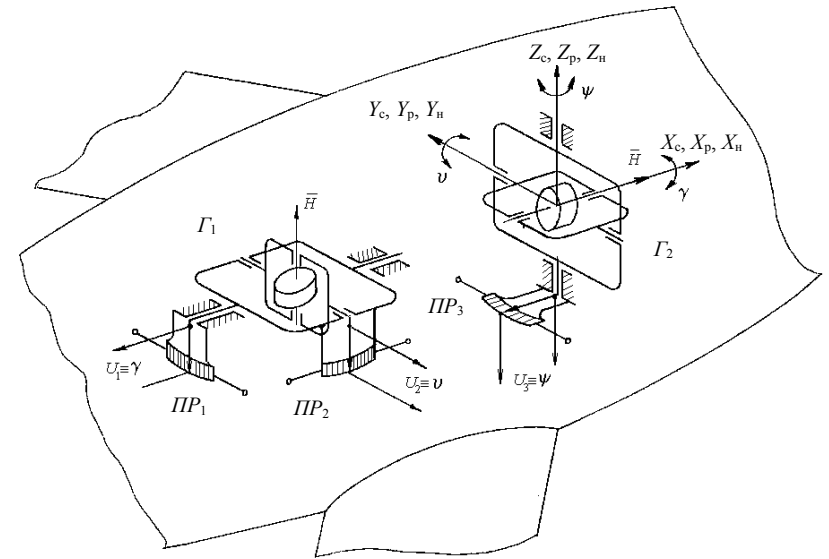


Рис. 4

Здесь оси наружных рамок гироскопов при установке их на самолете, ориентируются таким образом, чтобы для гироскопа Γ_2 наружная ось была перпендикулярна плоскости $X_c O Y_c$, а для гироскопа Γ_1 – параллельно оси $O X_c$, в системе координат $O X_c Y_c Z_c$, связанной с самолетом. Дополнительно перед началом движения при горизонтальном положении плоскости $X_c O Y_c$ главная ось гироскопа Γ_1 совмещается с вертикалью места, а главная ось гироскопа Γ_2 ориентируется параллельно продольной оси $O X_c$ самолета. При этом потенциметрические датчики $ПР_1$ и $ПР_2$ обнуляются. Датчик $ПР_3$ обнуляется при ориентировании оси гироскопа Γ_2 параллельно продольной оси самолета, когда последняя ориентирована на север. Теперь при подъеме продольной оси самолета над плоскостью местного горизонта, $\varphi \neq 0$, в соответствии с изложенными выше, с потенциметров $ПР_1$ и $ПР_2$ снимаются сигналы, пропорциональные углу крена γ и углу тангажа ν соответственно.

Очевидно, что при горизонтальном полете с потенциметрического преобразователя $ПР_3$ гироскопа Γ_2 будет сниматься сигнал, пропорциональный углу курса или рыскания ψ .

Такие приборы называют трехстепенными свободными астатическими гироскопами по следующим причинам. Во-первых, их роторы имеют сво-

боду вращения относительно основания – вокруг трех осей: оси OX_p , оси OY_p вместе с внутренней рамкой и вокруг оси OZ_n вместе с внутренней и наружной рамками (трехстепенной). Во-вторых, при любых движениях основания к гироскопу не прикладываются моменты внешних сил (свободный); и в третьих, его центр масс совпадает с неподвижной точкой O подвеса (астатический).

1.3. Понятия прецессии и гироскопического момента

Для выяснения сущности этих понятий положим, что к рассмотренному выше трехстепенному гироскопу приложен момент внешних сил. Пусть это сделано подвешиванием к внутренней рамке прибора груза массой m , как показано на рис. 5.

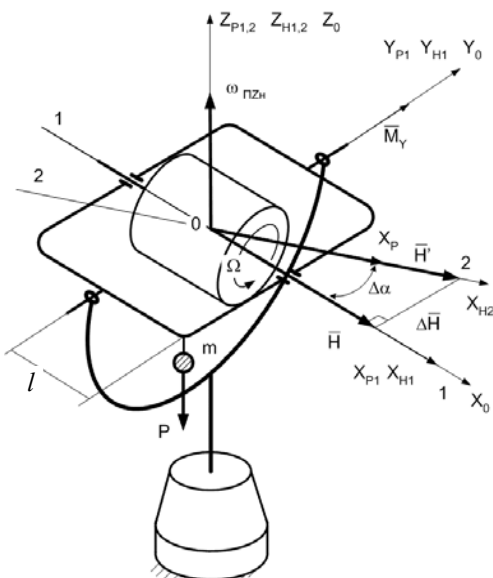


Рис. 5

Тем самым к внутренней рамке относительно оси OY_p окажется приложенным момент внешних сил, равный $\overline{M}_Y = mgl$, где \overline{g} – ускорение свободного падения, l – расстояние точки подвеса массы от оси внутренней рамки – плечо приложения силы тяжести P , \overline{M}_Y – вектор момента, направленный в положительном направлении оси OY_p . Допустим также, что начало наблюдения, $t=0$, соответствует положению главной оси гироскопа $I - I$, и что его кинетический момент $\overline{H} = I_X \overline{\Omega} \neq 0$. Считаем дополнительно, что плоскость $X_p O Y_p$ внутренней рамки прибора горизонтальна.

Если бы ротор не вращался ($\overline{\Omega} = 0$), то как известно, под действием момента M_Y , гиروزел, состоящий из ротора и внутренней рамки, начал бы двигаться вокруг оси OY с угловым ускорением $\varepsilon_y = M_y / I_y$, где I_y – момент инерции гиروزла относительно оси OY_p .

В рассматриваемом же случае, когда $\Omega \neq 0$, этого не произойдет. Под действием M_Y начнется движение ротора не вокруг оси OY_p , а вокруг оси OZ_n .

Это следует из упомянутых выше законов механики применительно к вращающемуся телу. В самом деле, в соответствии со вторым законом Ньютона воздействие \overline{M}_Y за время Δt приводит к изменению момента количества движения ротора на величину $\Delta \overline{H} = \overline{M}_Y \Delta t$. Приращение вектора кинетического момента $\Delta \overline{H}$ есть вектор, поскольку \overline{M}_Y вектор, а Δt – скалярная величина. Вектор $\Delta \overline{H}$, очевидно, коллинеарен вектору \overline{M}_Y ; он лежит в плоскости $X_p O Y_p$, составляет с вектором \overline{H} прямой угол и направлен в сторону действия \overline{M}_Y .

В результате за время Δt вектор \overline{H} смещается из положения 1 – 1 в положение 2 – 2, т.е. поворачивается в плоскости $X_p O Y_p$. Угол поворота вектора кинетического момента \overline{H} вокруг оси Z_p за время Δt составит величину $\Delta \alpha$. Поскольку $\Delta \alpha = \arctg \Delta H / H$, что при малом Δt составит $\Delta \alpha \approx \Delta H / H$, то $\dot{\alpha} = \Delta \alpha / \Delta t = \Delta H / H \Delta t = M_Y \Delta t / H \Delta t = M_Y / H$.

Таким образом, вращающийся ротор под действием момента внешних сил ведет себя не как неподвижный ротор под действием того же момента:

- он поворачивается не вокруг оси приложения момента, а вокруг оси, перпендикулярной оси приложения момента внешних сил;
- поворот главной оси ротора происходит не с ускорением $\epsilon = M_Y / I_Y$, а со скоростью $\omega_{пзп} = \dot{\alpha} = M_Y / H$.

Как видно, это особое движение. По этой причине оно и получило особое название – прецессия.

Прецессионное движение практически безынерционно. Оно определяется вектором угловой скорости, величина которой равна $\overline{\omega}_п = \overline{M}_{вн} / \overline{H}$, где $\overline{M}_{вн}$ – момент внешних сил, перпендикулярный вектору \overline{H} . Направление вектора $\overline{\omega}_п$ определяется простым правилом: направление $\overline{\omega}_п$ видится таким, чтобы положительный (против часовой стрелки) поворот от \overline{H} к $\overline{M}_{вн}$ осуществлялся по кратчайшему пути.

Примеры определения направления вектора угловой скорости прецессии иллюстрирует рис. 6, а и б.

Так, при ортогональности осей: $O X_p$ $O Y_p$ $O Z_p$ имеем рис. 6, а $\overline{\omega}_{пз} = \overline{M}_Y / \overline{H}$, рис. 6 б – $\overline{\omega}_{пY} = \overline{M}_{Zп} / \overline{H}$, т.е. вектор угловой скорости прецессии вокруг оси Y_p отрицателен при положительности вектора момента внешних сил, его вызывающего.

Тот факт, что под действием момента внешних сил вращающийся ротор прецессирует, а не поворачивается в направлении момента внешних сил, дает основание полагать, что момент внешних сил компенсируется некоторым моментом, встречным моменту внешних сил, равным ему по

величине и являющимся следствием прецессии. Последнее подтверждается известным экспериментальным фактом: если остановить прецессию, т.е. на пути движения ротора поставить механический стопор, то ротор будет поворачиваться в направлении действия момента внешних сил.

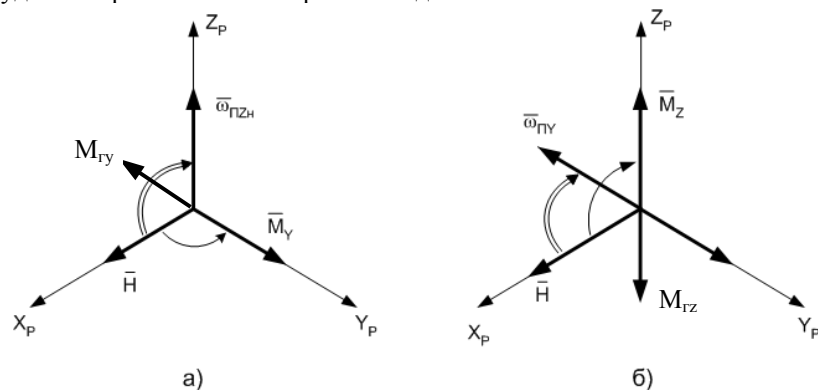


Рис. 6

Как известно, участие твердого тела одновременно в двух вращательных движениях: прецессионном вокруг экваториальной оси и вращательном вокруг главной оси – приводит к возникновению кориолисовых сил инерции. Их воздействие на материальные точки ротора, обладающие конечной массой, вызывает появление момента инерционных сил, называемого гироскопическим. Гироскопический момент, будучи следствием прецессии вращающегося ротора, порождаемой, в свою очередь, моментом внешних сил, является, в соответствии с третьим законом Ньютона, моментом противодействия.

Величины гироскопических моментов находятся формально из соотношений, определяющих угловые скорости прецессии, следующим образом:

$$M_{GY} = H\omega_{PZH}; M_{GZ} = -H\omega_{PY}.$$

Направление вектора гироскопического момента известно из следующего простого правила: направление вектора гироскопического момента является таким, откуда видится, что положительный (против часовой стрелки) переход от вектора \vec{H} к вектору $\vec{\omega}_P$ кажется происходящим по кратчайшему пути.

Примеры определения направления вектора гироскопического момента M_G , отмеченные двойными стрелками, иллюстрируется рис. 6.

Проведенный анализ приводит к интересному заключению. В случае вращающегося ротора, подвергающегося воздействию моментов внешних сил, возникает неразрывное триединство физических величин: "момент внешних сил – прецессия – гироскопический момент". Это триединство неразрывно. Оно состоит в том, что момент внешних сил вызывает прецессию; прецессия, в свою очередь, обуславливает гироскопический момент, компенсирующий момент внешних сил.

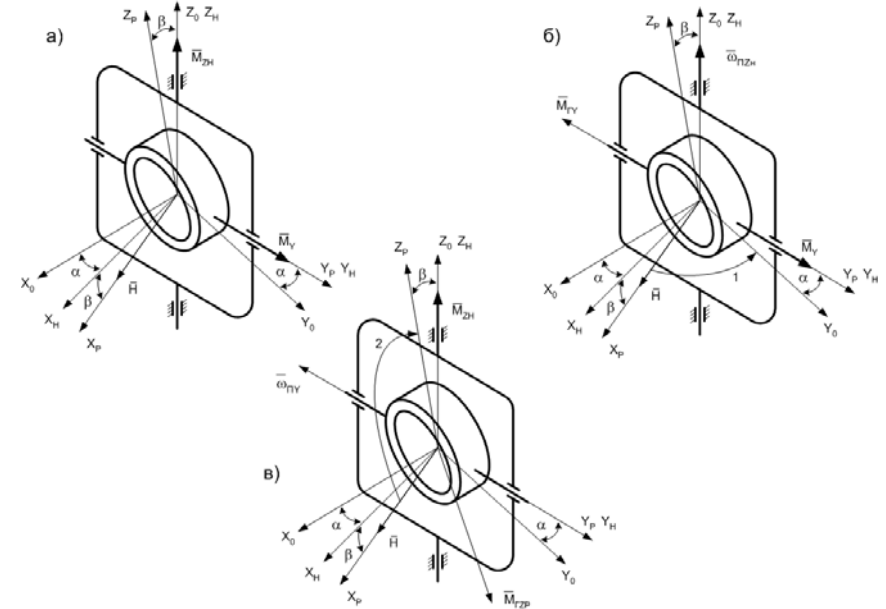


Рис. 7

Рассмотренные ранее процессы соотнесены к частному случаю ортогональности вектора \vec{H} плоскости $Y_n OZ_n$. В случае, когда внутренняя рамка поворачивается относительно наружной вокруг оси OY_p , возможна неперпендикулярность главной оси гироскопа плоскости $Y_n OZ_n$ наружной рамки (угол $\beta \neq 0$, как показано на рис.7, а). Для определения прецессии гироскопа в этом случае положим, что на гироскоп по-прежнему действуют моменты внешних сил M_Y и M_{Zn} , но система координат $X_p Y_p Z_p$ отклонена от системы координат $X_0 Y_0 Z_0$ на углы α и β соответственно (рис.7, а).

Рассмотрим сначала прецессионное движение главной оси гироскопа под действием момента внешних сил \vec{M}_Y , (рис.7, б).

Гироскоп здесь опять-таки прецессирует в сторону совмещения \vec{H} с \vec{M}_Y по кратчайшему пути в направлении стрелки 1. При этом движение гироскопа происходит не вокруг оси OZ_p , перпендикулярной плоскости

\overline{HOM}_Y , а вокруг оси наружной рамки OZ_n , составляющей с плоскостью \overline{HOM}_Y угол, отличный от прямого. Прецессия гироскопа происходит с угловой скоростью ω_{nZn} , вектор которой положителен. В дальнейшем принято считать, что вектор положителен, если он сонаправлен с направлением некоторой выбранной оси и наоборот. Это движение, в соответствии с упомянутым свойством триедиенства, приводит к появлению гироскопического момента M_{rY} , направленного встречно моменту внешних сил. Поскольку величина гироскопического момента, как результат векторного произведения, $M_{rY} = H\omega_{nZn} \sin(\overline{H} \wedge \overline{\omega}_{nZn}) = H\omega_{nZn} \sin(90^\circ + \beta) = H\omega_{nZn} \cos \beta$, то можно записать $M_Y = M_{rY} = H\omega_{nZn} \cos \beta$.

Отсюда, при $\beta \neq 0$, скорость прецессии вокруг оси OZ_n при положительном моменте внешних сил M_Y составит $\omega_{nZn} = M_Y / H \cos \beta$.

Аналогичные рассуждения справедливы и для случая приложения положительного момента внешних сил относительно оси наружной рамки \overline{M}_{Zn} , (рис.7, в). Под действием момента \overline{M}_{Zn} гироскоп прецессирует вокруг оси OY_p в направлении стрелки 2 с угловой скоростью $\overline{\omega}_{nY}$. При этом возникает гироскопический момент M_{rZp} , направленный по оси внутренней рамки OZ_p и равный

$$M_{rZp} = H\omega_{nY} \sin(\overline{H} \wedge \overline{\omega}_{nY}) = H\omega_{nY} \sin(90^\circ) = H\omega_{nY}.$$

Ось гироузла OZ_p не совпадает с осью наружной рамки гироскопа, что обуславливает, тем самым, несовпадение моментов \overline{M}_{Zn} и \overline{M}_{rZp} . Отсюда действие момента внешних сил должно компенсироваться проекцией гироскопического момента на ось наружной рамки, т.е. $M_{Zn} = M_{rZp} \cos \beta = H\omega_{nY} \cos \beta$.

Тем самым угловая скорость прецессии вокруг оси наружной рамки при положительном моменте внешних сил \overline{M}_{Zn} будет отрицательной и равной $\omega_{nY} = -M_{Zn} / H \cos \beta$. При этом гироскопический момент, действующий по оси наружной рамки, $M_{rZp} = -H\omega_{nY} \cos \beta$.

Анализ прецессионного движения гироскопа при $\beta \neq 0$ показывает, что при одном и том же моменте внешних сил с увеличением β для создания соответствующего гироскопического момента гироскоп прецессирует с большей скоростью. Ограничение скорости прецессии трением в подшипниках, а также аэродинамическим трением гироузла о воздух приводит, в конечном итоге, к уменьшению гироскопического момента при больших β , по сравнению с моментом внешних сил.

Ранее отмечалась практическая безынерционность прецессионного движения. Теоретически, а при более пристальном внимании и практиче-

ски, движение главной оси гироскопа под действием момента внешних сил более сложно. Рассмотрим его, например, применительно к случаю приложения момента M_Y внешних сил к оси внутренней рамки, как показано на рис. 8.

Здесь сразу при приложении момента внешних сил M_Y гироскоп, не обладая еще достаточным гироскопическим моментом, начнет поворачиваться вокруг оси внутренней рамки по направлению действия момента M_Y как обычное твердое тело с угловым ускорением $\ddot{\beta} = M_Y / I_Y$, где I_Y – момент инерции гироузла относительно оси OY_p . Вследствие этого будет расти угловая скорость $\dot{\beta}$.

В результате появляется гироскопический момент $M_{гЗр} = H\dot{\beta} \sin(\vec{H} \wedge \vec{\omega}_Y) = H\dot{\beta} \sin(90^\circ) = H\dot{\beta}$. Момент $M_{гЗр}$ через подшипники по оси внутренней рамки окажется приложенным к наружной рамке. При этом его проекция на ось наружной рамки $M_{гЗн} = M_{гЗр} \cos \beta = H\dot{\beta} \cos \beta$ начнет поворачивать весь гироскоп вокруг оси наружной рамки в направлении действия момента с ускорением $\ddot{\alpha} = M_{гЗн} / I_{Зн}$, где $I_{Зн}$ – момент инерции гироскопа относительно оси наружной рамки OZ_n . Гироскоп начнет вращаться вокруг оси OZ_n с угловой скоростью $\dot{\alpha}$. Следствием этого движения появится другой гироскопический момент

$$M_{гY} = H\dot{\alpha} \sin(\vec{H} \wedge \vec{\alpha}) = H\dot{\alpha} \sin(90^\circ - \beta) = H\dot{\alpha} \cos \beta,$$

направленный встречно моменту внешних сил. По этой причине ускоренное движение гироскопа вокруг оси OY_p будет теперь определяться суммарным воздействием моментов M_Y и $M_{гY}$, т.е. ускорение движения гироузла вокруг этой оси станет равным $\ddot{\beta} = (M_Y - M_{гY}) / I_Y$.

До тех пор, пока $M_Y - M_{гY} \neq 0$

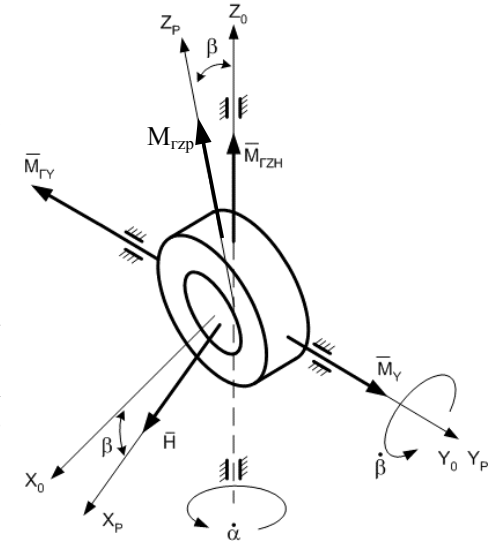


Рис. 8

будет увеличиваться $\dot{\beta}$, будет возрастать и гироскопический момент $M_{гZн}$, а значит, будет возрастать ускорение $\ddot{\alpha}$ и, как следствие, и скорость вращения гироскопа $\dot{\alpha}$, вследствие чего будет увеличиваться и гироскопический момент $M_{гY}$. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока $M_{гY}$ не станет равным M_Y . В момент равенства нулю разности моментов M_Y и $M_{гY}$ увеличение скорости $\dot{\beta}$ прекращается.

Однако постоянной скорости $\dot{\beta}$ будет соответствовать постоянный $M_{гZн}$, а, следовательно, конечное ускорение $\ddot{\alpha}$ и увеличивающаяся скорость $\dot{\alpha}$ и возрастающий гироскопический момент $M_{гY}$. Теперь он станет больше M_Y , величина скорости $\dot{\beta}$ начнет уменьшаться и движение гироскопа вокруг оси OY_p будет замедляться.

В результате этого в некоторый момент времени движение гироскопа вокруг оси OY_p сначала прекращается, а потом начинается его движение вокруг оси OY_p в обратном направлении в силу $M_{гY} > M_Y$. Гироскопический момент $M_{гZн}$ изменит свое направление. Рост скорости $\dot{\alpha}$ прекратится, гироскопический момент $M_{гY}$ начнет уменьшаться и т.д.

Таким образом, сразу же после приложения момента внешних сил M_Y по оси внутренней рамки возникает колебательное движение главной оси гироскопа вокруг осей OY_p и OZ_n со скоростями $\dot{\beta}$ и $\dot{\alpha}$, называемое нутационным.

Нутационные колебания происходят с большой частотой и малой амплитудой и при решении основных технических задач не учитываются.

Возникшие нутационные колебания достаточно быстро затухают из-за трения в подшипниках по осям подвеса, а также из-за трения о воздух и остается только прецессионное движение главной оси гироскопа $\omega_{пZн} = M_Y / H \cos \beta$, рассмотренное ранее.

1.4. Уравнения движения трехстепенного гироскопа в кардановом подвесе

Рассмотрим движение трехстепенного гироскопа под действием моментов внешних сил $M_{Zн}$ и M_Y с учетом инерции элементов карданова подвеса гироскопа. Положим при этом для общности, что гироскоп движется со скоростями $\dot{\alpha}$ и $\dot{\beta}$, в соответствии со знаками приложенных моментов и что эти скорости не постоянны, т.е. имеют место ускорения, как показано на рис. 9. Будем считать систему координат $OX_0Y_0Z_0$, связанную с основанием, неподвижной в абсолютном пространстве.

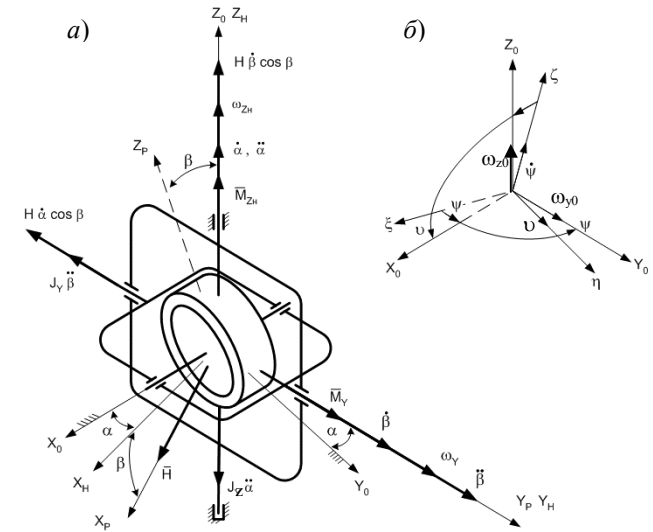


Рис. 9

Положение гироскопа относительно неподвижной системы координат $OX_0Y_0Z_0$ в каждый момент времени определяется углами α и β . Скорости и ускорения движения гироскопа соответственно равны: $\dot{\alpha}$ и $\ddot{\alpha}$; $\dot{\beta}$ и $\ddot{\beta}$.

Вывод уравнений движения гироскопа проводится при соблюдении условий

$$\dot{\beta} \ll \Omega \text{ и } \dot{\alpha} \ll \Omega.$$

Рассмотрим сначала схему моментов, действующих, например, по оси OY_p . Очевидно, что, во-первых здесь действует в отрицательном направлении момент инерционных сил $M_{исY} = I_Y \ddot{\beta}$, где I_Y – момент инерции гиروزла (внутренней рамы и ротора) относительно оси OY_p . Во-вторых, вокруг оси OY_p действует в отрицательном направлении гироскопический момент $M_{гY} = H \dot{\alpha} \sin(H^{\wedge}\alpha) = H \dot{\alpha} \cos\beta$.

Аналогично относительно оси OZ_n действует в отрицательном направлении момент инерционных сил сопротивления $M_{изn} = I_Z \ddot{\alpha}$, а также гироскопический момент $M_{гZn} = H \dot{\beta} \cos\beta$, направленный в положительном направлении оси OZ_0 . Здесь I_Z – момент инерции всех элементов подвеса (наружной, внутренней рам и ротора) относительно оси OZ_n .

Направления гироскопических моментов определяем в соответствии со сформулированным ранее правилом.

Приближенные упрощенные уравнения равновесия моментов по осям подвеса OZ_H и OY_P :

$$I_Z \ddot{\alpha} - H \dot{\beta} \cos \beta = M_{Z_H} ; \quad (1.1)$$

$$I_Y \ddot{\beta} + H \dot{\alpha} \cos \beta = M_Y .$$

Поясним физическое содержание полученных уравнений. Здесь в каждом случае момент внешних сил преодолевает момент сил инерции и гироскопический момент. Знак "минус" в первом уравнении по-прежнему означает, что положительный момент внешних сил вызывает отрицательную скорость прецессии. Отсюда при подстановке в первое уравнение скорости прецессии, обусловленной внешним моментом, получим противодействующий внешнему моменту гироскопический момент. Таким образом, сформулированное ранее свойство триединства и здесь не нарушается. Уравнения (1) и (2) нелинейные, так как $I_Z \neq \text{const}$ и $\cos \beta \neq \text{const}$, и найти их точное решение невозможно.

Для упрощения анализа движения главной оси гироскопа предположим, что β мал, т.е. $\cos \beta = 1$. Положим также $I_Y = \text{const}$ и $I_Z = \text{const}$. Тогда, при условии $M_{Z_H} = 0$ и $M_Y = 0$, свободное движение главной оси гироскопа определяется системой уравнений:

$$I_Y \ddot{\beta} + H \dot{\alpha} = 0 ; \quad (1.2)$$

$$I_Z \ddot{\alpha} - H \dot{\beta} = 0 .$$

Отсюда следует: $\dot{\beta} = \ddot{\alpha} I_Z / H$ и $\ddot{\beta} = \dddot{\alpha} I_Z / H$. Подставляя в уравнение (1.2) получим дифференциальное уравнение движения главной оси вокруг оси Z_H

$$\frac{I_Y I_Z}{H} \ddot{\alpha} + H \dot{\alpha} = 0 . \quad (1.3)$$

Аналогично может быть найдено дифференциальное уравнение, определяющее свободное движение главной оси гироскопа вокруг оси Y его рамки.

Обозначим собственную частоту колебаний гироскопа через ν и уравнение (1.3) в канонической форме:

$$\ddot{\alpha} + \frac{H^2}{I_Y I_Z} \dot{\alpha} = 0 ; \quad \ddot{\alpha} + \nu^2 \dot{\alpha} = 0 , \quad (1.4)$$

где $\nu = \sqrt{H^2 / I_Y I_Z} = H / \sqrt{I_Y I_Z}$.

Решим уравнение (1.4): $\alpha = A \cdot e^{pt}$, тогда $\dot{\alpha} = Ape^{pt}$, $\ddot{\alpha} = Ap^2e^{pt}$ и $\ddot{\alpha} = Ap^3e^{pt}$. Отсюда соответствующее характеристическое уравнение имеет вид $p^3 + v^2p = 0$.

Корни этого алгебраического уравнения равны: $p_1 = 0$; $p_2 = \pm jv$. Следовательно решение уравнения (1.4) имеет вид $\alpha = A_1 + B_1 \cos(vt + \varphi_1)$. Аналогично движение главной оси гироскопа вокруг оси его внутренней рамки определяется уравнением $\beta = A_2 + B_2 \cos(vt + \varphi_2)$.

Окончательно свободное движение главной оси гироскопа вокруг двух взаимно перпендикулярных осей имеет вид

$$\alpha = A_1 + B_1 \cos(vt + \varphi_1), \quad \beta = A_2 + B_2 \cos(vt + \varphi_2).$$

Коэффициенты A_1, A_2, B_1, B_2 зависят от начальных условий. Учитывая, что $\varphi_1 - \varphi_2 = \pi/2$ и полагая $\varphi_1 = \varphi$, получаем

$$\alpha = A_1 + B_1 \cos(vt + \varphi), \quad \beta = A_2 + B_2 \sin(vt + \varphi). \quad (1.5)$$

Из системы уравнений (1.5) следует, что свободное движение главной оси гироскопа колебательное. В силу $B_1 \neq B_2$ конец главной оси описывает в пространстве эллипс, называемый апексом. Эти колебательные движения главной оси гироскопа называются нутацией. Физический смысл этих колебаний объяснен ранее. Частота нутационных колебаний $v = H / \sqrt{I_Y I_Z}$ очень высока. В самом деле, если положим, что экваториальные моменты $I_Y = I_Z$ равны моменту инерции ротора, т.е. $I_Y = I_Z = I$, то $v = I\Omega / \sqrt{I^2} = \Omega$ и частота нутационных колебаний очень высока. Чем выше частота нутационных колебаний, тем меньше их амплитуда.

Таким образом, под действием импульса возмущающего момента (толчки, неравномерность трения в подшипниках) главная ось гироскопа колеблется с очень высокой частотой и очень малой амплитудой. В силу последнего ими часто пренебрегают на практике.

К сожалению, это пренебрежение не всегда оправдано. Так, частота нутаций может совпадать с собственными частотами колебаний конструктивных элементов гироскопа, тогда возможно появление ощутимых уходов оси гироскопа от исходного положения.

Нутационные движения сильно затухают из-за трения в подшипниках, сопротивления воздуха и других сил рассеивания.

Если пренебречь нутационными движениями главной оси гироскопа, что связано с пренебрежением инерционными членами в уравнениях (1) и (2), то получим усеченные уравнения движения гироскопа, в основном, и используемые в технике:

$$-H\dot{\beta} = M_{Z_H}, H\dot{\alpha} = M_y.$$

Другими словами, масса элементов карданова подвеса, т.е. их инерционность, не отражается на прецессионном движении гироскопа, а влияет только на его нутационные колебания.

Таким образом, движение главной оси гироскопа под действием моментов внешних сил практически безынерционное движение. Оно прекращается в момент обнуления момента внешних сил. Это обстоятельство широко используется для управления положением главной оси гироскопа в пространстве, осуществляемого приложением управляющих внешних моментов по осям подвеса с их последующим обнулением в нужные моменты времени.

1.5. Уравнение движения гироскопа на подвижном основании

До сих пор рассматривалось поведение гироскопа на неподвижном основании. Углы поворота гироскопа относительно абсолютного пространства совпадали с его углами поворота относительно основания. Движение гироскопа описывалось уравнениями (1) и (2).

