

ДОНЦОВ С.В.

# ОСНОВЫ ТЕОРИИ ГИРОСКОПА

2014

**ДОНЦОВ С.В.**

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ  
ГИРОСКОПА**

**ОДЕССА  
2014**

Печатается по рекомендации цикловой комиссии  
судоводительских дисциплин Мореходного училища  
им. А.И. Маринеско ОНМА

В учебном пособии рассмотрены основы теории гироскопа и  
способы превращения гироскопа в гирокомпас. Издание  
предназначено для курсантов морских училищ и колледжей.

РЕЦЕНЗЕНТ: Капитан дальнего плавания  
ГРИШИН Анатолий Павлович

## ВВЕДЕНИЕ

Морской флот пополняется высокоэкономичными, универсальными и специализированными судами с комплексной автоматизацией управления судовыми механизмами и системами, оснащенными первоклассной навигационной аппаратурой.

Современные технические средства судовождения включают в себя большой комплекс приборов, среди которых особое место принадлежит электронавигационным приборам (ЭНП). К ним относятся гирокомпасы, авторулевые, лаги, эхолоты и ряд других.

Электронавигационные приборы обеспечивают высокую точность судовождения и безопасность мореплавания, а также облегчают труд судоводителей.

Гирокомпасы предназначены для определения курса судна и направлений на различные ориентиры.

На протяжении многих веков единственным курсоуказателем на судне был магнитный компас. Этот простой по устройству и эксплуатации прибор обеспечивал надежное курсоуказание на тихоходных деревянных судах. На судах со стальным корпусом условия для работы магнитного компаса резко ухудшились. Под влиянием магнитного поля, образованного судовым железом, в показаниях магнитного компаса появляется трудно поддающаяся точному учету погрешность, называемая девиацией. Возросшие скорости морских судов также отрицательно сказались на показаниях магнитного компаса — его картушка, обладая малой направляющей силой, при больших скоростях судна неустойчива в меридиане.

Все это послужило причинами создания курсоуказателя нового типа, принцип действия которого не связан с магнитным полем земли. Таким курсоуказателем явился гирокомпас.

В отличие от магнитного компаса гирокомпас обладает высокой устойчивостью в меридиане и его поправка легко учитывается. Обеспечивая более точное курсоуказание, гирокомпас способствует увеличению провозной способности судна и снижению себестоимости перевозки грузов морем. Благодаря этому в течение одного года эксплуатации гирокомпаса полностью окупаются расходы на его изготовление.

Экономический эффект использования гирокомпаса еще более повышается при автоматическом управлении судовым рулевым приводом, так как авторулевой более точно удерживает судно на курсе, чем человек. Экспериментально установлено, что при работе авторулевого от гирокомпаса средняя экономия ходового времени судна составляет около 3%. Применение авторулевого позволяет также освободить матроса-рулевого от утомительного труда и использовать его, например, в качестве впередсмотрящего, что позволяет в большей мере обеспечивать безопасность мореплавания.

Лаги служат для измерения скорости судна и пройденного расстояния. В настоящее время на судах могут использоваться относительные

индукционные лаги, позволяющие измерять скорость судна относительно воды. Но широкое распространение получили уже абсолютные лаги, позволяющие определять истинную скорость судна (относительно грунта). Наибольшее распространение получили гидроакустические (доплеровские) лаги, принцип действия которых основан на измерении разности излучаемых и принимаемых после отражения от дна ультразвуковых частот. На малых судах, катерах, яхтах могут использоваться вертушечные лаги.

Эхолоты — приборы, служащие для измерения глубины под килем судна акустическим методом. Эти приборы используются как средство повышения безопасности мореплавания в трудных навигационных условиях. Измерение глубин ручным или механическим лотом, которым пришли на смену эхолоты, связано с необходимостью уменьшать скорость и требует значительного времени. С помощью же эхолота любые глубины могут быть измерены практически мгновенно на любых скоростях. Кроме того, эхолоты снабжены самописцами, которые непрерывно воспроизводят рельеф дна.

Наряду с отмеченными достоинствами электронavigационные приборы обладают и существенными недостатками. Главными из них являются сложность устройства и необходимость высокой квалификации обслуживающего персонала.

Кроме перечисленных, к электронavigационным приборам относятся автосчислители координат, путепрокладчики, а также ряд гироскопических приборов, предназначенных для целей навигации. Эти приборы пока не получили широкого применения на судах морского флота.

Электронavigационные приборы в сочетании с другими техническими средствами судовождения позволяют полностью автоматизировать процессы судовождения и тем самым еще более повысить производительность труда на морском транспорте. В настоящее время для судов морского флота разработаны автоматизированные навигационные комплексы, предназначенные для автоматизации процесса судовождения и одновременного решения нескольких навигационных задач: счисления пути, определения курса, скорости и координат судна, а также других навигационных параметров, необходимых для автоматического управления движением судна по заданной траектории. Источниками информации такого навигационного комплекса являются и электронavigационные приборы.

Большие заслуги в деле разработки и внедрения на морском флоте электронavigационных приборов принадлежат замечательному ученому академику А.Н. Крылову, заслуженному деятелю науки и техники профессору Б.И. Кудревичу, доктору технических наук Р.Н. Тюлину и другим ученым, имена которых тесно связаны с историей морского приборостроения.

## Глава 1. ГИРОСКОП И ЕГО ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА

### 1.1. Понятие о гироскопе

Основной частью всех гироскопических приборов, в том числе и гироскопов, является гироскоп. В общей динамике твердого тела гироскопом называется тело произвольной формы, совершающее вращение около одной закрепленной точки, являющейся его опорой. Однако в гироскопических приборах применяются гироскопы в виде тяжелых динамически симметричных дисков, совершающих быстрое вращение вокруг оси симметрии и имеющих такую систему подвеса, которая позволяет осям их собственного вращения произвольно изменять направление в пространстве.

Поэтому в технике гироскопом называется тяжелое быстро вращающееся симметричное твердое тело, ось вращения которого может изменять свое направление относительно любой системы координат, не связанной с гироскопом.

Термин «гироскоп» происходит от греческих слов «гирос» и «скопейн», что в переводе означает «наблюдать вращение».

Для уяснения понятия «гироскоп» воспользуемся так называемым лабораторным гироскопом (рис. 1), в котором массивный диск 1, называемый ротором гироскопа, жестко укреплен на оси, входящей в два диаметрально противоположных подшипника внутреннего кольца 3. Эта ось называется главной осью гироскопа (ось X-X). Вокруг главной оси ротору гироскопа сообщается весьма быстрое вращение, называемое собственным или главным вращением.

Цапфы внутреннего кольца входят в подшипники вертикального кольца 2, определяя горизонтальную ось гироскопа (ось Y-Y). Вокруг этой оси ротор может поворачиваться вместе с внутренним кольцом. Цапфы вертикального кольца входят в подшипники наружного кольца 4, укрепленного на подставке 5. В наружном кольце ротор гироскопа может поворачиваться вместе с внутренним и вертикальным кольцами вокруг вертикальной оси (ось Z-Z).

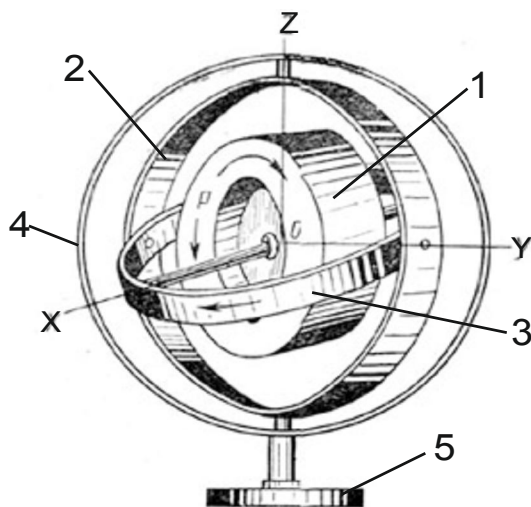


Рис. 1.

Все три оси гироскопа пересекаются в одной точке, называемой точкой подвеса ротора гироскопа, причем ось  $Y-Y$  перпендикулярна как оси  $X-X$ , так и оси  $Z-Z$ . Точка подвеса остается неподвижной при вращении гироскопа вокруг любой из его осей. Такой подвес ротора гироскопа называется кардановым подвесом. А кольца подвеса - кардановыми кольцами.

В теории гироскопии рассматриваются только поворотные движения гироскопа. Если гироскоп может поворачиваться одновременно вокруг трех осей, то он называется гироскопом с тремя степенями свободы. Если лишить гироскоп возможности поворачиваться вокруг одной из осей  $Y-Y$  или  $Z-Z$ , то гироскоп будет с двумя степенями свободы. Такой гироскоп называют также связанным гироскопом. Лишив гироскоп возможности поворачиваться вокруг обеих осей  $Y-Y$  и  $Z-Z$ , получим гироскоп с одной степенью свободы.

Гироскоп с тремя степенями свободы, центр тяжести которого совмещен с точкой подвеса, называется уравновешенным гироскопом. Ротор уравновешенного гироскопа находится в состоянии безразличного равновесия при любом положении его главной оси, так как в этом случае сила тяжести гироскопа уравновешивается реакцией опоры.

В гироскопических компасах гироскоп заключают в специальную камеру, которая выполняет роль внутреннего кольца лабораторного гироскопа. Эта камера называется гироскопической камерой (*гироскопической камерой*). В одних гироскопических компасах гироскопическая камера подвешена в кардановых кольцах, в других — помещается в герметическую сферу, называемую *гиросферой*, которая плавает в жидкости.

Для придания гироскопу быстрого вращения внутри гироскопической камеры укладывают статорную обмотку, питающуюся, как правило, трехфазным током повышенной частоты. Ротор же имеет короткозамкнутую обмотку типа «беличье колесо». Таким образом, гироскоп выполнен по такому же принципу, как трехфазный асинхронный электродвигатель.

## 1.2. Понятие о кинетическом моменте

Сложные и разнообразные явления, связанные с движением гироскопа и используемые в гироскопических приборах, вытекают из теоремы о кинетическом моменте, являющейся одной из основных теорем динамики твердого тела. Для ее понимания необходимо уяснить некоторые положения из механики.

### *Вектор угловой скорости*

На рис. 2 схематически изображен гироскоп, ротор которого совершает равномерное вращение относительно главной оси  $X-X$ . Направление этого вращения показано стрелкой на роторе.

Для характеристики вращательного движения тела на его оси вращения строят вектор угловой скорости так, чтобы из его конца вращение усматривалось против часовой стрелки. Длина вектора в некотором масштабе принимается равной числовому значению угловой скорости.

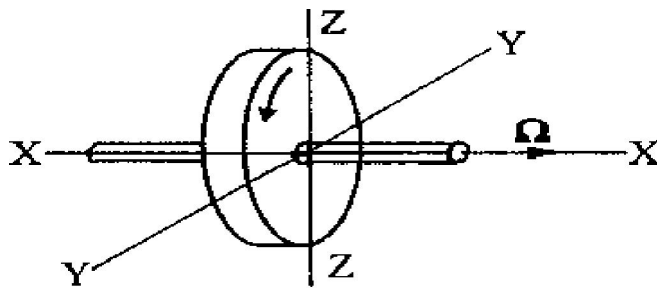


Рис. 2

На рис. 2 показан построенный по этим правилам вектор  $\Omega$  угловой скорости вращения ротора гироскопа с началом в центре гироскопа. Точку приложения вектора угловой скорости можно выбирать на оси вращения произвольно.

При своем изменении вектор в общем случае изменяет и числовое значение (длину), и направление. Если, например, гироскоп, изображенный на рисунке, совершая неравномерное вращение вокруг оси X-X, будет одновременно поворачиваться вокруг осей Y-Y и Z-Z, то  $\Omega$  будет изменять и свою длину, и свое направление в пространстве. Чтобы и в этом случае при помощи вектора угловой скорости можно было полностью охарактеризовать вращательное движение гироскопа, необходимо знать длину и направление  $\Omega$  в каждый момент времени, т.е. знать скорость изменения вектора.

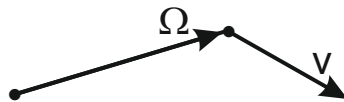


Рис. 3.

Об изменении вектора, т.е. об изменении его длины и направления, удобно судить по линейной скорости движения конца этого вектора. В математическом анализе вводится понятие производной вектора по времени, причем доказывается, что производная вектора по времени равна линейной скорости движения точки — конца вектора. Например, линейная скорость  $v$  конца вектора  $\Omega$  (рис. 3) при его изменении есть производная этого вектора по времени. Записывается это следующим образом:  $d\Omega/dt = v$ , где символом  $d\Omega/dt$  обозначается производная вектора  $\Omega$  по времени  $t$ .

### **Количество движения и момент количества движения**

Количеством движения материальной точки называется произведение массы этой точки на ее линейную скорость.

Линейная скорость точки — вектор, следовательно, количество движения также вектор, приложенный к движущейся точке и совпадающий по направлению с вектором линейной скорости.



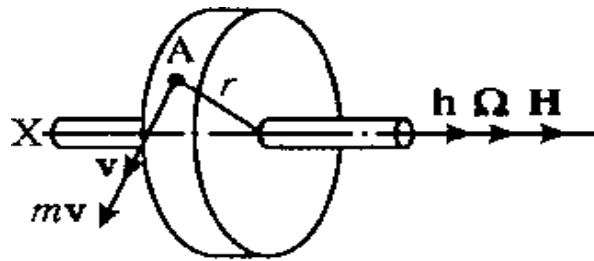


Рис. 4

На рис. 4 изображен гироскоп, вращающийся вокруг оси X-X с угловой скоростью  $\Omega$ . Выделим мысленно в теле ротора гироскопа материальную точку A с массой  $m$ . Эта точка движется по окружности радиусом  $r$  с линейной скоростью, числовое значение которой  $v = r\Omega$ . Вектор количества движения  $mv$  точки A направлен по касательной к окружности, описываемой точкой.

Подобно тому, как в механике вводится понятие момента силы, введем понятие момента количества движения материальной точки.

Моментом количества движения материальной точки относительно оси называется произведение количества движения этой точки на ее расстояние до оси вращения.

Вектор момента количества движения строят на оси вращения и направляют в сторону, с которой вращение точки усматривается против часовой стрелки.

Если обозначить числовое значение вектора момента количества движения точки A через  $h$ , то момент количества движения, согласно определению, будет:  $h = mvr$ . Вектор  $h$ , как это показано на рисунке, направлен по оси X-X в сторону, с которой вращение точки A усматривается против часовой стрелки.

Теперь распространим понятие о моменте количества движения на все твердое тело. Предположим, что тело ротора состоит из  $n$  материальных частиц, тогда  $H$  - момент количества движения всего ротора - определится суммой:  $H = h_1 + h_2 + h_3 + \dots + h_n$ , где  $h_1, h_2, h_3, \dots, h_n$  — моменты количеств движения материальных частиц, из которых состоит ротор.

Согласно определению момента количества движения материальной точки, имеем:

$$h_1 = m_1 v_1 r_1$$

$$h_2 = m_2 v_2 r_2$$

.....

$$h_n = m_n v_n r_n$$

Следовательно,  $H = \sum m_i v_i r_i$ . Но  $v = r\Omega$ , поэтому  $H = \sum m_i r_i^2 \Omega$ .

Угловые скорости всех точек вращающегося тела одинаковы, поэтому, вынося в последнем равенстве  $\Omega$  за знак суммы, получим:

$$H = \Omega \sum m_i r_i^2$$

Сумма произведений масс материальных частиц, составляющих тело, на квадраты их расстояний до некоторой оси называется моментом инерции тела относительно этой оси.

Следовательно  $\sum m_i r_i^2$  есть момент инерции ротора относительно оси вращения Х-Х. Обозначив момент инерции ротора через  $J$ , получим:

$$H = J \Omega \quad (1)$$

Итак, момент количества движения ротора гироскопа вращающегося вокруг своей оси, равен произведению момента инерции ротора относительно той же оси на его угловую скорость.

Вектор  $H$  имеет то же направление, что и вектор угловой скорости  $\Omega$ , т.е. с конца вектора  $H$  вращение ротора усматривается против направления движения часовой стрелки.

Момент количества движения  $H$  ротора гироскопа называется его *кинетическим моментом*.

В дальнейшем мы убедимся, что чем больше кинетический момент ротора, тем больше направляющий момент гироскопа, т.е. момент, устанавливающий ось гироскопа в меридиан. Из выражения  $H=J\Omega$  видно, что кинетический момент ротора можно увеличить путем увеличения момента инерции  $J$  или угловой скорости  $\Omega$ . Момент инерции ротора зависит не только от его массы, но и от распределения этой массы относительно оси вращения, так как  $J = \sum m_i r_i^2$ .

Чем дальше от оси вращения расположена основная масса ротора, тем больше его момент инерции. Вот почему для увеличения кинетического момента ротору придают форму диска, утолщенного по краям. Однако чрезмерное увеличение момента инерции ротора за счет его массы влечет за собой возрастание веса и размеров гироскопа и поэтому нецелесообразно.

Другой величиной, от которой зависит кинетический момент ротора, является его угловая скорость  $\Omega$ . В современных гироскопах роторы гироскопов вращаются со скоростями до 30 тыс. об/мин, чем обеспечивается большой направляющий момент гироскопа.

#### *Теорема о кинетическом моменте*

Эта теорема определяет закон изменения вектора кинетического момента при действии на вращающееся тело внешних сил:

*производная по времени от вектора кинетического момента вращающегося тела равна вектору главного момента всех внешних сил, действующих на тело, т.е.*

$$\frac{dH}{dt} = L,$$

где  $L$  – главный момент, равный сумме моментов внешних сил, приложенных к телу.

Нам уже известно, что производная по времени от вектора равна линейной скорости движения конца этого вектора. Поэтому эту теорему можно выразить иначе, т.е.

$$\frac{dH}{dt} = U,$$

где  $U$  – линейная скорость конца вектора  $H$ .

Следовательно,  $U = L$ .

Итак, линейная скорость движения конца вектора кинетического мо-

мента вращающегося тела равна по величине и направлению вектору главного момента внешних сил, приложенных к телу.

Эта теорема имеет большое значение для изучения свойств гироскопа.

### 1.3. Свободный гироскоп и его основное свойство

Уравновешенный гироскоп, у которого сумма моментов всех внешних сил, включая силы трения в подвесе, равна нулю, называется *свободным гироскопом*. Практически создать свободный гироскоп пока не представляется возможным. Однако существующие гироскопы имеют настолько малые силы трения в подвесе, что по своим свойствам приближаются к свободному гироскопу.

Для свободного гироскопа, как это следует из определения,  $L = 0$ , и теорему момента количества движения можно записать в следующем виде:

$$\frac{dH}{dt} = 0 \quad \text{или} \quad U = 0, \quad (3)$$

Это означает, что вектор кинетического момента  $H$  свободного гироскопа остается постоянным по величине и направлению в пространстве, а так как его направление всегда совпадает с главной осью  $X-X$  гироскопа, то главная ось свободного гироскопа сохраняет неизменным первоначально заданное направление в пространстве. В этом и заключается *основное свойство свободного гироскопа*.

Основное свойство свободного гироскопа объясняется инерцией. Все точки вращающегося ротора имеют скорости, направленные в плоскости вращения, и каждая точка стремится сохранить неизменной в пространстве плоскость своего вращения. На этом основании плоскость вращения всего ротора, а, следовательно, и его главная ось, также сохраняют неизменными в пространстве первоначальные направления.

Чем больше угловая скорость вращения ротора, тем большим кинетическим моментом обладает гироскоп и тем сильнее выражено его свойство сохранять неизменным первоначальное направление своей оси в пространстве.

Пользуясь свободным гироскопом, можно проследить суточное вращение земли вокруг ее оси. Действительно, если ось свободного гироскопа сохраняет неизменным свое первоначальное направление в пространстве, а сама земля вращается, то наблюдатель должен увидеть, что ось гироскопа поворачивается относительно земли. Если направить главную ось свободного гироскопа на какую-либо звезду, то ось гироскопа, сохраняя направление на звезду неизменным, будет вместе с ней изменять свои азимут и высоту, так как плоскости меридиана наблюдателя и истинного горизонта вращаются в пространстве вместе с землей. Такое изменение положения главной оси гироскопа относительно меридиана и горизонта называется *видимым движением*.

Рассмотрим несколько случаев видимого движения свободного гироскопа, установленного в разных точках земной поверхности.

### Гироскоп установлен на экваторе

На рис. 5 изображен земной шар, если смотреть на него со стороны Северного полюса  $P_N$ . Окружность представляет собой экватор земного шара. Стрелкой показано направление вращения земли (со стороны Северного полюса это вращение усматривается против часовой стрелки).

Пусть в первоначальный момент ось X-X гироскопа горизонтальна и направлена по линии E-W (положение 1). Через некоторый промежуток времени земля повернется на угол  $\beta$  и ось гироскопа, сохраняя неизменным свое первоначальное направление в пространстве, отклонится относительно плоскости истинного горизонта на такой же угол  $\beta$  (положение 2). Положение 3 гироскоп займет через 6 часов. В этом положении ось X-X прибора будет расположена вертикально. Относительно плоскости горизонта в положении 4 она будет снова горизонтальна, а в положении 5 — опять вертикальна.

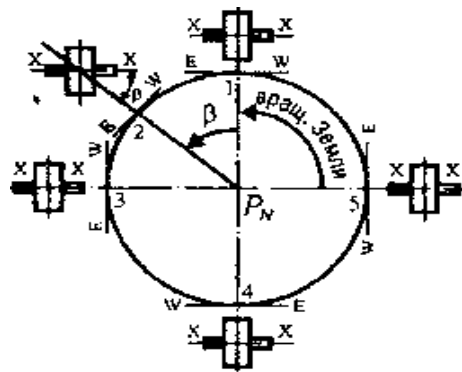


Рис. 5

За 24 часа, как это видно из рисунка, ось гироскопа повернется относительно земли на  $360^\circ$  град. Но это движение будет только кажущимся (видимым), в действительности же в результате собственного вращения Земли поворачивается плоскость истинного горизонта, а ось гироскопа сохраняет неизменным свое первоначальное направление в пространстве.

Если гироскоп установить на экваторе и направить его главную ось по линии N-S (рис. 6), то в этом случае вследствие вращения земли ось гироскопа будет поворачиваться вокруг оси X-X, параллельной оси вращения земли, и наблюдатель не обнаружит видимого движения гироскопа.

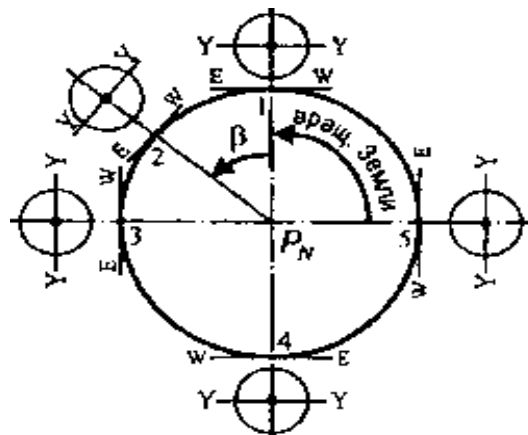


Рис. 6.

### Гироскоп установлен на полюсе

Предположим, что в первоначальный момент ось гироскопа горизонтальна и направлена на некоторую неподвижную звезду (рис. 7).

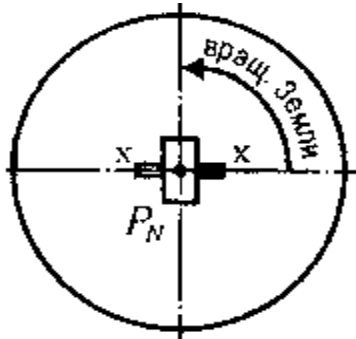


Рис. 7

За 24 часа земля совершит полный оборот вокруг своей оси. Нетрудно сообразить, что гироскоп, сохраняя неизменным направление оси X-X на звезду, совершит видимый поворот вокруг своей вертикальной оси на  $360^\circ$ , в сторону, противоположную вращению земли, т.е. по часовой стрелке.

Если главная ось гироскопа в первоначальный момент расположена вертикально — по линии  $P_N P_S$  (рис. 8), то наблюдатель не обнаружит видимого движения гироскопа, так как ось вращения земли в этом случае совпадает с осью X-X гироскопа.

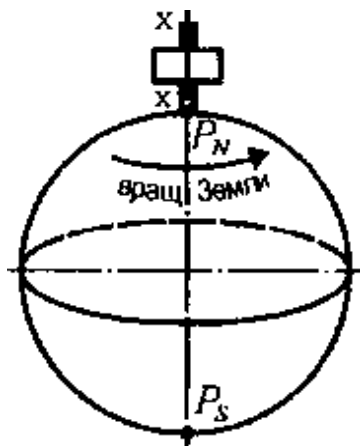


Рис. 8

### Гироскоп установлен в средней широте

Пусть в первоначальный момент главная ось гироскопа находится в меридиане и горизонтальна (рис. 9, положение 1). Через некоторый промежуток времени Земля повернется вокруг своей оси и гироскоп займет положение 2. В этом положении ось X-X прибора составит с меридианом наблюдателя некоторый угол  $\alpha$ , так как меридиан наблюдателя повернулся в пространстве вместе с землей, а ось гироскопа сохранила свое первоначальное направление. Одновременно с видимым уходом из меридиана ось X-X гироскопа будет подниматься над горизонтом, так как последний вращается вместе с землей, причем его восточная половина, как это видно из рис. 9, в пространстве опускается относительно своего первоначального положения. В положении 3 ось X-X гироскопа вновь окажется в плоскости меридиана, но будет поднята над горизонтом на угол  $\beta_{max}$ . Таким образом, гироскоп, установленный в средней северной широте обнаруживает уход северного конца главной оси от меридиана к востоку и от плоскости истинного горизонта вверх. Это движение только видимое, в действительности же в результате вращения земли вращаются в пространстве плоскости меридиана наблюдателя и истинного горизонта, причем северная часть меридиана наблюдателя непрерывно отходит от оси X-X гироскопа к западу, а восточная половина горизонта опускается.

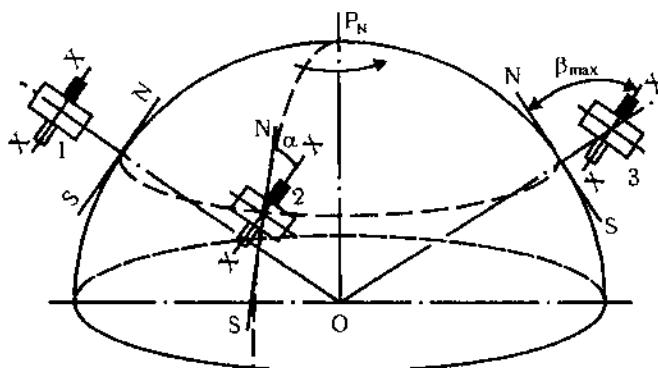


Рис. 9

### 1.4. Горизонтальная и вертикальная составляющие земного вращения

Мы выяснили, что если в первоначальный момент ось гироскопа находится в меридиане и горизонтальна, то в следующий момент вследствие вращения земли она выйдет из меридиана и одновременно отклонится от горизонта. Чтобы использовать гироскоп в качестве курсоуказателя, т.е. превратить его в гирокомпас, нужно заставить главную ось гироскопа непрерывно следовать за меридианом и оставаться все время в нем. Но для этого необходимо выяснить, с какими угловыми скоростями вращаются в пространстве сами плоскости меридиана и истинного горизонта для наблюдателя, находящегося в любой широте.

Вращение земли, если наблюдать его со стороны Северного полюса, совершается против направления часовой стрелки. Предположим, что наблюдатель находится в северном полушарии в широте  $\varphi$  (рис. 10).

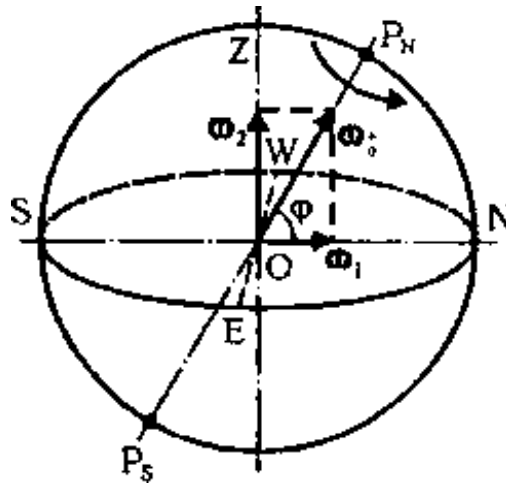


Рис. 10.

Пользуясь правилом построения вектора угловой скорости вращающегося тела, построим вектор угловой скорости вращения земли  $\omega_+$  по оси мира  $P_N P_S$  к Северному полюсу. Разложим вращение земли на два вращения: вокруг полуденной линии N-S и вокруг отвесной линии OZ наблюдателя. Для этого спроектируем вектор на полуденную и отвесную линии наблюдателя. Из рисунка имеем:

$$\left. \begin{aligned} \omega_1 &= \omega_\delta \cos \varphi \\ \omega_2 &= \omega_\delta \sin \varphi \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Составляющая  $\omega_1$  называется горизонтальной составляющей земного вращения, а составляющая  $\omega_2$  — вертикальной составляющей земного вращения.

Горизонтальная составляющая земного вращения  $\omega_1$  показывает, что плоскость истинного горизонта вращается в пространстве вокруг линии N-S наблюдателя с угловой скоростью, равной  $\omega_\delta \cos \varphi$ , причем со стороны севера (с конца вектора  $\omega_1$ ) это вращение усматривается против направления движения часовой стрелки, т.е. восточная половина горизонта непрерывно в пространстве «опускается», а западная — «поднимается» относительно своего начального положения.

Вертикальная составляющая земного вращения  $\omega_2$  показывает, что плоскость меридиана наблюдателя вращается в пространстве вокруг отвесной линии наблюдателя с угловой скоростью, равной  $\omega_\delta \sin \varphi$ , причем со стороны наблюдателя, находящегося в северном полушарии, это вращение усматривается против направления движения часовой стрелки, т.е. северная часть меридиана непрерывно «отходит» к западу.

В южной широте (рис. 11), так же как и в северной, вектор  $\omega_1$  направлен по полуденной линии N-S к северу, т.е. направление вращения плоскости истинного горизонта не меняется — восточная половина его непрерывно в пространстве опускается, а западная поднимается.

Вертикальная составляющая земного вращения  $\omega_2$  в южной широте направлена не к зениту наблюдателя, как это было в северной широте, а к надире. Следовательно, в южной широте вращение меридиана наблюдается по направлению движения часовой стрелки, т.е. северная



часть меридиана непрерывно «отходит» к востоку.

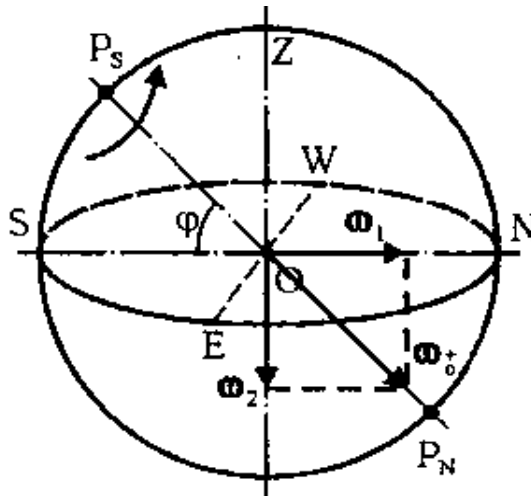


Рис. 11

Пользуясь формулами (4) для горизонтальной и вертикальной составляющих земного вращения и зная их направления, легко определить направления и скорости вращения плоскостей горизонта и меридиана и, следовательно, направления и скорости видимого движения оси свободного гироскопа, установленного в разных точках земной поверхности.

### 1.5. Прецессионное движение гироскопа

Продедаем следующий опыт. Приложим к свободному гироскопу силу  $F$ , которая стремится повернуть его вокруг горизонтальной оси  $Y-Y$  (рис. 12).