Положим теперь, что основание движется относительно системы координат $O\xi\eta\zeta$ (рис. 9, б), связанной с абсолютным пространством таким образом, что проекции скоростей основания $\dot{\psi}$ и $\dot{\varphi}$ на оси подвеса гироскопа равны соответственно ω_{Z_H} и ω_Y . Положим также, что, как и прежде, углы α и β являются углами поворота гироскопа относительно основания. Тогда (рис. 9) из уравнений (1) и (2) можно получить уравнение движения гироскопа на подвижном основании простым учетом обоих движений – основания относительно абсолютного пространства и гироскопа относительно основания:

$$I_y(\ddot{\beta} + \dot{\omega}_Y) + H(\dot{\alpha} + \omega_{Z_H})\cos\beta = M_y, \quad I_z(\ddot{\alpha} + \dot{\omega}_{Z_H}) - H(\dot{\beta} + \omega_Y)\cos\beta = M_{Z_H}.$$

В случае пренебрежения влиянием инерционных членов на работу гироскопа получим: $H(\dot{\alpha} + \omega_{Z_H})\cos\beta = M_y$ и $-H(\dot{\beta} + \omega_Y)\cos\beta = M_{Z_H}$.

Перепишем данные уравнения в следующем виде:

$$\dot{\alpha} = (M_y / H \cos\beta) - \omega_{Z_H} \quad \text{и} \quad \dot{\beta} = -(M_{Z_H} / H \cos\beta) - \omega_Y.$$

В частном случае, когда $M_y = M_{Z_H} = 0$, получаем: $\dot{\alpha} = -\omega$ и $\dot{\beta} = -\omega_Y$.

Эти уравнения показывают, что при поворотах основания гироприбора происходит изменение взаимного положения гироскопа и основания гиро-

скопа прибора со скоростью, равной и противоположной скорости поворота основания.

1.6. Кажущиеся уходы гироскопов

Трехстепенной идеализированный свободный гироскоп сохраняет неизменным положение своей главной оси относительно абсолютного пространства. По этой причине наблюдателю, связанному с вращающейся относительно абсолютного пространства Землей, будет казаться, что гироскоп "уходит" от первоначального положения, в то время как он лишь фиксирует факт вращения Земли. Такие "уходы" гироскопов называются кажущимися или видимыми.

Для пояснения сущности кажущихся "уходов" положим сначала, что гироскоп установлен на Северном полюсе Земли так, что ось его наружной рамки совмещена с местной вертикалью, а его главная ось горизонтальна, как показано на рис.10.

При этом вектор суточного вращения ω_3 Земли совпадает по направлению с осью наружной рамки подвеса гироскопа. Тогда в силу суточного вращения Земли и неподвижности \vec{H} относительно абсолютного пространства будет иметь место непрерывное перемещение корпуса потенциометра $ПР_1$ (рис. 3) вместе с Землей относительно его неподвижного движка, удерживаемого гироскопом. В результате с потенциометра $ПР_1$ будет сниматься сигнал $U_1 = K_1\psi$, пропорциональный углу, меняющемуся со скоростью 15 град/час. За сутки "уход" составит 360° .

Положим теперь, что тот же самый гироскоп установлен на экваторе в точке A как раньше, т.е. ось его наружной рамки совмещена с местной вертикалью, а его главная ось горизонтальна, рис.10,б. При этом, вследствие суточного вращения Земли со скоростью ω_3 , с той же скоростью будет поворачиваться связанная с ней наружная рамка гироскопа, а с нею и корпус потенциометра $ПР_2$ (см. рис.3). Движок же этого потенциометра останется неподвижным в силу неподвижности главной оси гироскопа относительно абсолютного пространства. В результате будет наблюдаться кажущийся "уход" главной оси гироскопа относительно внутренней рамки. Через 6 часов наблюда-

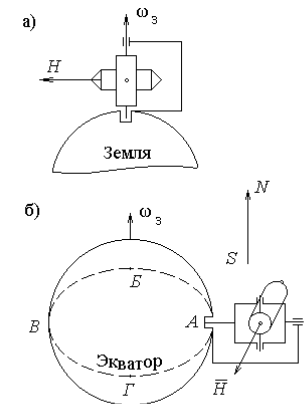


Рис. 10

тель с гироскопом окажется в точке B . Кажущийся уход при этом составит 90° , произойдет складывание осей гироскопа, и он станет двухстепенным.

В случае размещения гироскопа в произвольной точке земной поверхности с широтой места φ , при условии ортогональности его главной оси с линией, являющейся следом пересечения плоскостей местного горизонта и меридиана, а оси его наружной рамки с местной вертикалью, кажущиеся уходы будут наблюдаться вокруг осей Y_0 и Z_0 .

Соответствующие скорости уходов, согласно рис. 11, составляют $\omega_{3г} = \omega_3 \cos \varphi$ и $\omega_{3в} = \omega_3 \sin \varphi$, где $\omega_{3г}$ – горизонтальная проекция угловой скорости Земли, а $\omega_{3в}$ – ее вертикальная проекция.

При произвольной ориентации осей гироскопа, помещенного в точку поверхности с широтой места φ , кажущиеся уходы определяются проектированием составляющих $\omega_{3в}$ и $\omega_{3г}$ на соответствующие оси карданова подвеса.

Рассмотренная ситуация соответствует неподвижному относительно Земли основанию. В случае подвижного основания появляется дополнительный кажущийся уход главной оси гироскопа. Так, например, при горизонтальном полете самолета вдоль экватора, как показано на рис. 12, гироскоп окажется участвующим в дополнительном вращательном движении относительно центра масс Земли с угловой скоростью $\omega_y = v/(R_3 + h)$, где R_3 – радиус Земли, h – высота полета, v – линейная горизонтальная скорость полета.

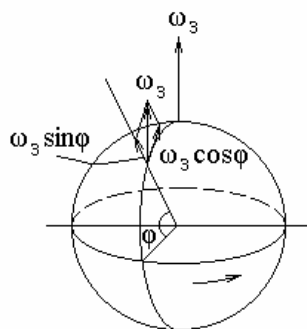


Рис. 11

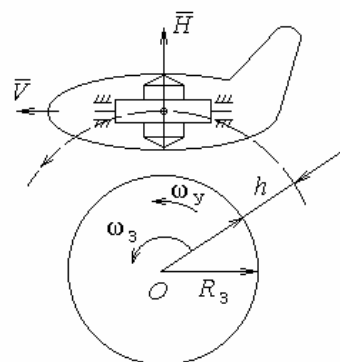


Рис. 12

В общем случае движения точки $\overline{\omega}_y$ направлен под некоторым углом к $\overline{\omega}_3$. Равно как и $\overline{\omega}_3$, вектор угловой скорости вращения основания $\overline{\omega}_y$ может быть спроецирован на оси карданова подвеса, и эти прецессии определяют результирующий кажущийся уход главной оси гироскопа.

1.7. Начальная установка осей гироскопа

Таким образом, трехстепенный астатический гироскоп – центр масс совмещен с точкой подвеса – может быть использован для измерения углов поворота основания вокруг одной или двух ортогональных осей, например углов ψ и ν , в соответствии со схемой на рис.13.

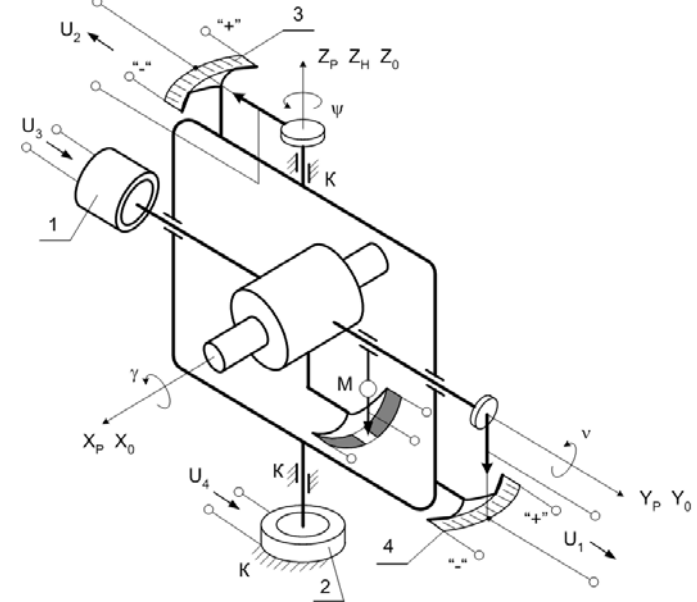


Рис. 13

При надлежащем выборе преобразователя угла ψ диапазон измерения углов ψ может быть неограниченным. Что же касается углов ν , то они не должны достигать значений $\pm 90^\circ$ и близких к ним, когда происходит складывание осей, т.е. совмещение оси ротора OX_p с осью наружной рамки OZ_H и превращение трехстепенного гироскопа в двухстепенной. Этой ситуации соответствует резкое увеличение ошибок в измерении углов ψ и ν . По этой причине позиционные гироскопы с обычным кардановым подвесом могут быть использованы для измерения углов поворота основания

только в тех случаях, когда углы поворота вокруг одной из осей не превышает $\pm 80-85^\circ$.

Мерой углов ψ и ν являются напряжения U_2 и U_1 , снимаемые, например, с потенциометрических преобразователей (рис. 3). В неидеализированных гироскопах движения основания, определяемые углами ψ и ν , приводят к появлению моментов трения $M_{Z_{тр}}$ и $M_{Y_{тр}}$ по осям подвеса OZ_n и OY_p . Следствием является прецессия главной оси гироскопа вокруг этих осей со скоростями $|\omega_{nZ}| = |M_{Y_{тр}}| / H \cos \nu$ и $|\omega_{nY}| = |M_{Z_{тр}}| / H \cos \nu$, что приводит к ее смещению относительно первоначального положения на углы $|\Delta\psi| = |\omega_{nZ}| \Delta t$ и $|\Delta\nu| = |\omega_{nY}| \Delta t$ за время наблюдения Δt , и возникает ошибка в измерении углов ψ и ν .

Отсюда следует ограничение на время работы свободного некорректированного астатического трехстепенного гироскопа: оно не должно быть больше времени, за которое ошибки успевают достигнуть недопустимых значений. Очевидно, оно зависит от качества гироскопа, а также от допустимых ошибок в измерении углов. Во многих случаях практического применения время работы гироскопа не превышает десяти минут (например, время полета ракеты), что позволяет здесь использовать современные гироскопы в режиме свободных, т.е. некорректируемых гироскопов.

Для того чтобы гироскоп измерял углы поворота объекта в выбранной системе координат, необходимо обеспечить начальную ориентацию его осей.

На рис.13 корпус гироприбора K жестко связывается с объектом и ось наружной рамки гироскопа выставляется относительно него в направлении оси OZ_0 при монтаже гироприбора на объекте. Что же касается осей OX_p и OY_p , подвижных относительно корпуса гироприбора, а значит, и объекта, то их выставка осуществляется либо с использованием арретиров, либо за счет работы систем коррекции.

Основными элементами систем коррекции являются моментные датчики 1 и 2, установленные по осям OY_p и OZ_n гироскопа. Это электрические машины, имеющие статор и ротор и работающие как электродвигатели в заторможенном режиме. Они вырабатывают момент, прямо пропорциональный питающему их управляющему току. Подачей напряжений U_4 и U_3 можно заставить главную ось гироскопа прецессировать вокруг осей OY_p и OZ_n соответственно, выставляя ее тем самым в нужное положение.

Если ось OZ_n гироскопа, связанная с объектом, занимает вертикальное положение и для нормальной работы достаточно обеспечить начальную ориентацию оси OX_p в перпендикулярном оси OZ_n положении, то коррекция перпендикулярности осуществляется подачей сигнала U_1 на момент-

ный датчик 2. Преобразователь углов 4 предварительно выставлен таким образом, что сигнал $U_1=0$ при перпендикулярности оси гироскопа OX_p оси OZ_n . При нарушении перпендикулярности осей OY_p и OZ_n сигнал, снимаемый с датчика 2 – напряжение U_1 , – перестает быть равным нулю. Поданное на моментный датчик 2 напряжение U_1 заставляет его развивать момент по оси Z_n , вынуждая гиروزел прецессировать вокруг оси OY_p в сторону обнуления U_1 . В момент обнуления U_1 прецессия мгновенно прекращается и ось OY_p оказывается перпендикулярной оси OZ_n . Работа коррекции при неподвижном объекте на этом заканчивается и в дальнейшем в процессе движения объекта ось OY_p гироскопа остается в горизонтальном положении в силу свойств свободного гироскопа. Такая система коррекции получила название межрамочной коррекции перпендикулярности.

Другая схема коррекции, обеспечивающая горизонтирование оси OX_p ротора, работает не от датчика 4, а от маятникового датчика M , (рис.13), движок которого имеет маятниковость и ось подвеса, параллельную оси OY_p , а потенциометр (или контактная ламель) закреплен на внутренней раме подвеса. При этом сигнал маятникового датчика M подается на моментный датчик 2 и прецессия гироскопа обеспечивает горизонтальность его главной оси вне зависимости от положения оси OZ_n . Такая коррекция получила название коррекции горизонтальности. Начальная ориентация оси OX_p по направлению оси OX_0 объекта осуществляется подачей сигнала U_3 на моментный датчик 1. Преобразователь углов 3 предварительно выставляется таким образом, что сигнал $U_2=0$ при параллельности осей OX_p гироскопа и OX_0 объекта. При этом угловое отклонение оси OX_p гироскопа от оси OX_0 объекта приводит к работе системы коррекции, настроенной таким образом, что прецессия гироскопа, вызванная моментом датчика 1, возвращает ось гироскопа OX_p в положение, параллельное оси объекта, что означает обнуление сигнала U_2 преобразователя 3. Такая коррекция получила название азимутальной коррекции.

Если на моментный датчик 1 подавать сигнал не от преобразователя 3, а от магнитного датчика курса, то работа системы азимутальной коррекции обеспечит начальную ориентацию оси OX_p гироскопа по направлению, параллельному направлению магнитного меридиана данного места.

Следует еще раз подчеркнуть, что в случае свободных гироскопов моментные датчики систем коррекции используются лишь до момента начала движения объекта. В момент начала движения объекта они отключаются и гироскоп становится свободным.

Арретирование прибора состоит в механической фиксации гиروزла относительно корпуса прибора посредством кулачкового-рычажного механизма. Очевидно, этот способ начальной ориентации осей гироскопа применим только в том случае, когда начальная ориентация осей системы

координат $OX_0Y_0Z_0$, связанной с объектом, точно соответствует заданной. В момент начала движения объекта гироскоп разарретируется и становится свободным.

Схема арретирующего устройства с электромагнитным приводом изображена на рис. 14 в положении, когда гироскоп заарретирован.

Основными узлами устройства являются втяжные электромагниты 1 и 2, рычаг 3 с толкателем 4 и клином 5, толкатель 6, кулачки 7 и 8, пружины 9, 10 и 11.

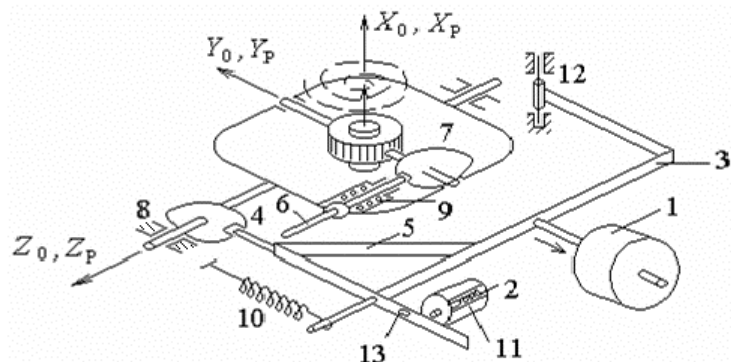


Рис. 14

Чтобы разарретировать гироскоп, надо подать питание на электромагнит 1. При этом его якорь втягивается, и рычаг 3 поворачивается вокруг оси 12 против часовой стрелки. Толкатель 4 выходит из паза кулачка 8, а клин 5 отходит от соприкосновения с подпружиненным толкателем 6. Последний под действием пружины 9 выходит из паза кулачка 7 – гироскоп становится свободным. Якорь включенного электромагнита 2 под действием пружины 11 входит выступающей частью в углубление 13 рычага 3. Это предотвращает самопроизвольное заарретирование гироскопа при случайном разрыве цепи питания электромагнита 1. В некоторых системах арретирования фиксирующий электромагнит 2 отсутствует.

Чтобы заарретировать гироскоп, надо выключить электромагнит 1 и включить (хотя бы кратковременно) электромагнит 2. При этом якорь электромагнита 2 утапливается, освобождая рычаг 3, и пружина 10 поворачивает рычаг 3 вокруг оси 12 по часовой стрелке. Если кулачки 7 и 8 к этому моменту находятся относительно толкателей 4 и 6 в произвольном положении за счет движения объекта и рассогласования системы координат $OX_0Y_0Z_0$ с системой координат $OX_pY_pZ_p$, то толкатель 4 упирается в поверхность кулачка 8, а клин 5 перемещает толкатель 6 так, что он упи-

рает в поверхность кулачка 7. Профиль поверхностей кулачков 7 и 8 выбирается так, что под влиянием сил, возникающих от давлений толкателей 4 и 6, кулачки разворачиваются и толкатели входят в пазы кулачков 8 и 7 и фиксируют гироузел в заданном положении. При этом электромагнит 2 выключают, и его якорь упирается в гладкую поверхность рычага 3, что подготавливает систему к последующей фиксации рычага в крайнем правом положении (при разарретировании).

Существенными конструктивными недостатками арретира с электромагнитным приводом являются значительные размеры и вес основного электромагнита. Поэтому иногда применяют небольшие и легкие приводы с пневмоцилиндром или с микродвигателем.

1.8. Неидеализированные трехстепенные свободные гироскопы и пути их совершенствования

Основное отличие неидеализированных трехстепенных гироскопов от идеализированных – наличие трения по осям подвеса. При этом, если трение по оси OX_p преодолевается двигателем, осуществляющим вращение ротора, то трение по осям OY_p и OZ_n приводит к "уходу" главной оси гироскопа от исходного положения. Это происходит следующим образом. При поворотах объекта (основания) вокруг осей OY_0 и OZ_0 в силу наличия трения в подшипниках по осям подвеса гироскопа OY_p и OZ_n со стороны основания на гироскоп будут действовать моменты сил трения. При знакопеременных (колебательных) поворотах основания эти моменты, естественно знакопеременны. Однако, в силу несимметричности сил трения в опорах подвеса гироскопа, моменты сил трения, возникающие при разных направлениях поворотов, оказываются неодинаковыми. Это позволяет говорить о некотором среднем моменте сил трения по осям подвеса гироскопа при знакопеременных поворотах основания вокруг этих осей. Таким образом, имеют место некоторые средние моменты сил трения по осям подвеса наружной и внутренней рамок гироскопа: $M_{Zn} \neq 0$ и $M_Y \neq 0$. В результате главная ось гироскопа прецессирует вокруг осей OY_p и OZ_n со скоростями $\omega_Y = -M_{Zn} / H \cos \beta$ и $\omega_Z = M_Y / H \cos \beta$, где β – угол неперпендикулярности главной оси гироскопа плоскости наружной рамки. За время наблюдения t вследствие прецессии главная ось "уйдет" относительно исходного положения на угол α .

Для оценки величины "ухода" гироскопа из-за трения в подшипниках рассмотрим реальную ситуацию для варианта ориентации осей подвеса гироскопа на объекте показанную на рис. 14. Допустим, что ротор гироскопа выполнен из стали ($j \cong 7,8 \cdot 10^{-3}$ кг/м³); диаметр ротора $D = 5 \cdot 10^{-2}$ м; он имеет форму цилиндра с размером по образующей $b = 3 \cdot 10^{-2}$ м; что ско-

рость его вращения $\Omega = 30000$ об/мин; при этом момент сил трения по оси подвеса OY_p составляет $M_f = 9,8 \cdot 10^{-6}$ Н·м. Определим скорость ухода гироскопа.

Имеем: $I_x = mR^2/2 = mD^2/8$, где $m = jV$; V – объем ротора, тогда $I_x = (\pi D^2/4)bj(D^2/8) = 1,375 \cdot 10^{-4}$ Н·м²

Кинетический момент данного ротора $H = I_x \Omega = 1,375 \cdot 10^{-4} \cdot 30000 \cdot 2\pi \cdot 60 = 0,43$ кг·м²/с

Тогда скорость "ухода" ω_{zh} гироскопа, при $\beta = 0$ $\dot{\alpha} = 9,8 \cdot 10^{-6}$ Н·м / $0,43$ кг·м²/с² = $227,9 \cdot 10^{-7}$ рад/с = $227,9 \cdot 10^{-7} \times 57,3 \times 3600 = 4,68$ град/час ≈ 5 град/час.

Скорость ухода гироскопа в рассмотренном примере очень велика. Конечно, понятие большой или малой скорости "ухода" зависит от конкретных требований, предъявляемых к гироскопу в зависимости от функциональных задач, решаемых объектом. Так, если гироскоп является элементом инерциальной системы навигации судна, то необходимо иметь в виду требования к системе навигации, чтобы за час движения судна погрешность определения координат в инерциальной системе не превышала, например, одной морской мили (1,82 км). Как известно морская миля соответствует 1' широты в предположении, что Земля представляет собой идеальный шар. Тогда, если предположить отсутствие каких-либо других источников погрешностей в инерциальной системе, скорость ухода гироскопа в такой системе не должна превышать одной угловой минуты в час, т.е. она должна быть меньше 0,016 град/ч. Это очень жесткие требования к гироскопу, обеспечение которых в настоящее время требует высокоточной элементной базы и высокого технологического уровня создания таких гироскопов. Таким образом, в реальных трехстепенных гироскопах одной из серьезнейших является проблема опор.

В современных высококачественных подшипниках моменты силы трения составляют $(1-2) \cdot 10^{-5}$ Н·м. Распространенность шариковых опор объясняется их большой грузоподъемностью, живучестью, прочностью, простотой конструкции узлов и мгновенной готовностью к работе. Именно в силу перечисленных качеств шарикоподшипниковые опоры постоянно совершенствуются и широко применяются до настоящего времени.

Основной характеристикой гиromотора является его кинетический момент $H = I_x \Omega$. Момент инерции I_x характеризует массу вращающегося тела и ее распределение относительно оси вращения. Так, в случае пустотелого цилиндра $I = m(R^2 + r^2)/2$, где R , r – наружный и внутренний радиусы цилиндра соответственно; m – его масса. При этом, с целью увеличения I приводной электродвигатель выполняется по обращенной схеме – статор помещается внутри ротора. Такая форма ротора позволяет увеличить кинетический момент гироскопа без увеличения геометрических размеров.

Увеличение массы ротора достигается также использованием в нем тяжелых сплавов на основе вольфрама.

По принципу действия приводные двигатели гиromоторов – асинхронные или синхронные. Скорости вращения роторов достигают 60000 об/мин. При этом синхронные двигатели обеспечивают более стабильную скорость вращения ротора при условии их возбуждения от специальных источников переменного напряжения высокостабильной частоты. Столь высокие скорости вращения роторов обуславливают тяжелые условия работы подшипников. Они претерпевают существенные вибрационные нагрузки, повышенный нагрев, значительные осевые и радиальные усилия и т.д. Все это приводит к повышенному износу беговых дорожек и шариков. В подшипниках увеличиваются люфты и трение. Наиболее известная характеристика ухудшения качества подшипника – люфт – приводит к смещению центра масс ротора относительно точки подвеса.

Положим, например, что смещение имеет место по оси вращения и составляет один микрон. В результате смещения на ротор начинает действовать сила веса P , которая при варианте ориентации осей подвеса гироскопа на объекте на рис. 13 создает момент относительно внутренней рамки $M_Y = \Delta \cdot P$, где $\Delta = 1 \cdot 10^{-6}$ м – смещение центра масс относительно точки подвеса. Под действием M_Y гироскоп прецессирует вокруг оси наружной рамки со скоростью $\omega_{NZH} = M_Y / H = \Delta \cdot P$. Положим, что кинетический момент гироскопа $H = 1$ кг·м²/с и что $P = 1$ кг. Тогда скорость "ухода" гироскопа, обусловленная смещением центра масс, составит $\omega_{NZH} = 9,8 \cdot 10^{-6}$ Н·м/1 кг·м²/с = $0,98 \cdot 10^{-5}$ рад/с = $0,98 \times 57,3 \times 3600 = 2,02$ град/ч ≈ 2 град/ч.

Как следует из изложенного, гиromотор гироскопа представляет собой сложный конструктивный узел. Современная промышленность выпускает большое количество разнообразных гиromоторов, различающихся габаритами, сроками службы, видом питания, стабильностью положения центра масс и т.д. Среди них есть и очень маленькие, величиной с наперсток, и очень большие, весом до нескольких килограммов. Чтобы раскрутить роторы таких гиromоторов до номинальных скоростей требуется более десяти минут.

В ряде случаев такие временные затраты на подготовку гиromотора к работе недопустимы. Это заставляет проектировать специальные электродвигатели для гиromоторов с увеличенным пусковым моментом и увеличенной частотой вращения поля в зазоре на этапе запуска. Так удается уменьшить вдвое и более время запуска гиromоторов.

В системах, где требуемое время подготовки должно составлять несколько секунд, электродвигатели не применяются. Для разгона ротора в

таких случаях используется шнур, либо стальная лента, как при разгоне игрушечного волчка, струя сжатого воздуха и даже пороховой ускоритель. Такие гироскопы работают на выбеге. Их применение оправдано в условиях, когда не требуется значительное время работы гироскопа с момента запуска и скорость ротора на выбеге за время работы практически не изменится.

1.9. Пути снижения уходов трехстепенных гироскопов

1.9.1. Принудительное вращение опор подвеса

Одним из наиболее эффективных способов уменьшения ухода гироскопа из-за влияния моментов сил трения в опорах подвеса является принудительное вращение последних, называемое в литературе и на практике также "оживление". Способ уменьшения сил трения оживлением основан на так называемых первом и втором эффекте Н.Е.Жуковского.

Сущность первого эффекта легко иллюстрируется примером более медленного затухания колебаний маятников в случае принудительного вращения его опоры.

На рис.15 представлена наиболее распространенная схема трехстепенного гироскопа с принудительным вращением средних колец 1 и 2 шарикоподшипников, в которых установлена рама 3 гироскопа 4.

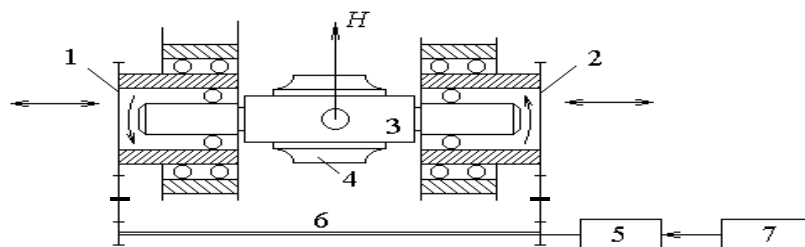


Рис. 15

Предположим сначала, что средние кольца шарикоподшипников 1 и 2 вращаются в противоположные стороны электродвигателем 5 через редуктор 6 с угловыми скоростями ω_0 . Тогда результирующий момент трения, действующий на гироскоп по этой оси, будет определяться разностью моментов сил трения в подшипниках 1 и 2: $\Delta M_1 = M_1 - M_2$. Если теперь переключателем 7 периодически реверсировать вращение электродвигателя 5, то ΔM_1 будет менять свой знак. При равенстве положительных $\Delta M_{1л}$ (левого) и отрицательных $\Delta M_{1п}$ (правого) значений разностей моментов

ΔM_1 за целое число циклов гироскоп не будет иметь систематических составляющих уходов.

В процессе каждого цикла реверсирования гироскоп будет совершать равные уходы, направленные навстречу друг другу при левом и правом вращении опор. Величина уходов определяется значением разности ΔM_1 моментов сил трения, а частота – частотой реверсирования принудительного вращения опор.

Практически вторая разность $\Delta M_2 = \Delta M_{1л} - \Delta M_{1п}$ не равна нулю, но ее величина значительно меньше суммарного момента трения $M_{\Sigma} = M_1 + M_2$, действующего на гироскоп при отсутствии принудительного вращения опор. Поэтому остаточная систематическая составляющая ухода гироскопа с оживлением такого типа очень мала.

Уход гироскопа с вращающимися опорами зависит от скорости и периода вращения средних колец опор, а также от запаздывания при реверсе. Известны следующие режимы работы вращающихся опор: вращение опор в разные стороны без реверса ($\varphi = \omega_0 t$); вращение с реверсом ($\varphi > 2\pi$); колебательный режим ($\varphi < 2\pi$) и вращение в разные стороны с наложением периодической составляющей ($\varphi = \omega_0 t + \varphi_0 \sin \omega t$), где φ – угол поворота среднего кольца шарикоподшипника с угловой скоростью ω_0 за полупериод, ω – частота периодической составляющей.

Эффективность использования вращающихся опор можно оценить по величинам параметров одного из типов реальных опор:

$$M_1 + M_2 = 3,92 \cdot 10^{-5} \text{ Н}\cdot\text{м}, \Delta M_2 = 0,34 \cdot 10^{-5} \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Указанные параметры опор находятся в сильной зависимости от качества их изготовления. Однако к настоящему времени возможности снижения моментов трения шарикоподшипников за счет улучшения их качества во многом уже исчерпаны.

В среднем моменты трения современных трехколесных шарикоподшипников составляют $1,92 \cdot 10^{-6} \div 2,94 \cdot 10^{-6} \text{ Н}\cdot\text{м}$ ($0,02 \div 0,03 \text{ г}\cdot\text{см}$) на 1Н ($0,1 \text{ кгс}$) нагрузки.

Определенный резерв дальнейшего уменьшения трения опор заключен в использовании одновременно первого и второго эффектов Н.Е.Жуковского. Сущность второго эффекта поясним на примере, показанном на рис.16.

Здесь для уменьшения трения при скольжении тела 1 относительно тела 2 со скоростью v_1 используется дополнительное скольжение тела 2 относительно тела 3 со скоростью v_2 в направлении, перпенди-

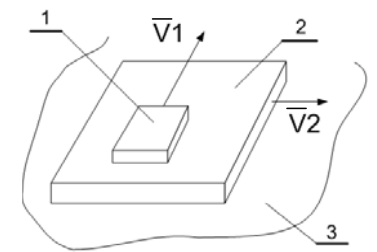


Рис. 16

кулярном направлении скорости v_1 . При этом $v_1 \gg v_2$. Для использования второго эффекта Н.Е.Жуковского в приложении к вращающейся опоре, изображенной на рис.15, с целью дальнейшего снижения момента трения среднему кольцу, кроме вращательного движения, придают линейные вибрации вдоль оси подвеса (показаны стрелками) относительно шариков.

1.9.2. Принудительное вращение подвеса

Кроме моментов сил трения в опорах другими источниками уходов гироскопа являются моменты разбаланса и инерционность рамок карданова подвеса.

Один из путей уменьшения влияния указанных параметров карданова подвеса на уход гироскопа – использование так называемых обращенных кардановых подвесов, когда последние располагаются внутри ротора гироскопа. При этом снижается масса подвеса, а значит, и моменты трения в опорах, моменты его разбаланса, и моменты инерции элементов подвеса.

Трехстепенные гироскопы с обращенным (или внутренним) кардановым подвесом используют для измерения угловых отклонений объектов в ограниченном диапазоне углов.

На рис.17 ротор 3 с беличьей клеткой 2 гиromотора вращается в опорах 1 и 6 относительно статора 5, закрепленного на внутренней рамке 4 карданового подвеса. Наружная рама 9 карданового подвеса выполнена в виде крестовины и имеет свободу перемещения в штанге 7 корпуса 8 относительно оси, перпендикулярной плоскости чертежа. Подвеска гиromотора обеспечивает совмещение его центра масс с геометрическим центром подвеса. Штанга 7, в свою очередь, приводится в принудительное вращение в

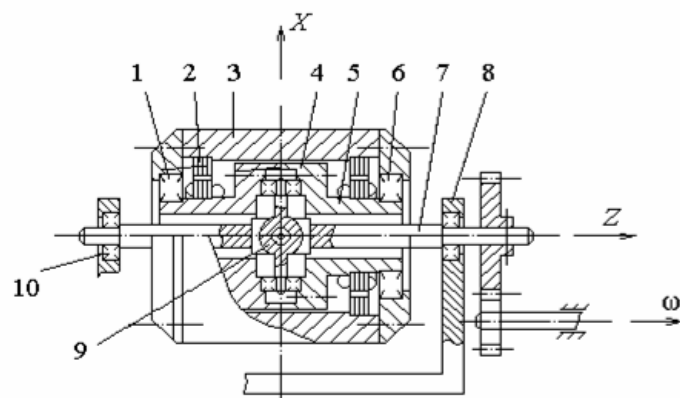


Рис. 17

корпусе δ , в подшипниках 10 , с малой скоростью, что обеспечивает также оживление опор карданова подвеса. Принудительное вращение подвеса в данном случае в отличие от принудительного вращения опор подвеса (п. 9.1.1) исключает систематические уходы гироскопа от заданного направления за счет превращения не только моментов сил трения, но также всех возмущающих моментов, векторы которых участвуют во вращении подвеса, в периодические функции времени. Информация об угловом положении ротора относительно корпуса снимается двухкоординатными датчиками угла, построенными на индукционном, емкостном или опто-электронном принципе.

2. КОРРЕКТИРУЕМЫЕ ТРЕХСТЕПЕННЫЕ ГИРОСКОПЫ

Свободные, некорректируемые, трехстепенные гироскопы используются на объектах лишь с малым временем работы. Причиной тому являются уходы главной оси гироскопа от исходного положения вследствие как трения по осям подвеса, так и суточного вращения Земли либо перемещения объекта по земной поверхности.

При необходимости обеспечения длительного времени работы гироскопов применяют корректируемые гироскопы, у которых положение главной оси, так или иначе, корректируется во время работы. Коррекция осуществляется с использованием сигналов от различного рода датчиков положений вертикалей и линий Север – Юг – датчиков типа маятников, компасов и др.

Коррекция трехстепенных гироскопов иногда достигается за счет смещения центра масс относительно точки подвеса (точки пересечения осей подвеса). Такие гироскопы в отличие от астатических называются статическими.

Существует обширное семейство трехстепенных корректируемых гироскопов. Ниже рассматриваются основные его представители.

2.1. Гирокомпасы

Идея использования гироскопа в качестве указателя направления на Северный полюс Земли принадлежит Фуко, предложившему двухстепенные гироскопы.

Вектор ω_3 угловой скорости вращения Земли в каждой точке ее поверхности с широтой места φ может быть представлен двумя составляющими: проекцией вектора угловой скорости Земли на направление местной вертикали $|\omega_{3в}| = \omega_3 \sin \varphi$ и проекцией на плоскость местного горизонта $|\omega_{3г}| = \omega_3 \cos \varphi$. Так как последняя лежит в плоскости местного

меридиана, то ее направление совпадает с направлением (рис.18) на Северный полюс Земли.

Положим, что в точке A земной поверхности установлен двухстепенной гироскоп (рис.18, б) таким образом, что ось его внутренней рамки OY_p совмещена с местной вертикалью. Тогда его ось OX_p , т.е. вектор кинетического момента \vec{H} , лежит в плоскости местного горизонта. Допустим дополнительно, что H отклонен в плоскости местного горизонта от направления на Северный полюс Земли на угол ψ (рис.18, в). Тогда на такой двухстепенной гироскоп действует гироскопический момент

$$M_{\Gamma Y} = H\omega_3 \cos \varphi \sin(\vec{H} \wedge \vec{\omega}_3 \cos \varphi).$$

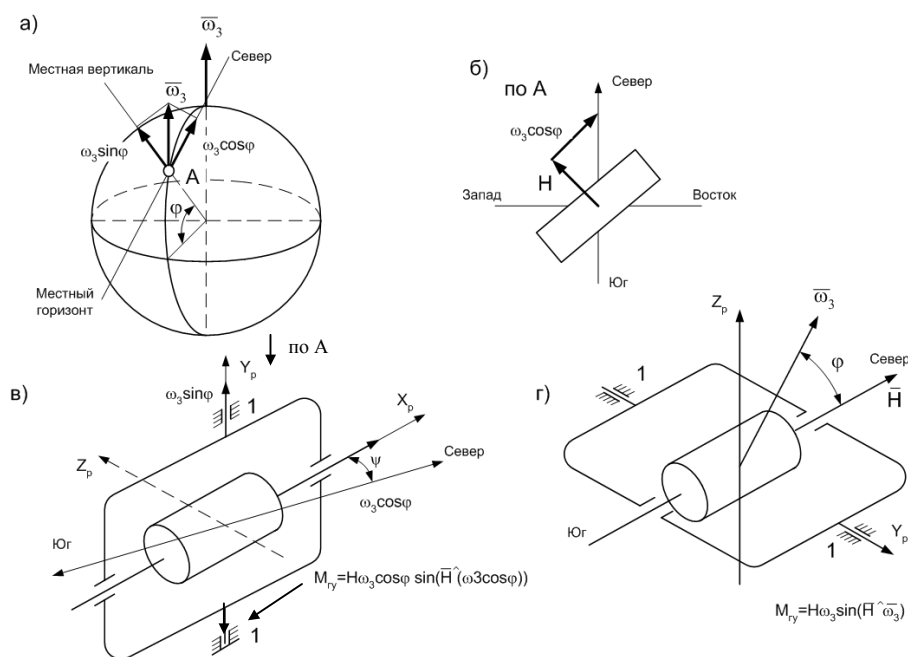


Рис. 18

Составляющая угловой скорости вращения Земли $\omega_3 \cos \varphi$ через подшипники основания $1-1$ (см. рис. 18, г) воздействует на гироскоп, увлекая за собой и поворачивая его в пространстве вокруг оси OX_p . Из-за отсутствия третьей степени свободы под действием $M_{\Gamma Y}$ гироскоп поворачивается (не прецессирует) вокруг оси OY в сторону совмещения H и

$\omega_3 \cos \varphi$ по кратчайшему пути, т.е. стремится прийти в плоскость местного меридиана, а, следовательно, и ориентироваться в направлении Северного полюса Земли. По энергии гироскоп проходит это направление; гироскопический момент меняет знак, и, как следствие, меняется направление движения гироскопа. По истечении некоторого времени эти колебательные движения гироскопа из-за действия сил сопротивления затухают и его главная ось оказывается направленной на север. При этом $M_{\Gamma Y}$ становится равным нулю.

Составляющая угловой скорости $\omega_3 \sin \varphi$ не вызывает возникновения гироскопического момента, так как совпадает по направлению с осью OY_p подвеса гироскопа.

Таким образом, рассмотренный двухстепенный гироскоп, будучи установленным на основании, неподвижном относительно Земли, указывает направление на географический полюс Земли.

Положим теперь, что тот же самый гироскоп установлен в точке A таким образом, что ось OY_p его рамки лежит в плоскости местного горизонта и перпендикулярна плоскости местного меридиана (рис.18, ε). Вектор \vec{H} при этом оказывается лежащим в плоскости местного меридиана. При данной ориентации осей подвеса двухстепенного гироскопа угловая скорость вращения Земли ω_3 через подшипники основания $I - I$ воздействует на гироскоп, увлекая его за собой и поворачивая его в пространстве вокруг оси OZ_p , что вызывает появление гироскопического момента $M_{\Gamma Y} = \vec{H} \omega_3 = H \omega_3 \sin(\vec{H} \wedge \vec{\omega})$. Из-за отсутствия третьей степени под действием этого момента, как и в предыдущем случае, главная ось гироскопа, в конечном итоге, совмещается с вектором ω_3 угловой скорости вращения Земли. Тем самым, угол между плоскостью местного горизонта и главной осью гироскопа оказывается равным широте места φ точки A . Отсюда и название прибора – гиросирот. Как и предыдущий прибор, данный гироскоп хорошо работает лишь на основании, неподвижном относительно Земли.

В случае размещения приборов, выполненных по рассмотренным выше схемам, на основаниях, подвижных относительно Земли, движение главной оси гироскопа становилось неустойчивым, что делало невозможным его использование для измерения курсовых углов объектов. Причиной тому была реакция этих приборов на угловые скорости движения основания, которые, как правило, существенно превосходили медленную угловую скорость вращения Земли.

Решение проблемы гироскопа нашлось в семействе трехстепенных гироскопов, позволяющих, при идеальном подвесе, исключить влияние угловых движений основания на гироскоп. Оно было предложено гол-

ландским священником Максимом Горрардом Ван де Босом в 1886 году и заключалось в опускании центра масс гироузла – совокупности ротора и внутренней рамки – по направлению оси наружной рамки, что придает гироузлу нижнюю маятниковость ml (рис.19). Здесь вектор ω_3 суточного вращения Земли перпендикулярен плоскости чертежа.

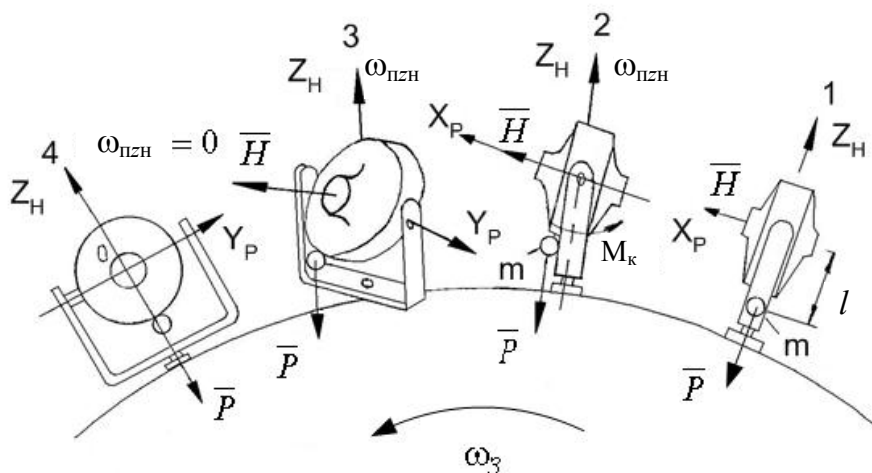


Рис. 19

Положим сначала, ситуация 1, что статический гироскоп помещен на экваторе таким образом, что ось его наружной рамки вертикальна, а ось внутренней рамки лежит в плоскости местного меридиана. Тогда при не раскрученном роторе маятник устанавливается вертикально, а ось OX_P – ось вращения ротора – оказывается в плоскости местного горизонта, находясь в плоскости чертежа. Если в этом положении гироскопа осуществляется его запуск, то вектор \bar{H} "запоминает" положение плоскости местного горизонта, соответствующего ситуации 1.

Вследствие суточного вращения Земли через некоторое время гироскоп окажется в положении 2. При этом его главная ось OX_P окажется возвышающейся над плоскостью местного горизонта, а плечо маятника – не совмещенным с местной вертикалью. Следствием этой ситуации является воздействие момента M_k маятника, прикладываемого к гироузлу относительно оси OY_P , перпендикулярной плоскости чертежа. Под действием момента M_k гироскоп прецессирует со скоростью $\omega_{пzh}$ вокруг оси OZ_H в сторону совмещения \bar{H} с плоскостью местного меридиана. Промежуточная ситуация представлена положением 3, где вектор \bar{H} вышел из плос-

кости чертежа. В процессе дальнейшей прецессии главная ось OX_p гироскопа приходит в плоскость местного меридиана, оказываясь при этом и в плоскости местного горизонта – положение 4. Корректирующий момент обнуляется и прецессия прекращается. При этом главная ось OX_p гироскопа оказывается перпендикулярной плоскости чертежа, т.е. параллельной направлению вектора угловой скорости вращения Земли. Возмущающее воздействие последней на гироскоп прекращается, и гироскоп остается указателем направления на север. Такие гироскопы называют трехстепенными маятниковыми гирокомпасами.

Несколько иная картина имеет место при размещении гироскопа в любой другой точке земной поверхности – не на экваторе. Здесь будет наблюдаться постоянный уход главной оси гироскопа из плоскости местного меридиана и горизонта в силу суточного вращения Земли. Это будет постоянно порождать корректирующий момент M_k , вынуждающий гироскоп прецессировать в плоскость местного меридиана. Поскольку возмущающее воздействие на гироскоп есть функция широты места установки гироскопа, то и корректирующий момент, обуславливающий постоянную прецессию, гарантирующую удержание оси гироскопа в плоскости местного меридиана, должен быть функцией той же широты. Это требование удовлетворяется соответствующим управлением маятниковостью.

Очевидно, что процесс отслеживания уходящей, вследствие суточного вращения Земли плоскости местного меридиана, главной осью гироскопа при $\varphi=0$ сопряжен с ее движением в двух плоскостях, т.е. вокруг осей OZ_n и OY_p . Характеристики гироскопа в режиме гирокомпаса определяются в этом случае системой уравнений равновесия моментов по упомянутым осям. Схема гирокомпаса, движущегося вокруг осей OY_p и OZ_n одновременно, представлена на рис.20.

Пусть при этом движение соответствует случаю положительных значений скоростей $\dot{\psi}$ и $\dot{\vartheta}$. Введем систему координат $O\xi\eta\zeta$, связанную с Землей так, что ее ось $O\xi$ совмещена с местной вертикалью; ее ось ξ с плоскостью местного горизонта и располагается в плоскости местного меридиана; ось η ориентирована в направлении "восток – запад". Система координат $OX_nY_nZ_n$ связана с наружной рамкой гироскопа, $X_pY_pZ_p$ – с гиросузлом.

В соответствии с выбранными системами координат и принятыми допущениями гироскоп движется относительно системы координат $O\xi\eta\zeta$ со скоростями $\dot{\psi} \neq 0$, $\dot{\vartheta} \neq 0$, и вместе с системой $O\xi\eta\zeta$ с угловыми скоростями, определяемыми вертикальной проекцией вектора угловой скорости вращения Земли $\omega_3 \sin \varphi$ и ее горизонтальной проекцией $\omega_3 \cos \varphi$, где φ – широта места установки гироскопа. Учет также наличие момента M_k маятника гиросузла, обусловленного наличием смещенной массы m на плече l .

Составим сначала уравнение равновесия моментов в проекциях на ось наружной рамки гироскопа OZ_n . Моменты, действующие по этой оси на гироскоп:

- $H\dot{\vartheta} \cos \vartheta$ – гироскопический момент, обусловленный скоростью $\dot{\vartheta}$ с учетом не перпендикулярности осей OX_p и OZ_n ;

- $I_z \ddot{\psi}$ – момент инерционных сил сопротивления;

- $H\omega_3 \cos \varphi * \cos \vartheta * \sin \psi$ – гироскопический момент, обусловленный проекцией скорости $\omega_3 \cos \varphi$ на ось OY_p с учетом неперпендикулярности осей OZ_n и OX_p (см. рис.20 – вид по стрелке B) и называемый направляющим моментом.

Отсюда уравнение равновесия моментов по оси OZ_n имеет вид

$$I_z \ddot{\psi} + H \cos \vartheta (\dot{\vartheta} + \omega_3 \cos \varphi * \sin \psi) = 0.$$

Аналогично составим уравнение равновесия моментов в проекциях на ось внутренней рамки OY_p . Моменты, действующие по этой оси:

- $Pl \sin \vartheta$ – момент маятника M_k , где l – плечо маятника (см. рис. 20 – вид по стрелке A);

- $I_y \ddot{\vartheta}$ – момент инерционных сил сопротивления;

- $H\dot{\psi} \cos \vartheta$ – гироскопический момент, обусловленный скоростью $\dot{\psi}$ с учетом неперпендикулярности осей OZ_n и OX_p .

- $H\omega_3 \sin \varphi \cos \vartheta$ – гироскопический момент, обусловленный проекцией вектора угловой скорости $\omega_3 \sin \varphi$ вращения Земли на ось наружной рамки с учетом неперпендикулярности осей OZ_n и OX_p .

Отсюда уравнение равновесия моментов, действующих по оси OY_p имеет вид

$$I_y \ddot{\vartheta} + H \cos \vartheta (\dot{\psi} + \omega_3 \sin \varphi) = Pl \sin \vartheta .$$

Таким образом, система уравнений, определяющих движение главной оси гироскопа, имеет вид

$$\begin{cases} I_z \ddot{\psi} + H \cos \vartheta (\dot{\vartheta} + \omega_3 \cos \varphi \sin \psi) = 0; \\ I_y \ddot{\vartheta} + H \cos \vartheta (\dot{\psi} + \omega_3 \sin \varphi) = Pl \sin \vartheta. \end{cases}$$

При условии малости угла ϑ получим:

$$\begin{cases} I_z \ddot{\psi} + H (\dot{\vartheta} + \omega_3 \cos \varphi \sin \psi) = 0; \\ I_y \ddot{\vartheta} + H (\dot{\psi} + \omega_3 \sin \varphi) = Pl \vartheta; \end{cases}$$

Полученная система уравнений содержит инерционные члены $I_z \ddot{\psi}$ и $I_y \ddot{\vartheta}$, а это означает наличие нутационных колебаний. Опуская члены уравнений, характеризующие нутационные колебания гироскопа, получим:

$$\begin{cases} H (\dot{\vartheta} + \omega_3 \cos \varphi \sin \psi) = 0; & (2.1) \\ H (\dot{\psi} + \omega_3 \sin \varphi) = Pl \vartheta. & (2.2) \end{cases}$$

Выражая из (2.2) угол ϑ , дифференцируя его и подставляя в (2.1), получаем:

$$\vartheta = \frac{H (\dot{\psi} + \omega_3 \sin \varphi)}{Pl}; \quad (2.3)$$

$$\dot{\vartheta} = \frac{H \ddot{\psi}}{Pl}; \quad H \left(\frac{H \ddot{\psi}}{Pl} + \omega_3 \cos \varphi \cdot \sin \psi \right) = 0 .$$

Поскольку $H \neq 0$, то $\ddot{\psi} + \frac{Pl \omega_3}{H} \cos \varphi \cdot \sin \psi = 0$.

Полагая малым угол ψ получаем: $\psi + k^2\psi = 0$, где $k^2 = Pl\omega_3 \cos \varphi / H$.

Как известно, общим интегралом данного дифференциального уравнения является следующее выражение: $\psi = c_1 \cos kt - c_2 \sin kt$

Используя уравнение (2.3), получаем:

$$\vartheta = \frac{H}{Pl}(-c_1 k \sin kt + c_2 k \cos kt + \omega_3 \sin \varphi).$$

Перепишем полученное выражение в следующем виде:

$$\vartheta = c_2 \frac{Hk}{Pl} \cos kt - c_1 \frac{Hk}{Pl} \sin kt + \frac{H\omega_3 \sin \varphi}{Pl}.$$

Зададимся следующими начальными условиями при $t = 0$, $\vartheta = 0$, $\dot{\vartheta} = 0$, $\dot{\psi} = 0$, $\psi = \psi_0$, при которых $c_1 = \psi_0$, а $c_2 = 0$.

Используя полученные значения произвольных постоянных интегрирования, получаем:

$$\psi = \psi_0 \cos kt; \quad \vartheta = -\frac{\psi_0 Hk}{Pl} \sin kt + \frac{H\omega_3 \sin \varphi}{Pl}.$$

Анализ полученных решений показывает, что при размещении гироскопа в точке с широтой места φ точка конца вектора кинетического момента H гироскопа описывает на плоскости, перпендикулярной меридиональному направлению, эллипс, центр которого находится в плоскости местного меридиана и приподнят над горизонтом на величину $\vartheta_0 = H\omega_3 \sin \varphi / Pl$.

Траектория движения точки представлена на рис. 21, а.

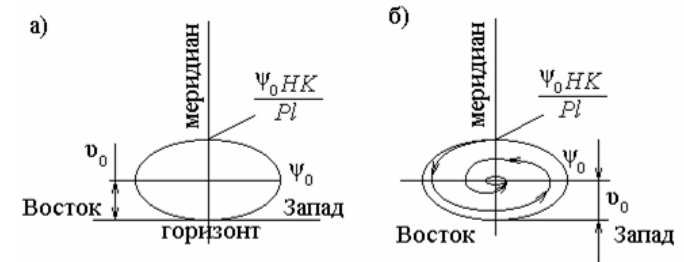


Рис. 21

Таким образом, главная ось гироскопа совершает незатухающие колебания с частотой $K = \sqrt{\omega_3 \cos \varphi Pl / H}$, центр которых приподнят над плоскостью местного горизонта на величину $\vartheta_0 = H\omega_3 \sin \varphi / Pl$, при од-

новременной прецессии вокруг оси OZ_n , обусловленной конечностью угла $\vartheta_0 \neq 0$.

Скорость прецессии, при малом угле приподнятости ϑ_0 составит

$$\omega_{\text{пр}} = Pl\vartheta_0 / H = \omega_3 \sin \varphi, \quad (2.4)$$

т.е. главная ось гироскопа отслеживает кажущийся уход плоскости местного меридиана, обусловленный суточным вращением Земли.

Незатухающие колебания главной оси гирокомпаса приводят к невозможности использования прибора для измерения курсовых углов. Необходимо демпфирование колебаний, т.е. введение вязкого трения по осям подвижности. В случае введения демпфирования уравнения движения гироскопа приобретают следующий вид:

$\psi = \psi_0 e^{-t/T} \cos kt$, $\vartheta = \vartheta_{10} e^{-t/T} \sin kt + \vartheta_0$, где $\vartheta_{10} = -\psi_0 HK / Pl$; T – постоянная времени затухания демпфированных колебаний. Она определяется, прежде всего, коэффициентом вязкого трения в демпфирующем устройстве. Движение конца главной оси гироскопа на картинной плоскости с учетом демпфирования показано на рис. 21, б.

Соотношение (2.4) справедливо лишь для случая малых значений ϑ , т.е. при использовании гирокомпаса в низких широтах. Там точность прибора оказывается очень высокой. В высоких широтах $\sin \vartheta \neq \vartheta$, что, в соответствии с соотношением (2.4), приводит к ошибкам слежения оси гироскопа за уходящей плоскостью меридиана. Для уменьшения этих ошибок необходимо изменить значение момента маятника M_k , что вызовет усложнение прибора. Кроме того, на широтах, близких к 90° ($\varphi = 90$), направляющий момент гирокомпаса $H\omega_3 \cos \varphi \cos \vartheta \sin \psi$, обуславливающий чувствительность гирокомпаса к отклонению его главной оси от плоскости меридиана, становится близким к нулю. Это обстоятельство приводит к неработоспособности трехстепенных маятниковых гирокомпасов в высоких широтах, так как величины моментов внешних сил по оси OZ_n гирокомпаса начинают преобладать над величиной направляющего момента и гирокомпас теряет чувствительность к плоскости меридиана.

Кроме упомянутой причины возникновения ошибок имеется и еще одна. Дело в том, что, будучи маятниковым прибором, гирокомпас чувствителен к линейным ускорениям движения основания, т.е. ухудшает точность работы при эволюциях основания.

Для уменьшения ошибок от воздействия на гирокомпас линейных ускорений, в частности, возникающих в периоды маневрирования объекта, период собственных колебаний гирокомпаса делают равным периоду Шу-

лера, т.е. $84,4$ мин и определяемым соотношением $T = 2\pi / K = 2\pi \sqrt{H / \omega_3 \cos \varphi Pl}$.

Отсюда именно и следует, что на каждой широте места (с изменением широты место меняется $\cos \varphi$) необходимо посредством специальной системы регулировать параметры маятника таким образом, чтобы обеспечить отношение H/Pl , гарантирующее $T = 84,4$ мин. Это условие называется условием инвариантности (невозмущаемости) гирокомпаса по отношению к линейным ускорениям.

Большая постоянная времени невозмущаемого гирокомпаса означает длительность его времени $t_{\text{гот}}$ готовности к работе. В самом деле, если принять время установления переходного процесса $t_{\text{гот}} = 5T$, то время готовности к работе составит $t_{\text{гот}} = 84,3 \text{ м} \times 5 \approx 420 \text{ мин} = 6 \text{ ч}$. Тем самым гирокомпас должен включаться задолго до начала движения основания, либо до запуска выставляться в плоскости меридиана принудительным способом. В целом кажущаяся простота создания невозмущаемого гирокомпаса с периодом Шулера обманчива. Достаточно сказать, что в рассмотренной здесь схеме трехстепенного маятникового гирокомпаса для получения периода Шулера плечо l маятника должно быть равно радиусу R Земли.

2.2. Курсовые гироскопы

Курсовой гироскоп, равно как и гирокомпас, предназначен для измерения углов поворота объектов в плоскости местного горизонта относительно направления на север. Это корректируемый гироскоп. Его главная ось в процессе работы постоянно приводится в плоскость местного меридиана посредством специальной системы коррекции, называемой азимутальной. Приведение осуществляется посредством использования сигналов от радиокompаса, от системы астрокоррекции или от магнитного компаса, называемых гиромагнитными компасами.

Помимо курсового гироскопа и гирокомпаса в семейство гироскопов направления входят еще и азимутальные. Они измеряют угол между направлением движения объекта и любым направлением, выбранным за начальное. Очевидно, что такие гироскопы в отличие от гирокомпасов не обладают чувствительностью к отклонению направления вектора кинетического момента \vec{H} от направления на север. Азимутальная система коррекции таких гироскопов призвана лишь компенсировать кажущийся "уход", обусловленный вращением Земли. Такие курсовые гироскопы называют гиropolукомпасами или гиropolукурсозаказателями.

Точность измерения курсового угла посредством курсового гироскопа в значительной мере зависит от его конструкции. С целью выявления причин ошибок измерения курсового угла рассмотрим трехстепенной гироскоп, представленный на рис.22.

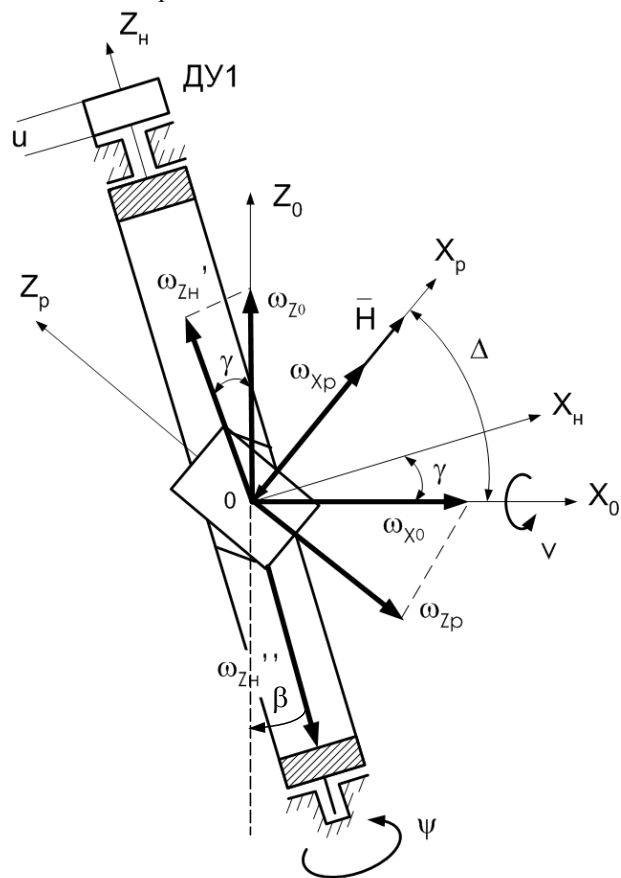


Рис. 22

Здесь использованы следующие системы координат: OX_0, OY_0, OZ_0 – система координат, связанная с основанием, поворачивающимся вокруг осей X_0 и Z_0 со скоростями ω_{z_0} и ω_{x_0} соответственно; OX_H, OY_H, OZ_H – система координат, связанная с наружной рамкой гироскопа; OX_p, OY_p, OZ_p – система координат, связанная с гиразулом.

Допустим, что ось OZ_0 основания вертикальна, а его оси OY_0 и OX_0 лежат в плоскости местного горизонта. Положим также, что наружная рамка

гироскопа не вертикальна, т.е. ее ось OZ_n повернута вокруг оси OY_n на угол γ , и что гиروزел повернут вокруг той же оси OY_n на угол, отличный от γ и равный Δ .

Измерительной осью прибора является ось OZ_n . Сигнал, пропорциональный курсовому углу, снимается с датчика угла ДУ1, смонтированного на этой оси.

В идеальном случае измерительная ось прибора OZ_n совмещена с осью основания OZ_0 , а его главная ось OX_p лежит в плоскости местного горизонта. Тогда сигнал, снимаемый с датчика угла ДУ1 равен

$$U = K_1 \psi = K \int_0^t \omega_{ZO} dt, \text{ где } \omega_{ZO} - \text{угловая скорость поворота основания}$$

вокруг вертикальной оси. В ситуации, соответствующей рис. 22, выходной сигнал ДУ определяется результирующей $\omega_{\Sigma Z_n} = \omega_{Z_n}' + \omega_{Z_n}''$, равной сумме проекций угловых скоростей поворота основания вокруг осей OZ_0 и

$$OX_0 \text{ на измерительную ось } OZ_n \text{ т.е. } U = K_1 \int_0^t \omega_{\Sigma Z_n} dt, \text{ где } \omega_{\Sigma Z_n} - \text{результу}$$

тирующая проекция угловых скоростей. Величина $\omega_{\Sigma Z_n}$ определяется из следующих соображений. При повороте основания вокруг оси OZ_0 вместе с ним поворачивается корпус датчика угла со скоростью $\omega_{Z_n}' = \omega_{ZO} \cos \gamma$,

а его ротор (если это электрический индукционный датчик) или его движок (если датчик потенциометрический) остаются неподвижными. Несколько сложнее обстоят дела с проектированием вектора ω_{X_0} на ось

OZ_n . Спроецируем сначала ω_{X_0} на ось OZ_p и получим $\omega_{Z_p} = \omega_{X_0} \sin \Delta$.

Эта составляющая должна вызвать появление гироскопического момента $M_Y = H \omega_{Z_p} = H \omega_{X_0} \sin \Delta$. Как следует из рис.22, движение гироскопа вокруг оси OZ_p вследствие воздействия угловой скорости ω_{X_0} невозможно.

Оно возможно лишь вокруг оси OZ_n . Обозначим составляющую скорости, вызывающую это движение, через ω_{Z_n}'' . Поскольку ω_{Z_n}'' , равно как и ω_{Z_p} , обусловлены одной и той же причиной – скоростью ω_{X_0} , – то вызываемое ими следствие – гироскопический момент – должно количественно оцениваться одинаково, т. е. $H \omega_{Z_n} = H \omega_{Z_p}$.

Отсюда

$$H \omega_{X_0} \sin \Delta = \overline{H} \omega_{Z_n}'' = H \omega_{Z_n}'' \sin(\overline{H} \wedge \overline{\omega_{Z_p}}) = H \omega_{Z_n} \sin(90^\circ + \Delta - \gamma) =$$

$$= H\omega_{ZH}'' \cos(\Delta - \gamma).$$

Таким образом, результирующая проекция угловых скоростей поворота основания на ось чувствительности при $\gamma \neq 0$ и $\Delta \neq 0$ определяется соотношением $\omega_{\Sigma Z_p} = \omega_{ZO} \cos \gamma - \omega_{XO} \sin \Delta / \cos(\Delta - \gamma)$ тогда сигнал, снимаемый с датчика угла ДУ1,

$$U = K_1 \int_0^t [\omega_{ZO} \cos \gamma - \omega_{XO} \sin \Delta / \cos(\Delta - \gamma)] dt,$$

т.е. курсовой гироскоп при $\gamma \neq 0$ и $\Delta \neq 0$ становится чувствительным к движениям основания не только вокруг вертикальной оси OZ_0 – курсовое движение, – но и вокруг горизонтальной оси OX_0 . Погрешность определения угла в этом случае составит

$$\begin{aligned} \Delta U &= K_1 \Delta \psi = K_1 \int_0^t [\omega_{ZO} - \omega_{ZO} \cos \gamma + \omega_{XO} \sin \Delta / \cos(\Delta - \gamma)] dt = \\ &= K_1 \int_0^t [\omega_{ZO} (1 - \cos \gamma) + \omega_{XO} \sin \Delta / \cos(\Delta - \gamma)] dt. \end{aligned}$$

Как следует из полученного соотношения, погрешность измерения угла в большей мере зависит от угла Δ , чем от угла γ , т.е. от негоризонтальности главной оси гироскопа больше, нежели от угла отклонения оси наружной рамки OZ_n от оси основания OZ_0 , т.е. от вертикали.