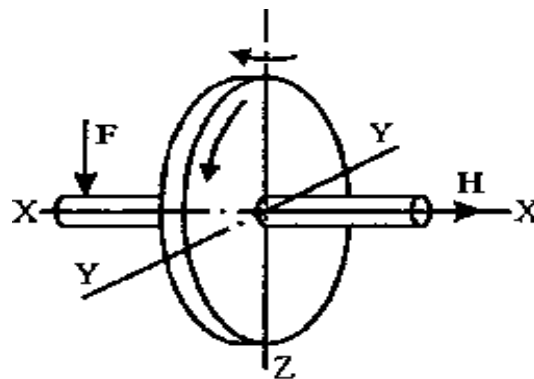


Рис. 12

Мы не обнаружим привычного для нас результата действия силы, гироскоп не будет поворачиваться вокруг оси  $Y-Y$ , а вместо этого начнет поворачиваться вокруг оси  $Z-Z$  в направлении, показанном стрелкой. Если приложить к гироскопу силу, стремящуюся повернуть его вокруг вертикальной оси  $Z-Z$ , то гироскоп начнет поворачиваться вокруг горизонтальной оси  $Y-Y$ . Такой результат действия силы на гироскоп представляется непонятным только на первый взгляд. Рассмотрим физическую сущность этого явления. На рис. 13 показаны линейные скорости



$v_i$ , точек вращающегося ротора, находящихся в данный момент на осях Y-Y и Z-Z гироскопа. Сила F стремится повернуть ротор гироскопа вокруг оси Y-Y. Легко сообразить, что такая сила сообщает точкам A и B ротора, находящимся в данный момент на оси Z-Z, дополнительные скорости  $\Delta v_i$ , направленные перпендикулярно плоскости вращения ротора. Следовательно, под действием силы F скорости точек A и B изменят свои направления. Новые скорости этих точек будут направлены по равнодействующим скоростей  $v_i$  и  $\Delta v_i$ .

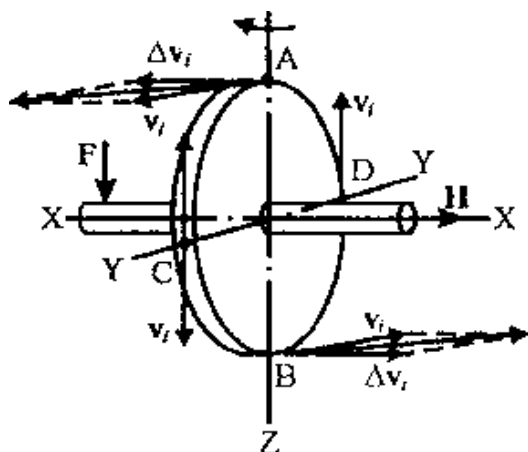


Рис. 13.

Линейные скорости точек C и D не изменятся, так как эти точки лежат в данный момент на оси Y-Y, вокруг которой сила F стремится повернуть ротор гироскопа.

Значит, под действием силы F гироскоп будет совершать такое движение, при котором направления скоростей точек C и D останутся прежними. А направления скоростей точек A и B изменятся. Нетрудно видеть, что такое движение будет совершаться вокруг оси Z-Z, причем сверху оно будет усматриваться по часовой стрелке.

Итак, под действием приложенной силы гироскоп совершает поворот, причем плоскость этого поворота перпендикулярна линии действия силы. Такое движение гироскопа называется *прецессионным движением* или *прецессией*.

Прецессионное движение гироскопа легко объясняется и теоремой о кинетическом моменте. Согласно этой теореме линейная скорость движения конца вектора кинетического момента вращающегося тела равна по величине и направлению главному моменту внешних сил, приложенных к телу.

На рис. 14 показан гироскоп, к которому приложена сила F, стремящаяся повернуть его вокруг оси Y-Y. Построим вектор момента этой силы L. Согласно принятому в механике правилу, вектор L должен лежать на оси, вокруг которой действует сила, и из его конца действие силы должно усматриваться против движения часовой стрелки.

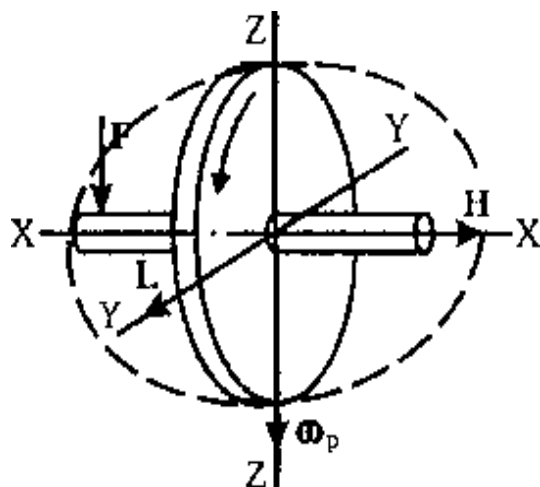


Рис. 14

Согласно формуле  $U = L$ , где  $U$  - вектор линейной скорости движения конца вектора  $H$ . Построим из конца вектора  $H$  вектор  $U$  так, чтобы он по величине и направлению был равен вектору  $L$ . Вектор  $U$  и покажет нам направление и скорость движения конца вектора кинетического момента  $H$ . Из рисунка видно, что конец вектора  $H$  вместе с главной осью гироскопа начнет совершать движение вокруг оси  $Z-Z$  гироскопа, т.е. в плоскости, перпендикулярной линии действия силы  $F$ . Траектория движения конца вектора  $H$  показана на рис. 14 пунктирной линией.

Определим угловую скорость прецессионного движения  $\omega_p$ . Для этого достаточно определить угловую скорость одной точки гироскопа, например точки, определяющей конец вектора  $H$ . Так как при вращательном движении точки угловая скорость ее равна линейной, деленной на радиус вращения, то, как следует из рис. 14,

$$\omega_p = U/H. \text{ Но } U = L. \text{ Следовательно, } \omega_p = L/H. \quad (5)$$

Таким образом, угловая скорость прецессионного движения прямо пропорциональна моменту внешней силы и обратно пропорциональна кинетическому моменту.

Направление вектора угловой скорости прецессии  $\omega_p$  определяется по известному нам правилу: из конца этого вектора прецессионное движение должно усматриваться против часовой стрелки.

Рассматривая рис. 14, видим, что в прецессионном движении конец вектора  $H$  стремится к концу вектора  $L$ . Конец вектора  $H$  называется полюсом гироскопа, а конец вектора  $L$  - полюсом момента внешней силы. Для определения направления прецессионного движения пользуются следующим правилом: в прецессионном движении полюс гироскопа стремится к полюсу момента внешней силы по кратчайшему пути.

Это правило называется *правилом полюсов*.

В заключение отметим, что прецессионное движение прекращается сразу же после прекращения действия силы. В силу этого свойства всякие толчки и удары, которые передаются от корпуса судна на гирокомпас,

вызывают прецессию гироскопа только в течение своего действия, а так как оно кратковременно, то ось гироскопа практически остается в меридиане. Таким образом, удары и толчки не оказывают на гирокомпас почти никакого влияния, и в этом его большое достоинство.

### 1.6. Гироскопическая реакция. Момент гироскопической реакции

При рассмотрении вопроса о прецессионном движении гироскопа мы видели, что под действием приложенной внешней силы ось гирокомпаса движется не по направлению силы, а перпендикулярно ей и оказывает этой силе сопротивление.

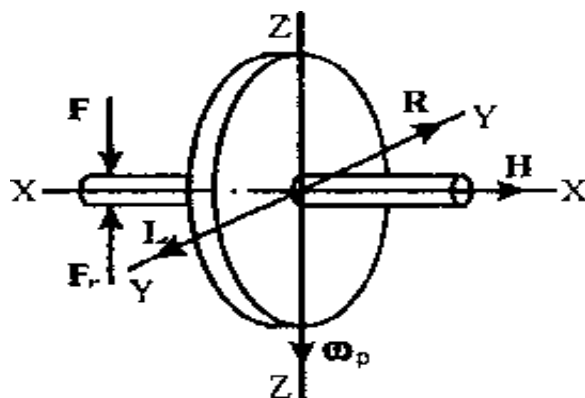


Рис. 15

Если, например, пальцем нажать на ось гироскопа с некоторой силой  $F$  (рис. 15), то со стороны оси к пальцу прикладывается противодействующая сила реакции  $F_r$ , уравновешивающая нажим.

Сила  $F_r$  называется гироскопической реакцией, а момент этой силы  $R$  — моментом гироскопической реакции или *гироскопическим моментом*.

Силы  $F$  и  $F_r$  равны по величине, но противоположны по направлению. Поэтому момент гироскопической реакции равен по величине, но противоположен по направлению моменту приложенной силы, т.е.  $R = L$ . Угловая скорость прецессии по формуле (5)  $\omega_p = L/H$ . Отсюда  $L = H \omega_p$ . Следовательно,

$$R = H \omega_p \quad (6)$$

Итак, момент гироскопической реакции равен произведению кинетического момента на угловую скорость прецессии и направлен в сторону, противоположную моменту силы, вызвавшей прецессионное движение гироскопа.

Для определения направления вектора гироскопического момента пользуются правилом трех пальцев левой руки, которое вытекает непосредственно из рис. 15: если расположить три пальца левой руки взаимно перпендикулярно и указательный палец направить вдоль вектора  $H$ , а большой — вдоль вектора  $\omega_p$  то средний палец укажет направление вектора  $R$ .

Из формулы (6) видим, что появление гироскопического момента в теле ротора обуславливается наличием прецессионного движения гиро-

скопа, которое, в свою очередь, возникает от действия на гироскоп момента внешних сил.

Гироскопический момент возникает в теле ротора не только в результате прецессионного движения гироскопа, но и при всяком вынужденном повороте гироскопа вокруг оси, не совпадающей с осью вращения. Чтобы убедиться в этом, достаточно попробовать повернуть руками ось гироскопа. Тогда мы почувствуем, что ось сопротивляется повороту, стремится вырваться из руки и оказывает на наши руки давление. По ощущению в руках мы убедимся, что при повороте в горизонтальной плоскости ось давит на руки вертикальной парой сил, и наоборот.

Чтобы продемонстрировать появление гироскопического момента при вынужденном повороте, лишим гироскоп, показанный на рис. 16, возможности поворачиваться вокруг оси Y-Y подставки, для чего винтом заждем эту ось. Такой гироскоп имеет две степени свободы.

Возьмем прибор в руки, и будем поворачивать его вместе с подставкой вокруг оси Y-Y с некоторой угловой скоростью  $\omega$ . Такой поворот гироскопа называется вынужденным поворотом или *вынужденной прецессией*.

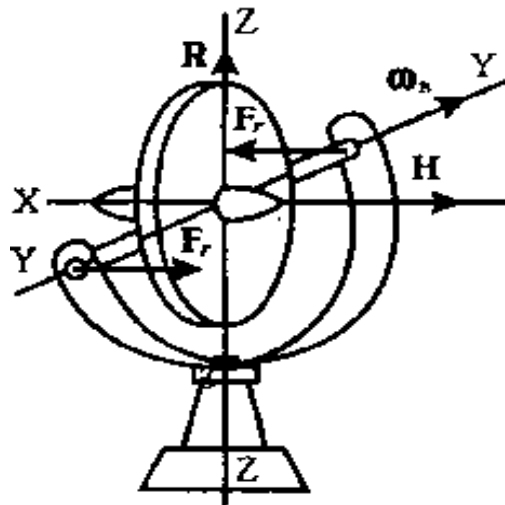


Рис.16.

Мы увидим, что гироскоп, совершая вынужденную прецессию вокруг оси Y-Y, начнет одновременно поворачиваться вокруг оси Z-Z так, чтобы вектор H кратчайшим путем совместился с вектором  $\omega$  (сверху этот поворот будет виден против часовой стрелки).

Таким образом, от подставки на гироскоп передается пара сил  $F_r$ , устанавливающая его ось определенным образом. Момент этой пары является гироскопическим моментом  $R$ , возникающим в теле ротора вследствие вынужденной прецессии. В этом можно убедиться, определив направление вектора  $R$  в данном примере по правилу трех пальцев левой руки.

Величина гироскопического момента при вынужденном повороте гироскопа будет

$$R = H \omega \quad (7)$$

Не вникая в физическую природу гироскопического момента, отметим, что он является следствием так называемых *кориолисовых* сил инерции, которые возникают при повороте вращающегося тела вокруг оси, не совпадающей с осью вращения.

## ГЛАВА 2.

### ГИРОКОМПАС НА НЕПОДВИЖНОМ ОСНОВАНИИ

#### 2.1. Принцип использования гироскопа в качестве курсоуказателя. Полезная составляющая земного вращения

Проследим за видимым движением главной оси свободного гироскопа, установленного в некоторой северной широте  $\varphi$ .

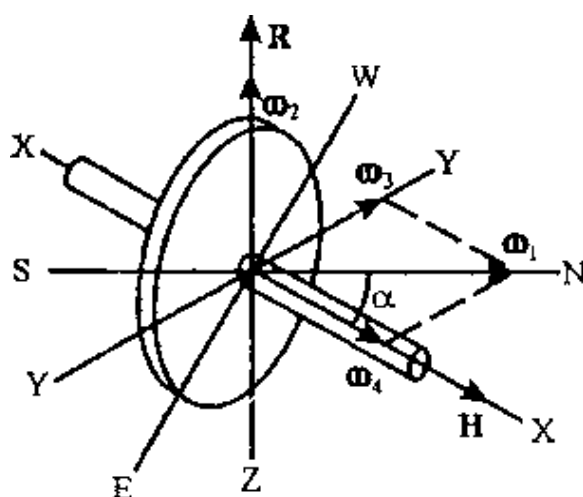


Рис. 17

Пусть в первоначальный момент главная ось X-X гироскопа строго горизонтальна и составляет с меридианом некоторый угол  $\alpha$ . Причем северный конец главной оси отклонен к востоку (рис. 17). При такой установке вертикальная ось Z-Z прибора совпадает с отвесной линией наблюдателя. Северным концом главной оси будем называть тот ее конец, который расположен в северной половине горизонта.

Нам известно, что горизонтальная составляющая земного вращения  $\omega_1$  показывает, что плоскость истинного горизонта вращается в пространстве вокруг линии N-S с угловой скоростью  $\omega_1 \cos \varphi$ . Причем восточная половина горизонта непрерывно «опускается», а западная «поднимается» относительно своего начального положения. Следовательно, ось гироскопа начнет совершать видимое движение вокруг оси Y-Y. Причем северный конец главной оси будет подниматься над горизонтом, а южный — уходить под горизонт.

Чтобы получить величину угловой скорости видимого поворота гироскопа вокруг оси Y-Y, разложим угловую скорость  $\omega_1$  на составляющие  $\omega_3$  и  $\omega_4$  соответственно по осям Y-Y и X-X гироскопа.

Составляющая  $\omega_4$ , направленная по оси X-X, ничтожно мала по сравнению с угловой скоростью  $\Omega$  собственного вращения ротора гироскопа вокруг оси X-X, поэтому в дальнейшем принимать ее во внимание мы не будем. Кроме того, она показывает, что плоскость истинного горизонта вращается вокруг оси X-X гироскопа и поэтому не вызывает видимого изменения положения этой оси относительно плоскости истинного горизонта.

Из рисунка имеем:

$$\omega_3 = \omega_1 \sin \alpha = \omega_{\frac{1}{2}} \cos \varphi \sin \alpha \quad (8)$$

Составляющая  $\omega_3$  показывает, что плоскость истинного горизонта вращается вокруг оси Y-Y гироскопа с угловой скоростью

$$\omega_3 = \omega_{\frac{1}{2}} \cos \varphi \sin \alpha$$

Эта составляющая вызовет видимый подъем северного конца оси X - X над плоскостью горизонта. Если северный конец оси отклонить к западу на некоторый угол  $\alpha$ , то составляющая  $\omega_3$  изменит свое направление и северный конец оси будет видимым образом опускаться под горизонт, так как в этом случае

$$\omega_3 = \omega_{\frac{1}{2}} \cos \varphi \sin(-\alpha) = -\omega_{\frac{1}{2}} \cos \varphi \sin \alpha$$

Помимо движения относительно горизонта, ось X - X гироскопа начнет совершать видимое движение относительно меридиана, так как плоскость меридиана наблюдателя вращается в пространстве вокруг отвесной линии наблюдателя с угловой скоростью  $\omega_2 = \omega_{\frac{1}{2}} \sin \varphi$  причем в северной широте северная часть меридиана непрерывно отходит к западу, а в южной широте — к востоку.