В соответствии с изложенным, в курсовых гироскопах предпочтительнее система коррекции, обеспечивающая горизонтирование главной оси. Эта процедура называется еще нивелированием и осуществляется системой маятниковой коррекции. Желательно также и обеспечить вертикальность оси наружной рамки.

На рис.23 представлены два варианта нивелирования главной оси гироскопа. В обоих случаях кожух гироскопа – гиروزел – оснащен маятниковым датчиком M , фиксирующим отклонение главной главной оси \bar{H} гироскопа от плоскости местного горизонта.

При отклонении с маятникового устройства снимается сигнал U , поступающий на моментный датчик $МД$, который развивает корректирующий момент, заставляющий гироскоп прецессирировать в сторону обнуления U , т.е. в сторону совмещения вектора кинетического момента \bar{H} гироскопа с плоскостью местного горизонта. Поскольку прецессионное движение безынерционно, то гироскоп останавливается при $U = 0$, т.е. при горизонтальном положении \bar{H} .

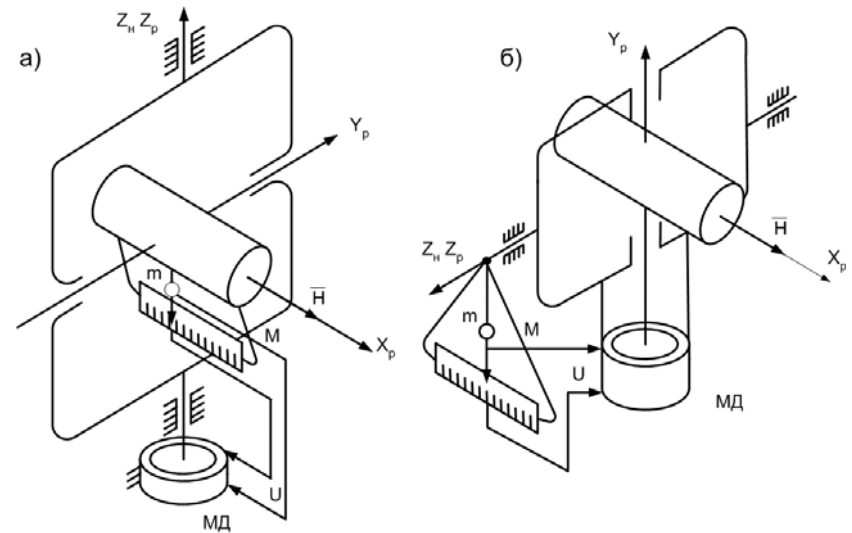


Рис. 23

Отличие схем на рис.23, *а* и *б* состоит в том, что в схеме на рис.23, *б* одновременно с горизонтированием главной оси гироскопа происходит приведение измерительной оси в вертикальное положение.

Схема курсового гироскопа с нивелированием главной оси гироскопа и ее азимутальной коррекцией посредством магнитного компаса представлена на рис. 24.

Нивелирование главной оси гироскопа здесь осуществляется посредством маятника M , усилителя U_1 и моментного датчика MD_2 . Таким образом, главная ось гироскопа всегда совмещена с плоскостью местного горизонта.

Азимутальная коррекция осуществляется посредством следящей системы, состоящей из устройства сравнения $Ус$, усилителя U_2 , моментного датчика MD_1 , прецессирующего гироскопа и датчика угла $ДУ_1$. Эта система вынуждает главную ось гироскопа отслеживать направление магнитной стрелки. При этом их датчики $ДУ_1$ и $ДУ_2$ устанавливаются так, что когда согласованное направление является направлением на север, снимаемые с них сигналы равны нулю: $U_1 = U_2 = 0$.

При этом сигнал сравнивающего устройства $\Delta U = 0$ и $U_3 = 0$, корректирующий момент $M_{дв} = 0$, ось OX_p гироскопа неподвижна. Теперь при поворотах основания на угол ψ вместе с основанием поворачиваются корпуса датчиков углов $ДУ_1$ и $ДУ_2$ соответственно на тот же самый угол $\psi = \psi_{мс}$. Их роторы (или движки) остаются неподвижными в силу непод-

вижности главной оси гироскопа и магнитной стрелки, удерживающей направление на север. В результате с датчиков углов снимаются одинаковые сигналы $U_1 = U_2 = K_1\psi$, являющиеся мерой угла поворота основания.

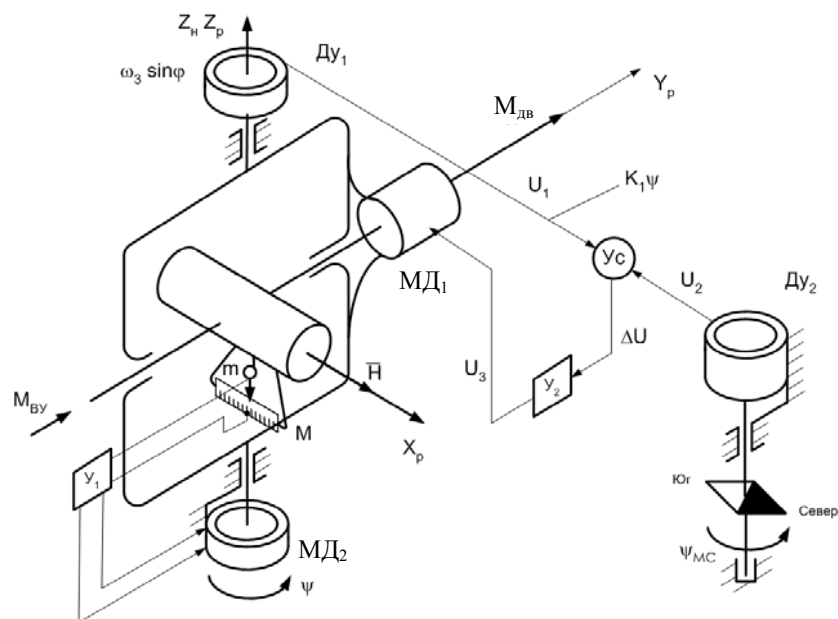


Рис. 24

В случае ухода главной оси гироскопа в горизонтальной плоскости от согласованного исходного положения при неподвижном основании на угол, например, $\psi_r \neq 0$, вследствие сохранения магнитной стрелкой направления на север, сигнал датчика ДУ₂ будет равен нулю, $\psi_{mc} = 0$, т.е. $U_2 = K\psi_{mc} = 0$. Вместе с тем $U_1 \neq 0$, так как $U_1 = K\psi_r$, а $\psi_r \neq 0$.

В результате с выхода усилителя У₂ будет сниматься сигнал U_3 , который обуславливает на моментном датчике МД₁ момент M_{dv} , заставляющий гироскоп прецессировать в сторону обнуления ΔU , т.е. в сторону совмещения направления вектора \vec{H} с направлением магнитной стрелки. Прецессия прекращается, и главная ось останавливается, как только это совмещение происходит.

Отклонение магнитной стрелки от плоскости меридиана ($\Delta\psi_{mc} \neq 0$) обуславливает появление ложных сигналов коррекции, вызывающих отклонение главной оси гироскопа от направления на север, в сторону отклонения магнитной стрелки, что будет являться ошибкой в измерении курсового угла ψ поворота основания.

Здесь возникает вопрос о том, зачем же нужен курсовой гироскоп, когда все-равно необходима магнитная стрелка, имеющая датчик ДУ₂, вырабатывающий сигнал U_2 , являющийся мерой отклонения основания от направления на север. Дело в том, что при периодических отклонениях магнитной стрелки в силу возмущающих факторов и магнитных аномалий на угол $\Delta\psi_{mc}$ от направления на север гироскоп при оптимально выбранных характеристиках системы азимутальной коррекции не успевает воспроизвести величину ошибки, равную $\Delta\psi_{mc}$. Это обеспечивается использованием в цепи коррекции инерционных элементов запаздывания, выбором минимальных скоростей прецессии гироскопа под действием момента М_{д1} и даже режима периодического отключения цепи коррекции на время, за которое "уходы" гироскопа могут превысить заданные пределы погрешности измерения курсового угла.

Дополнительно на оси магнитной стрелки нельзя размещать другие устройства, имеющие большие нагрузочные моменты (например, сельсины датчики для различных потребителей сигналов курсового угла на объекте, или мощные потенциометрические устройства и другие, нагружающие ось возмущающими моментами). В курсовом гироскопе такая возможность имеется, так как эти моменты будут скомпенсированы двигателем МД₂ системы горизонтальной коррекции.

Уравнения движения курсового гироскопа получим при следующих условиях:

- угол поворота основания $\psi \neq 0$,
- угол отклонения магнитной стрелки от направления на север $\Delta\psi_{mc} \neq 0$,
- угол поворота главной оси гироскопа вокруг оси OZ_n относительно основания $\psi_g \neq 0$ и $\psi_g < \Delta\psi_{mc}$

Тогда сигналы, снимаемые с датчиков углов ДУ₁ и ДУ₂, соответственно равны $U_1 = K_1(\psi - \psi_g)$ и $U_2 = K_1(\psi - \Delta\psi_{mc})$. На выходе устройства сравнения Ус формируется сигнал $\Delta U = U_1 - U_2 = K_1(\Delta\psi_{mc} - \psi_g)$ что приводит к сигналу $U_3 = K_y K_1(\Delta\psi_{mc} - \psi_g)$ на входе моментного датчика МД₁, где K_y – коэффициент усилителя У₂. U_3 поступает на моментный датчик МД₁ и заставляет его развивать момент

$M_{\text{дв}} = K_{\text{мд}} K_{\text{у}} K_{\text{л}} (\Delta \psi_{\text{мс}} - \psi_{\text{г}})$, вынуждающий главную ось гироскопа прецессировать в направлении согласования с магнитной стрелкой. Помимо $M_{\text{дв}}$ по этой оси может действовать и момент внешних сил $M_{\text{вв}}$. Если предположить совпадение направлений этих моментов, то результирующий момент, вызывающий прецессию, равен $M_{\Sigma \text{у}} = M_{\text{дв}} + M_{\text{вв}}$.

Под действием этого суммарного момента гироскоп прецессирует вокруг оси $OZ_{\text{н}}$ со скоростью $\dot{\psi}_{\text{г}}$.

Момент $M_{\Sigma \text{у}}$ должен компенсироваться суммарным гироскопическим моментом. Он создается угловой скоростью $\dot{\psi}_{\text{г}}$, а также проекцией угловой скорости вращения Земли $\omega_3 \sin \varphi$ на ось $OZ_{\text{н}}$. В соответствии с рис.22 уравнение равновесия моментов, предположив, что трение в подвесе по этой оси равно нулю, имеет следующий вид:

$$H(\dot{\psi}_{\text{г}} + \omega_3 \sin \varphi) = K_{\text{мд}} K_{\text{у}} K_{\text{л}} (-\psi_{\text{г}} + \Delta \psi_{\text{мс}}) + M_{\text{вв}}$$

Для простоты записи обозначим $\omega_B = \omega_3 \sin \varphi$ - скорость видимого ухода главной оси гироскопа из плоскости местного меридиана. Тогда

или

$$H(\dot{\psi}_{\text{г}} + \omega_B) = K_{\text{мд}} K_{\text{у}} K_{\text{л}} (\Delta \psi_{\text{мс}} - \psi_{\text{г}}) + M_{\text{вв}} \dot{\psi}_{\text{г}} + K_{\text{мд}} K_{\text{у}} K_{\text{л}} \psi_{\text{г}} = K_{\text{мд}} K_{\text{у}} K_{\text{л}} \Delta \psi_{\text{мс}} - H\omega_B + M_{\text{вв}};$$

или

$$T\dot{\psi}_{\text{г}} + \psi_{\text{г}} = \Delta \psi_{\text{мс}} + T\left(-\omega_B + \frac{M_{\text{вв}}}{H}\right), \quad \text{где}$$

$T = \frac{H}{K_{\text{мд}} K_{\text{у}} K_{\text{л}}}$ - постоянная времени контура горизонтальной коррекции.

При составлении уравнения движение курсового гироскопа следует помнить, что цепь азимутальной коррекции представляет собой замкнутый устойчивый следящий контур, что обеспечивается соответствующим подключением концов, подводящих напряжение к моментному датчику.

В идеальном случае контур азимутальной коррекции совмещает по направлению главную ось гироскопа с осью магнитной стрелки, т.е.

$$\psi_{\text{г}} = \Delta \psi_{\text{мс}}$$

В неидеализированной ситуации в установившемся режиме, $\dot{\psi}_\Gamma = 0$,

$$\psi_\Gamma = \Delta\psi_{MC} + T \left(\frac{M_{BY}}{H} - \omega_B \right) \text{ т.е. имеет место погрешность отсле-}$$

живания главной осью гироскопа положения оси магнитной стрелки. Очевидно, что эта погрешность уменьшается с уменьшением постоянной времени T контура азимутальной коррекции. Это может быть достигнуто либо уменьшением H , либо увеличением коэффициента передачи контура, либо воздействием на оба эти параметра одновременно. Так может быть уменьшена погрешность, вносимая видимым уходом гироскопа и моментами внешних сил.

Помимо рассмотренных источников ошибок, погрешности в измерении курсового угла зависят также и от погрешностей ориентации магнитной стрелки. Это следует из соотношения

$$U_1 = K_1(\psi - \psi_\Gamma) = K_1(\psi - \Delta\psi_{MC}) \text{ если пренебречь составляющей } T \left(\frac{M_{BY}}{H} - \omega_B \right).$$

При установке курсового гироскопа на подвижном основании ось магнитной стрелки колеблется относительно направления на магнитный полюс Земли, т.е. $\Delta\psi_{MC} \neq 0$ что и обуславливает ошибку измерения ψ . Колебания стрелки могут быть

определены следующим образом $\Delta\psi_{MC} = \Delta\psi_{MCT} \sin vt$ где

$\Delta\psi_{MCT}$ - амплитуда колебаний стрелки, v - частота ее колебаний.

Система азимутальной коррекции вынуждает главную ось гироскопа отслеживать направление магнитной стрелки. При этом уравнение движе-

$$\text{ния главной оси гироскопа при } T \left(\frac{M_{BY}}{H} - \omega_B \right) = 0 \text{ имеет вид}$$

$$T\ddot{\psi}_\Gamma + \psi_\Gamma = \Delta\psi_{MC}$$

$$\text{Отсюда передаточная функция контура азимутальной коррекции } W(p)_{KK} = \psi_\Gamma(p) / \Delta\psi_{MC}(p) = 1 / (1 + Tp). \quad \text{Амплитудно-}$$

$$\text{частотная характеристика этого контура } A(\omega) = 1 / \sqrt{1 + T^2 v^2}$$

Следовательно, амплитуда вынужденных колебаний главной оси гироскопа связана с амплитудой колебаний оси магнитной стрелки простым соотношением

$$\psi_{IT} = \Delta\psi_{MCT} / \sqrt{1 + T^2 \nu^2}.$$

Таким образом, при установке курсового гироскопа на подвижном основании, движения которого возмущает магнитную стрелку, амплитуда вынужденных колебаний главной оси гироскопа может быть уменьшена соответствующим выбором постоянной времени T контура азимутальной коррекции. Очевидно, чем больше T , тем меньше динамические ошибки курсового гироскопа в определении курсового угла датчиком ДУ1.

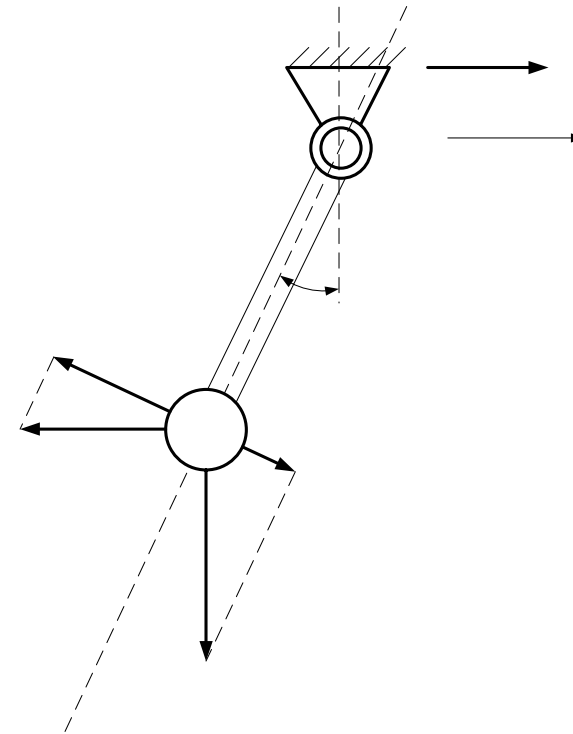
Таким образом, требования к контуру азимутальной коррекции курсового гироскопа противоречивы. Из соображений уменьшения ошибок от $M_{\text{вн}}$ и $w_{\text{в}}$ необходимо уменьшать его постоянную времени, а из соображений уменьшения динамических ошибок – увеличивать ее. Очевидно, разумным решением этого вопроса является некоторая компромиссная величина T , вполне определенная для конкретных условий применения курсового гироскопа на различных объектах. В большинстве случаев практических применений выбирают $T \approx 100$ секунд.

2.3. Гировертикали

Гировертикалями называют гироскопические устройства для определения углов поворота оснований относительно горизонтальной плоскости. В случае неподвижного основания определение угла его наклона или угла его неперпендикулярности не представляет трудностей. Оно может быть осуществлено посредством различного рода маятников, уровней, акселерометров и т.д. При этом точность определения оказывается не хуже единиц угловых секунд.

Иначе обстоит дело в случае подвижных оснований. Здесь, даже при использовании достаточно сложных технических средств, поставленная задача решается с погрешностью в десятые доли градуса.

Дело здесь в том, что такие средства как маятник, уровень, акселерометр и т.д., будучи установленным, на подвижном основании под воздействием ускорений отклоняются от положений истинной вертикали или горизонтали. Для пояснения этого положения рассмотрим маятник, установленный на основании, движущемся с постоянным ускорением a_x , рис.23.



Движение основания с ускорением приводит к тому, что сила инерции F_u отклоняет маятник от положения истинной вертикали места 1 – 1 в положении кажущейся вертикали 2 – 2. При этом угол несовпадения кажущейся и истинной вертикалей определяется следующим образом:

$$ma_X \cos \alpha = mg \sin \alpha$$

$$;$$

$$\alpha = \arctg(a_X / g)$$

При малых значениях ускорения основания $a_X \ll g$, $\alpha \approx \frac{a_X}{g}$

К счастью, режим движения объектов с постоянным ускорением не является основным. Как известно, основные режимы движения объектов – это разгон, торможение и маневрирование, сопровождающиеся центростремительным ускорением.

Наиболее продолжительным режимом движения объектов является режим управляемого движения, когда нужно измерять угловые повороты объекта вокруг его центра масс. Такое движение сопровождается обычно угловыми колебаниями объекта, что приводит к действию знакопеременных ускорений на установленные на нем измерительные приборы. Очевидно, что чувствительные элементы маятника, уровня или акселерометра

при колебаниях основания не могут занимать установившегося положения. Так в случае маятника в каждый момент времени его положение определяется очевидным соотношением $\alpha = \alpha_m \sin vt$, где α_m - амплитуда колебаний маятника относительно установившегося состояния (кажущийся или истинной вертикали); V - частота колебаний основания. Тем самым затрудняется возможность использования маятника для точного измерения углового поворота оснований.

Как было показано ранее, в идеализированных трехстепенных свободных гироскопах отсутствует влияние колебаний основания на положение главной оси гироскопа относительно инерциального пространства. Принципиально такой гироскоп с начальной ориентацией главной оси OX_p вращения ротора по вертикали места позволяет в последующем измерять углы наклона основания. Однако, в силу наличия трения в подшипниках по осям подвеса гироскопа неидеализированные трехстепенные свободные гироскопы уходят с течением времени, т.е. их главная ось отклоняется от вертикального положения на некоторый угол, увеличивающийся с течением времени. Это исключает возможность применения трехстепенных свободных гироскопов для измерений наклонов оснований при большом времени работы. Кроме того, при движении объекта положение вертикали места изменяется и становится несоответствующим начальной ориентации гироскопа.

Решением сформулированной таким образом задачи может быть комплексирование в рамках одной измерительной системы гироскопа с маятником, уровнем или акселерометром. Последние являются чувствительными элементами систем коррекции положения главной оси гироскопа, т.е. совмещение ее с местной вертикалью.

Существует множество реализаций гировертикалей. Ниже рассматриваются основные.

2.3.1. Гировертикаль с маятниковой коррекцией

Схема гировертикали с маятниковой коррекцией показана на рис.24.

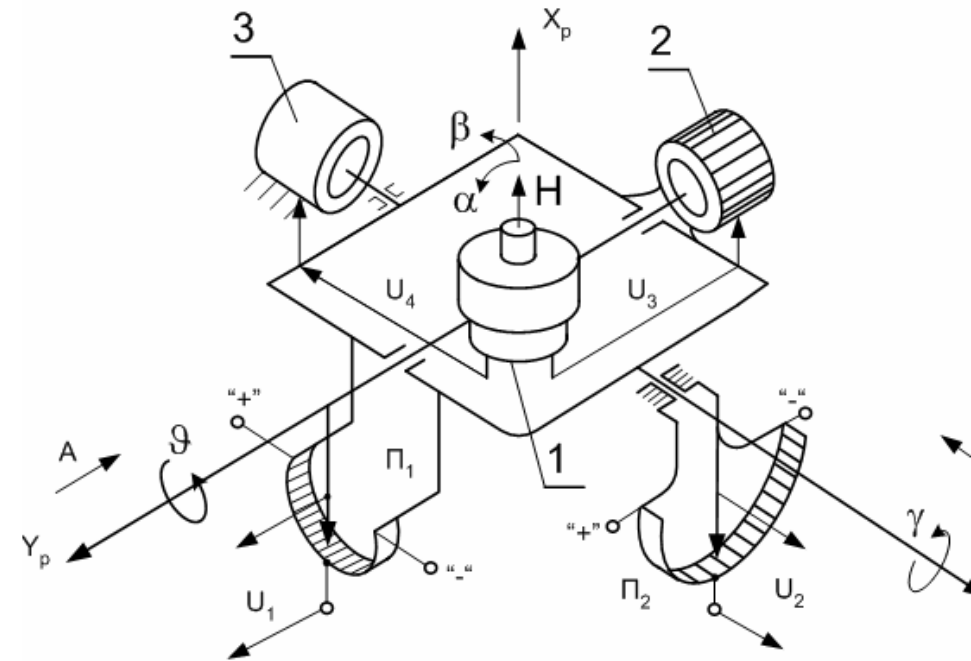


Рис. 24

Гировертикаль состоит из трехстепенного астатического гироскопа; двухплоскостного маятникового устройства 1, связанного с кожухом гироскопа; двух моментных датчиков 2 и 3; а также двух, например, потенциометрических преобразователей Π_1 и Π_2 угловых перемещений в электрический сигнал.

Углы α и β определяют отклонение главной оси гироскопа от положения истинной вертикали, а углы γ и ν являются углами отклонения основания от горизонтальной плоскости.

В идеализированном случае главная ось гироскопа совмещена с местной вертикалью, т.е. углы $\alpha = 0$ и $\beta = 0$. Эта ситуация обеспечивается работой системы маятниковой коррекции. В самом деле, при уходе оси гироскопа от вертикального положения, например при отклонении ее на угол $\alpha \neq 0$ в соответствии с рис.24, с маятникового устройства, рис.25, снимается сигнал $U_3 \neq 0$, формируемый в соответствии с рисунком.

Здесь поворот giroузла на угол α приводит к повороту корпуса потенциометра П на тот же самый угол. Движок потенциометра Д, будучи связан с маятником, остается совмещенным с вертикалью. В результате с потенциометра П снимается сигнал $U_3 = K\alpha$. Этот сигнал поступает на моментальный датчик 2, который и прикладывает к giroузлу относительно внутренней рамки момент по оси OY_p , направленной так, что он заставляет главную ось прецессировать вокруг оси OZ_H в сторону уменьшения U_3 , т.е. в сторону обнуления угла α . Прецессия прекращается в момент $\alpha = 0$, т.е. в момент прихода главной оси гироскопа в вертикальное положение. Аналогично корректируется прибор и по углу β с той лишь разницей, что корректирующий момент здесь прикладывается моментным датчиком 3 по оси OZ_H к наружной рамке относительно основания по сигналу $U_4 = k\beta$ маятникового устройства 1.

Вертикальность главной оси гироскопа позволяет измерять углы наклона объекта. Положим, что гироскоп установлен на объекте так, что его оси OZ_H и OY_p совмещены соответственно с его продольной и поперечной осями. Тогда при повороте объекта вокруг оси OZ_H на угол крена γ поворачивается на тот же угол и корпус жестко связанного с основанием потенциометра П2. Его движок при этом движении основания остается неподвижным в силу сохранения неизменным направления кинетического момента Н. В результате с потенциометрического преобразователя П2 снимается сигнал $U_2 = k\gamma$, пропорциональный углу крена.

При повороте объекта вокруг оси OY_p на угол тангажа ϑ вместе с основанием поворачивается и наружная рамка гироскопа, а также корпус связанного с ней потенциометра П1 на угол ϑ . При этом движении основания движок потенциометра П1 остается неподвижным в силу сохранения неизменным направления кинетического момента Н. В результате с потенциометрического преобразователя П1 снимается сигнал $U_1 = k\vartheta$, пропорциональный углу тангажа.

Таким образом, идеализированная гировертикаль позволяет

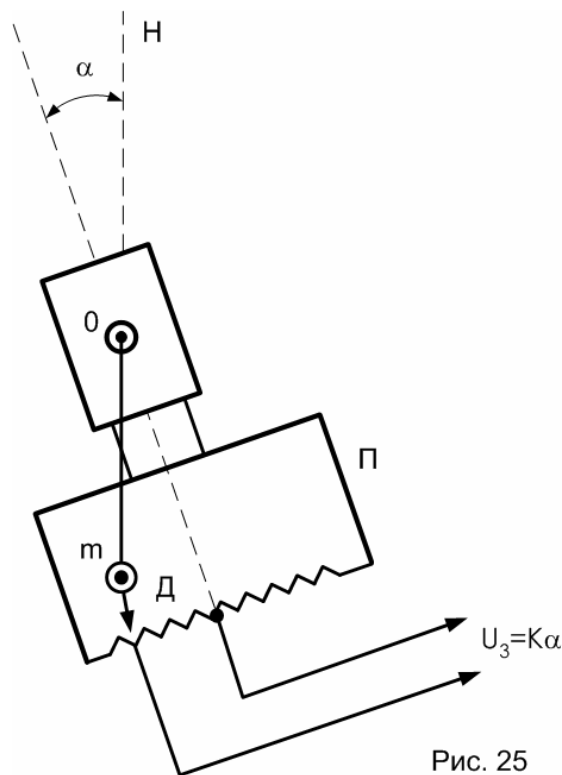


Рис. 25

измерять углы отклонения объекта от горизонтальной плоскости вокруг двух ортогональных осей.

В неидеализированных гировертикалях главная ось гироскопа оказывается несовпадающей с местной вертикалью, т.е. определяющие ее положение углы $\alpha \neq 0$ и $\beta \neq 0$. Это приводит к искажению информации об углах поворота объекта, поскольку, как это следует из рис.24, в общем случае $U_1 = k(\nu - \beta)$ и $U_2 = k(\gamma - \alpha)$. Если не учитывать других погрешностей измерения, то ошибки гировертикали будут полностью определяться углами α и β .

Как следует из изложенного ранее, углы α и β являются следствием отклонения маятника от истинной вертикали при действии линейных ускорений, обусловленных движением объекта.

Для анализа ошибок гировертикали составим уравнения ее движения. При этом пренебрежем инерционными членами в силу незначительности влияния нутационных колебаний на работу гировертикали. Учтем лишь ускорения движения основания a_z и a_y , моменты внешних сил подвеса M_{vy} и M_{vz} , а также кажущиеся уходы главной оси гироскопа из – за суточного вращения Земли.

Найдем сначала зависимость сигналов, снимаемых с потенциометров П1 и П2, от углов α и β , а также от ускорений движения основания a_y и a_z .

Состояния маятниковых датчиков, например в соответствии со схемой на рис.24 представлены на рис.26.