В нашем случае вектор вертикальной составляющей  $\omega_2$  направлен вверх по оси Z-Z, так как в начале параграфа было оговорено, что гироскоп установлен в северной широте. Поэтому точка N меридиана отходит к западу, а северный конец оси X - X совершает видимое движение к востоку.

Итак, свободный гироскоп не может быть использован в качестве курсоуказателя, потому что ось его непрерывно уходит от меридиана и одновременно наклоняется к плоскости горизонта.

Лишим теперь наш гироскоп возможности поворачиваться вокруг оси Y-Y. Как мы это делали в предыдущем параграфе (см. рис. 16), т.е. заменим свободный гироскоп связанным.

В этом случае гироскоп вынужден будет поворачиваться вместе с землей вокруг своей оси Y-Y с угловой скоростью согласно формуле (8), т.е. он будет совершать вынужденную прецессию. Следовательно, в теле ротора гироскопа появится гироскопический момент R, направленный согласно правилу трех пальцев левой руки вверх по оси Z-Z гироскопа.

Этот момент заставит гироскоп повернуться вокруг оси так, чтобы его главная ось совместилась с меридианом. Величина гироскопического момента определяется по формуле (7), т.е.  $R = H \omega_p$ ,

но  $\omega_p = \omega_z = \omega_{\pm} \cos \varphi \sin \alpha$ . Тогда:  $R = H \omega_{\pm} \cos \varphi \sin \alpha$  (9)

Итак, в результате вращения земли на гироскоп с двумя степенями свободы действует направляющая пара сил, которая увлекает его главную ось к плоскости меридиана наблюдателя. Как только ось X-X гироскопа совместится с меридианом,  $\alpha$  станет равным 0, тогда и R будет равен 0 и движение гироскопа прекратится. В следующий момент меридиан снова уйдет от оси X-X с угловой скоростью  $\omega_2 = \omega_{\pm} \sin \varphi$  и сразу же возникнет угол  $\alpha$ , появится составляющая  $\omega_3$  и гироскопический момент R, и ось гироскопа вновь придет в меридиан. Подробные исследования показывают, что гироскоп с двумя степенями свободы совершает незатухающие колебания около меридиана.

Таким образом, лишив гироскоп свободы вращения относительно оси Y-Y, мы превратили его в прибор, который указывает меридиан наблюдателя. Следовательно, такой прибор становится гироскопическим указателем истинного меридиана, или *гироскопическим компасом*.

На этом основании момент гироскопической реакции называют *направляющим моментом гироскопического компаса*, а составляющую земного вращения (формула (8)) называют *полезной составляющей земного вращения*, так как именно эта составляющая создает в теле ротора гироскопа направляющий момент.

Из формулы (9) видно, что величина направляющего момента гироскопического компаса зависит от кинетического момента H, широты места  $\varphi$  и угла  $\alpha$  отклонения главной оси гироскопического компаса от меридиана. Надлежащая величина R в современных гироскопических компасах достигается способами, рассмотренными в п. 1.2. В высоких широтах, как следует из формулы, условия работы гироскопического компаса резко ухудшаются.

Гироскоп, заключенный в камеру (гироскопическую камеру) и имеющий устройство для создания направляющего момента к меридиану, называется *чувствительным элементом (ЧЭ) гироскопического компаса*. Чувствительный элемент является основным узлом гироскопического компаса, а все остальные детали и устройства служат для обеспечения работы чувствительного элемента.

Гироскопический компас, у которого в качестве чувствительного элемента используется гироскоп с двумя степенями свободы, т.е. связанный гироскоп, называется гироскопическим компасом с двумя степенями свободы.

Однако связанный гироскоп в качестве чувствительного элемента в современных морских гироскопических компасах не применяется. Гироскопический компас с двумя степенями свободы может работать только на неподвижном основании, т.е. на берегу. На судне такой прибор работать не может, так как на качке появится составляющая вынужденного поворота прибора вокруг оси Y-Y, вследствие чего возникнет гироскопический момент, который уведет ось гироскопа из меридиана.

В морских гироскопических компасах в качестве чувствительных элементов используются гироскопы с неполной связью.

*Гироскопом с неполной связью* называется такой гироскоп, у которого при определенном положении его главной оси момент внешних

сил равен нулю, а при уходе оси от этого положения момент появляется.

Неполную связь можно осуществить различными способами, основные из которых будут приведены ниже.

## 2.2. Способы превращения гироскопа в гирокомпас

### 2.2.1. Смещение центра тяжести чувствительного элемента вниз по оси Z-Z.

На рис. 18 изображен гироскоп, заключенный в гирокамеру, в нижней части которой укреплен груз, благодаря чему центр тяжести G гирокамеры смещен относительно точки подвеса O вниз на расстояние  $a$ , называемое метацентрической высотой чувствительного элемента.

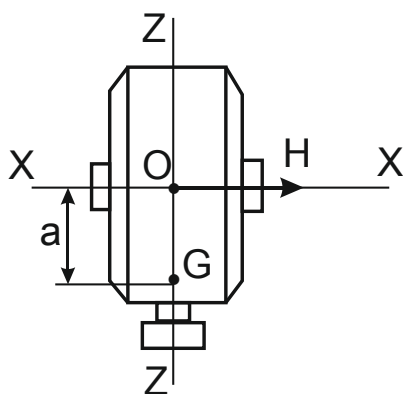


Рис. 18.

Предположим, что такой прибор установлен на экваторе и в первоначальный момент его главная ось X-X горизонтальна и выведена из меридиана на угол  $90$  град., т.е. направлена по линии E-W (рис. 19). В этом положении сила тяжести P гирокамеры с грузом не будет создавать момента относительно точки подвеса, поскольку она лежит на линии действия силы. Следовательно, гироскоп вследствие своего основного свойства будет стремиться сохранять неизменным первоначальное направление главной оси.

В следующий момент времени в результате вращения земли плоскость истинного горизонта повернется в пространстве на некоторый угол  $\beta$  (восточная половина горизонта опустится), и ось X-X, сохраняя первоначальное направление, составит с горизонтом такой же угол  $\beta$ . Сила тяжести P, направленная всегда по отвесной линии, введет относительно оси Y-Y момент L, вектор которого направлен вдоль оси Y-Y на читателя, т.е. к северу. Под действием момента L гироскоп начнет совершать прецессионное движение вокруг оси Z-Z, направление которого определится по правилу полюсов: полюс гироскопа в прецессионном движении стремится к полюсу момента внешней силы по кратчайшему расстоянию. Следовательно, конец вектора H пойдет к северной части меридиана наблюдателя.



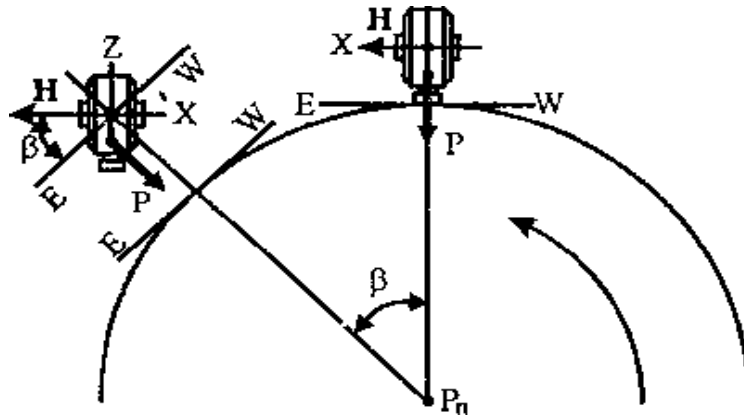


Рис. 19.

Итак, гироскоп с пониженным центром тяжести, будучи выведенным из меридиана, совершает прецессионное движение к меридиану и, как мы увидим в дальнейшем, его ось в конечном итоге установится в меридиане. Такой гироскоп становится указателем меридиана, т.е. *чувствительным элементом гирокомпаса*.

Определим по формуле (5) угловую скорость прецессии чувствительного элемента к меридиану.

Обозначив массу чувствительного элемента через  $m$ , получим:

$$L = P l = mgl,$$

где  $g$  - ускорение силы тяжести  $P$ ;  $l$  - плечо силы  $P$ .

Из треугольника GOD:  $l = a \sin\beta$ . Следовательно,  $L = mga \sin\beta$ .

Угол  $\beta$  обычно мал, так как гироскоп сразу же реагирует на опускание горизонта и начинает прецессировать к меридиану, поэтому, заменив  $\sin\beta$  самим углом  $\beta$ , выраженным в радианах, получим  $L = mga\beta$ .

Произведение  $mga$  для данного чувствительного элемента есть величина постоянная, поэтому, обозначив ее через  $B$ , формулу (5) для угловой скорости прецессии чувствительного элемента к меридиану можно записать в виде:

$$\omega_p = \frac{B\beta}{H} \quad (10)$$

Итак, угловая скорость прецессии чувствительного элемента прямо пропорциональна его моменту силы тяжести и обратно пропорциональна кинетическому моменту.

Из выражения  $L = mgasin\beta$  имеем:  $L_{max} = mgasin90^\circ = mga = B$ . На этом основании коэффициент  $B$  называется максимальным моментом силы тяжести чувствительного элемента.

Гироскоп с пониженным центром тяжести является гироскопом с неполной связью. Действительно, при горизонтальном положении оси

X-X прибора угол  $\beta$  и момент  $B\beta$  равны нулю, но стоит только вывести ось X-X прибора из горизонтального положения, как сразу же появляется угол  $\beta$  и момент  $B\beta$ , который заставит прибор прецессировать к меридиану.

Таким образом, главная ось гироскопа с неполной связью так же, как и ось связанного относительно оси Y-Y гироскопа, будучи выведенной из меридиана, получит движение к меридиану.

При этом необходимо отметить, что у всех гирокомпасов с пониженным центром тяжести чувствительного элемента северным концом главной оси является тот, со стороны которого вращение ротора усматривается совершающимся против движения часовой стрелки. Другими словами, вектор кинетического момента  $H$  у этих гирокомпасов направлен на север.

Превращение гироскопа в гирокомпас путем снижения центра тяжести чувствительного элемента применяется в отечественных гирокомпасах типа «Курс», «Амур» и других. Эти гирокомпасы называют часто гирокомпасами с твердым маятником или гирокомпасами с положительным маятником.

#### 2.2.2. Подвес к гирокамере сообщающихся сосудов с ртутью.

Возникновение момента силы тяжести, вызывающего прецессионное движение главной оси чувствительного элемента гирокомпаса к меридиану, можно добиться прикреплением к гирокамере двух сообщающихся сосудов с тяжелой жидкостью (ртутью). При возникновении угла наклона главной оси гироскопа относительно горизонта в одном из сосудов возникает избыток ртути, который и вызывает момент силы тяжести, в результате чего появляется прецессионное движение оси чувствительного элемента к меридиану. Подробно рассматривать теорию работы такого устройства в этом описании мы не будем, так как в отечественных гирокомпасах такой способ превращения свободного гироскопа в чувствительный элемент гирокомпаса применения не нашел.

Подвес к гирокамере сосудов с ртутью для превращения гироскопа в гирокомпас применен в гирокомпасе «Спери-минор» и в некоторых других иностранных гирокомпасах. Такие гирокомпасы чаще называются гирокомпасами с жидкостным или гидравлическим маятником или гирокомпасами с отрицательным маятником.

#### 2.2.3. Электромагнитное управление

В рассмотренных выше случаях прецессионное движение чувствительного элемента к меридиану создается моментами силы тяжести, пропорциональными углу наклона главной оси к горизонту. Подобные же моменты могут быть введены электромеханическим способом. С этой целью на уравновешенном чувствительном элементе устанавливается измерительное устройство, называемое индикатором горизонта (рис. 20), в котором вырабатывается электрический сигнал, пропорциональный углу наклона главной оси прибора к горизонту. Сигнал индикатора горизонта усиливается в специальном усилителе и

подводится к обмотке индукционного датчика, который преобразует сигнал во вращающий момент относительно оси  $Y-Y$  чувствительного элемента.

В дальнейшем этот датчик будем называть датчиком горизонтального момента.

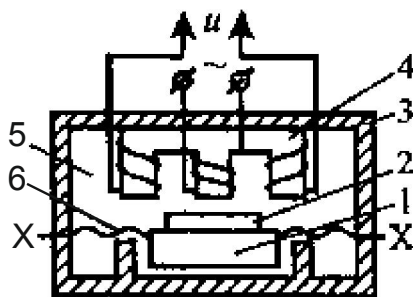


Рис. 20.

Индикатор горизонта представляет собой герметизированный корпус 3, заполненный вязкой жидкостью 5, в которую погружено рабочее тело индикатора 1. Рабочее тело прикреплено к корпусу индикатора пружинами 6. Плотность жидкости подобрана так, чтобы рабочее тело имело нейтральную плавучесть.

При симметричном положении якоря 2 относительно сердечника 4 сигнального трансформатора сопротивление магнитных цепей вторичных обмоток равны между собой и наводимые в этих обмотках э.д.с. взаимно компенсируются. При смещении же якоря из симметричного положения из-за наклона чувствительного элемента относительно горизонта на выходе сигнального трансформатора появляется сигнальное напряжение  $u$ , равное разности э.д.с., наводимых в каждой вторичной обмотке.

Напряжение  $u$ , снимаемое с индикатора горизонта, пропорционально перемещению рабочего тела, т.е. углу наклона главной оси чувствительного элемента от плоскости истинного горизонта.

Сигнальное напряжение, усиленное в усилителе, поступает на статор датчика горизонтального момента. Пропорционально этому сигналу датчик введет момент относительно оси  $Y-Y$  чувствительного элемента, и чувствительный элемент начнет совершать прецессионное движение вокруг вертикальной оси, т.е. к меридиану.

Таким образом, и в гирокомпасе с электромагнитным управлением угловая скорость прецессии чувствительного элемента к меридиану зависит только от угла  $\beta$  наклона главной оси прибора к плоскости истинного горизонта.

Подобный способ превращения свободного гироскопа в чувствительный элемент гирокомпаса применен в отечественных гирокомпасах типа «Вега» и во многих иностранных гирокомпасах.

### 2.3. Незатухающие колебания гирокомпаса

В предыдущем параграфе были рассмотрены способы создания прецессии чувствительного элемента к меридиану, т.е. способы создания направляющего момента в современных гирокомпасах. Однако факт дви-

жения оси прибора к меридиану еще не дает нам права утверждать, что такой прибор может быть использован в качестве указателя меридиана. Для использования гироскопа в качестве курсоуказателя необходимо, чтобы его главная ось устанавливалась в истинном меридиане или в каком-нибудь другом известном направлении и не выходила из него. Рассмотрим более подробно движение, которое совершает относительно меридиана и горизонта ось чувствительного элемента с пониженным центром тяжести, установленного в некоторой северной широте  $\varphi$ . При этом временно условимся считать, что силы трения в подвесе чувствительного элемента отсутствуют.

Пусть в первоначальный момент ось прибора горизонтальна и отклонена от меридиана на некоторый малый угол  $\alpha$  востоку (рис. 21). На рисунке показаны: NESW - плоскость истинного горизонта. Q - плоскость, перпендикулярная полуденной линии N-S наблюдателя, M-M - меридиан наблюдателя,  $\omega_1$  - горизонтальная составляющая земного вращения,  $\omega_2$  - вертикальная составляющая земного вращения,  $\omega_3$  - полезная составляющая земного вращения.

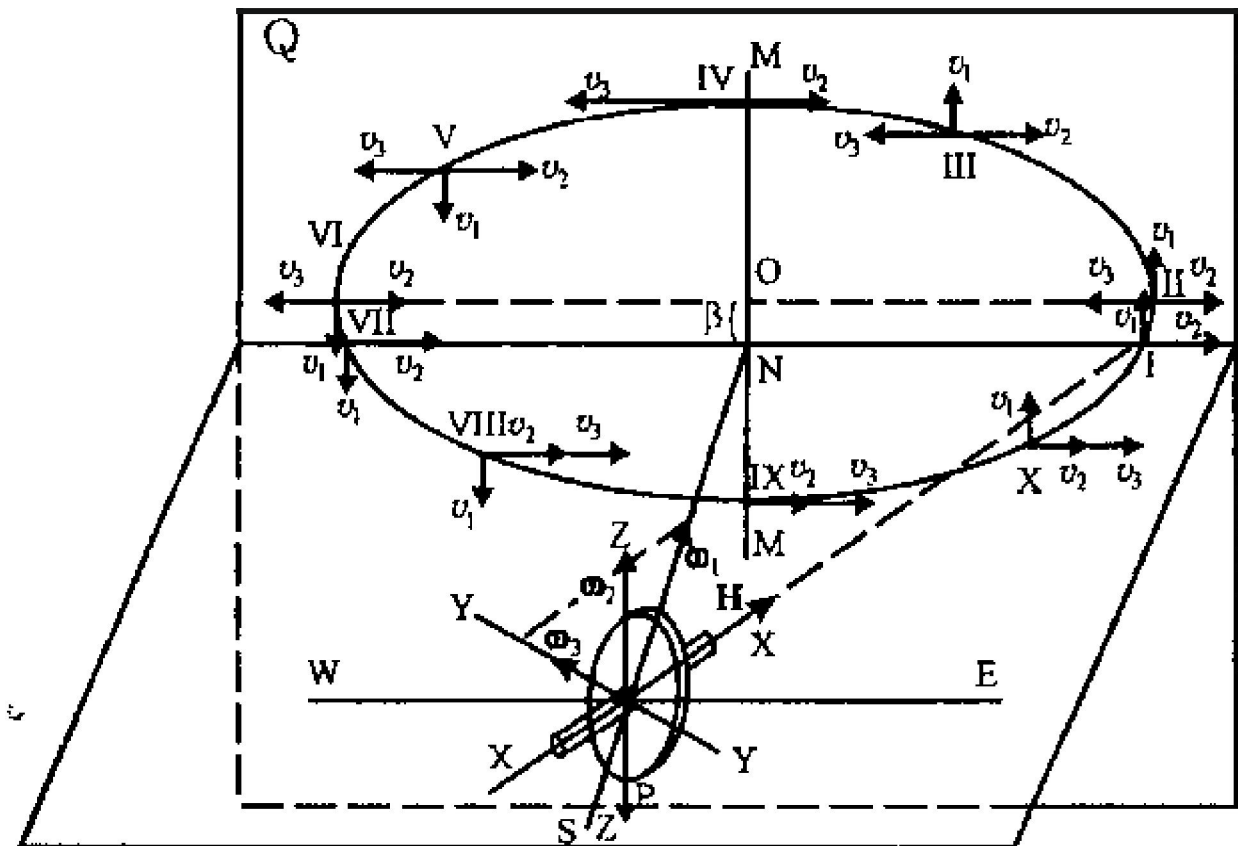


Рис. 21.

Говоря об отклонении главной оси гироскопа от меридиана, мы всегда будем иметь в виду ее северную половину, т.е. для гироскопа с пониженным центром тяжести чувствительного элемента — ту половину, к которой направлен вектор кинетического момента  $H$ .

Проследим за траекторией движения полюса гироскопа, наблюдая

движение его проекции на плоскость Q.

В первоначальный момент главная ось X-X прибора горизонтальна, поэтому  $\beta = 0$ ,

$$B\beta = 0; \quad \omega_p = B\beta/H = 0 \quad (11)$$

Следовательно, в первоначальный момент прецессионное движение чувствительного элемента отсутствует. Но вследствие наличия угла  $\alpha$  и полезной составляющей земного вращения  $\omega_z$  восточная половина горизонта начнет опускаться под полюсом гироскопа и проекция последнего начнет перемещаться вверх с некоторой линейной скоростью  $v_1$  (положение I). Одновременно с этим проекция полюса гироскопа начнет перемещаться к востоку, так как меридиан наблюдателя вращается вокруг отвесной линии с постоянной для данной широты угловой скоростью  $\omega_2 = \omega_g \sin \varphi$  и его северная часть непрерывно уходит к западу. Обозначим эту постоянную линейную скорость движения проекции полюса гироскопа  $v_2$ .

Вследствие видимого подъема оси гироскопа появится угол  $\beta$ , возникнет момент  $B\beta$  и гироскоп начнет прецессировать к меридиану с угловой скоростью  $\omega_p = B\beta/H$ ; поэтому полюс гироскопа и его проекция получат некоторую линейную скорость  $v_3$ , направленную к меридиану (положение II). Траекторией движения проекции полюса гироскопа из положения I в положение II будет кривая, обращенная вогнутостью к меридиану, поскольку линейная скорость  $v_3$ , непрерывно увеличиваясь (вследствие увеличения угла  $\beta$ ), замедляет уход полюса гироскопа от меридиана.

Наступит такой момент, когда скорости  $v_2$  и  $v_3$  сравняются по величине, так как скорость  $v_2$  постоянна, а скорость  $v_3$  непрерывно увеличивается. Положим, что равенство этих скоростей наблюдается в положении II. Тогда в этом положении уход полюса гироскопа от меридиана прекратится и уже в следующий момент полюс гироскопа начнет перемещаться к меридиану, так как скорость  $v_3$  станет больше, чем  $v_2$  (положение III).

В положении III скорость  $v_1$  меньше, чем в положениях I и II, так как угол  $\alpha$  и полезная составляющая  $v_3$  уменьшились, и горизонт стал медленнее опускаться под полюсом гироскопа.

Продолжая подниматься над горизонтом с линейной скоростью  $v_1$  и двигаясь к меридиану с линейной скоростью  $v_3 - v_2$ , полюс гироскопа перемещается по кривой, обращенной вогнутостью к горизонту, так как  $v_1$  непрерывно уменьшается.

Когда ось прибора придет в меридиан (положение IV), подъем полюса гироскопа прекратится, потому что в меридиане

$$\alpha = 0; \quad \omega_z = \omega_g \cos \varphi \sin \alpha = 0 \quad \text{и} \quad v_1 = 0 \quad (12)$$

Но вследствие наличия угла прибор продолжает прецессировать вокруг оси Z-Z, поэтому полюс гироскопа перейдет в западную половину горизонта. Начиная с положения IV, угол  $\beta$  начнет уменьшаться, так как западная половина горизонта непрерывно в пространстве поднимается.

Полюс гироскопа видимым образом будет опускаться с линейной скоростью  $v_1$ . Значит в меридиане угол  $\beta$ , момент  $B\beta$ , угловая скорость прецессии  $\omega_p = B\beta/H$  и линейная скорость  $v_3$  максимальны.

По мере отхода главной оси от меридиана линейная скорость  $v_1$  увеличивается, так как увеличивается угол  $\alpha$ , а скорость  $v_3$  уменьшается, так как уменьшается угол  $\beta$  (положения V, VI).

В положении VI скорости  $v_2$  и  $v_3$  сравняются, а в следующий момент  $v_2$  будет больше  $v_3$ . И полюс гироскопа вновь пойдет к меридиану. Следовательно, угол  $\alpha$  и скорость  $v_1$  в положении VI максимальны.

В положении VII ось прибора горизонтальна,  $\beta = 0$  и поэтому  $v_3 = 0$ . В следующий момент северный конец оси опустится под горизонт, перемещаясь с линейной скоростью  $v_1$ ; появится угол  $\beta$ , и гироскоп начнет прецессировать к меридиану, т.е. линейные скорости  $v_2$  и  $v_3$  будут суммироваться. В том, что, начиная с положения VII, гироскоп вновь начнет прецессировать к меридиану, нетрудно убедиться. В самом деле, в положениях II, III, IV, V, VI северный конец главной оси был приподнят над горизонтом и вектор момента силы тяжести  $L$  был направлен по оси Y-Y к западу. Поэтому, согласно правилу полюсов, полюс гироскопа перемещался к западу. После положения VII северный конец главной оси опущен под горизонт, вектор  $L$  направлен к востоку и полюс гироскопа перемещается к востоку.

В положении IX  $\alpha = 0$ ;  $\omega_3 = 0$  и  $v_1 = 0$ . Угол  $\beta$  и скорость  $v_3$  максимальны. Северный конец оси перейдет в восточную половину горизонта и начнет уходить от меридиана, одновременно приподнимаясь, так как восточная половина горизонта в пространстве опускается.

И, наконец, мы увидим, что ось вернется в исходное положение I, а дальше все явления периодически повторятся.

Фигура, полученная на плоскости, является эллипсом. Причем большая ось эллипса проходит через точки II и VI, а малая ось совпадает с меридианом M - M.

Таким образом, гироскоп с пониженным центром тяжести, будучи выведен из меридиана, совершает около него незатухающие эллиптические колебания. Значит, такой прибор «чувствует» меридиан, и поэтому гироскоп с пониженным центром тяжести мы с полным основанием можем называть чувствительным элементом гироскопа.

В действительности эллипс незатухающих колебаний получается сильно сжатым. Если следить за колебаниями чувствительного элемента, то нам будет казаться, что они совершаются только в горизонтальной плоскости, а угол  $\beta$  наклона оси к горизонту совершенно незаметен для глаза. Величина отношения малой оси эллипса к большой выражается в сотых долях единицы. Совершенно аналогично можно убедиться в том, что гироскоп с подвешенными к нему ртутными сосудами, будучи выведен из меридиана, также совершает около него незатухающие колебания по эллипсу.

Время, в течение которого чувствительный элемент совершает одно полное колебание по эллипсу, называется *периодом незатухающих ко-*

лебаний гироскопа.

Период незатухающих колебаний гироскопа с пониженным центром тяжести выражается следующей формулой:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{H}{B\omega_0 \cos \varphi}} \quad (13)$$

Из формулы (13) видно, что для таких гироскопов период незатухающих колебаний зависит только от широты, в которой находится гироскоп, причем с увеличением широты период увеличивается.

Период незатухающих колебаний подбором конструктивных постоянных  $H$  и  $B$  можно сделать каким угодно. Наивыгоднейшей величиной периода незатухающих колебаний у этих гироскопов, как мы увидим в дальнейшем, является величина  $T_0 = 84,4$  мин.

Благодаря значительной величине периода незатухающих колебаний гироскоп обладает большой устойчивостью в меридиане, поскольку при кратковременных действиях на него возмущающих усилий (удары волн, сотрясения корпуса и т.д.) он не успевает сколько-нибудь значительно уходить от меридиана.

Рассматривая движение чувствительного элемента, мы не принимали во внимание силы трения в его подвесе. В действительности эти силы существуют, и колебания чувствительного элемента совершаются не по эллипсу, а по сходящейся эллиптической спирали, т.е. по своему характеру являются затухающими. После того как колебания затухнут, главная ось прибора установится в положении равновесия.

Положением равновесия главной оси гироскопа будем называть такое ее положение, при котором она остается неподвижной относительно земли, т.е. относительно плоскостей меридиана и горизонта.

Определим координаты положения равновесия оси гироскопа, т.е. углы  $\alpha_r$  и  $\beta_r$ , которые ось составляет с плоскостями меридиана и горизонта. Движение полюса гироскопа относительно плоскости горизонта определяется линейной скоростью  $v_1$ , которая отсутствует только в том случае, когда ось находится в меридиане, т.е. при  $\alpha = 0$  (см. рис. 21, положения IV и IX). Следовательно, в положении равновесия оси гироскопа относительно горизонта она должна находиться в плоскости меридиана.

Движение полюса гироскопа относительно меридиана определяется скоростями  $v_2$  и  $v_3$ . Чтобы ось оставалась неподвижной относительно меридиана, скорости  $v_2$  и  $v_3$  должны быть равны по величине и противоположны по направлению. Другими словами, прибор должен прецессионировать за меридианом с такой же угловой скоростью, с какой меридиан уходит в пространстве от оси прибора, т.е. должно быть выполнено равенство  $\omega_p = \omega_2$  или, подставив вместо  $\omega_p$  и  $\omega_2$  их значения,

$$B\beta_r/H = \omega_0 \sin \varphi \quad (14)$$



Это условие будет выполнено только при определенном угле  $\beta_r$ , величина которого из последнего равенства будет

$$\beta_r = \frac{B}{H} \omega_3 \sin \varphi. \quad (15)$$

Итак, в положении равновесия ось гирокомпаса находится в меридиане и наклонена к горизонту на угол  $\beta_r$ , т.е. координаты положения равновесия оси гирокомпаса будут:

$$\begin{cases} \alpha_r = 0 \\ \beta_r = \frac{H}{B} \omega_3 \sin \varphi \end{cases} \quad (16)$$

Вот почему эллипс незатухающих колебаний гирокомпаса, установленного в северной широте, как это видно из рис. 21, приподнят над горизонтом на угол  $\beta_r$ .

Ось гирокомпаса сама устанавливается под углом  $\beta_r$  к горизонту, чтобы следовать за меридианом, оставаясь в его плоскости. В этом легко убедиться, если проследить за движением чувствительного элемента, ось которого в первоначальный момент находится, например, в меридиане и горизонтальна. В следующий момент вследствие вращения меридиана северный конец оси отклонится к востоку и начнет приподниматься, так как восточная половина горизонта в пространстве опускается. Появятся угол  $\beta$ , момент  $B\beta$ , и прибор начнет прецессировать к меридиану. При этом ось прибора неизбежно «догонит» меридиан, так как угол  $\beta$  и угловая скорость прецессии все время возрастают. Если ось опередит меридиан, то она окажется в западной половине горизонта, которая непрерывно приподнимается. Угол  $\beta$  начнет уменьшаться, угловая скорость прецессии уменьшится, и прибор «подождет» меридиан.

В южной широте в положении равновесия северный конец оси опущен под горизонт на такой же угол  $\beta_r$ , так как в южной широте вращение меридиана наблюдателя совершается так, что его северная часть непрерывно отходит к востоку. Следовательно, и прецессионное движение чувствительного элемента совершается к востоку.

Угол  $\beta_r$  очень мал по абсолютной величине и в средних широтах составляет всего лишь около 0,1 град.

#### **2.4. Погашение незатухающих колебаний методом горизонтального момента. Жидкостный успокоитель**

В гирокомпасах силы трения в подвесе чувствительного элемента настолько малы, что затухающие колебания под их действием продолжают длиться длительное время. Так, например, если чувствительный элемент гирокомпаса «Курс» вывести из меридиана на угол  $30^\circ$  и предоставить ему возможность совершать свободные колебания около меридиана, то эти колебания затухнут через 10-15 суток. Очевидно, что такой прибор негоден для практического использования в качестве курсоуказателя. Впервые, пришлось бы перед каждым выходом судна в море запускать



гироскоп за 10-15 суток, что весьма неудобно. Во-вторых, если такой прибор в условиях плавания по каким-либо причинам выйдет из меридиана, ему потребуется длительное время для возвращения в меридиан, и в течение этого времени он не может быть использован в качестве курсоуказателя. Поэтому необходимо искусственно ускорить затухание колебаний и таким образом ускорить приход оси гироскопа в меридиан. На первый взгляд, может показаться, целесообразным увеличить силы трения в подвесе чувствительного элемента. Однако это делать нельзя, так как гироскоп приобретет недопустимый «застой» и точность курсоуказания станет недостаточной.

В современных гироскопах для погашения незатухающих колебаний вводятся специальные приспособления, называемые успокоителями, принцип действия которых в общих чертах сводится к следующему.

Обратимся к эллипсу незатухающих колебаний гироскопа (см. рис. 21). Из рисунка нетрудно установить, что для погашения незатухающих колебаний достаточно было бы ввести дополнительное прецессионное движение чувствительного элемента в горизонтальной плоскости (вокруг оси Z-Z), причем такое, чтобы дополнительная линейная скорость полюса гироскопа ускоряла приход прибора в меридиан и тормозила его уход из меридиана, т.е. чтобы она всегда была направлена к меридиану. Согласно теореме о кинетическом моменте для создания такой скорости необходимо ввести дополнительный момент относительно оси Y-Y прибора, вектор которого был бы всегда горизонтален и направлен к меридиану. Тогда, согласно правилу полюсов, полюс гироскопа получит дополнительную скорость, направленную к меридиану, что приведет в конечном итоге к погашению колебаний чувствительного элемента. Такой метод погашения незатухающих колебаний называется методом горизонтального момента.