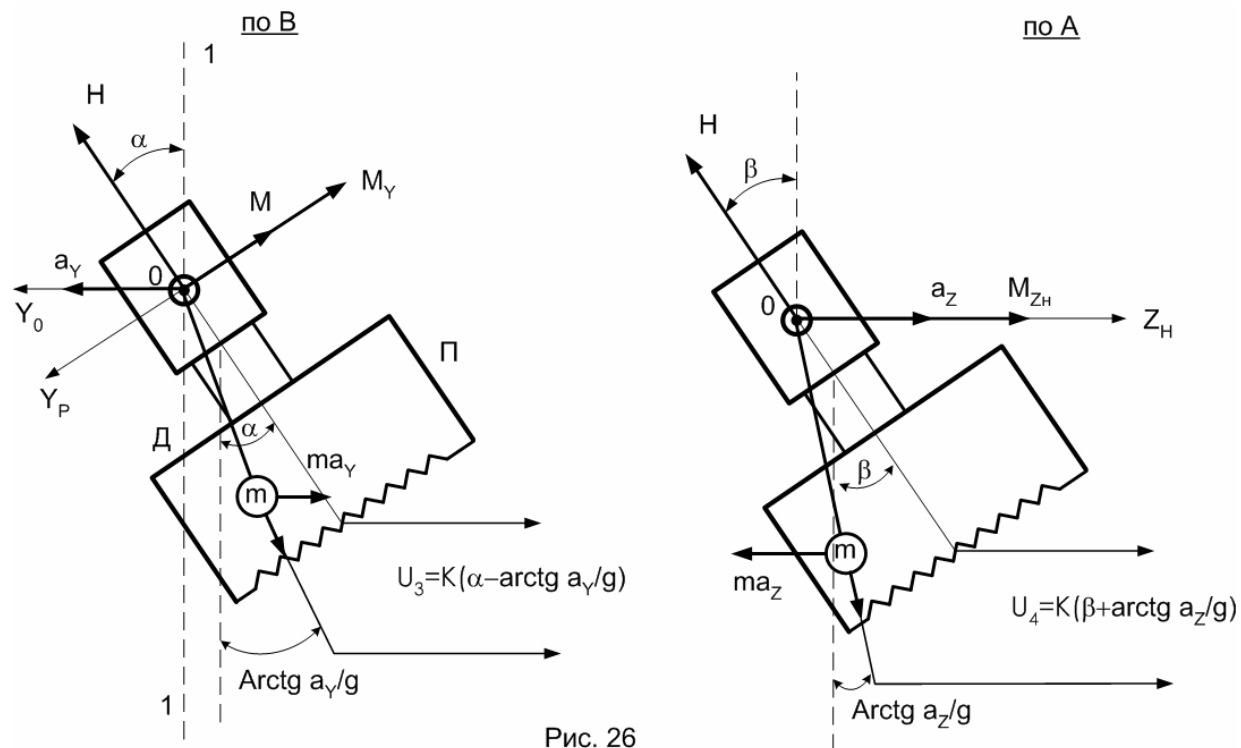


Рис. 26

При этом рис. 26, в случае "В" иллюстрирует схему формирования сигнала U_3 . Здесь вместе с гиروزлом от вертикали 1 – 1 на угол α отклонен и корпус потенциометра П. Дополнительно, в силу действия на маятник ускорения a_y происходит отклонение от вертикали в ту же сторону и движка потенциометра. В результате с потенциметрического преобразователя снимается сигнал U_3 , пропорциональный разности углов поворота

корпуса потенциометра и движка, т.е. $U_3 = K \left(\alpha - \arctg \frac{a_y}{g} \right)$

В случае, соответствующем рис.26А гиروزел повернут вокруг оси OY_p от вертикали 1 – 1 на угол β в положительном направлении. К тому же вследствие движения основания в силу действия на маятник ускорения a_z движок потенциометра отклоняется от вертикали в отрицательном направлении на угол $-\arctg \frac{a_z}{g}$. В результате с потенциметрического

$$\begin{array}{ccccccc} \text{преобразователя} & & \Pi & & \text{снимается} & & \text{сигнал} \\ U_4 = K \left(\beta - \left(-\operatorname{arctg} \frac{a_z}{g} \right) \right) & = & K \left(\beta + \operatorname{arctg} \frac{a_z}{g} \right) \end{array}$$

Сигналы U_3 и U_4 поступают на моментные датчики 2 и 3 соответственно (см. рис.24). Последние развивают корректирующие моменты

$$M_Y = K_{MD} K \left(\alpha - \operatorname{arctg} \frac{a_y}{g} \right)$$

$$M_{ZH} = K_{MD} K \left(\beta + \operatorname{arctg} \frac{a_y}{g} \right)$$

направленные так, что обусловленная ими прецессия гиросула должна обнулять сигналы U_3 и U_4 , т.е. совмещать средние точки намотки потенциометров с движками. Направления M_y и M_{ZH} показаны на схеме рис.26. Положим, что моменты внешних сил M_{By} и M_{Bz} действуют согласно с направлением осей. Тогда могут быть составлены уравнения моментов вокруг осей OY_p и OZ_H в посылке, что скорости кажущегося ухода ω_{BY} и ω_{BZ} совпадают по направлению с соответствующими скоростями прецессий:

- уравнение моментов относительно оси OY_p

$$H(\dot{\alpha} + \omega_{BZ}) = -M_{KY} + M_{BY} = -K_{MD} K \left(\alpha - \operatorname{arctg} \frac{a_y}{g} \right) + M_{BY}$$

- уравнение моментов относительно оси OZ_H

$$-H(\dot{\beta} - \omega_{BY}) = M_{KZ} + M_{BZ} = K_{MD} K \left(\beta + \operatorname{arctg} \frac{a_z}{g} \right) + M_{BZ}$$

Отсюда уравнения движения главной оси гироскопа имеют вид:

$$H\dot{\alpha} + K_{MD} K \alpha = K_{MD} K \operatorname{arctg} \frac{a_y}{g} + M_{BY} - H\omega_{BZ};$$

$$H\dot{\beta} + K_{MD} K\beta = -H\omega_{BY} - K_{MD} K \arctg \frac{a_Z}{g} + H\omega_{BY} - M_{BZ}$$

Введя понятие постоянной времени, $T = \frac{H}{K_{MD} K}$, получим следующую систему уравнений:

$$T\dot{\alpha} + \alpha = \arctg \frac{a_Y}{g} + T \left(\frac{M_{BY}}{H} - \omega_{BZ} \right)$$

$$T\dot{\beta} + \beta = -\arctg \frac{a_Z}{g} + T \left(\omega_{BY} - \frac{M_{BZ}}{H} \right)$$

При постоянстве правых частей полученных уравнений в установившемся режиме ошибки гировертикали равны:

$$\alpha = \arctg \frac{a_Y}{g} + T \left(\frac{M_{BY}}{H} - \omega_{BZ} \right)$$

$$\beta = -\arctg \frac{a_Z}{g} + T \left(\omega_{BY} - \frac{M_{BZ}}{H} \right)$$

Из уравнений ошибок видно, что их уменьшение связано с необходимостью снижения моментов внешних сил по осям подвеса, увеличения кинетического момента H гироскопа и уменьшения его постоянной времени T .

Последнее достигается увеличением коэффициента передачи K_{MD} в цепях маятниковой коррекции.

При отсутствии каких – либо возмущений правые части уравнений равны нулю. Тогда уравнения, определяющие собственные движения гироскопа примут вид:

$$T\dot{\alpha} + \alpha = 0; \alpha(0) = \alpha_0$$

$$T\dot{\beta} + \beta = 0; \beta(0) = \beta_0$$

Откуда получаем:

$$\alpha = \alpha_0 e^{-\frac{t}{T}} \quad \text{и} \quad \beta = \beta_0 e^{-\frac{t}{T}}$$

Таким образом, при отклонении гироскопа на углы α_0 и β_0 его приведение к вертикали происходит тем быстрее, чем меньше его постоянная времени T .

Сравнительный анализ уравнений движения курсового гироскопа и гировертикали подтверждает их одинаковость в смысле реакции гироскопа на вынуждающие движения. В самом деле, как и в случае магнитной стрелки, колебания основания, равно как и движение маятника, через цепи коррекции, обуславливает колебательное движение оси гироскопа. Соотношение амплитуд колебаний маятника α_{MT} и β_{MT} и главной оси гироскопа α_{GT} и β_{GT} определится аналогичным случаю курсового гироскопа соотношением:

$$\alpha_{GT} = \alpha_{MT} / \sqrt{1 + T^2 \nu^2} \text{ и } \beta_{GT} = \beta_{MT} / \sqrt{1 + T^2 \nu^2}$$

где ν - частота колебаний маятника.

Таким образом, динамические ошибки прибора уменьшаются с увеличением постоянной времени корректирующих контуров.

Из изложенного следует противоречивость требований к постоянной времени цепей коррекции. Обычно, в качестве компромиссного решения выбирают $T \approx 100$ секунд, удовлетворяющее наиболее широкому кругу реальных объектов.

2.3.2. Гировертикаль с механической коррекцией

Схема такой гировертикали представлена на рис.27.

Здесь трехстепенной гироскоп с вертикальной осью вращения ротора оснащен двумя полукольцами 1 и 2, являющимися маятниками с нижними точками подвеса, т. е. неустойчивыми маятниками. Каждое полукольцо имеет прорезь. В прорезях полуколец размещен палец 4, вращаемый приводом ротора гироскопа через понижающий редуктор 5. Полукольца и гиروزел уравновешены относительно осей OY_p и OZ_H посредством противовеса 3. При вертикальном положении главной оси гироскопа палец свободно вращается в прорезях полуколец, не задевая их стенок. В результате к гироскопу не прикладываются моменты внеш-

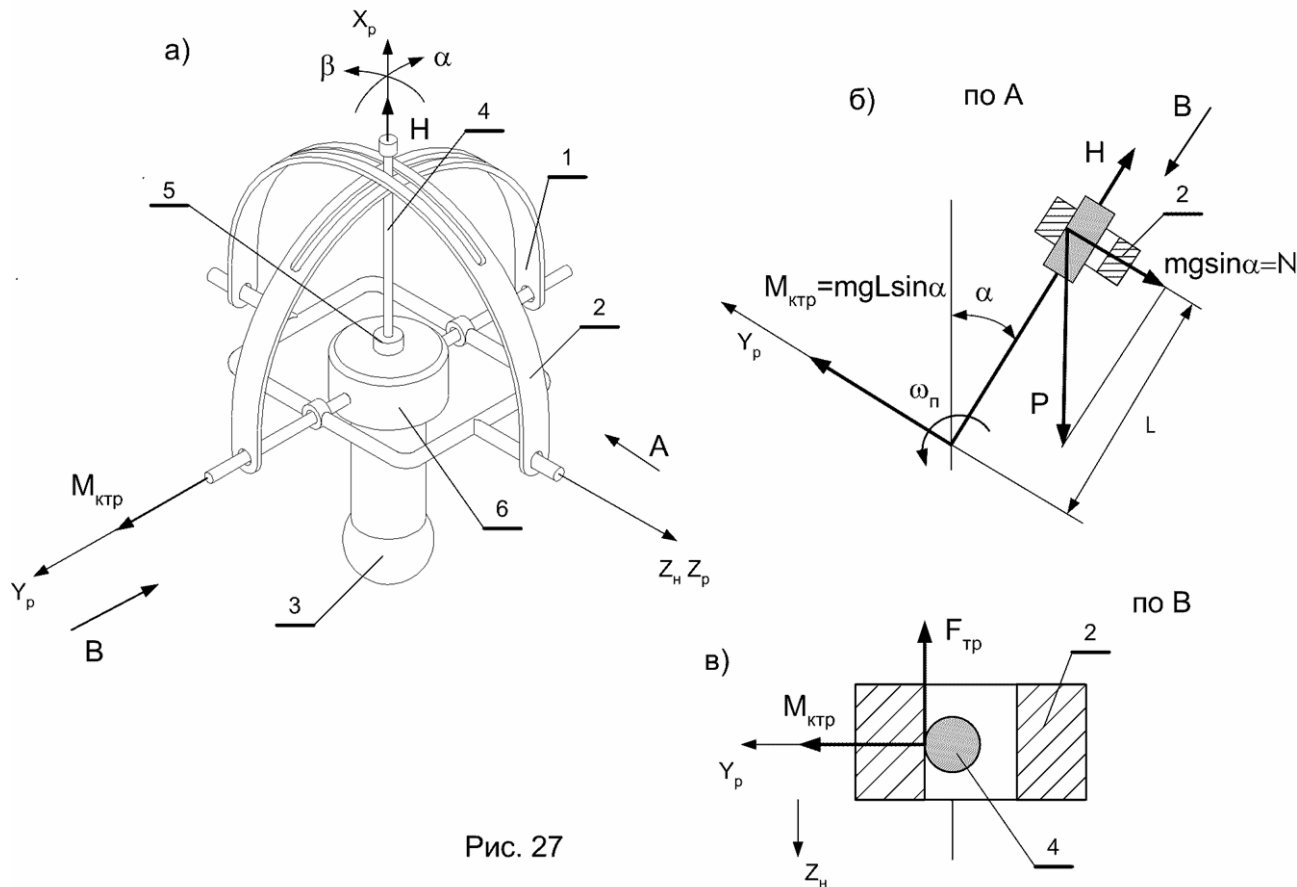


Рис. 27

них сил и его главная ось не вынуждается уходить из положения вертикали.

Если теперь главная ось гироскопа отклонилась от вертикали на угол α вокруг оси OZ_H , как показано на рис.27а и б, то полукольцо 2 "упадет" на палец и прижмется к нему. При этом момент вокруг оси OZ_H от воздействия полукольца на палец не возникает из-за того, что давление пальца уравновешивается противовесом 3. Однако возникает момент вокруг оси OY_p . Это происходит следующим образом.

Упавшее полукольцо давит на палец с силой $N = P \sin \alpha = mg \sin \alpha$, где m - масса полукольца. Сила N , будучи силой нормального давления, со стороны полукольца на палец, вызывает появление силы трения между вращающимся пальцем и полукольцом. Эта сила равна $F_{тр} = K_{тр}N$, $K_{тр}$ – коэффициент динамического трения. Направление силы трения определяется направлением вращения пальца, как показано на рис.27в. Эта сила создает момент вокруг оси OY_p , равный $M_{КТР} = K_{ТР}Nl$, направленный как показано на рис.27в.

Под действием этого момента гироскоп прецессирует вокруг оси OZ_H в сторону обнуления $M_{КТР} = K_{ТР}mgl \sin \alpha$ т.е. в сторону обнуления угла α . При $\alpha = 0$ обнуляется корректирующий момент $M_{ктр}$, ось гироскопа занимает вертикальное положение. Дальнейшее прецессионное движение прекращается.

Аналогично корректируется вертикальность главной оси гироскопа по углу β . Здесь работает полукольцо 1.

2.3.3. Гировертикали с интегральной коррекцией.

Уменьшение установившихся ошибок гировертикали, обусловленных кажущимся уходом и моментами внешних сил, возможно за счет введения интеграла в закон формирования сигнала коррекции.

Одна из возможных схем такой гировертикали показана на рис.28.

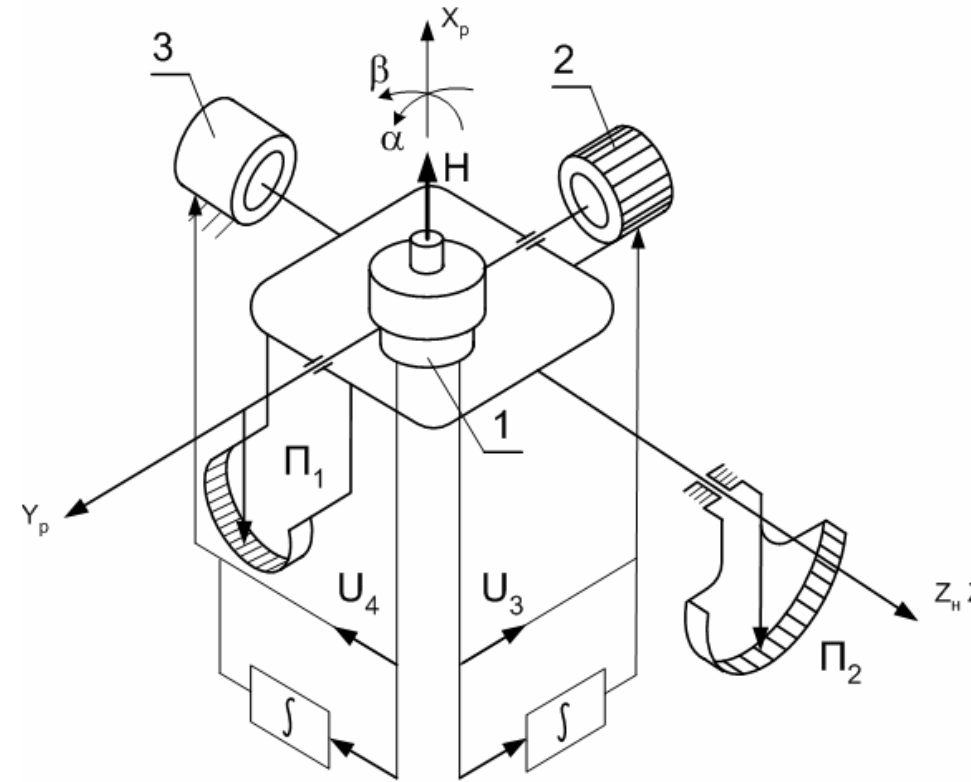


Рис. 28

Здесь использована, по существу, гировертикаль с маятниковой коррекцией, рассмотренная в разделе 2.3.1. Уравнение движения гировертикали с маятниковой коррекцией по оси OZ_H , полученное в разделе 2.3.1 имеет следующий вид:

$$H(\ddot{\alpha} + \omega_{BZ}) = -K_{MD} K_1 \left(\alpha - \arctg \frac{a_y}{g} \right) + M_{BY} \quad (*)$$

Введение интеграла в сигнал коррекции в соответствии с рис. 28, позволяет представить модифицированное уравнение (*) в виде следующего выражения (используется оператор «р»):

$$H(p\alpha + \omega_{BZ}) = -K_{MD} K_1 \left(\alpha - \arctg \frac{a_y}{g} \right) - \frac{1}{p} K_{MD} K_1 K_u \left(\alpha - \arctg \frac{a_y}{g} \right) + M_{BY}$$

где K_u - коэффициент передачи интегратора.

Отсюда в результате алгебраических преобразований получим:

$$Hp^2 \alpha - H\omega_{BZ} = -p K_{MD} K_1 \left(\alpha - \arctg \frac{\alpha_y}{g} \right) - K_{MD} K_1 K_u \left(\alpha - \arctg \frac{\alpha_y}{g} \right) + p M_{BY};$$

или

$$\left(\frac{H}{K_{MD} K_1 K_u} p^2 + \frac{1}{K_u} p + 1 \right) \alpha = \frac{1}{K_{MD} K_1 K_u} \left[K_{MD} K_1 \left(\alpha - \arctg \frac{\alpha_y}{g} \right) + M_{BY} - H\omega_{BZ} \right] p + \arctg \frac{\alpha_y}{g};$$

или

$$(T^2 p^2 + Tp + 1) \alpha = \frac{1}{K_{MD} K_1 K_u} \left[K_{MD} K_1 \left(\alpha - \arctg \frac{a_y}{g} \right) + M_{BY} - H\omega_{BZ} \right] p + \arctg \frac{a}{g} (**)$$

При $\omega_{BZ} = const$ и $M_{BY} = const$ в установившемся режиме,

т.е. при $t \rightarrow \infty (P \rightarrow 0)$ установившаяся ошибка составит:

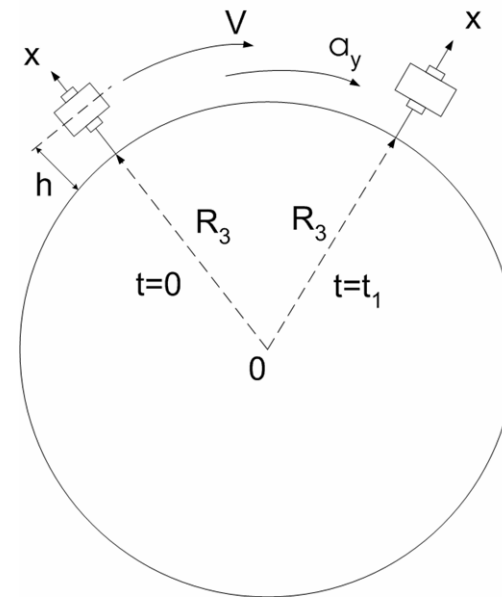
$$\alpha = \arctg \frac{a_y}{g}$$

Таким образом, введение интеграла в закон управления позволяет обнулить ошибки, вносимые видимым уходом и моментами внешних сил по осям подвеса, возникающими из-за небаланса и сил натяжения элементов конструкции (например, токоподводов). Однако, ошибки, вносимые линейными ускорениями, возникающими при движении объекта, при этом не уменьшаются.

Введение интеграла в закон управления позволяет уменьшить не только установившиеся, но и динамические ошибки такой гировертикали. Передаточная функция, как следует из (**), имеет вид:

ний $q = \sqrt{\frac{1}{T_2^2}} = \sqrt{\frac{K_{\text{мд}} K_1 K_u}{H}}$. Уменьшение динамических ошибок в

Пусть объект движется на мадой высоте h над земной поверхностью со



скоростью V и ускорением a_v . Введение интеграла в закон коррекции, как известно, обнуляет ошибки, обусловленные кажущимся уходом от суточного вращения Земли, а также от действия моментов внешних сил. По этой причине уравнение (*) преобразуется к сле-

$$\mathbf{H}\left(\dot{\boldsymbol{\alpha}} + \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{R}_3 + \mathbf{h}}\right) = -\mathbf{K}_{\mathbf{M}\mathbf{D}} \mathbf{K}_1 \left($$

Рис. 29

Введение интегратора с коэффициентом передачи K_u в канал сигнала коррекции в соответствии со схемой на рис. 28 видоизменяет уравнение и приводит к следующему уравнению:

$$H(p\alpha + \frac{V}{R_3}) = -\frac{1}{p} K_{\text{мд}} K_1 K_u (\alpha - \arctg \frac{a_y}{g}).$$

Отсюда после простых алгебраических преобразований получим

$$Hp^2 \alpha + K_{\text{мд}} K_1 K_u \alpha = K_{\text{мд}} K_1 K_u \arctg \frac{a_y}{g} - \frac{V}{R_3} Hp.$$

Полагаем: $a_y \ll g$; $\arctg \frac{a_y}{g} = \frac{a_y}{g}$ и что ось OZ_H лежит в плоскости

местного меридиана. Тогда ось OY_p совпадает с направлением вектора линейной скорости V ; направление ускорения движения основания a_y также совпадает с направлением линейной скорости. Тогда соотношение выше можно привести к следующему виду:

$$\begin{aligned} (Hp^2 + K_{\text{мд}} K_1 K_u) \alpha &= K_{\text{мд}} K_1 K_u \frac{a_y}{g} - \frac{V}{R_3} Hp = K_{\text{мд}} K_1 K_u \frac{a_y pV}{gpV} - \frac{H}{R_3} pV = \\ &= (K_{\text{мд}} K_1 K_u \frac{a_y}{gpV} - \frac{H}{R_3}) pV \end{aligned}$$

где pV — ускорение движения основания, т.е $pV = a_y$. Отсюда

$$(Hp^2 + K_{\text{мд}} K_1 K_u) \alpha = (K_{\text{мд}} K_1 K_u \frac{1}{g} - \frac{H}{R_3}) pV$$

или

$$(p^2 + q^2) \alpha = (\frac{K_{\text{мд}} K_1 K_u}{gH} - \frac{1}{R_3}) pV, \text{ где}$$

$$q = \sqrt{\frac{K_{\text{мд}} K_1 K_u}{H}} - \text{частота собственных колебаний гироскопа. При}$$

условии $pV \neq 0$ инвариантность (невозмущаемость) гировертикали к действию линейных ускорений наблюдается при условии:

$$\frac{K_{\text{мд}} K_1 K_u}{gH} - \frac{1}{R_3} = 0 \quad \text{или} \quad \frac{K_{\text{мд}} K_1 K_u}{H} = \frac{g}{R_3}.$$

Следовательно $q = \sqrt{\frac{K_{\text{мд}} K_1 K_u}{H}} = \sqrt{\frac{g}{R_3}}.$

Таким образом для обеспечения нечувствительности гировертикали к линейным ускорениям, возникающим при движении объекта, необходимо собственную частоту колебаний гировертикали выбирать из условия

$$q = \sqrt{\frac{K_{\text{мд}} K_1 K_u}{H}} = \sqrt{\frac{g}{R_3}}. \quad \text{Отсюда период колебаний такой, невоз-}$$

мущающейся линейным ускорением, вертикали определится соотношени-

ем: $T = \frac{2\pi}{g} = 2\pi \sqrt{\frac{R_3}{g}} = 84,3 \text{ мин.}$ Это условие невозмущаемости

гировертикали к линейным ускорениям движения основания было впервые сформулировано Максом Шулером. Отсюда и название «период Шулера».

Собственное движение гировертикали определяется простым соотно-

шением: $\ddot{\alpha} + q^2 \alpha = 0$. Это уравнение колебательного звена. Его решение имеет вид $\alpha = C_1 \cos(qt + \varphi)$. При нулевых начальных условиях $C_1 = 0$ и, следовательно, $\alpha = 0$. Тем самым ошибка в каждый момент времени при любых ускорениях равна нулю.

У реальных приборов имеются различные причины, обуславливающие $C_1 \neq 0$. По этой причине в неидеализированных приборах необходимо демпфирование собственных колебаний. Оно осуществляется введением корректирующей цепи в канал сигнала коррекции.

2.4. Гиросинтезаторы

Гиросинтезаторы предназначены для измерения линейных скоростей движения оснований. Центр масс таких гироскопов смещен относительно точки подвеса, т. е. в качестве гиросинтезаторов используются статические гироскопы. Известны различные реализации гиросинтезаторов. Две наиболее распространенные схемы представлены на рис. 30а, б.

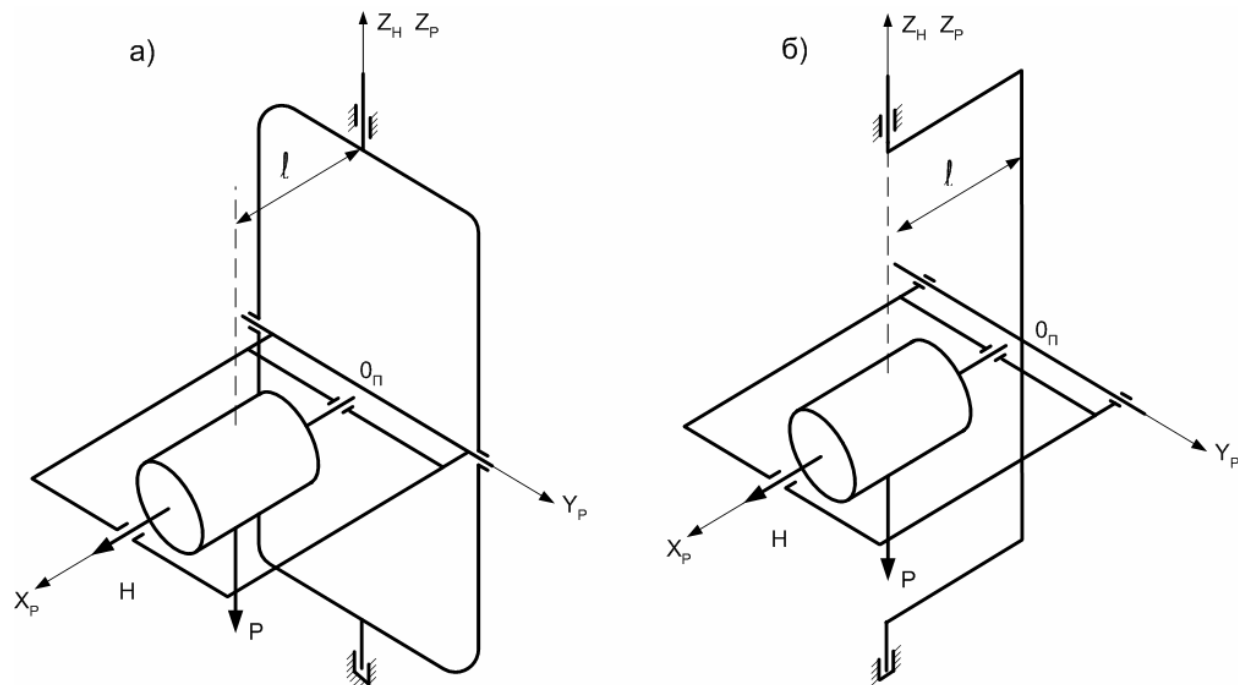


Рис. 30

Как видно из рис. 30, в обоих случаях центр масс гироскопа смещен относительно оси OY_p в направлении главной оси на величину ℓ . Отличие этих подвесов состоит в возможности обеспечения большей точности устройства, представленного на рис. 30б, т. е. когда центр масс гироскопа совмещен с осью наружной рамки, а ось внутренней рамки смещена на величину ℓ .

В обоих случаях момент маятника составляет величину $M = mg \ell$.

Принцип действия гироскопа рассмотрим на примере схемы прибора, представленного на рис. 31.

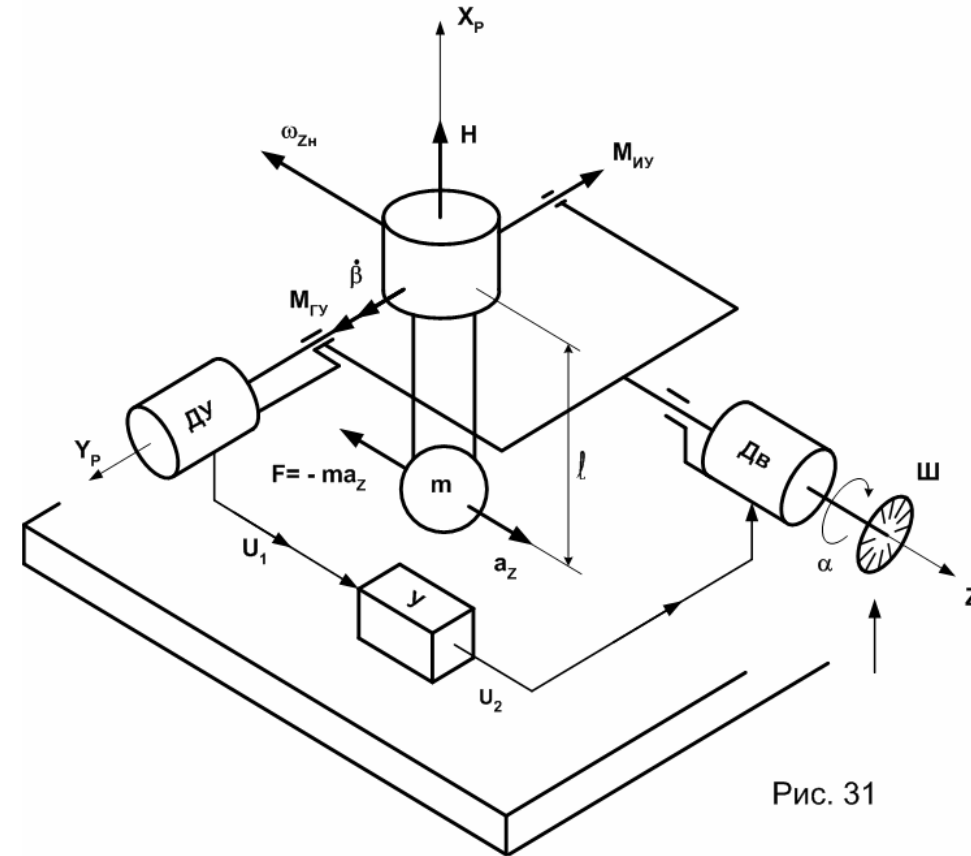


Рис. 31

Положим, что ось $0Z_H$ этого прибора лежит в плоскости горизонта и совмещена с направлением движения основания. В случае движения основания с ускорением a_z на гиروزел прибора, как следует из рис. 31, действует сила инерции $F_u = -ma_z$. На плече ℓ она создает момент силы $M_{иу} = ma_z \ell$, если считать, что начальное положение главной оси гироскопа вертикально. Под действием $M_{иу}$ гироскоп прецессирует вокруг оси $0Z_H$ с такой скоростью $\omega_{пз_н}$, что возникающий вследствие прецессии гироскопический момент $M_{гв}$ компенсирует момент сил инерции. Отсюда
$$\omega_{пз_н} = \frac{M_{иу}}{H} = \frac{m\ell a_z}{H}.$$
 Если угол поворота гироскопа вокруг оси $0Z_H$

обозначить через α , то получим $\Omega_{pz_n} = \dot{\alpha} = \frac{m\ell a_z}{H}$. Отсюда найдем

$$\alpha = \left[\frac{m\ell}{H} \int_0^t a_z dt \right]. \text{ Так как интеграл от ускорения равен линейной скорости, то } \alpha = \frac{m\ell V}{H}.$$

Следовательно, в идеальном случае угол α поворота наружной рамки такого прибора пропорционален скорости движения основания, на котором установлен прибор.

Информация о скорости здесь снимается со шкалы Ш, отградуированной в единицах линейной скорости.

Градуировка осуществляется посредством воздействия на прибор ускорения силы тяжести. Для этого прибору создается соответствующее наклонное положение, при котором момент, обусловленный ускорением силы тяжести, может быть точно определен в каждой точке калибровочной характеристики.

Рассмотренный принцип действия гироинтегратора соответствует случаю идеализированного прибора:

- трение по осям подвеса равно нулю;
- ось чувствительности прибора, ось OZ_n , лежит в плоскости местного горизонта;
- главная ось гироскопа (вектор \overline{H}) совмещена с местной вертикалью.

В неидеализированных приборах эти условия часто не выдерживаются. Как во всех случаях практических приборов трение по оси не бывает равным нулю. Это приводит, при движении гироскопа вокруг оси OZ_n , к по-

явлению момента трения $M_{tpz} = -M_{tpz} \sin \alpha$. Учитывая, что угловая

скорость $\dot{\alpha}$ в среднем знакопостоянна, можно допустить $M_{tpz} = -M_{tpz} = const$. Под действием этого момента гироскоп прецессирует вокруг оси внутренней рамки в сторону совмещения \overline{H} с M_{tpz} по кратчайшему пути,

т.е. с угловой скоростью $\dot{\beta} = \frac{M_{tpz}}{H}$. Главная ось гироскопа перестает

быть вертикальной и действующему на гироскоп моменту сил инерции M_{ny} добавляется составляющая момента, обусловленного маятниково-

стью, и равная $mg \ell \sin \beta$, вызывающая ошибки в измерении ускорения a_z . При этом причиной ошибок является не только чувствительность гироскопа к дополнительной составляющей момента, обусловленного маятниковостью, но и изменение коэффициента передачи прибора из-за изменения эффективного значения плеча приложения силы $\ell_{\text{эф}} = \ell \cos \beta$.