**Жидкостный успокоитель.** В гироскопах с пониженным центром тяжести чувствительного элемента для создания горизонтального момента используется так называемый жидкостный успокоитель, который схематически представляет собой два сообщающихся сосуда, укрепленных в верхней части гироскопа с северной и южной ее сторон (рис. 22). Сосуды примерно до половины заполнены вязкой жидкостью, обычно вазелиновым маслом.

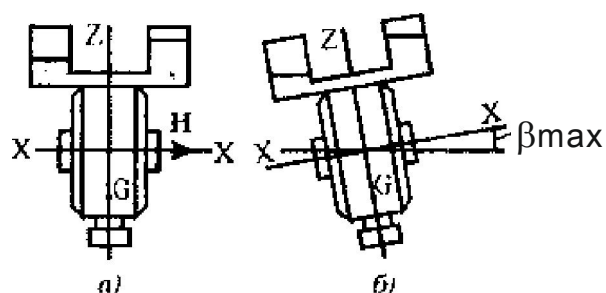


Рис. 22.

При незатухающих колебаниях чувствительный элемент гироскопа совершает два вида колебаний: вертикальные - в плоскости углов  $\beta$  и

горизонтальные - в плоскости углов  $\alpha$  (см. рис. 21). Колебания чувствительного элемента в вертикальной плоскости, происходящие вместе с сосудами успокоителя, вызывают перетекание жидкости из одного сосуда в другой, т.е. вызывают колебания жидкости в сосудах. Диаметр соединительной трубки сосудов и вязкость жидкости подбираются такими, чтобы колебания жидкости запаздывали по фазе на  $1/4$  периода относительно колебаний самих сосудов при равенстве периодов тех и других колебаний. Это означает, что когда ось X-X чувствительного элемента горизонтальна (рис. 22, а), в одном из сосудов должен быть максимальный избыток жидкости. Когда же ось X-X имеет максимальный угол наклона к горизонту (рис. 22, б), жидкости в сосудах станет поровну.

Рассмотрим, каково будет движение чувствительного элемента с укрепленным на нем масляным успокоителем.

Пусть в начальный момент ось X-X прибора горизонтальна и отклонена от меридиана на угол  $\alpha_1$  к востоку (рис. 23). На этом рисунке показаны последовательные положения чувствительного элемента и масла в успокоителе, а также траектория движения проекции полюса гироскопа на плоскость, перпендикулярную плоскостям меридиана и горизонта.

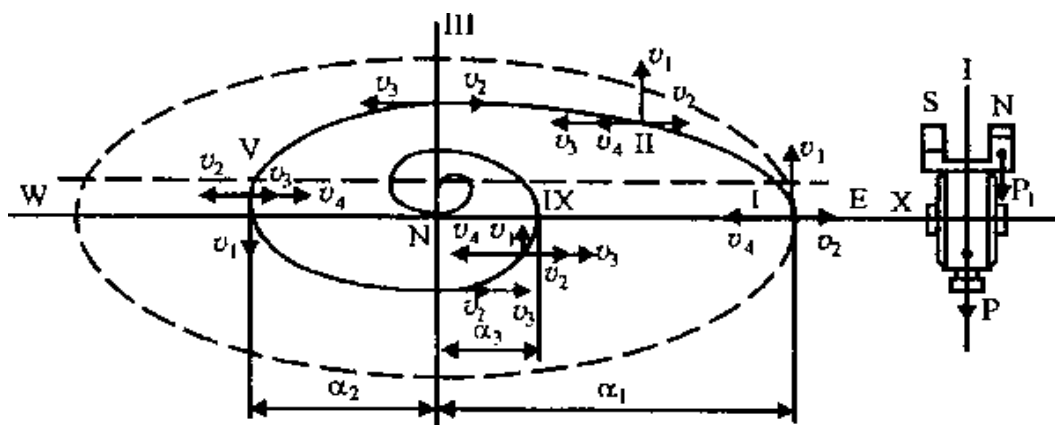


Рис. 23.

Для простоты предположим, что режим колебаний масла в сосудах уже установился, т.е. колебания эти запаздывают по фазе относительно колебаний самих сосудов на  $1/4$  периода. Это означает, что в положении I, когда ось X-X чувствительного элемента горизонтальна, максимальный избыток жидкости будет в северном сосуде, так как до этого момента северный конец оси был опущен под горизонт и масло перетекало в северный сосуд. Сила тяжести избытка жидкости  $P_1$  вводит момент относительно оси Y-Y, вектор которого направлен к западу. Этот момент вызовет прецессию чувствительного элемента вокруг оси Z-Z, и поэтому полюс гироскопа, согласно правилу полюсов, начнет перемещаться к западу. Условимся называть прецессию чувствительного элемента под действием силы тяжести  $P_1$  избытка масла в одном из сосудов успокоителя *добавочной прецессией*, а прецессию, вызванную моментом тяжести  $P$  самого чувствительного элемента, — *главной прецессией*.

Линейную скорость полюса гироскопа в результате добавочной прецессии обозначим через  $v_4$ .

В положении I, помимо линейной скорости  $v_4$ , полюс гироскопа имеет линейные скорости  $v_1$  и  $v_2$ , смысл которых нам уже известен из предыдущего параграфа.

В результате добавочной прецессии полюс гироскопа не будет перемещаться по эллипсу, как это было при незатухающих колебаниях, а пойдет по сходящей спирали.

Линейная скорость  $v_4$  больше, чем скорость  $v_2$ , поэтому в положении I чувствительный элемент пойдет к меридиану, а не от меридиана, как это было при незатухающих колебаниях.

В положении II избыток масла в северном сосуде уменьшился, так как часть жидкости перетекла в южный сосуд вследствие его опускания. Это вызвало уменьшение силы  $P_1$  и, следовательно, уменьшение угловой скорости добавочной прецессии и линейной скорости  $v_4$ .

Когда через четверть периода колебаний главная ось прибора придет в меридиан (положение III), угол  $\beta$  наклона оси к горизонту будет максимальным и, следовательно, жидкости в сосудах станет поровну. В этом положении  $P_1 = 0$ , добавочная прецессия прекратилась и  $v_4 = 0$ .

В следующий момент ось прибора перейдет в западную половину горизонта, полюс гироскопа и северный сосуд начнут опускаться. Однако жидкость все еще перетекает в южный сосуд, поэтому в нем образуется избыток жидкости. Момент силы  $P_1$ , а следовательно, и линейная скорость  $v_4$  изменяет свои направления на противоположные (положение IV). Линейная скорость  $v_4$  будет вновь направлена к меридиану.

Если до прихода чувствительного элемента в меридиан добавочная прецессия ускоряла его движение к меридиану, то теперь она замедляет уход оси прибора от меридиана. Следовательно, движение чувствительного элемента к меридиану будет совершаться быстрее, а от меридиана - медленнее, чем в подобных же случаях при незатухающих колебаниях.

В положении V наступит равенство скоростей  $v_3 = v_2 + v_4$ , и в следующий момент прибор начнет возвращаться к меридиану.

Когда ось прибора станет горизонтальной (положение VI), в южном сосуде образуется максимальный избыток жидкости. В этом положении сила тяжести избытка жидкости  $P_1$  и линейная скорость  $v_4$  максимальны.

Из рисунка видно, что наибольшее отклонение главной оси чувствительного элемента от меридиана к западу (угол  $\alpha_2$ ) меньше первоначального отклонения к востоку ( $\alpha_1$ ); колебания чувствительного элемента становятся затухающими.

После положения VI северный конец оси будет опускаться под горизонт и одновременно перемещаться к меридиану, жидкость начнет перетекать из южного сосуда в северный, сила тяжести  $P_1$  избытка жидкости, угловая скорость добавочной прецессии и линейная скорость  $v_4$  будут уменьшаться.

В положении VII угол  $\beta$  наклона оси к горизонту достигнет максимального значения и жидкости в сосудах станет поровну, т.е.  $P_1 = 0$ , уг-

ловая скорость добавочной прецессии и линейная скорость  $v_4$  также равны нулю.

В следующий момент северный конец оси окажется в восточной половине горизонта и начнет видимым движением приподниматься. Жидкость продолжает перетекать в северный сосуд, и в нем образуется избыток жидкости. Добавочная прецессия и линейная скорость вновь направлены к меридиану (положение VIII).

В положении IX ось X-X горизонтальна, а в северном сосуде, как и в положении I, образуется максимальный избыток жидкости. Отклонение главной оси от меридиана к востоку (угол  $\alpha_3$ ) меньше, чем предыдущее отклонение к западу (угол  $\alpha_2$ ).

Таким образом, чувствительный элемент совершил одно затухающее колебание по так называемой сходящейся эллиптической спирали. Далее все явления начнут периодически повторяться, пока колебания не затихнут. Итак, момент силы тяжести избытка жидкости в сосудах успокоителя создает добавочное прецессионное движение чувствительного элемента, всегда направленное к меридиану, которое превращает незатухающие колебания гирокомаса в затухающие.

Рассмотрим далее, какое положение займет главная ось прибора, когда колебания затухнут, т.е. определим координаты положения равновесия оси гирокомаса, имеющего приспособление для затухания.

Как нами было уже рассмотрено в п. 2.3, ось займет такое положение, при котором она будет оставаться неподвижной относительно плоскостей меридиана и горизонта.

Движение северного конца главной оси чувствительного элемента относительно горизонта при затухающих колебаниях, как это видно из рис. 23, определяется линейной скоростью  $v_1$ . Следовательно, в положении равновесия скорость  $v_1$  должна быть равной нулю, что возможно только при установке оси прибора в меридиане, когда  $\alpha_r = 0$ .

Ось прибора будет оставаться неподвижной относительно меридиана, если линейная скорость прецессионного движения северного конца оси будет равна скорости, с которой меридиан уходит от оси. В положении равновесия главная ось прибора должна быть наклонена к горизонту на некоторый угол  $\beta_r$ , так как при горизонтальном положении оси прецессионного движения за меридианом не будет.

Итак, координаты положения равновесия оси прибора при затухающих колебаниях будут:

$$\begin{cases} \alpha_r = 0 \\ \beta_r = \frac{H}{B - C_M} \omega_0 \sin \varphi \end{cases} \quad (17)$$

где  $C_M$  — максимальный момент силы тяжести избытка масла.

Угол  $\beta_r$  при наличии успокоителя несколько больше, чем при незатухающих колебаниях, так как момент силы тяжести чувствительного элемента  $B\beta_r$  уменьшается моментом  $C_M$  избытка масла в южном сосуде успокоителя. Легко видеть, что в северной широте в положении равно-

весия северный конец оси приподнят над горизонтом на угол  $\beta_r$ , а в южной — опущен под горизонт.

Жидкостный успокоитель для погашения незатухающих колебаний используется почти во всех гирокомпасах с твердым маятником, например, в гирокомпасах типа «Курс», «Амур» и других.

## **2.5. Погашение незатухающих колебаний методом вертикального момента**

Как мы видели, добавочная прецессия чувствительного элемента, совершаемая в горизонтальной плоскости и направленная всегда к меридиану, приводит к погашению незатухающих колебаний гирокомпаса. Очевидно, такого же результата можно достичь, создав добавочную прецессию чувствительного элемента в вертикальной плоскости и направленную всегда к горизонту. Для создания такой добавочной прецессии необходимо ввести устройство, создающее вертикальный момент. Такой метод погашения незатухающих колебаний, называемый методом вертикального момента, применяется в гирокомпасах с ртутными сосудами и с электромагнитным управлением. Существует несколько способов создания вертикального момента. Рассмотрим некоторые из них.

### **Создание вертикального момента с помощью эксцентрического груза**

Установка на западной половине гирокамеры, на горизонтальной оси  $Y-Y$  эксцентрического грузика, центр тяжести которого не совпадает с точкой подвеса гирокамеры, приводит к появлению добавочной прецессии чувствительного элемента в вертикальной плоскости при любом наклоне главной оси  $X-X$  к горизонту. Причем северный конец оси в результате добавочной прецессии идет к горизонту. Добавочная прецессия всегда направлена к горизонту и поэтому вызовет погашение незатухающих колебаний. Такой способ погашения незатухающих колебаний применен в гирокомпасах с жидкостным маятником (сообщающиеся сосуды с ртутью). В этом описании подробнее данный метод мы рассматривать не будем.

### **Создание вертикального момента электромагнитным способом**

Как было показано в предыдущем случае, для погашения незатухающих колебаний гирокомпаса необходимо создать добавочную прецессию чувствительного элемента в вертикальной плоскости к горизонту с угловой скоростью, пропорциональной углу  $\beta$ .

В гирокомпасах с электромагнитным управлением для этой цели на чувствительном элементе, кроме датчика горизонтального момента, установлен еще и датчик вертикального момента. Сигнальное напряжение на статор этого датчика также подается от индикатора горизонта через усилитель. Поэтому датчик вертикального момента вводит относительно оси  $Z-Z$  чувствительного элемента вращающий момент, вызывающий прецессионное движение чувствительного элемента к горизонту, что приведет к погашению незатухающих колебаний.

## ГЛАВА 3. ГИРОКОМПАС НА ДВИЖУЩЕМСЯ СУДНЕ. ПОГРЕШНОСТИ ГИРОКОМПАСА

### 3.1. Погрешности гирокомпаса и причины их возникновения

В главе 2 был рассмотрен гирокомпас, установленный на неподвижном относительно земли основании. При таком условии ось гирокомпаса устанавливается в меридиане наблюдателя.

Иначе обстоит дело на движущемся судне. В этом случае на гирокомпас оказывают влияние собственное движение судна, качка, изменение его скорости и курса, вызывая дополнительные отклонения оси гирокомпаса от меридиана, т.е. погрешности в его показаниях, которые могут достигать значительных величин. Погрешности показаний гирокомпаса получили наименования, соответствующие причинам их возникновения.

Погрешность, которая возникает вследствие движения судна с постоянной скоростью и постоянным курсом, называется скоростной.

Погрешность, возникающая при изменении судном скорости и курса, называется инерционной.

Погрешность, появляющаяся при качке судна, относится к разряду инерционных погрешностей, так как она вызывается силами инерции, возникающими на качке. Однако эту погрешность выделяют и ее называют погрешностью качки.

Рассмотрим перечисленные погрешности, а также методы предупреждения и исключения некоторых из них.

### 3.2. Скоростная погрешность

Рассмотрим вначале влияние движения судна на показания гирокомпаса с пониженным центром тяжести чувствительного элемента.

При движении судна плоскости истинного горизонта и меридиана наблюдателя получают дополнительные вращения в пространстве, что приводит к изменению координат положения равновесия оси гирокомпаса, в результате чего возникает угол отклонения оси гирокомпаса от плоскости меридиана наблюдателя.

Угол, на который ось гирокомпаса отклоняется от плоскости меридиана наблюдателя вследствие движения судна с постоянными скоростью и курсом, называется *скоростной погрешностью гирокомпаса*.

Не вдаваясь в теорию данного вопроса, запишем выражение, определяющее скоростную погрешность гирокомпаса:

$$\operatorname{tg} \delta_v = - \frac{V_c \cos \text{ИК}}{R_{\text{г}} \omega_{\text{г}} \cos \varphi + V_c \sin \text{ИК}} \quad (18)$$

Для транспортных судов скоростная погрешность  $V_c$  не превышает обычно нескольких градусов, поэтому допустимо считать, что  $\operatorname{tg} \delta_v = \delta_v$ ,



тогда

$$\delta_v = - \frac{V_c \cos IK}{R_{\oplus} \omega_{\oplus} \cos \varphi + V_c \sin IK} \quad (19)$$

Произведение  $R_{\oplus} \omega_{\oplus}$  есть линейная скорость, с которой движется точка экватора земли в результате ее суточного вращения. Выражая эту скорость в узлах, получим:

$$R_{\oplus} \omega_{\oplus} = \frac{360 \cdot 60}{24} = 900 \text{ узлов}$$

Поэтому формулу скоростной погрешности можно переписать в виде:

$$\delta_v = - \frac{V_c \cos IK}{900 \cos \varphi + V_c \sin IK} \quad (20)$$

Скоростная погрешность, вычисленная по последней формуле, будет выражена в радианах. Для перевода в градусы надо умножить ее на  $57,3^\circ$ .