Для устранения этих ошибок в приборе предусмотрена межрамочная коррекция. Она осуществляется контуром, состоящем из датчика угла ДУ, усилителя У и двигателя Дв. В самом деле, как только, в силу прецессии гиروزла вокруг оси OY_p угол β перестанет быть равным нулю, то сразу же появится на выходе ДУ сигнал $U_1 = K\beta$, где K - коэффициент передачи ДУ. Он усиливается усилителем У и подается на двигатель Дв. Последний развивает по оси OZ_H момент, вызывающий встречную прецессию гироскопа вокруг оси OY_p . В результате гироскоп удерживается в положении, при котором β близко к нулю.

Как следует из текста выше, причиной ошибок гироскопа может стать и негоризонтальность его измерительной оси OZ_H . В этом случае прибор становится чувствительным к ускорению силы тяжести. Дополнительно он начинает измерять не ускорение a_z , а лишь ее проекцию на измерительную ось. Для устранения этой ошибки прибор располагают либо на стабилизированной платформе, если объект не стабилизирован, либо вычисляют ошибки по величине угла негоризонтальности оси чувствительности и учитывают их.

Межрамочная коррекция в гироскопах может быть и релейной. В этом случае измерителем неперпендикулярности \overline{H} и оси OZ_H является датчик с релейной характеристикой. В случае релейной межрамочной коррекции главная ось гироскопа постоянно прецессирует относительно положения, перпендикулярного плоскости наружной рамки.

Представляется интересным здесь еще один момент. Из математиче-

ской модели $\alpha = \frac{m\ell V}{H}$ следует, что чувствительность прибора тем

больше, чем меньше кинетический момент гироскопа \overline{H} . Так обычно и поступают в случае гироскопов, где роторы гиروزлов делаются сравнительно маленькими и легкими. Однако на этом пути повышения чувствительности имеются и серьезные ограничения.

Дело в том, что упомянутая выше математическая модель прибора не совсем точна. Здесь не учтены инерционные члены, т. е. не учтены неизбежные нутационные колебания. Уменьшение кинетического момента, как известно, сопровождается уменьшением частоты собственных колебаний гироскопа, увеличением амплитуды этих колебаний. Так что нутаци-

онные движения в гироскопах с облегченными роторами могут оказаться существенными и заметно повлиять на его точность работы.

3. Двухстепенные гироскопы

3.1. Гиротахометры

Гиротахометрами называются двухстепенные гироскопы, предназначенные для измерения угловых скоростей объектов, таких как самолеты, суда, наземные транспортные средства и т. д. Широко используются гиротахометры также и в составе сложных многогироскопных систем.

Гиротахометры называют также и датчиками угловой скорости (ДУС), а также дифференцирующими гироскопами.

3.1.1. Гиротахометр с механической пружиной.

Схема прибора представлена на рис.32. Он состоит из гиروزла 1 с гириком, центрирующих пружин 3, поршня демпфера 4, цилиндра демпфера 5, микрометрического винта 6 регулировки коэффициента демпфирования, шкалы 7, связанной с основанием 2, рычага 8, через который осуществляется центрирование гиروزла и стрелки 9. Система координат $Ox_p y_p z_p$ связана с гирузлом, а система координат $Ox_0 y_0 z_0$ – с основанием. Прибор является двухступенным, т.к. его ротор имеет две угловые степени свободы: возможность вращения в подшипниках гирузла вокруг оси Ox_p и вместе с гирузлом вокруг оси Oy_p .

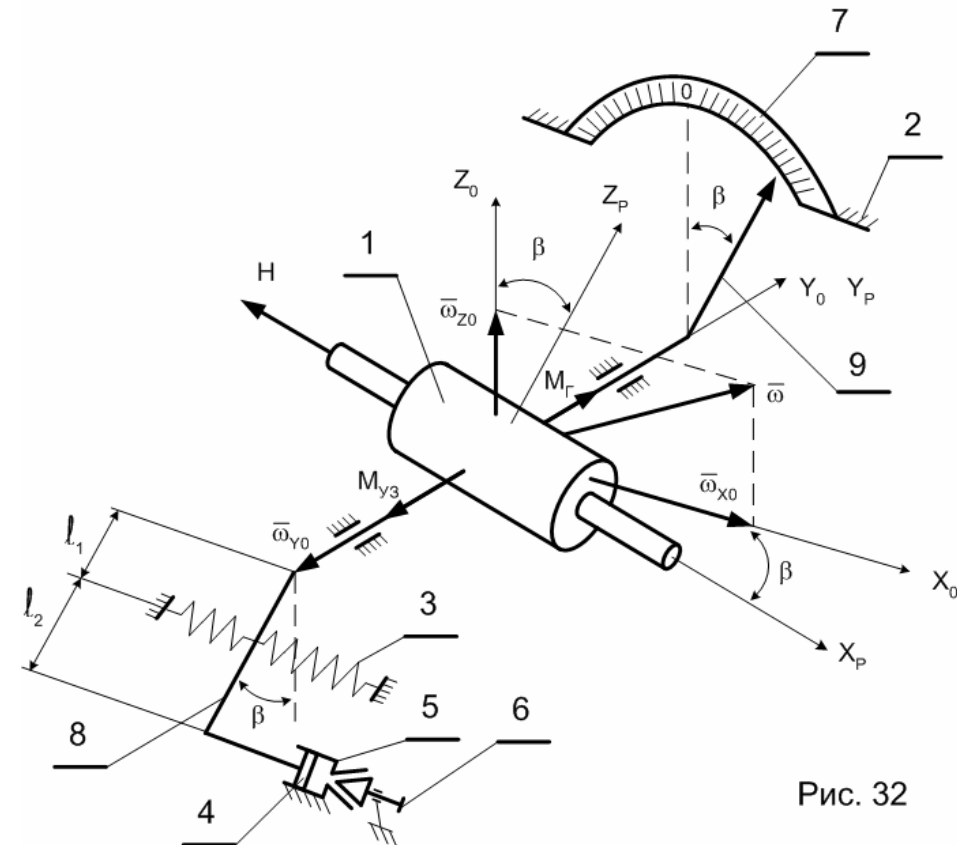


Рис. 32

В исходном положении, в случае неподвижного основания, центрирующие пружины удерживают гиروزел в таком положении, что оси системы координат $0X_pY_pZ_p$ совмещаются с осями соответствующими осям системы координат $0X_0Y_0Z_0$, связанной с основанием, а стрелка 9 находится на нулевой отметке шкалы.

Положим теперь, что основание поворачивается с некоторой угловой скоростью, проекции которой на оси $0X_0$ и $0Z_0$ соответственно равны ω_{x0} и ω_{z0} . Как известно, воздействие на прибор угловой скорости $\vec{\omega}$, вектор которой лежит в плоскости $0X_0Z_0$, приводит к появлению гироскопического момента $\vec{M}_Г = H\vec{\omega} \sin(\hat{H\omega})$.

Вектор M_Γ направлен по оси OY_0 в положительном направлении, т.к. гироскопический момент стремится совместить вектор \overline{H} с вектором $\overline{\omega}$ по кратчайшему пути. В результате происходит поворот гиروزла вокруг оси OY_p на некоторый угол \square .

С учетом факта конечности \square гироскопические моменты, обусловленные воздействием на прибор составляющих ω_{x_0} и ω_{z_0} вектора угловой скорости $\overline{\omega}$, определяются простыми соотношениями:

$$M_{\Gamma 1} = H\omega_{x_0} \sin(\overline{H\omega_{x_0}}^\wedge) = H\omega_{x_0} \sin \beta \text{ и}$$

$$M_{\Gamma 2} = H\omega_{z_0} \sin(\overline{H\omega_{z_0}}^\wedge) = H\omega_{z_0} \cos \beta.$$

Они и образуют результирующий гироскопический момент $M_\Gamma = M_{\Gamma 1} + M_{\Gamma 2} = H(\omega_{x_0} \sin \beta + \omega_{z_0} \cos \beta)$. Поворот гиروزла под действием M_Γ вокруг оси OY_p сопровождается появлением моментов сил сопротивления: момента инерционных сил $M_{\text{и}}$; момента сил сопротивления пружин $M_{\text{пр}}$; момента сил сопротивления в демпфере $M_{\text{д}}$ и момента сил трения $M_{\text{тр}}$. Момент инерционных сил $M_{\text{и}} = I_y \ddot{\beta}$, где I_y – момент

инерции гиروزла относительно оси Y и $\ddot{\beta}$ – угловое ускорение движения гиروزла вокруг оси OY_p . Момент сил сопротивления пружин $M_{\text{пр}} = \ell_1 F_{\text{пр}} = \ell_1 k_{\text{пр}} \Delta_{\text{пр}} = \ell_1 k_{\text{пр}} \ell_1 \beta = k_{\text{пр}} \ell_1^2 \beta$, где $k_{\text{пр}}$ – коэффициент жесткости пружин; ℓ_1 – плечо, образованное участком рычага между осью OY_p и точкой крепления центрирующих пружин; \square – угол поворота гиروزла вокруг оси OY_p ; $\Delta = \ell_1 \beta$ – деформация пружин, что справедливо при малых β .

Момент сил сопротивления в демпфере:

$$M_{\text{д}} = \ell_2 F_{\text{д}} = \ell_2 k_{\text{д}} V_{\text{п}} = \ell_2 k_{\text{д}} \ell_2 \dot{\beta} = \ell_2^2 k_{\text{д}} \dot{\beta},$$

где ℓ_2 – плечо, образованное участком рычага между осью OY_p и точкой крепления поршня демпфера; $k_{\text{д}}$ – коэффициент пропорциональности между скоростью перемещения поршня относительно стенок цилиндра и силой сопротивления движению поршня; $V_{\text{п}}$ – скорость перемещения

поршня относительно стенок цилиндра, равная $V_{\Pi} = \ell \cdot \dot{\beta}$ при малых скоростях поворота гиросузда $\dot{\beta}$.

В каждый момент движения имеет место равенство моментов сил сопротивления движущему моменту, т.е.

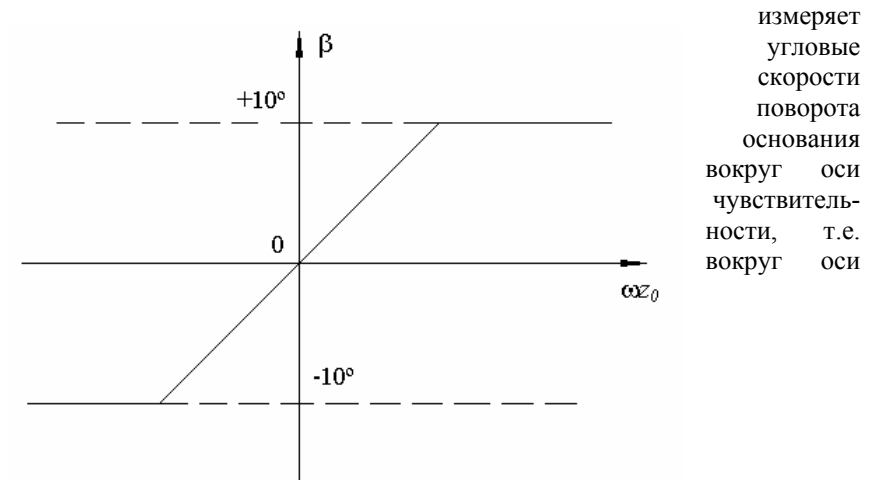
$$M_{\Gamma} = M_{\text{И}} + M_{\text{Д}} + M_{\text{Пр}} + M_{\text{ТРУ}} \quad \text{или}$$

$$H(\omega_{x_0} \sin \beta + \omega_{z_0} \cos \beta) + M_{\text{ТРУ}} = I_y \ddot{\beta} + k_{\text{Д}} \ell^2 \dot{\beta} + k_{\text{Пр}} \ell_1^2 \beta.$$

Полученное уравнение полностью определяет прибор как в части его характеристик, так и в части ошибок.

Идеальная характеристика прибора получается в статическом режиме работы, т.е. при $\dot{\beta} = 0$ и $\ddot{\beta} = 0$, при условии $M_{\text{ТРУ}} = 0$ и $\beta \approx 0$.

Тогда $k_{\text{Пр}} \ell_1^2 \beta = H \omega_{z_0}$ и $\beta = (H / k_{\text{Пр}} \ell_1^2) \omega_{z_0} = k_{\text{ГТ}} \omega_{z_0}$, где $k_{\text{ГТ}}$ – коэффициент передачи гиротаксметра. Таким образом, данный прибор



перпендикулярной плоскости, образованной главной осью гироскопа и осью подвеса рамки. Статическая характеристика идеализированного прибора представлена на рис.33.

Из соображений минимизации кинематических ошибок величина рабочего угла \square ограничивается 10° .

Кинематическая ошибка прибора обусловлена конечностью рабочего угла \square . Это обстоятельство приводит к следующему. Во-первых,

Рис.33

прибор начинает измерять не величину ω_{z0} , а ее проекцию на ось чувствительности прибора, т.е. $\omega_{z0Y} = \omega_{z0} \cos \beta$. Во-вторых, он становится чувствительным к движению основания вокруг второй оси, - оси OY_p , т.е. к угловой скорости ω_{x0} . Кинематическая ошибка легко находится из полного уравнения движения гироскопа в предположении: $\ddot{\beta} = 0$; $\dot{\beta} = 0$ и $M_{\text{тп}} = 0$. Тогда:

$$k_{\text{пр}} \ell^2 \beta = H(\omega_{z0} \cos \beta + \omega_{x0} \sin \beta) \quad \text{или}$$

$$\beta_1 = k_{\text{ГТ}}(\omega_{z0} \cos \beta + \omega_{x0} \sin \beta).$$

Отсюда ошибка измерения скорости ω_{z0} составит:

$$\Delta \beta = \beta - \beta_1 = k_{\text{ГТ}}[\omega_{z0}(1 - \cos \beta) - \omega_{x0} \sin \beta].$$

При рабочих углах $\beta = 10^\circ$ ошибка измерения угловой скорости ω_{z0} составит $\Delta \omega_{z0} = 0,014 \omega_{z0} + 0,174 \omega_{x0}$. Если положить $|\omega_{x0}| = |\omega_{z0}|$, то $\Delta \omega_{z0}$ составит 17,54%. Такая точность устраивает лишь в случае грубых измерений. В точных приборах это недопустимо, поэтому рабочее значение β ограничивается диапазоном $\beta = 2^\circ - 5^\circ$, что в свою очередь нежелательно, так как уменьшает крутизну выходного сигнала.

Статические ошибки прибора обуславливаются трением в подвесе по оси прецессии, т.е. по оси OY_p . Они определяются из условия

$$\ddot{\beta} = 0; \dot{\beta} = 0; \beta - \text{мал}; \cos \beta = 1; \sin \beta = 0. \text{ Тогда } \beta = k_{\text{ГТ}} M_{\text{тп}} / H.$$

Соответствующая характеристика прибора представлена на рис.34.

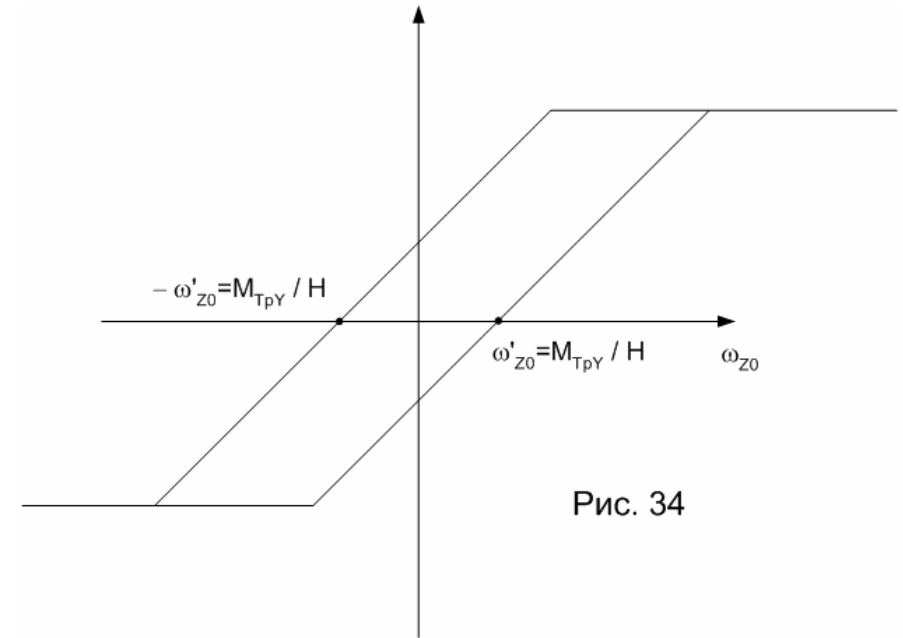


Рис. 34

Таким образом наличие трения приводит к гистерезису статической характеристики прибора. При этом его пороговая чувствительность $\omega'_{z_0} = M_{тp\gamma} / H$ становится конечной. Ее величина определяется, в частности, моментом трения $M_{тp\gamma}$. Как известно $M_{тp\gamma}$ зависит от давления на опоры по оси подвеса. Оно определяется не только силой веса гиросузла. Существенное увеличение давления происходит также из-за гироскопических моментов. Так поворот основания как вокруг оси чувствительности, так и вокруг перпендикулярной ей оси приводит к дополнительному давлению со стороны гиросузла на опоры в силу тенденции вектора \overline{H} сохранить свое положение в пространстве неизменным. Это увеличение давления зависит от скорости поворота основания и может стать очень большим при значительных скоростях.

Аналогично проявляет себя и скорость поворота основания вокруг оси OY_p . В самом деле в первый момент этого движения имеет место поворот основания при неподвижном гиросузле в силу тенденции вектора \overline{H} остаться неподвижным относительно абсолютного пространства. Тем самым

это движение в начальный момент обусловит появление выходного сигнала- смещение стрелки относительно нуля шкалы даже при $\omega_{z_0} = 0$. Далее, в силу упомянутого процесса, происходит деформация пружин. Они создают момент внешних сил M_y , прикладываемый к гиросузлу. Следствием этого является тенденция гироскопа прецессировать вокруг оси OZ_0 в сторону совмещения \overline{H} и M_y по кратчайшему пути. Это прецессионное движение невозможно из-за крепления оси рамки в подшипниках основания по оси OY_p . Подшипники дополнительно нагружаются, что объясняется тенденцией гироскопа повернуться вокруг оси OZ_0 . Основание развивает, в свою очередь, момент сил реакции, прикладываемый к гиросузлу и действующий вокруг оси Z . Под действием этого момента сил реакции происходит прецессия гироскопа вокруг оси OY_p в сторону обнуления M_y . Прецессия прекратится после поворота гиросузла вокруг оси OY_p на угол, равный углу поворота основания. Таким образом движение основания вокруг оси OY_p также сопровождается дополнительным нагружением опор.

Следовательно, движение основания вокруг всех трех осей приводит к дополнительному нагружению подшипников, а, следовательно, и к увеличению трения по оси OY_p . Результатом является увеличение статических ошибок. Увеличиваются при этом и кинематические ошибки.

Динамические ошибки прибора определяются из основного уравнения движения при условии малости \square и $M_{тр}=0$. Тогда $\cos \beta = 1$, $\sin \alpha = 0$ и уравнение движения прибора имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} I_y \ddot{\beta} + k_d \ell_2^2 \dot{\beta} + k_{пр} \ell_1^2 \beta &= H \omega_{z_0}; \\ (I_y p^2 + k_d \ell_2^2 p + k_{пр} \ell_1^2) \beta(p) &= H \omega_{z_0}(p); \\ \left(\frac{I_y}{k_{пр} \ell_1^2} p^2 + \frac{k_d}{k_{пр} \ell_1^2} p + 1 \right) \beta(p) &= \frac{H}{k_{пр} \ell_1^2} \omega_{z_0}(p) = k_{гт} \omega_{z_0}(p) \end{aligned}$$

Отсюда :

$$W(p) = \frac{\beta(p)}{\omega_{z_0}(p)} = \frac{k_{гт}}{(I_y / k_{пр} \ell_1^2) p^2 + (k_d / k_{пр} \ell_1^2) p + 1} = \frac{k_{гт}}{T^2 p^2 + 2\xi T p + 1}$$

$$\text{где } T = \sqrt{I_y / k_{пр} \ell_1^2}, \xi = k_d / 2\sqrt{k_{пр} I_y} \cdot \ell_1.$$

Таким образом гиротаксометр представляет собой звено второго порядка. При этом, в силу возможности регулировать ζ микрометрическим винтом, можно сделать ζ таким, что корни характеристического уравнения станут:

- действительными и отрицательными при $\zeta > 1$;
- действительными и кратными при $\zeta = 1$;
- комплексными при $\zeta < 1$.

В первом случае, $\zeta > 1$, гироскоп становится аperiодическим звеном второго порядка со сравнительно малым быстродействием. Во втором случае, $\zeta = 1$, гироскоп также остается аperiодическим звеном второго порядка при максимальном быстродействии и отсутствии колебательности в переходном процессе. В третьем случае, $\zeta < 1$, повышается быстродействие прибора при увеличении колебательности.

Проведенный анализ свободного движения гироскопа позволяет оценить его динамические ошибки. Как известно, для любого летательного аппарата, судна, наземного транспортного средства и т.д. характерно колебательное движение вокруг, в общем случае, всех трех его осей. Тем самым, например, в нашем случае можно считать, что основание движется вокруг оси OZ_0 по гармоническому закону $\psi_{z_0} = \psi_{z_m} \sin \nu t$ с частотой

ω_z .

Отсюда угловая скорость движения основания

$\dot{\psi}_{z_0} = \psi_{z_m} \nu \cos \nu t = \omega_{z_m} \cos \nu t$, где $\omega_{z_m} = \psi_{z_m} \nu$ – амплитуда угловой скорости.

Из передаточной функции прибора легко может быть найдено выражение для коэффициента передачи гиротаксометра, как функция частоты колебаний основания ω_z :

$$k_{гг}(\nu) = k_{гг}(0) / \sqrt{(1 - \nu^2 T^2)^2 + 4\xi^2 \nu^2 T^2}. \text{ Обозначим } \omega_z = q \omega_{z_0},$$

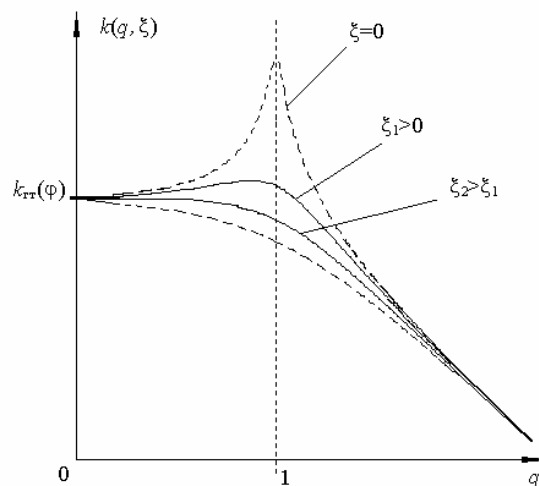
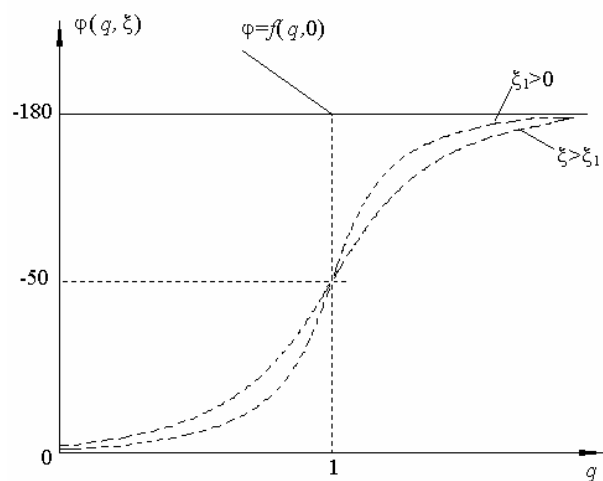
где q – относительная частота, поскольку $1/T$ – собственная частота коле-

баний гиротаксометра. Тогда $k_{гг}(q) = k_{гг}(0) / \sqrt{(1 - q^2)^2 + 4\xi^2 q^2}$.

Зависимость $k_{гг}(q, \zeta)$ представлена на рис.35. Анализ семейства характеристик показывает, что $k(q, \zeta) \approx const$ в диапазоне относительных частот $q=0 - 0,2$. Это значит, что гиротаксометр измеряет угловые скорости движения оснований практически без ошибки, если частота колебаний основания в 5 – 10 раз меньше собственной частоты колебаний прибора. При этом большее постоянство $k(q, \zeta)$ достигается при $\zeta \rightarrow 1$.

Помимо амплитудных гиротаксометру присущи и фазовые ошибки. Зависимость фазового сдвига, вносимого прибором, определяется простым

соотношением $\varphi(q, \xi) = -\arctg 2\xi q(1 - q^2)$. Графически она представлена семейством кривых на рис.35.



Отсюда следует, что фазовые ошибки уменьшаются с уменьшением ξ . Рис. 35

Таким образом наиболее рациональным является значение ξ , определяемое из соображений постоянства коэффициента передачи. Чаще всего $\xi = 0,7$.

3.1.2. Гиротахометр с электрической пружиной

Основным недостатком рассмотренного выше прибора является большая кинематическая ошибка. Она не может быть уменьшена обнулением угла поворота гироузла ξ , т.е. обнулением или хотя бы уменьшением выходного сигнала. Дело в том, что с уменьшением ξ уменьшается разрешающая способность прибора по выходу.

Выходом из положения является создание гиротахометра с электрической пружиной. Его схема представлена на рис.36.

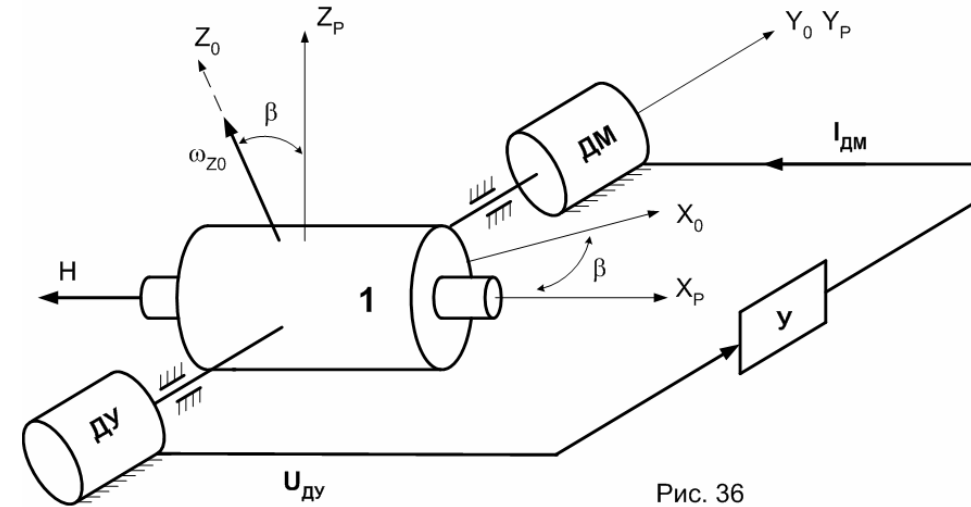


Рис. 36

Прибор состоит из гиروزла **1**, преобразователя угловых перемещений в электрический сигнал **ДУ**, датчика момента **ДМ** и усилителя **У**. Как и в предыдущем случае, поворот основания с угловой скоростью ω_{Z0} приводит к появлению гироскопического момента

$M_{гy} = H\omega_{Z0} \sin(\overline{\omega_{Z0}})$. Следствием этого является поворот гиروزла вокруг оси на некоторый угол β . В результате на выходе преобразователя угловых перемещений вырабатывается электрический сигнал $U_{ду} = k_{ду}\beta$. Этот сигнал усиливается усилителем **У**, на выходе которого появляется ток $I_{дм} = k_y U_{ду} = k_y k_{ду}\beta$.

Датчик момента представляет собой электрическую машину, вырабатывающую момент, прямо пропорциональный управляющему току, питающему ее, т.е. $M_{дм} = k_{дм} I_{дм} = k_{дм} k_y k_{ду}\beta$.

Очевидно, что при некотором значении угла поворота гиروزла момент, развиваемый моментным датчиком, становится равным гироскопическому, т.е. $M_{г} = \omega_{Z0} H \sin(\overline{\omega_{Z0}}) = M_{дм} = k_{дм} k_y k_{ду}\beta$. Таким образом элементы замкнутого контура – преобразователь угловых перемещений в электрический сигнал, усилитель и моментный датчик, - создавая момент, противодействующий гироскопическому и

пропорциональный углу поворота гиросузда, заменяет собой обычные центрирующие пружины, используемые в предыдущем приборе. Отсюда и название прибора – гиротаксметр с электрической пружиной. Жесткость электрической пружины легко менять изменением коэффициента передачи усилителя k_y . Так, увеличивая k_y , можно сделать угол отклонения гиросузда

$$\beta = H\omega_{z0} \sin(\overline{H\omega_{z0}}) / k_{\text{дм}} k_y k_{\text{ду}}$$
 сколь угодно малым, практически равным нулю. Тем самым обнуляются и кинематические ошибки гиротаксметра.

Мерой угловой скорости поворота основания в рассматриваемом приборе является управляющий ток моментного датчика

$$I_{\text{мд}} = \beta k_{\text{ду}} k_y = [H\omega_{z0} \sin(\overline{H\omega_{z0}}) / k_{\text{ду}} k_y k_{\text{дм}}] k_{\text{ду}} k_y = H\omega_{z0} / k_{\text{дм}},$$

, т.к. $\beta \approx 0$.

Использование в приборе электрической пружины позволяет существенно расширить диапазон измеряемых ускорений. При этом на точность измерения не влияют коэффициенты передачи ни преобразователя угла, ни усилителя.

Вместе с тем в таких устройствах имеются и свои трудности. Так пороговая чувствительность здесь определяется остаточным выходным током усилителя. Он может быть сделан весьма малым по сравнению с максимально возможным выходным током усилителя, но не может стать нулевым. Важным фактором является также и непостоянство остаточного выходного тока.

Тем не менее оценка возможностей существующей электронной элементной базы позволяет утверждать, что гиротаксметры с электрической пружиной, в целом, гарантируют гораздо более высокое качество, нежели гиротаксметры с механической пружиной.

Уравнение движения такого гиротаксметра, получаемое из условия равновесия моментов в проекции на ось Y_0 в динамике, характеризует его динамические свойства. Так в нашем случае имеет место

$$I_y \ddot{\beta} + k_{\text{ду}} k_y k_{\text{дм}} \beta = H\omega_{z0},$$

что соответствует колебательному прибору с недемпфированными колебаниями. Такой прибор практически непригоден для работы. Необходимо демпфирование колебаний в нем, т.е. введение в уравнение его динамики члена $k_{\text{д}} \dot{\beta}$, что реализуется соответствующим корректирующим звеном в усилителе. Тогда уравнение

динамики прибора имеет вид: $I_y \ddot{\beta} + k_d \dot{\beta} + k_{\text{ду}} k_y k_{\text{дм}} \beta = H \omega_{z_0}$. Следовательно, данный прибор, как и предыдущий, имеет передаточную функцию вида $W_{\text{гт}}(p) = k_{\text{гт}} / (T^2 p^2 + 2\xi T p + 1)$.

Большая жесткость электрической пружины, легко реализуемая посредством соответствующего увеличения коэффициента усиления усилителя, приводит к существенному уменьшению постоянной времени T , а, следовательно, и к увеличению собственной частоты колебаний прибора. Тем самым рассматриваемый вариант прибора более высокочастотный, т.е. более быстродействующий.