Из последнего выражения следует, что при северных курсах судна скоростная погрешность отрицательна, т.е. имеет западное наименование, при южных — положительна, т.е. имеет восточное наименование. Максимальное значение будет на курсах 0 и  $180^\circ$ , а на курсах же 90 и  $270^\circ$  скоростная погрешность равна нулю.

Для облегчения вычисления скоростной погрешности гирокомпаса на судах имеются специальные таблицы и диаграммы.

Таблицы вычислены для различных широт, скоростей и истинных курсов судна через промежутки: по широте — десять, пять, четыре, два и один градус, по скорости — четыре узла и по курсу — пять градусов. Чем выше широта, тем чаще дается ее значение, так как с увеличением широты скоростная погрешность значительно возрастает.

Такие таблицы, но в упрощенном виде в специальных планшетах выдаются вместе с комплектом некоторых гирокомпасов. Пользование таблицами весьма просто и не требует особых пояснений.

Для вычисления скоростных погрешностей можно пользоваться также диаграммами, которые прилагаются к комплектам некоторых гирокомпасов.

### 3.3. Исключение скоростной погрешности гирокомпаса

В некоторых конструкциях гирокомпасов для исключения скоростной погрешности имеется специальное приспособление, называемое *корректором*.

Рассмотрим принцип устройства корректора, применяемого в гирокомпасах типа «Курс».





Для того чтобы угол  $\varepsilon_0$  был равен скоростной погрешности гироком-паса, надо установить расстояние между центрами дисков в некотором масштабе пропорционально скорости судна и широте. Расстояние между центрами дисков называется *установочным числом корректора*. Это число для различных скоростей и курсов судна выбирают по специальной номограмме, которая укреплена на корпусе корректора. Для этого на нижней шкале номограммы находим точку, соответствующую скорости судна, и от нее проводим линию, параллельную боковой рамке, до пересечения с прямой, соответствующей широте места. Из полученной точки пересечения проводим линию, параллельную нижней рамке, до пересечения со шкалой установочных чисел (левая шкала) и снимаем с нее установочное число.

Установочное число не зависит от курса судна. Следовательно, при изменении курса судна менять установку корректора нет необходимости (изменение курса учитывается корректором автоматически).

Рассмотренный нами корректор рассчитан на широты от 0 до  $82^\circ$  и на скорости судна до 50 узлов.

В гирокомпасах с электромагнитным управлением для исключения скоростной погрешности на датчик вертикального момента подаются дополнительные сигналы коррекции, которые формируются в специальном вычислительном устройстве (блоке коррекции). При таком условии величина вертикального момента, вводимого датчиком, будет больше необходимого. В результате из показаний гирокомпаса исключаются погрешность затухания и скоростная погрешность и положением равновесия оси гирокомпаса является линия N - S.

Для формирования сигналов коррекции в вычислительное устройство необходимо вводить величину широты места судна и скорости судна. Широта места вводится вручную, скорость судна может вводиться от лага и вручную, а курс — от гирокомпаса.

### **3.4. Влияние ускорения на показания гирокомпаса**

При всяком изменении режима движения судна, т.е. при изменении его скорости или курса, а также при одновременном изменении скорости и курса возникают ускорения, которые в свою очередь, порождают силы инерции.

Под действием моментов сил инерции возникает прецессионное движение чувствительного элемента гирокомпаса, что приводит к уходу его главной оси из меридиана и к появлению погрешностей.

Прецессия чувствительного элемента, возникающая под действием сил инерции, называется *инерционной прецессией*.

Ускорения, а следовательно, и силы инерции действуют только во время маневра, поэтому инерционная прецессия также совершается только во время маневра, а после окончания маневра прекращается.

Угол, на который чувствительный элемент повернется в горизонтальной плоскости в результате инерционной прецессии, называется инерционным перемещением (*инерционной погрешностью*).

Обозначив инерционное перемещение через  $b$ , согласно определению получим:

$$b = \omega_n \cdot \Delta t = \frac{B}{H} \cdot \frac{j_x}{g} \cdot \Delta t \quad (21)$$

где  $\omega_n$  - угловая скорость инерционной прецессии;

$\Delta t$  – время маневра;

$j_x$  – составляющая вектора ускорения по X-X.

Инерционная прецессия чувствительного элемента, возникающая при маневре судна, всегда совершается в сторону нового гирокомпасного меридиана, т.е. в сторону нового положения равновесия оси гирокомпаса, соответствующего новому режиму движения судна.

В гирокомпасах с гидравлическим маятником (с ртутными сосудами) центр тяжести чувствительного элемента совпадает с точкой его подвеса, поэтому силы инерции, возникающие при маневре, непосредственно влияния на чувствительный элемент не оказывают. Однако силы инерции вызывают перетекание ртути из одного сосуда в другой. Тогда момент силы тяжести избытка ртути создает инерционную прецессию чувствительного элемента. Инерционная прецессия чувствительного элемента гирокомпаса с гидравлическим маятником также всегда направлена в сторону нового гирокомпасного меридиана.

В гирокомпасах с электромагнитным управлением чувствительный элемент полностью уравновешен и поэтому влияние ускорения на этот гирокомпас в том виде, как это имеет место в гирокомпасах с пониженным центром тяжести чувствительного элемента и с гидравлическим маятником, не проявляется. Однако ускорение передается гирокомпасу через индикатор горизонта. Действительно, при маневрировании судна рабочее тело индикатора под действием инерционных сил изменяет свое положение. В связи с этим на выходе индикатора появляется сигнал, пропорциональный ускорению судна. Этот сигнал через усилитель поступает на датчики моментов, в результате чего к чувствительному элементу будут приложены моменты, пропорциональные ускорению, и чувствительный элемент начнет совершать инерционную прецессию. Эта прецессия также совершается в сторону нового гирокомпасного меридиана.

### **3.5. Условие апериодического перехода оси гирокомпаса в новое положение равновесия**

В предыдущем параграфе было установлено, что при изменении режима движения судна силы инерции вызывают инерционную прецессию чувствительного элемента, направленную всегда к новому гирокомпасному меридиану.

За время маневра гирокомпасный меридиан отклоняется на угол, равный разности скоростных погрешностей гирокомпаса после и до маневра, т.е. на угол  $\delta_2 - \delta_1$  (рис. 25).

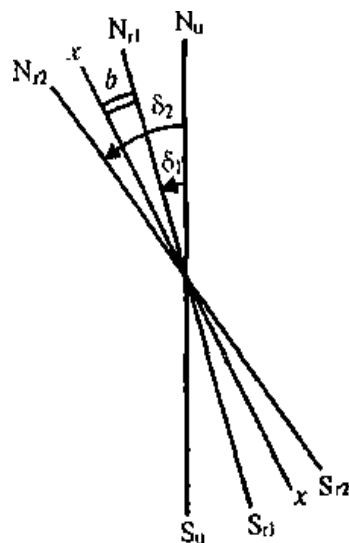


Рис. 25

За это же время главная ось чувствительного элемента гирокомпаса переместится на угол  $b$ , равный ее инерционному перемещению. На рис. 25 показано положение оси X-X чувствительного элемента после маневра и угол  $b$ , равный ее инерционному перемещению. При неравенстве углов  $\delta_2 - \delta_1$  и  $b$  ось X-X гирокомпаса после окончания маневра окажется вне нового положения равновесия, и начнет, как нам известно, совершать около него затухающие колебания. Следовательно, в таком случае, пока колебания чувствительного элемента не затухнут и ось прибора не установится в новом гирокомпасном меридиане, в показаниях гирокомпаса будет погрешность.

Если углы  $\delta_2 - \delta_1$  и  $b$  равны, то после окончания маневра ось гирокомпаса окажется в новом гирокомпасном меридиане  $Nr_2 - Sr_2$ , т.е. в положении равновесия, соответствующем новому режиму движения судна. В этом случае ось гирокомпаса во время маневра будет перемещаться вместе с гирокомпасным меридианом, оставаясь в нем как во время маневра, так и после него, и, следовательно, показания гирокомпаса не будут содержать погрешности. Такой переход оси гирокомпаса в новое положение равновесия называется аperiодическим.

Отметим, что понятие аperiодического перехода для гирокомпаса с электромагнитным управлением не имеет смысла, так как положение равновесия этого гирокомпаса от скорости судна не зависит.

Выведем условие аperiодического перехода для гирокомпасов с пониженным центром тяжести и ртутными сосудами (гидравлическим маятником).

При аperiодическом переходе  $b = \delta_2 - \delta_1$ .

Подставив в это выражение вместо  $b$ ,  $\delta_2$  и  $\delta_1$  их значения и преобразовав полученное равенство мы сможем записать условие аperiодического перехода в следующем виде:

$$\frac{B}{H} \cdot \frac{1}{g} = \frac{1}{R_{\delta} \omega_{\delta} \cos \varphi}$$

Это равенство показывает, что условие апериодического перехода не зависит от характера маневра, а зависит только от конструктивных постоянных гирокомпасов  $B$  и  $H$  и от широты  $\varphi$ , в которой совершается маневр.

Перепишем последнее выражение в следующем виде:

$$\frac{R_{\delta}}{g} = \frac{H}{B \omega_{\delta} \cos \varphi}$$

Сравнивая полученное выражение с формулой периода незатухающих колебаний гирокомпасов с пониженным центром тяжести (13), запишем окончательно условие апериодического перехода в следующем виде:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{R_{\delta}}{g}} \quad (22)$$

Подставив в последнюю формулу числовые величины  $R_{\delta} = 6370300$  м,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> получим:  $T_0 = 84,4$  мин.

Итак, для того чтобы при маневре судна ось гирокомпасов апериодически переходила в новое положение равновесия, необходимо, чтобы период незатухающих колебаний гирокомпасов был равен 84,4 мин.

Выполнить условие апериодического перехода без специального приспособления (регулятора) можно только в какой-нибудь одной широте, так как период незатухающих колебаний гирокомпасов при перемене широты изменяется.

В отечественных гирокомпасов период незатухающих колебаний гирокомпасов делается равным 84,4 мин. в широте 60°. Эта широта называется *расчетной широтой* и обозначается символом  $\varphi^*$ .

Период незатухающих колебаний гирокомпасов, соответствующий расчетной широте, также называется *расчетным периодом* и обозначается символом  $T^*$ , т.е.

$$T^* = \sqrt{\frac{H}{B \omega_{\delta} \cos \varphi^*}} = 84,4 \text{ мин.} \quad (23)$$

### 3.6. Инерционная погрешность первого рода

При плавании судна в широте, отличающейся от расчетной, период незатухающих колебаний гирокомпасов не равен 84,4 мин и условие апериодического перехода не соблюдено. Если судно совершит маневр, то после окончания маневра ось гирокомпасов окажется вне нового гирокомпасного меридиана, т.е. гирокомпас будет обладать погрешностью.

Погрешность, появляющаяся при маневре вследствие неравенства периода незатухающих колебаний гирокомпасов 84,4 мин, называется *инерционной погрешностью первого рода*.

Инерционная погрешность первого рода обозначается символом  $\delta_j^I$ .

Предположим, что маневр совершается в широте  $\varphi$ , большей расчетной  $\varphi^*$ , т.е.  $\varphi > \varphi^*$ . Из выражения периода незатухающих колебаний гирокомпасов следует, что в этом случае  $T_0$  больше расчетного  $T_0 > T^*$ .

Из этого легко сделать вывод, что в широте, большей расчетной,

прецессионное движение чувствительного элемента совершается медленнее, чем нужно для апериодического перехода, и что к концу маневра ось гирокомпаса не успеет прийти в новый гирокомпасный меридиан, т.е.  $b < \delta_2 - \delta_1$ .

После окончания маневра ось гирокомпаса начнет совершать затухающие колебания около нового гирокомпасного меридиана по сходящейся спирали, и когда колебания затухнут, инерционная погрешность первого рода исчезнет.

Если судно совершает маневр в широте, меньшей чем расчетная ( $\varphi < \varphi^*$ ), то  $T_0 < T^*$ , и инерционная прецессия чувствительного элемента совершается быстрее, чем это нужно для апериодического перехода оси гирокомпаса в новый гирокомпасный меридиан. В этом случае после окончания маневра главная ось окажется за новым гирокомпасным меридианом, поскольку  $b > \delta_2 - \delta_1$  и начнет приходить в новый гирокомпасный меридиан, совершая около него затухающие колебания.

Из рассмотренных примеров следует, что инерционная погрешность первого рода имеет максимальную величину сразу же после окончания маневра, а затем в процессе затухающих колебаний гирокомпаса уменьшается до нуля.

Формулу для вычисления этой погрешности можно вывести из следующего равенства:  $\delta_j^1 = b - (\delta_2 - \delta_1)$ . Подставив значения известных нам величин и преобразовав полученное выражение, сможем записать формулу для  $\delta_j^1$  в следующем виде:

$$\delta_j^1 = (\delta_2 - \delta_1) \cdot \left( \frac{b}{\delta_2 - \delta_1} - 1 \right) \quad (24)$$

Для отечественных гирокомпасов  $\varphi^* = 60^\circ$ . Следовательно,  $\cos \varphi^* = 1/2$ . Поэтому:

$$\delta_j^1 = (\delta_2 - \delta_1) \cdot \left( \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi^*} - 1 \right) \quad \text{или} \quad \delta_j^1 = (\delta_2 - \delta_1) \cdot (2 \cos \varphi - 1) \quad (25)$$

Этой формулой и пользуются для вычисления инерционной погрешности первого рода после окончания маневра.

Из формулы видно, что в нее не входят конструктивные величины. Поэтому она справедлива для всех гирокомпасов. Отметим, что эта формула дает инерционную погрешность со своим знаком.

Наибольшую величину инерционная погрешность  $\delta_j^1$  имеет при повороте судна с курса N на курс S и обратно; в этих случаях на быстроходных судах и в высоких широтах она может быть 5-6° и более.

Через четверть периода затухающих колебаний, т.е. в высоких широтах (свыше 75°) примерно через час, инерционная погрешность первого рода исчезнет, так как за это время главная ось гирокомпаса придет в меридиан, а последующее отклонение ее от меридиана будет в 3-5 раз меньше начального.



### 3.7. Инерционная погрешность второго рода

Разбирая вопрос о влиянии ускорений на показания гироскопа, мы совершенно не учитывали наличия у гироскопа приспособления для затухания.

Оказывается, что наличие этого приспособления нарушает условие апериодического перехода оси гироскопа в новое положение равновесия и, следовательно, вызывает погрешность.

Погрешность, возникающая при маневре вследствие наличия невыключенного приспособления для затухания, называется *инерционной погрешностью второго рода*.

Рассмотрим причины возникновения указанной погрешности в гироскопе с жидкостным успокоителем. Предположим, что судно совершает маневр в расчетной широте гироскопа. В этом случае инерционная погрешность первого рода не возникнет. Составляющая  $j_x$  ускорения при маневре судна вызовет силу инерции  $F_x$ , которая приложена к центру тяжести чувствительного элемента, и момент  $L_y$ , который вызовет инерционную прецессию чувствительного элемента к новому гироскопическому меридиану. Вместе с тем силы инерции, приложенные к каждой частице масла в сосудах, заставят масло перетекать из одного сосуда в другой (из северного сосуда в южный). Вследствие этого в южном сосуде образуется избыток масла, вес которого также создаст момент относительно оси  $Y-Y$  чувствительного элемента. Поэтому инерционная прецессия чувствительного элемента вокруг оси  $Z-Z$  будет совершаться с угловой скоростью, которая будет меньше скорости, необходимой для апериодического перехода. Следовательно, за время маневра главная ось гироскопа не успеет дойти до нового гироскопического меридиана на некоторый угол.

После окончания маневра сила инерции и момент инерции исчезают. Однако избыток масла в южном сосуде и момент от силы тяжести его достигают максимальной величины.

После окончания маневра силы инерции, приложенные к частицам масла, также исчезают, поэтому количество масла в сосудах медленно выравнивается. Примерно через четверть периода затухающих колебаний угол отклонения оси от нового гироскопического меридиана достигает максимальной величины, после чего главная ось гироскопа в процессе затухающих колебаний приходит в новый гироскопический меридиан.