3.2. Двухстепенные гироскопы для измерения углов поворота

3.2.1. Двухстепенной интегрирующий гироскоп (ДИГ)

ДИГ предназначен для измерения углов поворота основания вокруг одной оси, называемой осью чувствительности. Его схема представлена на рис.37.

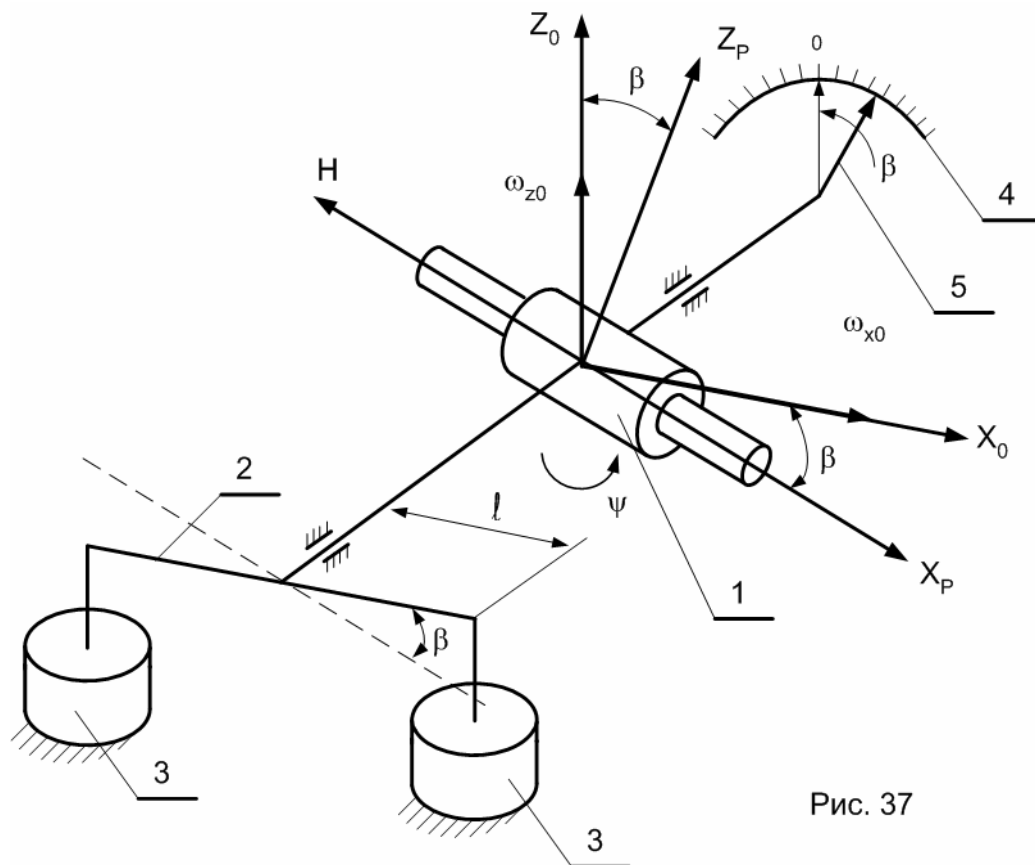


Рис. 37

Прибор состоит из гироузла 1 и системы рычагов 2, связывающих ось подвеса гироузла с демпферами 3. Угол поворота гироузла фиксируется посредством шкалы 4 и подвижной стрелки 5, связанной опять же с гироузлом.

Уравнение движения этого прибора составляется аналогично уравнению движения гиротаксиметра. Разнит эти уравнения лишь отсутствие члена, вносимого центрирующими пружинами, т.е. $M_{тр}=0$. С учетом этого факта уравнение движения прибора имеет вид:

$$I_y \ddot{\beta} + k_d \ell^2 \dot{\beta} = H(\omega_{z0} \cos \beta + \omega_{z0} \sin \beta) + M_{трY}.$$

Полученное уравнение полностью определяет характеристики прибора. Так в случае идеализированного прибора, $M_{тр}=0$ и $\beta \approx 0$, в устано-

вившемся режиме уравнение движения гироскопа имеет следующий вид:

$k_d \ell^2 \dot{\beta} = H \omega_{z0}$ или $\dot{\beta} = (H / k_g \ell^2) \omega_{z0} = k_{\text{диг}} \omega_{z0} = k_{\text{диг}} \dot{\Psi}$. Здесь Ψ – угол поворота основания вокруг оси OZ_0 .

Поскольку выходным параметром прибора является угол отклонения стрелки β , то в результате интегрирования получим $\beta = \int k_{\text{диг}} \dot{\Psi} dt = k_{\text{диг}} \Psi + C$. постоянная интегрирования C обусловлена начальными условиями и может быть обнулена выставкой гироскопа к началу работы в положение $\beta=0$. Тогда идеализированный интегрирующий гироскоп измеряет угол поворота вокруг оси чувствительности OZ_0 , т.е. $\beta = k_{\text{диг}} \Psi$.

Таким образом, при нулевых начальных условиях, рассматриваемый прибор не только осуществляет восприятие угловой скорости поворота основания $\dot{\beta} = \dot{\Psi}$, но и интегрирует ее, обеспечивая тем самым измерение угла поворота основания $\beta = k_{\text{диг}} \Psi$. Отсюда и название – интегрирующий.

В неидеализированном приборе $\beta \neq 0$ и не может считаться малым.

В этом случае $\dot{\beta} = k_{\text{диг}} (\omega_{z0} \cos \beta + \omega_{x0} \sin \beta)$. Гироскоп начинает воспринимать движения основания вокруг второй оси, перпендикулярной оси чувствительности. Кроме того ошибка измерения в рассматриваемом случае определяется тем фактом, что прибор воспринимает не саму измеряемую угловую скорость ω_{z0} , а ее проекцию на ось чувствительности прибора OZ_p . С целью уменьшения упомянутых ошибок, называемых кинематическими, максимальное рабочее значение угла β ограничивается.

Обычно $\beta_{\text{max}} \leq 2-3^\circ$.

В неидеализированном приборе не только $\beta \neq 0$, но и не равно нулю трение по оси подвеса гироузла, т.е. $M_{\text{тр}} \neq 0$. Тогда при условии

$\ddot{\beta} = 0$, $\beta \approx 0$, $\omega_{z0} = 0$, $\omega_{x0} = 0$ получим из основного уравнения движения:

$$k_d \ell^2 \dot{\beta} = M_{\text{тр}};$$

$$\dot{\beta} = M_{\text{тр}} / k_d \ell^2 = H M_{\text{тр}} / H k_d \ell^2 = k_{\text{диг}} M_{\text{тр}} / H.$$

Обычно $k_{\text{диг}}$ выбирается в пределах 1-2. Это позволяет оценить количественно ошибку ДИГ из-за трения по оси подвеса.

Положим, что $M_{\text{тр}}=0,1$ Гсм для случая гиromотора, рассмотренного в предыдущих примерах, т.е. для гиromотора с кинетическим моментом $H=4100$ Гсм. Тогда ошибка в виде скорости ухода составит

$\dot{\beta}=0,1 \times 57,3 \times 3600 / 4100 \approx 5^\circ/\text{час}$. Это очень много. Следовательно, ДИГ можно применять лишь на изделиях с малым временем работы. Сюда относятся, например, противотанковые ракеты.

Самопроизвольный уход гироскопа, т.е. его поворот вокруг оси OY_0 может происходить не только вследствие $M_{\text{тр}} \neq 0$, но и вследствие неодинаковости коэффициентов трения в демпферах при движении поршня в них вверх и вниз.

Динамические свойства ДИГ определяются его передаточной функцией, легко находимой из основного уравнения движения $W_{\text{диг}}(p) = k_{\text{диг}} / (1 + T p)$, где $T = I_y / k_d \ell^2$. Для обеспечения хороших интегрирующих свойств k_d в таких приборах делается большим. Следствием этого является малая постоянная времени двухстепенных интегрирующих гироскопов. Она не превышает долей миллисекунд.

Отсюда

$$W_{\text{диг}}(p) = \dot{\beta}(p) / \dot{\psi}(p) = k_{\text{диг}},$$

т.е. ДИГ можно практически считать безинерционным звеном.

Как известно, углы поворота, оснований могут измеряться трехстепенными гироскопами. Причем каждый такой прибор позволяет измерять одновременно два угла.

Для измерения трех углов, определяющих угловые положения, например, летательного аппарата относительно абсолютного пространства, необходимы два трехстепенных гироскопа с взаимно перпендикулярными осями вращения маховиков. Поскольку в большинстве случаев движения объектов вдоль предписанной траектории оси совершают периодические угловые движения в трех плоскостях, то измерение их параметров движения возможно посредством и двухстепенных интегрирующих гироскопов. Число таких гироскопов должно быть равным трем. Несмотря на большое количество приборов, гиросистема в данном случае оказывается более простой из-за большей простоты двухстепенных гироскопов по сравнению с трех степенными. При малом времени работы объекта точность системы

на двух степенных шарикоподшипниковых гироскопах окажется вполне приемлемой.

3.2.2. Поплавковый гироскоп

Поплавковый гироскоп является конструктивной разновидностью двухстепенного интегрирующего гироскопа. Его схема представлена на рис.38.

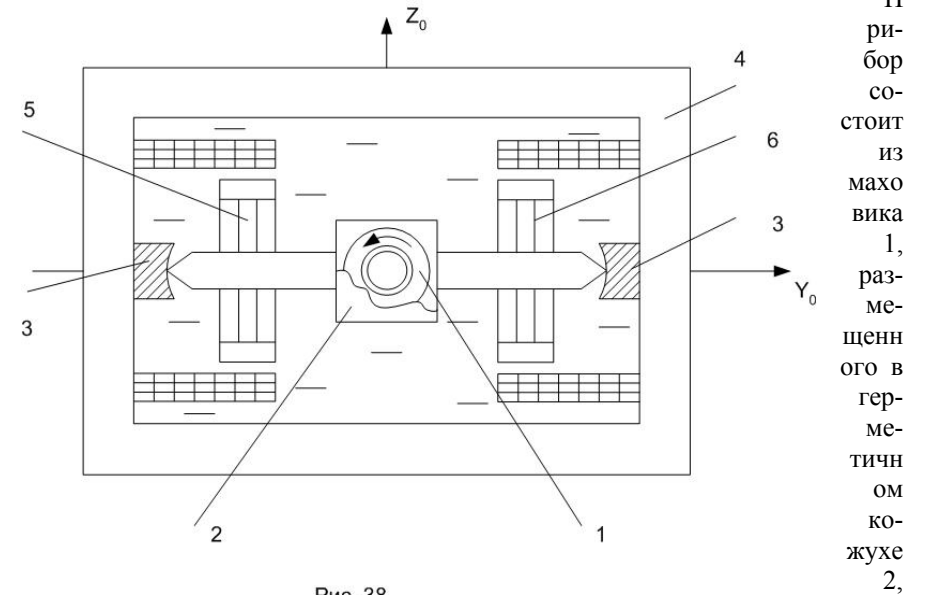


Рис. 38

выполняющем функции внутренней рамки. Ось рамки смонтирована в подшипниках 3, изготовленных из камней типа агата и рубина, как в часовых механизмах. Тем самым гироскоп имеет две угловые степени свободы: вращение маховика вокруг оси X (перпендикулярно плоскости чертежа), а также вращение маховика вместе с рамкой 2 вокруг оси Y. Гироскоп смонтирован в герметичном корпусе 4, полость которого заполнена специальной, тяжелой, вязкой (как свежий мед) жидкостью. Следовательно, на гироскоп в данном приборе действует выталкивающая сила. Параметры гироскопа и жидкости выбираются такими, чтобы гироскоп в жидкости пребывал в безразличном состоянии. Тем самым обнуляется давление гироскопа на опоры, и, следовательно, минимизируется трение в них. Теоретически оно должно быть равным нулю. В самом деле, в силу технологических допусков процесса изготовления, полного обнуления

давления не происходит, не происходит и полного обнуления трения в опорах.

Дополнительно прибор оснащается преобразователем угловых перемещений в электрический сигнал 5, а также моментным датчиком 6.

С целью обеспечения постоянства поплавкового эффекта в диапазоне температур обеспечивается и постоянство вязкости жидкости в приборе. Это достигается ее термостабилизацией. Погрешность термостабилизации не превышает $0,1^\circ$. Термостабилизация осуществляется подогревом жидкости до температуры, несколько превышающей максимальную рабочую температуру окружающей среды. При такой организации термостабилизации упрощается и она сама. Система работает лишь на подогрев, восполняя перепад температур между температурой окружающей среды и максимальной температурой термостабилизации. Вязкость жидкости соответствует вязкости «молодого» меда.

Жидкость в приборе не только разгружает опоры, но и обеспечивает необходимое вязкое трение поворотному движению гиросузда. Тем самым исключается необходимость в демпферах.

Применение жидкостного подвеса, наряду с уменьшением трения, увеличивает перегрузочную способность прибора. Это происходит из-за одинакового увеличения веса поплавка и жидкости при воздействии перегрузок. Тем самым линейные ускорения практически не увеличивают давления на опоры прибора.

Иначе ведет себя прибор при угловых эволюциях основания. Здесь возможны большие перегрузки. В самом деле при угловых движениях основания, например, вокруг оси OY возникают гироскопические моменты, действующие на опоры и полуоси. Эти нагрузки могут быть очень большими и приводить к изгибу и даже излому полуосей. Это обстоятельство заставляет использовать в поплавковых гироскопах роторы с малыми кинетическими моментами.

Введение поплавкового подвеса существенно повысило точность гироскопа, но не сделало его идеальным. Появились иные проблемы, такие как неравномерность нагрева жидкости по объему, возбуждающая ее циркуляцию, остаточная неуровненность гиросузда и т.д. Эти проблемы требуют более высокого технологического уровня изготовления прибора. По этой причине они и дороги.

Масса поплавковых гироскопов составляет 0,1-3 кг, а их уходы лежат в пределах $0,01-5^\circ/\text{час}$.

Таким образом, поплавковые гироскопы позволяют существенно увеличить точность гироскопических систем за счет уменьшения трения в подвесе по оси прецессии прибора. Однако, как и в случае с ДИГ, здесь не представляется возможным исключить кинематическую ошибку.

Для реализации высокой точности, принципиально присущей поплавковым приборам, их используют обычно по схемам нуль-индикаторов в компенсационных схемах измерения углов поворота основания. Одна из таких схем представлена на рис.39.

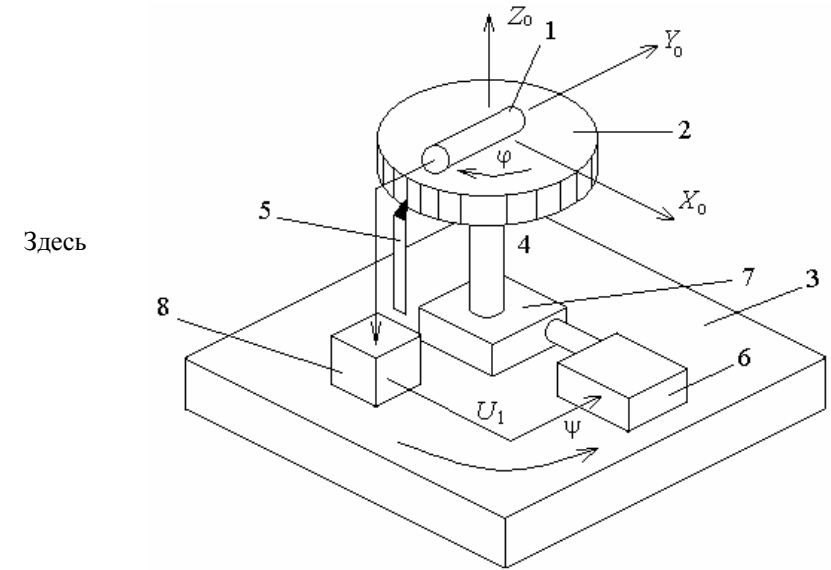


Рис. 39

поплавковый гироскоп 1 монтируется на подвижной платформе 2. Платформа с гироскопом может поворачиваться вокруг оси OZ_0 основания 3 - посредством электродвигателя 6 через редуктор 7, смонтированных на основании. На ободу платформы 2 размещена шкала 4, а с основанием 3 связан указатель 5. Преобразователь угловых перемещений гироскопа связан электрически через усилитель 8 с электродвигателем 6. Принцип действия прибора прост.

Поворот основания 3 вокруг оси OZ_0 на угол $\psi \approx 0$ из-за механической связи через редуктор 7 приводит к такому же повороту и платформы 2. В результате на выходе гироскопа появляется электрический сигнал U , который усиливается усилителем 8 и подается на электродвигатель 6. Последний через редуктор разворачивает платформу 2 относительно

платформы 3 в противоположном направлении со скоростью $\dot{\varphi} = \dot{\psi}$. В результате платформа 2 остается неподвижной относительно оси OZ_0 .

Вместе с ней поворачивается и индекс относительно неподвижной шкалы. Тем самым представляется возможным измерять угол поворота основания вокруг оси OZ_0 . Угол поворота гироузла гироскопа вокруг оси прецессии в силу практической неподвижности платформы 2 остается близким к нулю. В результате здесь, помимо минимизации ошибок из-за трения в подвесе, минимизируются и кинематические ошибки.

Точность поплавковых гироскопов, равно как и точность систем на таких гироскопах, оказывается очень высокой. Так современные поплавковые приборы не только обнаруживают угловую скорость суточного вращения Земли, но и скорость ее годового вращения.

4. Понятие о гиросtabilизаторах

В составе систем управления подвижными объектами зачастую необходимы стабилизированные площадки, не подверженные колебаниям при угловых колебаниях несущего их основания. На таких площадках размещаются разнообразные измерительные приборы и устройства: акселерометры, гироскопы, астронавигационные устройства и т.д. Площадки могут быть стабилизированы по одной, двум или трем осям. Отсюда и названия стабилизаторов: одноосный, двухосный и трехосный.

Схема одноосного стабилизатора представлена на рис.40а.

Здесь платформа П имеет лишь одну угловую степень свободы относи-

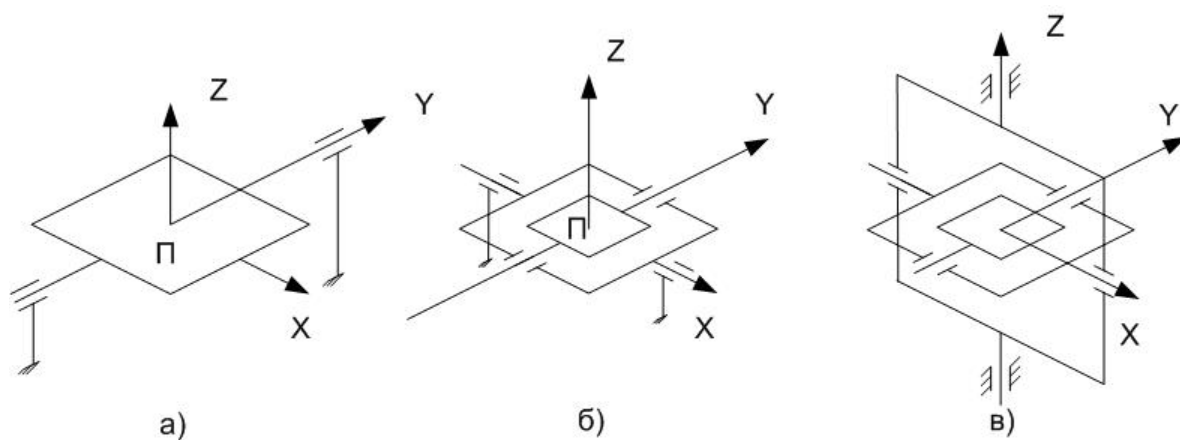


Рис. 40

тельно основания – возможность поворота вокруг оси OY . Тем самым она может сохранять неподвижное угловое положение лишь при поворотах основания вокруг оси OY либо вокруг оси, ей параллельной.

В случае двухосного гиросtabilизатора, рис.40б, платформа Π может поворачиваться относительно основания вокруг двух осей OX и OY . Тем самым становится возможным создание площадки, совмещенной с плоскостью местного горизонта. Тогда сама площадка становится устройством детектирования угловых движений основания вокруг осей, лежащих в плоскости горизонта.

Наиболее полную стабилизацию приборов обеспечивает трехосный стабилизатор, выполняемый по схеме на рис.40в. Именно такие площадки и создают на подвижном объекте неизменно ориентированные системы координат, используемые для управления угловым положением объекта.

4.1. Одноосный одnogирoскопный силовой гиросtabilизатор

В простейшем случае, для стабилизации платформы, относительно одной оси, может быть использован свободный трехстепенной гироскоп. На рис.41 представлена такая схема стабилизации платформы относительно оси O_ζ абсолютной системы координат.

Здесь платформа Π жестко связана с наружной рамкой гироскопа и, положим, параллельна главной оси гироскопа. При действии момента внешних сил M_{BH} , стремящегося повернуть рамку, а, следовательно, и платформу Π , гироскоп мгновенно начинает прецессировать вокруг оси

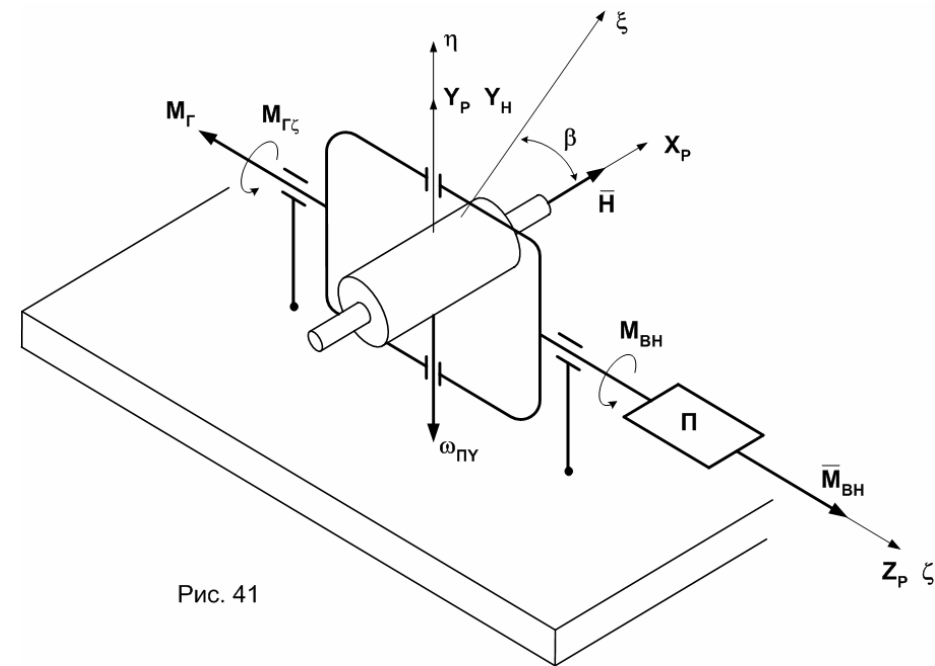


Рис. 41

Для стабилизации больших объектов в течении длительного времени используются более сложные устройства. Схема одного из них представлена на рис.42.



Для пояснения принципа действия схемы рассмотрим последовательное движение основания вокруг его осей, полагая что трение по осям под-

веса гироскопа не равно нулю и является причиной увода платформы П. Так при повороте основания вокруг оси OX_0 вместе с основанием поворачивается трехстепенный гироскоп и платформа П.

Аналогично при повороте основания вокруг оси OY_0 вместе с основанием поворачивается корпус и наружная рамка трехстепенного гироскопа и платформы П. Главная ось гироскопа остается неподвижна. В результате этого с датчика угла ДУ снимается сигнал U_1 , пропорциональный углу β между осями OX_p и OX_0 . Он усиливается усилителем У до уровня U_2 и подается на двигатель Дв. Последний, через редуктор Р, прикладывает момент $M_{Z_{Дв}}$ к гироскопу по оси его наружной рамки OZ_n . В результате гироскоп начинает прецессировать вокруг оси OY_p в сторону поворота платформы. Прецессия прекращается в момент, когда вектор H станет перпендикулярным плоскости наружной рамки. Таким образом, при движении основания вокруг оси OY вместе с основанием поворачивается платформа и трехстепенный гироскоп. При этом ось ротора гироскопа остается перпендикулярной плоскости наружной рамки.

Рассмотрим теперь движение основания вокруг оси OZ_0 . При этом движении к наружной рамке гироскопа, а, следовательно и к платформе прикладывается момент M_z внешних сил по оси OZ_n . Под действием \overline{M}_z гироскоп прецессирует в сторону смещения H с \overline{M}_z по кратчайшему пути. В результате появляется U_1 и, как и раньше двигатель Дв развивает момент по оси OZ_n равный $M_{Z_{Дв}}$ и направленный встречно уводящему моменту M_z . В момент $M_z = M_{Z_{Дв}}$ прецессия прекращается. Отсюда следует, что

$$M_z = M_{Z_{Дв}} = K_{ДУ} \cdot K_Y \cdot K_{Дв} \cdot \beta$$

$$\text{Таким образом в установившемся режиме } \beta = \frac{M_z}{K_{Дв} \cdot K_Y \cdot K_{ДУ}}.$$

Соответствующим выбором коэффициента передачи K_Y можно обеспечить требуемую малость угла β . У современных гиросtabilизаторов произведение $K_{ДУ} \cdot K_Y \cdot K_{Дв}$ достигает сотен тысяч и даже миллиона гсм/радиан, что гарантирует величину угла β не более долей градуса.

Таким образом в установившемся режиме момент M_z внешних сил, уводящий платформу, компенсируется в рассматриваемой схеме стабилизирующим моментом двигателя $M_{Z_{Дв}}$.

Несколько иначе обстоят дела в переходный период. Как известно, стабилизирующий момент $M_{Z_{Дв}}$ двигателя не может достичь значения M_z мгновенно. Причиной этому может быть инерционность самого двигателя, инерционность усилителя и т.д. Тем самым на этапе переходного периода $M_z > M_{Z_{Дв}}$. Тем не менее поворота платформы в направлении M_z не проис-

ходит из-за стабилизирующих свойств самого трехстепенного гироскопа, рассмотренных раньше.

Таким образом в первые мгновения после появления возмущающего момента M_z отклонения платформы в направлении действия момента не происходит. Это исключительной важности явление имеет место благодаря мгновенной реакции гироскопа, т.е. благодаря его способности мгновенно генерировать гироскопический момент, парирующий момент внешних сил. В этом случае гироскоп проявляет свои силовые свойства, что и послужило основанием для названия такого прибора силовым гиросtabilизатором.

Итак, в первый момент времени гироскоп уравнивает момент внешних сил, но сам при этом прецессирует, увеличивая при этом угол β . При некотором значении β вступает в работу двигатель стабилизации и освобождает гироскоп от силовых функций.

В рассматриваемой схеме платформа П не только стабилизируется относительно оси OZ_0 , но и выставляется в плоскость местного горизонта. Это обеспечивается следующим образом. При отклонении платформы П от горизонтального положения происходит и одновременно и уход плоскости наружной рамки от вертикального положения. Этот факт фиксируется маятниковым устройством М, который вырабатывает сигнал U_3 , пропорциональный углу негоризонтальности платформы. Этот сигнал поступает на моментный датчик МД, который прикладывает к гиросузу момент по оси OY_p . Этот момент не может вызвать прецессию вокруг оси OZ_n из-за большого момента сил сопротивления по оси гиросtabilизатора, обусловленных редуктором. В результате со стороны редуктора через наружную рамку действует момент сил реакции, являющийся моментом внешних сил по отношению к гиросузу. Этот момент действует по оси OZ_n и заставляет гироскоп прецессировать вокруг оси OY_p , т.е. вокруг оси приложения момента моментным датчиком МД. Теперь, как и раньше, появляется U_1 ; стабилизирующий двигатель развивает момент по оси OZ_n , который действует до тех пор, пока Н не вернется в исходное положение. Последнее случится, когда платформа П вернется в плоскость местного горизонта.

4.2. Одноосный индикаторный гиросtabilизатор

Схема такого стабилизатора представлена на рис.43.

Здесь трехстепенной гироскоп 1 смонтирован на платформе П, установленной на основании 2. Преобразователь угла ДУ измеряет угловые рассогласования главной оси гироскопа OX_p и оси платформы OX_n , т.е. вырабатывает сигнал $U_1 = K(\alpha_r - \alpha_n)$. Сигнал U_1 усиливается усилителем У

до значения $U_2 = K_y K (\alpha_r - \alpha_n)$ и подается на двигатель. Последний прикладывает момент к платформе по оси Z_n относительно основания стремясь обнулить U_1 , а, следовательно, и разность угловых положений осей $0X_r$ и $0X_n$.

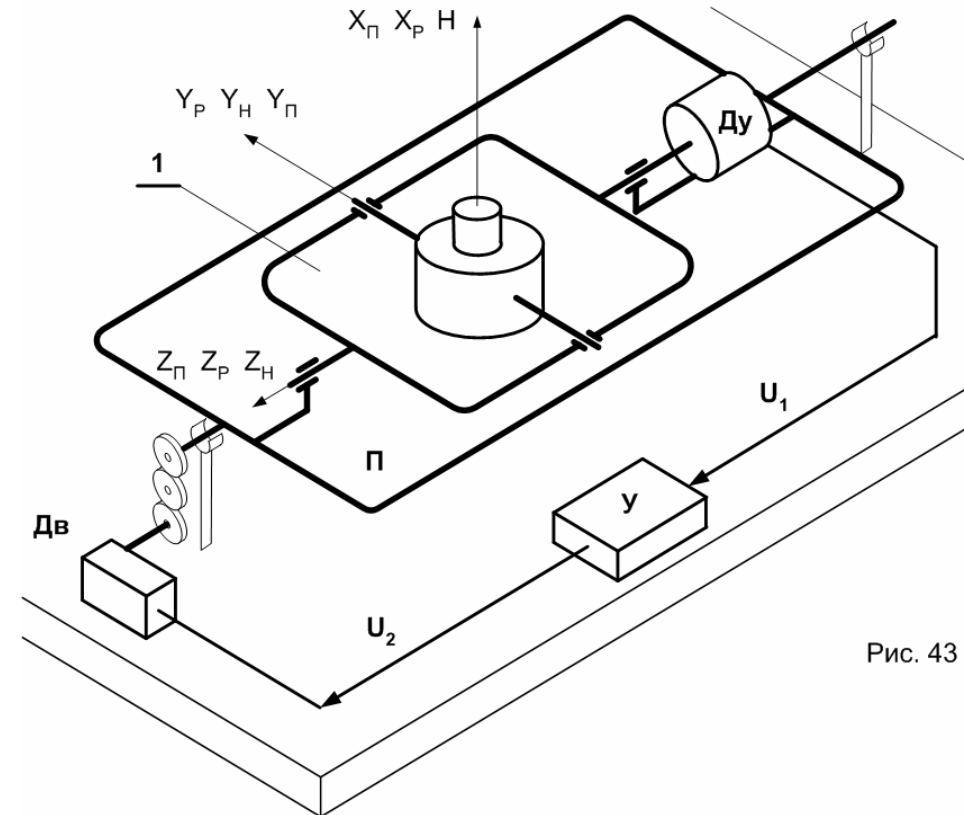


Рис. 43

Очевидно, что в установившемся режиме:

$$\Delta\alpha = (\alpha_r - \alpha_n) = M_b / K_{дв} \cdot K_y \cdot K = M_b / K_{\Sigma}$$
 где M_b – возмущающий момент, действующий на платформу П по оси Z_n ; $K_{\Sigma} = K_{дв} \cdot K_y \cdot K$; $K_{дв}$ – коэффициент передачи двигателя. Угол $\Delta\alpha$ можно сделать очень малым соответствующим выбором K_{Σ} . В этой схеме K_{Σ} можно сделать большим, нежели в предыдущей приблизительно на порядок.

Рассмотренный контур стабилизации платформы неустойчив. Дело в том, что он состоит из “электрической пружины” – ДУ-У-Дв и не содер-

жит демпфирующего элемента. В случае больших инерционностей при больших значениях K_{Σ} здесь могут возникнуть серьезные трудности с демпфированием собственных колебаний. Эффективности традиционных RC цепей может не хватить и придется использовать сигналы, пропорциональные скорости.

Индикаторной эта схема названа потому, что гироскоп здесь работает не как силовой элемент, а как элемент, фиксирующий отклонения от заданного положения.

Если теперь на стабилизированной платформе П смонтировать стабилизатор с перпендикулярной первому осям стабилизации, платформа Π_1 окажется стабилизированной по двум осям. Подобным образом можно построить и устройство трехосной стабилизации платформы.

5. Другие типы гироскопов

5.1. Вибрационные гироскопы

Детектирование угловых перемещений и скоростей возможно не только посредством вращающейся массы, но и посредством вибрирующей. Гироскопический эффект у вибрирующих масс используется в так называемых вибрационных гироскопах. Упрощенная схема такого гироскопа представлена на рис.44.

Гироскоп состоит из инерционных масс 1 и 2, упругой скобы 3, торсиона 4, основания 5 и преобразователя угла в электрический сигнал 6. Чувствительной осью прибора является ось OX .

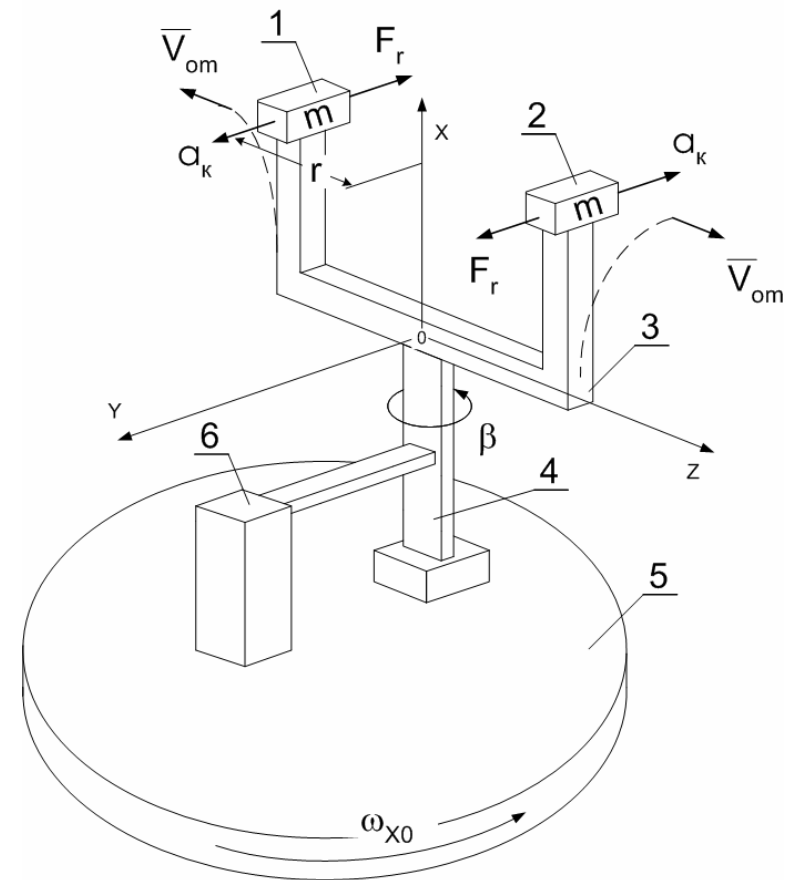


Рис. 44

Массы 1 и 2 гироскопа вибрируют с постоянной амплитудой и частотой в плоскости XOZ . Устройство, осуществляющее вибрацию, на рис.44 не показано.

Вследствие вибрации массы 1 и 2 то сближаются, то расходятся в плоскости XOZ . Тем самым они движутся с мгновенной линейной скоростью $V = V_m \sin \gamma t$, где V_m – амплитуда скорости движения масс, равная $V_m = |r_{\max} \dot{\gamma}|$; r_{\max} – максимальный радиус расхождения масс; r_0 – исходное значение радиуса, соответствующее покоящимся массам; γ – круговая частота собственных колебаний вибратора.

При повороте вибратора вокруг оси X с угловой скоростью ω_{x0} на массы 1 и 2 начинают действовать кориолисовы (гироскопические) ускоре-

ния, как в традиционных гироскопах. Они перпендикулярны плоскости вибрации и равны $a_k = 2\omega_{x0} V$, рис. 44.

Появление кориолисовых ускорений означает появление гироскопических (инерционных) сил, действующих на массах и равных $F_r = 2\omega_{x0} \cdot (r_{\max} - r_0) \cdot \gamma \cdot m \cdot \sin \gamma t = F_m \cdot \sin \gamma t$, где F_m – амплитуда гироскопических сил. Эти силы и создают гироскопический момент – момент инерционных сил, действующих на вибратор вокруг оси X.

Очевидно, что мгновенное значение этого момента имеет вид $M_r = M_m \cdot \sin \gamma t = k \cdot \omega_{x0} \cdot \sin \gamma t$, т.е. амплитуда момента M_m прямо пропорциональна ω_{x0} . Момент M_r закручивает торсион на угол β относительно основания, где $\beta = \beta_m \cdot \sin \gamma t$. Тем самым амплитуда закрутки торсиона является мерой угловой скорости поворота основания 1 вокруг оси X.

Угол β преобразуется датчиком 6 в электрический сигнал.

Таким образом вращение основания вокруг оси 0X в рассматриваемом устройстве приводит к дополнительным круговым колебательным движениям масс вокруг той же оси X. При этом наблюдается периодическая закрутка торсиона на угол, амплитуда которого равна β_m . Как частота вибраций масс, так и частота собственных крутильных колебаний зависит от конструктивных параметров прибора: вибрирующих масс; моментов инерции конструктива относительно оси 0X и жесткости торсиона. Следовательно, можно обеспечить одинаковость частоты вибраций и частоты крутильных колебаний соответствующим выбором конструктивных параметров. Такой резонансный режим существенно повышает чувствительность прибора.

Демпфирование колебаний вокруг оси X происходит за счет внутреннего трения в

Из объяснения принципа действия прибора следует, что он воспринимает угловую скорость движения основания. В самом деле ω_{x0} вызывает воздействие на вибрирующие массы знакопеременных сил инерции, тем больших, чем больше ω_{x0} . Эти силы, будучи приложенными к инерционным массам, вызывают крутильные деформации торсиона с тем большей амплитудой, чем больше ω_{x0} . Угол закрутки торсиона преобразуется посредством измерительного преобразования угла в электрический сигнал $U = k\omega_{x0}$.

Следовательно, рассмотренный прибор эквивалентен двухстепенному гироскопу – точнее гиротаксметру.

Сравнение данного прибора с двухстепенным гироскопом показывает, что он много проще классического двухстепенного гироскопа. Здесь нет опор с их неопределенным и непостоянным трением. Расход энергии на поддержание вибрационного режима много меньше нежели на вращение

ротора с большой скоростью. Меньше и массогабаритные характеристики прибора.

Создание реальных приборов с использованием вибрирующих масс сопряжено с решением серьезных технических проблем. Тем не менее такие гироскопы существуют, стабильно работают и характеризуются высокими точностями измерения скоростей. Более того идея вибрационного гироскопа оказалась весьма плодотворной и нашла применение в технике гироскопии.

Разработка этой идеи привела к созданию волновых твердотельных гироскопов. Макет такого гироскопа может быть представлен в виде полусферической чаши с ножкой, установленной на горизонтальном основании. Чаша выполняется тонкостенной из кварца и служит резонатором. В резонаторе возбуждаются и поддерживаются некоторым образом колебания стенок, т.е. они пульсируют поочередно в двух ортогональных направлениях, лежащих в горизонтальной плоскости. В результате первоначально круглый срез резонатора периодически обращается в овальный. Половина разности большой оси вала и диаметра верхнего круглого среза принимается за амплитуду упругой волны, возбужденной в резонаторе.

Если теперь совместить ось упругой волны – большую ось овала – с некоторой осью основания и начать вращать основание вокруг вертикальной оси, то будет наблюдаться инертное свойство упругой волны. То есть ось волны будет отставать от оси основания. Последнее доказано теоретически и экспериментально.

Теоретические исследования показывают, что такие гироскопы будут обладать очень стабильными характеристиками, что и является гарантом высокой точности. На точность их работы не окажет влияние трение, в том числе трение в материале резонатора и трение о воздух. К тому же они должны обладать очень малыми габаритами, малой потребляемой мощностью и малым временем выхода на рабочий режим.

Такие гироскопы рассматриваются как самые перспективные.

5.2. Динамически настраиваемые гироскопы

Динамически настраиваемые гироскопы получили название роторных вибрационных гироскопов (РВГ) и широко применяются в качестве двухкомпонентных измерителей угловых скоростей.

На рис.45 приведена кинематическая схема РВГ с двумя степенями свободы. Ротор гироскопа 1 упругими торсионами 2 соединен с валом 3 и приводится во вращение с угловой скоростью Ω двигателем 4, укрепленным в основании 5. Углы β колебаний ротора вокруг оси торсионов изме-

ряются датчиком 6. При отсутствии угловой скорости основания они равны нулю.

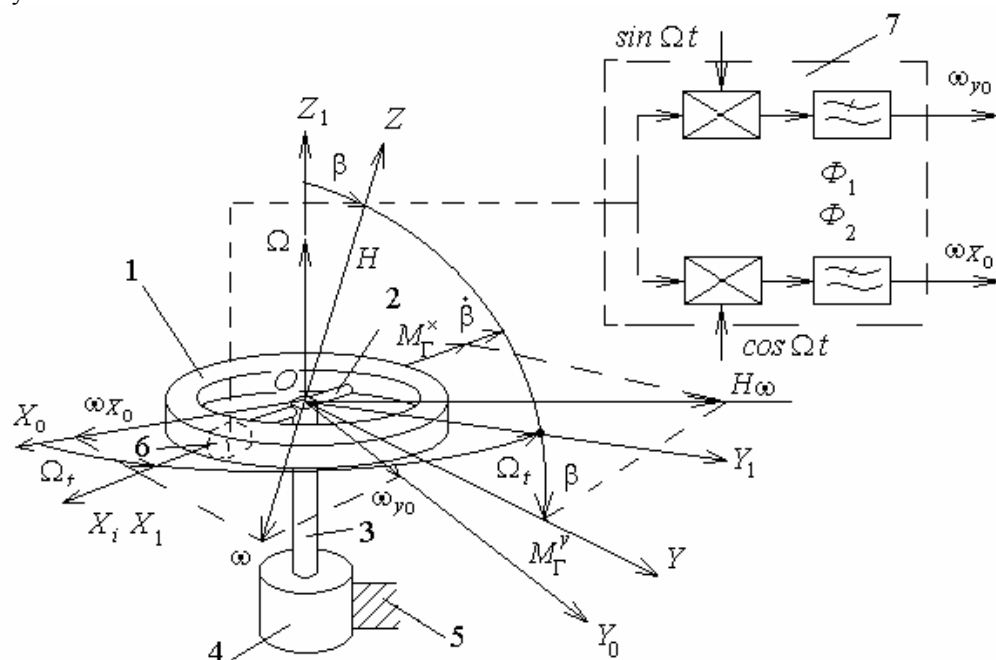


Рис. 45

При вращении основания с угловой скоростью ω возникает гироскопический момент $M_{\Gamma} = H\omega$, проекция $M_{\Gamma x}$ которого на ось торсионов вызывает разворот ротора на угол β , составляющая $M_{\Gamma y}$ разворота ротора практически не вызывает в связи с достаточно высокой жесткостью торсионов во-круг оси OY). Проекция $M_{\Gamma x}$ при постоянных скоростях Ω и ω изменяется по гармоническому закону с частотой Ω , что вызывает изменение угла β также по гармоническому закону. Амплитуда колебаний ротора по углу β зависит от угловой скорости ω , а фаза – от соотношений ω_{x0} и ω_{y0} проек-ций ω на оси основания OX_0 и OY_0 .

В устройстве 7 с помощью двух фазочувствительных выпрямителей при использовании сигнала опорного генератора полезный сигнал с датчи-ка 6, пропорциональный углу β , разделяется на составляющие, одна из которых пропорциональна ω_{x0} , а вторая – ω_{y0} .

Уравнение движения РВГ

$$I\ddot{\beta} + K\dot{\beta} + C\beta = H(\omega_{x0} \sin \Omega t - \omega_{y0} \cos \Omega t)$$

где I_z – момент инерции ротора относительно его полярной оси OZ;

$I_x = I_y$ – экваториальные моменты инерции ротора

K – коэффициент демпфирующего момента

$C = C_m + (I_z - I)\Omega^2$ – коэффициент позиционного момента;

C_t – жесткость торсионов;

$(I_z - I)\Omega^2$ – динамическая жесткость, обусловленная моментом центробежных сил.

Частное решение уравнения при постоянных переменных ω_{x0} и ω_{y0}

$$\beta = \frac{A}{\sqrt{(M_0^2 - \Omega^2) + 4d^2 M_0^2 \Omega^2}} [\omega_{x0} \sin(\Omega t - \varphi) - \omega_{y0} \cos(\Omega t - \varphi)]$$

$$\text{где } A = \frac{H}{I}, \quad M_0^2 = \frac{C}{I}, \quad d = \frac{K}{2\sqrt{CI}},$$

$$\varphi = \arctg \frac{2dM_0\Omega}{(M_0^2 - \Omega^2)}$$

Выходной сигнал гироскопа по углу β во вращающейся системе координат OXYZ зависит от ω_{x0} , ω_{y0} и представляет собой амплитудно-модулированные колебания на частоте собственного вращения ротора. При $M_0 = \Omega$ амплитуда колебаний по углу β имеет максимальное значение (режим резонанса) и условие обеспечения данного равенства называют условием динамической настройки РВГ.

Достоинства РВГ состоят в том, что отсутствие трения опор обуславливает малый порог чувствительности, а резонансный режим при обеспечении условия динамической настройки предопределяет вполне различные углы колебаний ротора гироскопа при малых ω .

К недостаткам РВГ относится наличие погрешностей при действии угловой вибрации основания, наиболее значительных при частоте вибрации 2Ω вокруг осей OX₀ и OY₀.

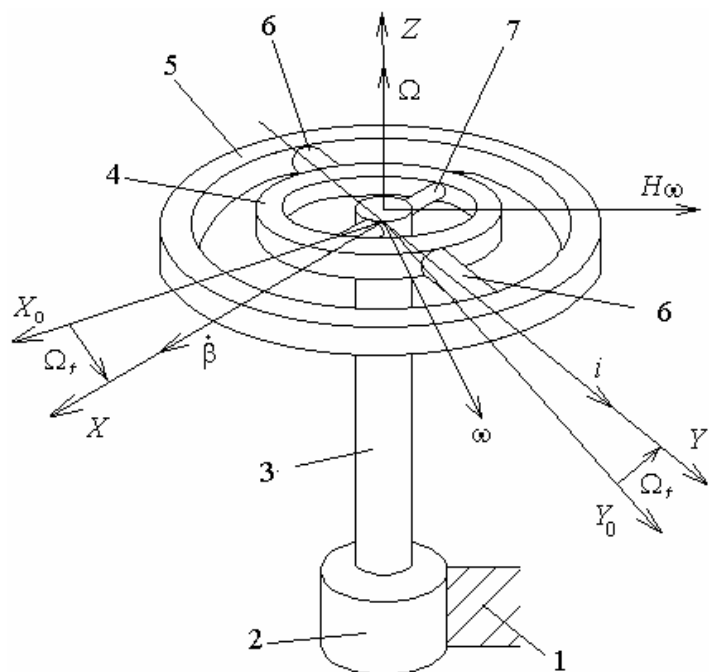


Рис. 46

приведена кинематическая схема РВГ с тремя степенями свободы. Отличие этой схемы состоит в том, что на валу 3 двигателя 2 здесь с помощью торсионов 7 закреплено внутреннее кольцо 4. Ротор 5 связан с кольцом 4 торсионами 6, перпендикулярно расположенными торсионам 7. Ротор имеет три степени свободы. Углы поворота (колебаний) ротора вокруг осей торсионов содержат информацию о компонентах ω_{x0} и ω_{y0} угловой скорости ω основания 1. Обработка измерительной информации осуществляется аналогичным для двухстепенного РВГ способом.

Роторные вибрационные гироскопы с двумя и тремя степенями свободы в иностранной литературе называют гиروفлексами. Благодаря высокой чувствительности, малому уходу (дрейфу), небольшим габаритам гиروفлексы нашли применение в качестве чувствительных элементов гиросtabilizаторов.

Идея компенсации упругих моментов торсионов в ограниченном диапазоне углов инерциальными моментами карданных рамок позволила резко снизить уходы (дрейфы) трехстепенных роторных вибрационных гироскопов, что обусловило их использование в качестве прецизионных

чувствительных элементов высокостабильных хранителей ориентации в неподвижном пространстве.

5.3. Магнитогидродинамические гироскопы

Основным препятствием на пути совершенствования классических гироскопов с вращающимся чувствительным элементом – ротором – является трение в опорах. Это обусловило поиск технических решений в части создания гироскопа без опор. Один из вариантов гироскопа без опор – гидродинамический – строится на использовании в качестве вращающейся чувствительной массы тяжелой токопроводящей жидкости. Схема гироскопа представлена на рис. 47.

Гироскоп состоит из статора 1, заключенного в корпус 2 таким образом, что между ними создается кольцевой зазор 3. Зазор с обеих сторон закрывается медными кольцами 4. Заполняется зазор ртутью. В кольцах предусматриваются по два отверстия, расположенных диаметрально. Пара отверстий одного кольца лежит на оси, ортогональной оси размещения пары отверстий другого кольца. Каждая пара диаметрально противоположных отверстий подсоединяется к своему устройству измерения перепада.

Жидкость, будучи электропроводной, - ртуть - легко приводится во

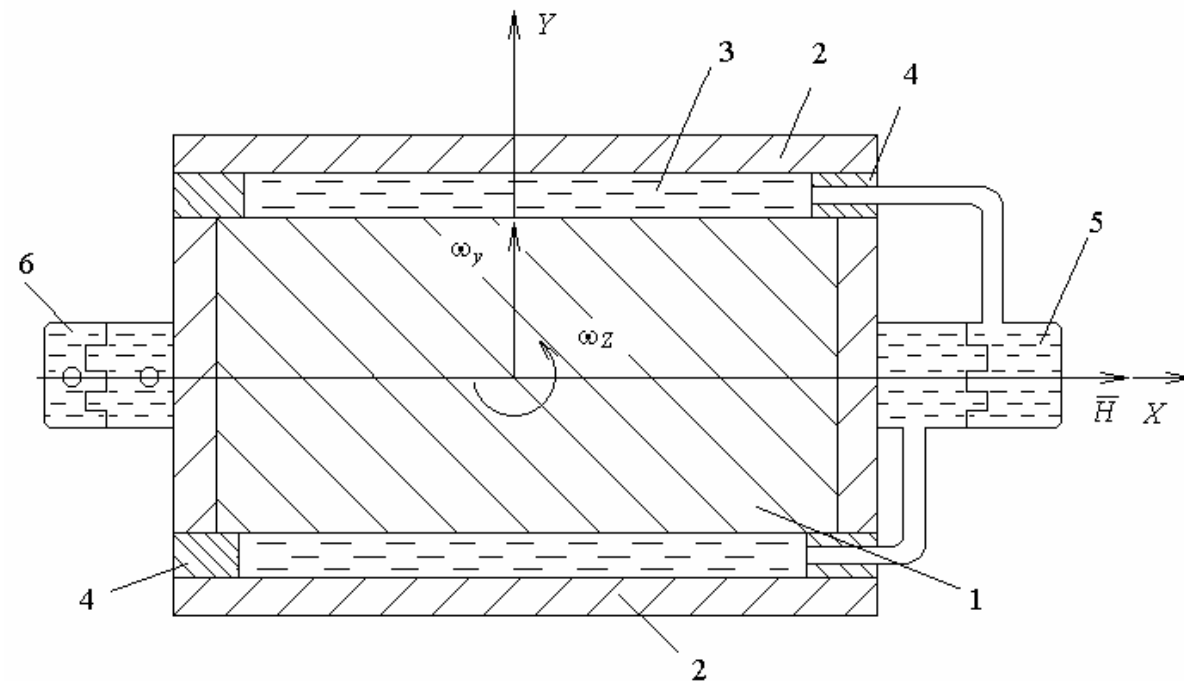


Рис. 47

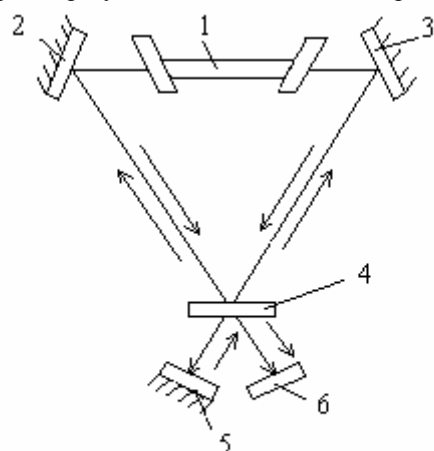
вращательное движение посредством вращающегося магнитного поля. Вращение жидкости имеет место вокруг оси X. Тем самым ртуть с её большим удельным весом выполняет роль маховика с кинетическим моментом H.

При повороте основания вокруг оси, например, Y со скоростью ω_Y на частицы жидкости действуют кориолисовы ускорения, а следовательно и гироскопические силы. Они направлены параллельно оси X и противоположны друг другу, например, в верхней и нижней частях чертежа. В результате диафрагма 7 воспринимает перепад давлений. Её деформация и является мерой угловой скорости ω_Y .

Аналогичная картина наблюдается и при повороте основания вокруг оси Z – оси перпендикулярной плоскости чертежа. В этом случае угловая скорость ω_Z обусловит соответствующий перепад сил, воспринимаемый мембраной 8. Тем самым данный прибор определяет угловую скорость поворота основания в плоскости YOZ

5.4. Лазерные гироскопы

Лазерные гироскопы, равно как и гидродинамические, не нуждаются в специальных высококачественных опорах. Их принцип действия прост. Он поясняется схемой на рис 48. Здесь лазер 1 излучает с торцов на неподвижные непрозрачные зеркала 2 и 3, которые меняют направление хода лучей таким образом, что они сходятся на полупрозрачном зеркале 4. Зеркало 4 пропускает часть одного из световых потоков на интерферометр 6, а часть другого светового потока, пропущенная тем же зеркалом 4, отражается непрозрачным зеркалом 5 и также направляется на интерферометр 6. В результате тщательной юстировки волновые фронты



двух лучей совмещаются на интерферометре. Лучи интерферируют, образуя интерференционные полосы, которые и фиксируются фотодетектором интерферометра.

Вращение гироскопа вокруг оси, перпендикулярной плоскости чертежа, приводит к тому, что интерферен-

Рис.48.

ционные полосы начинают перемещаться со скоростью, пропорциональной скорости вращения поворота основания. Измеряя частоту следования сигнала на выходе фотодетектора, представляется возможным определить скорость вращения основания.

Основными достоинствами лазерных гироскопов являются:

- минимальное время готовности;
- отсутствие механически движущихся частей, а значит, и проблем связанных с этим движением;
- способность выдерживать большие линейные перегрузки;
- большой срок службы;
- широкий диапазон измеряемых угловых скоростей.

Лазерные гироскопы существуют, но имеют и недостатки. Так они оказываются нечувствительны к малым угловым скоростям, не обеспечивают требуемой стабильности измерений, велики их массогабаритные характеристики.

На пути решения этих технических проблем стоят серьезные технические трудности. Так очень трудно выдержать геометрические размеры контура, определяющего путь светового луча с точностью до сотых и даже тысячных долей процента длины световой волны. Тем более обеспечить это требование в широком диапазоне температур. Кроме того, для получения четкой интерференционной картины требуется создание лазеров, излучающих на одной единственной длине волны. Все эти требования остаются пока до конца нерешенными.

Тем не менее, судя по сообщениям американской печати, прогресс в создании лазерных гироскопов заметен. Так, американским специалистам удалось разработать трехступенной лазерный гироскоп, все элементы которого размещаются внутри монолитного кварцевого шара диаметром около 20 см. Размеры такого гироскопа близки к размерам классических гироскопов.

5.5. Гироскопы с бескарданными подвесами

Поиски путей резкого снижения возмущающих моментов, воздействующих на гироскоп, привели к созданию бескарданных неконтактных подвесов. Как правило, гироскопы с бескарданными неконтактными подвесами имеют быстровращающийся твердотельный ротор, например, в форме сферы (сплошной или полый шар), помещенный также в сферическую полость корпуса. Между внутренней сферой корпуса и шаром имеется зазор. Специальные устройства бесконтактного подвеса центрируют шар внутри сферы так, что он в процессе работы не касается ее. В таком

положении шар раскручивают и он обладает свойствами трехстепенного гироскопа.

Кроме практически полного отсутствия моментов трения в неконтактных бескарданных подвесах исключаются также целый ряд недостатков кардановых подвесов, таких как наличие динамического дрейфа (динамической погрешности – ухода) гироскопа, обусловленного кинематическими связями элементов реального карданова подвеса (в основном осей внутренней и наружной рам карданова подвеса), от неточности монтажа и установки гироскопа в кардановом подвесе на объекте.

По типу устройств, обеспечивающих центрирование шара и отсутствие его контакта со сферой различают газовые (газостатические и газодинамические) подвесы, жидкостные (гидростатические – поплавковые и гидродинамические) подвесы, электростатические и электродинамические подвесы, магнитные подвесы.

В газостатическом подвесе ротор гироскопа удерживается во взвешенном состоянии силами избыточного давления газа, подаваемого в рабочий зазор между ротором и сферической поверхностью опоры, жестко связанной с корпусом. В газодинамическом подвесе принудительная подача газа отсутствует и первоначально невращающийся ротор опирается внутренней поверхностью на опору. После приведения ротора во вращения гиromотором газ, заполняющий подвес, увлекается ротором и вгоняется в клиновидный зазор – зазор переменного профиля между ротором и опорой. В результате в зазоре создается переменное давление, имеющее наибольшее значение в области минимального зазора и при достижении определенной скорости вращения ротор отделяется от опоры и далее удерживается во взвешенном состоянии силами избыточного давления газа. Момент трения газовой среды при идеальной сферичности поверхности ротора, как возмущающий момент, вызывающий дрейф (уход) гироскопа много меньше момента трения, например в шарикоподшипниках. При неидеальной сферичности ротора нормальные силы давления газа на его поверхность создают момент относительно центра масс ротора, что приводит к дополнительному дрейфу (уходу) гироскопа. Однако дрейфы таких гироскопов много меньше обычных, имеющих шарикоподшипниковые подвесы. Кроме того, гироскопы с газовым подвесом имеют большой ресурс работы.

В случае магнитного или электростатического подвеса взвешивание ротора-шара внутри сферы-корпуса осуществляется за счет взаимодействия магнитных или электрических полей.

Специальные устройства, расположенные в корпусе создают магнитные или электростатические силы, центрирующие шар внутри сферы так, что он не касается ее. Так как электрические и магнитные поля могут су-

ществовать и в безвоздушном пространстве, то воздух из герметичной сферы откачивается.

Если теперь шар раскрутить, то устройство превращается в трехстепенной гироскоп.

Таким образом конструкция такого гироскопа проще классического за счет устранения подвеса. Это снижает массогабаритные характеристики прибора, а также устраняет контактное трение – шар не касается стенок и не имеет трения о газовую среду вследствие вакуумизации полости корпуса.

Упомянутые выше качества шарового гироскопа позволяют обеспечить еще одно очень полезное свойство. Ротор-шар, однажды приведенный во вращение, может вращаться очень долго на выбеге, не теряя скорость. Таким образом потребление энергии таким гироскопом может быть очень малым.

По американским данным шаровый гироскоп может вращаться после запуска без дополнительного потребления энергии в течение года.

В конце ротор все-таки останавливается из-за торможения его остаточным газом.

К сожалению, у шаровых гироскопов помимо достоинств есть и недостатки. Скорее это технические и технологические проблемы, требующие решения. Одной из них является проблема раскрутки шара таким образом, чтобы ось его вращения оказывалась ориентированной относительно корпуса вполне определенным образом. Другой не менее серьезной проблемой является съем информации о положении оси вращения шара относительно корпуса – вектора кинетического момента относительно корпуса. Третьей проблемой является изготовление шара с очень точным воспроизведением сферы и т.д.

Судя по принципу действия шаровые гироскопы должны иметь бесконечный срок службы. Однако это не так. Он ограничивается в шаровых гироскопах числом запусков. Дело в том, что неподвижный шар покоится на нижней поверхности сферы. При его запуске и останове происходит контакт сферы с шаром. В процессе этого контакта шар трется о сферу. Особенно это существенно при останове гироскопа, когда быстро вращающийся шар опускается на днище сферы и тормозится в результате возникающего при этом контактного трения. Ситуации запуска и остановки – ситуации повышенного износа контактируемых поверхностей шара и сферы, а также увеличенного тепловыделения в этих местах. Именно по этой причине срок службы шаровых гироскопов определяется числом их запусков.

Контрольные задания

1. Дать понятие кориолисовых (гироскопических) ускорений.
2. Сравнить гироскопические ускорения с обычными.
3. Дать понятие гироскопического момента.
4. Сравнить гироскопический момент с обычным моментом сил инерции.
5. Объяснить понятие «свободный трехстепенной гироскоп» и его назначение.
6. Дать понятие статического и астатического гироскопов.
7. Объяснить понятие прецессии и прокомментировать связь между моментом внешних сил и прецессией.
8. Объяснить поведение трехстепенного гироскопа в реальном кардановом подвесе.
9. Дать понятие кажущихся уходов гироскопа.
10. Объяснить принципы начальной установки осей (арретирование гироскопов, межрамочная коррекция).
11. Прокомментировать методы снижения уходов в трехстепенных гироскопах.
12. Объяснить принцип действия гироскопа.
13. Объяснить принцип действия курсового гироскопа.
14. Объяснить принцип действия гироскопа с маятниковой коррекцией.
15. Объяснить принцип действия гироскопа с механической коррекцией.
16. Объяснить принцип действия гироскопа с интегральной коррекцией.
17. Объяснить принцип действия гироскопа.
18. Объяснить принцип действия гироскопа с механической пружиной.
19. Объяснить принцип действия гироскопа с «электрической пружиной».
20. Объяснить принцип действия двухстепенного интегрирующего гироскопа.
21. Объяснить принцип действия одноосных, двухосных и трехосных гироскопов.
22. Объяснить принцип действия вибрационных гироскопов.
23. Объяснить принцип действия динамически настраиваемых гироскопов.

Библиографический список

1. Бесекерский В.А., Фабрикант Е.А. Динамический синтез систем гироскопической стаабилизации. Л.: Судостроение, 1968. 351 с.
2. Ишлинский А.Ю. Ориентация, гироскопы и навигация. М.: Наука, 1976. 670 с.
3. Власов Ю.Б. Гироскопы на новых физических принципах. Л.: Издательство Ленинградского Электротехнического института, 1976. 129 с.
4. Гироскопические системы / под ред. Д.С. Польпора, М.; Высшая школа, 1971, ч.2. 488 с.
5. Малеев П.И. Новые типы гироскопов. Л.: Судостроение, 1971. 160 с.
6. Герхен-Губанов Г.В. Гироскопические приборы и устройства. (учебное пособие ч.1). Л.: Издательство ЛМИ, 1978.
7. Герхен-Губанов Г.В. Гироскопические устройства (учебное пособие ч.2). Л.: издательство ЛМИ, 1980.
8. Александров Ю.С. Навигационные системы (учебное пособие ч.1 – гироскопические приборы и устройства навигационных систем). Санкт-Петербург: Издательство БГТУ «Военмех», 1997. 65 с.