В гироскопах с гидравлическим маятником составляющая ускорения вызывает перетекание ртути из одного сосуда в другой. Образовавшийся в одном из сосудов избыток ртути при наличии эксцентрического груза вызывает, как известно, два прецессионных движения: главную прецессию и добавочную.

Если маневр совершается в расчетной широте гироскопа, то в результате главной прецессии после окончания маневра главная ось окажется в новом гироскопическом меридиане. Однако вследствие наличия добавочной прецессии, которая у гироскопов с гидравлическим маят-

ником всегда совершается к горизонту, после маневра ось гирокомпаса окажется вне нового своего положения равновесия по высоте.

Поэтому после окончания маневра чувствительный элемент гирокомпаса начнет приходить к своему новому положению равновесия, совершая около него затухающие колебания. Пока не затухнут эти колебания, у гирокомпаса будет погрешность, которая и является *инерционной погрешностью второго рода*. Так же как и у гирокомпасов с жидкостным успокоителем, величина ее будет максимальной примерно через четверть периода затухающих колебаний после окончания маневра.

Отметим особенности инерционной погрешности второго рода:

- это — «запаздывающая» погрешность, так как она достигает своего наибольшего значения не сразу после окончания маневра, а приблизительно через четверть периода затухающих колебаний;
- величина погрешности зависит только от характера маневра и не зависит от широты;
- независимо от характера маневра погрешность всегда направлена в сторону первоначального гирокомпасного меридиана.

Величина инерционной погрешности второго рода обычно меньше, чем первого рода. Однако на быстроходных судах при резких маневрах она может достигать  $5^\circ$ .

### 3.8. Методы предупреждения инерционных погрешностей

Для предупреждения инерционных погрешностей первого рода необходимо при переходе судна в другие широты регулировать величину периода незатухающих колебаний гирокомпаса так, чтобы во всех широтах он оставался равным 84,4 мин. В этом случае условие апериодического перехода оси гирокомпаса в новое положение равновесия будет соблюдено во всех широтах и у гироскопа инерционной погрешности первого рода не возникнет.

Гирокомпас, у которого период незатухающих колебаний равен 84,4 мин во всем диапазоне широт плавания судна, называется *апериодическим компасом*.

Из формулы периода незатухающих колебаний гирокомпаса с пониженным центром тяжести чувствительного элемента видно, что  $T_0$  можно регулировать по широте, изменяя конструктивные величины гирокомпаса  $H$  и  $B$ .

Однако регулировка периода  $T_0$  путем изменения кинетического момента  $H$  влечет за собой уменьшение направляющего в меридиан момента при увеличении широты и поэтому не может быть использована в широком диапазоне широт. Изменение периода  $T_0$  путем регулировки конструктивной величины  $B$  технически выполнить сложно, т.к. нужно изменять положение центра тяжести чувствительного элемента.

Для предупреждения инерционной погрешности второго рода в гирокомпасах с пониженным центром тяжести применяются специальные



устройства — выключатели затухания, перекрывающие трубку, соединяющую сосуды масляного успокоителя при маневре. Благодаря этому жидкость не может перетекать из одного сосуда в другой, чем предупреждается появление «инерционного избытка» жидкости в одном из сосудов и, следовательно, появление инерционной погрешности второго рода. Сразу же после окончания маневра приспособление для затухания вновь должно быть включено.

В гироскопах с гидравлическим маятником приспособление для выключения затухания в целях предупреждения инерционной погрешности второго рода не применяется.

В гироскопах с электромагнитным управлением предупреждение инерционных погрешностей может быть достигнуто несколькими способами.

Первый из них заключается в компенсации силы инерции, приложенной к рабочему телу индикатора горизонта, при маневре судна. Для компенсации силы инерции вычислительное устройство гироскопа вычисляет величину действующего ускорения по показаниям лага. Сигнал, напряжение которого пропорционально вычисленному ускорению, подается на датчик момента и компенсирует сигнал, возникший вследствие инерционного перемещения рабочего тела индикатора.

Второй способ состоит в том, что в индикаторе горизонта устанавливают контактные ограничители, которые разрывают цепь индикатора горизонта при смещении рабочего тела под действием сил инерции. В этом случае чувствительный элемент прекращает реагировать на вращение земли и, следовательно, превращается в обыкновенный гироскоп. Однако за время маневра он не успевает существенно отклониться от первоначального направления. А так как положение равновесия гироскопа с электромагнитным управлением при маневре не меняется, то после включения индикатора горизонта в показаниях гироскопа появляется очень незначительная ошибка.

### **3.9. Суммарная инерционная погрешность**

Гироскопы, устанавливаемые на транспортных судах, в большинстве случаев являются неаперiodическими и, как правило, не имеют приборов, предназначенных для выключения затухания. Следовательно, при маневре судна в широте, отличающейся от расчетной, у гироскопа появляются инерционные погрешности и первого и второго рода, т.е. суммарная инерционная погрешность. Поэтому показания гироскопа в течение некоторого времени после маневра будут неточными.

После окончания маневра обе погрешности начинают уменьшаться по закону затухающих колебаний, причем фазы их не совпадают: когда погрешность первого рода имеет наибольшее значение, погрешность второго рода близка к нулю.

Подробное исследование суммарной инерционной погрешности показывает, что ее характер зависит от соотношения широт: расчетной  $\varphi^*$  и фактической широты  $\varphi$  маневра.

В широте  $\varphi < \varphi^*$  эти погрешности в течение первой четверти периода противоположны по знаку и близки по величине, поэтому они будут взаимно погашаться. Следовательно, в широтах меньших расчетной целесообразно выключать затухание на время маневра.

Если же  $\varphi > \varphi^*$ , то в течение первой четверти периода погрешности имеют одинаковые знаки и суммарная погрешность может достигать значительной величины. В этом случае при маневре целесообразно выключать затухание.

Суммарная инерционная погрешность достигает особенно больших величин и очень медленно уменьшается при плавании в высоких широтах, где направляющая сила гирокомпаса мала, а период затухающих колебаний велик. Например, в широте  $82^\circ$  направляющая сила гирокомпаса в 3 раза меньше, чем в расчетной широте, а период затухающих колебаний в несколько раз больше расчетного (84,4 мин).

Суммарная инерционная погрешность представляет практический интерес только в течение первого полупериода затухающих колебаний гирокомпаса, а затем она становится незначительной.

Если судно совершает несколько маневров, следующих один за другим через некоторые промежутки времени, то инерционная погрешность накапливается. При многократном маневрировании возможна такая последовательность маневров, при которой инерционные погрешности могут быть в 2-3 раза больше, чем при одиночном маневре. Причем инерционные погрешности, возникающие при многократном маневрировании, могут существенно отличаться по характеру изменения по времени от тех, которые возникают в результате одиночного маневра.

### 3.10. Влияние качки на гирокомпас с пониженным центром тяжести чувствительного элемента

При качке судна, как и при маневрировании, возникают силы инерции, вызывающие погрешность в показаниях гирокомпаса.

Погрешность гирокомпаса, вызываемая силами инерции, возникающими при качке судна, называется *погрешностью качки*.

Ускорения и силы инерции, возникающие при качке судна, значительно больше, чем при изменении режима движения судна. Поэтому погрешности качки могут достигать таких величин, которые сделают гирокомпас практически непригодным, если не предупредить их возникновение.

Не вдаваясь подробно в теорию данного вопроса и вывод формулы погрешности качки, запишем конечное выражение для расчета этой погрешности:

$$\delta_k = \frac{B}{4H\omega_g \cos \varphi} \cdot \frac{j_{\max}^2}{g^2} \cdot \sin 2\theta \quad (26)$$

где  $j_{\max}$  - амплитудное значение ускорения;  $\theta$  – румб качки.

Рассматривая последнюю формулу для  $\delta_k$ , видим, что погрешность гирокомпаса на качке зависит:

- 1) от широты  $\varphi$  места, причем с увеличением широты погрешность возрастает;
- 2) от квадрата ускорения  $j^2_{\max}$ , сообщаемого гирокомпасу на качке; это значит, что даже при незначительном увеличении  $j_{\max}$  погрешность качки быстро возрастает;
- 3) от  $\sin 2\theta$ , что определяет четвертной характер погрешности качки; при румбах качки N, E, S, W  $\sin 2\theta = 0$  и погрешность качки не возникает; при румбах качки NE, SE, SW, NW  $\sin 2\theta = 1$  и погрешность качки максимальна.

Четвертному характеру погрешности качки можно дать простое физическое объяснение. Действительно, если волна идет с главных румбов N или S, то составляющая силы инерции  $F_y = 0$  и прибор не раскачивается вокруг оси X-X. По этой причине ось Y-Y остается все время горизонтальной.

Если волна идет с румбов E или W, то составляющая  $F_x = 0$ , момент  $L_y = 0$  и погрешность качки также не возникает.

При румбах качки, отличающихся от N, S, E, W обе составляющие силы инерции  $F_x$  и  $F_y$  не равны нулю и у гирокомпаса возникает погрешность.

В заключение отметим, что погрешность качки имеет одинаковый характер для всех одногироскопных компасов.

### 3.11. Предупреждение влияния качки на гирокомпас с пониженным центром тяжести чувствительного элемента

Для предупреждения погрешности качки нужно предупредить раскачивание чувствительного элемента вокруг главной оси X-X, т.е. стабилизировать ось Y-Y прибора так, чтобы она все время оставалась горизонтальной. Именно на этом основан метод предупреждения возникновения погрешности качки в гирокомпасах с пониженным центром тяжести чувствительного элемента.

Для стабилизации оси Y-Y в горизонтальной плоскости гироскопическая система (чувствительный элемент) таких гирокомпасов состоит не из одного, а из двух совершенно одинаковых гироскопов. Эти гироскопы установлены внутри шара, называемого гиросферой (рис. 26).

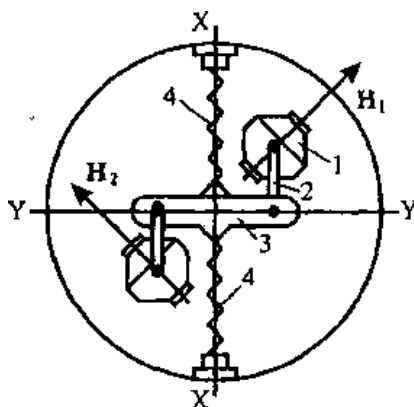


Рис. 26

Относительно гиросферы гироскопы могут поворачиваться одновременно только вокруг их вертикальных осей в противоположные стороны и на одинаковые углы, что обеспечивается специальным механизмом. Этот механизм устроен следующим образом. К камерам 1, в которых заключены гироскопы, жестко прикреплены кронштейны 2, обращенные в противоположные стороны. Кронштейны соединены шарнирной тягой 3, цапфы которой входят в подшипники кронштейнов. Шарнирная тяга, в свою очередь, связана с корпусом гиросферы при помощи двух пружин 4. Эти пружины устанавливают гироскопы так, что их главные оси образуют между собой угол  $90^\circ$ .

Если гироскопы начнут поворачиваться вокруг вертикальных осей в одинаковых направлениях, то шарнирная тяга явится жесткой связью между ними, и вместе с гироскопами начнет поворачиваться вся гиросфера. Поворот же гироскопов вокруг их вертикальных осей, но в противоположные стороны ограничивается только пружинами.

Чтобы выяснить, как рассматриваемая система предупреждает возникновение погрешности качки, расположим гироскопы несколько иначе (рис.27).

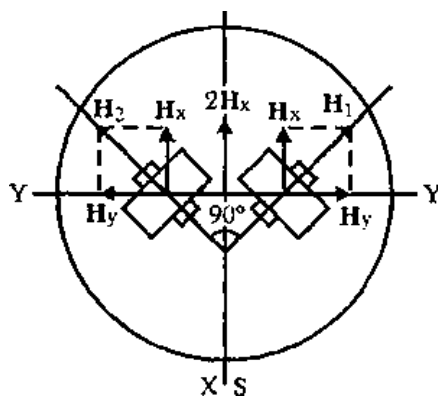


Рис. 27.

Как уже отмечалось, гироскопы подбирают совершенно одинаковыми, поэтому при равенстве угловых скоростей вращения их роторов кинетические моменты  $H_1$  и  $H_2$  гироскопов будут численно одинаковыми. Разложим каждый из векторов  $H_1$  и  $H_2$  на составляющие  $H_x$  и  $H_y$  по направлению биссектрисы угла между главными осями гироскопов и по перпендикуляру к ней. Составляющие  $H_x$  одинаковы по величине и направлению и поэтому могут быть представлены суммарным вектором  $2H_x$ , направленным по биссектрисе угла между главными осями. Составляющие  $H_y$  тоже равны по величине и направлены в разные стороны. Следовательно, двухгироскопный чувствительный элемент можно рассматривать как одногироскопный с кинетическим моментом  $2H_x$ . На этом основании линию, определяемую вектором  $2H_x$ , назовем главной осью X-X гиросферы и обозначим ее N-S, а ось гиросферы, определяемую векторами  $H_y$ , обозначим Y-Y.

Если гиросфера находится в положении равновесия, то ее главная ось

X-X совпадает с гирокомпасным меридианом. Во время качки благодаря такому устройству вместо того чтобы раскачивать гиросферу вокруг главной оси N-S, сила инерции будет вызывать прецессионные движения гироскопов вокруг их вертикальных осей то в одну, то в другую сторону. Причем, устройство соединения гироскопов обеспечивает разворот гироскопов в разные стороны на одинаковый угол. Поэтому результирующий кинетический момент  $2Hx$  всегда будет направлен по линии N-S.

Итак, ось Y-Y двухгироскопного чувствительного элемента при качке судна остается горизонтальной, а это значит, что погрешность качки не возникает.

Во всех остальных отношениях двухгироскопный чувствительный элемент подобен одногироскопному, поэтому все сказанное об одногироскопном компасе с пониженным центром тяжести чувствительного элемента справедливо и для двухгироскопного, с той лишь разницей, что кинетический момент последнего больше.

Гироскопы располагаются в гиросфере в виде буквы «Т», так как при таком расположении они занимают наименьший объем.

### **3.12. Предупреждение влияния качки на гирокомпас с электромагнитным управлением**

Предупреждение появления погрешности качки в гирокомпасах с электромагнитным управлением достигается приданием индикатору горизонта значительной инерционности за счет подбора упругости пружин и вязкости жидкости, в которую погружено рабочее тело индикатора. Благодаря этому рабочее тело индикатора горизонта почти не успевает реагировать на ускорения, возникающие на качке, и появляющаяся погрешность качки настолько мала, что практического значения не имеет. Отметим также, что большая инерционность индикатора горизонта устраняет влияние на гирокомпас кратковременных ускорений, возникающих при внезапных сотрясениях корпуса судна и вибрациях.

## Список литературы

1. Нечаев П.А., Кудревич Н.Б. Электронавигационные приборы, Москва, Транспорт, 1974 – 400 с.
2. Воронов В.В., Перфильев В.К., Яловенко А.В., Технические средства судовождения. Москва, Транспорт, 1974 – 336 с.
3. Дмитриев В.И., Технические средства судовождения, М.,Транспорт, 1990 – 320 с.
4. Смирнов Е.Л., Яловенко А.В., Перфильев В.К., Воронов В.В., Сизов В.В., Технические средства судовождения, 2000 г.
5. Смирнов Е.Л., Яловенко А.В., Якушенков А.А., Технические средства судовождения. Теория., Москва, Транспорт, 1987.

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>Введение.....</b>	<b>4</b>
<b>Глава 1 .Гироскоп и его основные свойства.....</b>	<b>6</b>
1.1. Понятие о гироскопе.....	6
1.2. Понятие о кинетическом моменте.....	7
1.3. Свободный гироскоп и его основное свойство.....	11
1.4. Горизонтальная и вертикальная составляющие земного вращения.....	14
1.5. Прецессионное движение гироскопа.....	16
1.6. Гироскопическая реакция. Момент гироскопической реакции.....	19
<b>Глава 2. Гироскоп на неподвижном основании.....</b>	<b>21</b>
2.1. Принцип использования гироскопа в качестве курсоуказателя. Полезная составляющая земного вращения.....	21
2.2. Способы превращения гироскопа в гироскоп.....	24
2.3. Незатухающие колебания гироскопа.....	27
2.4. Погашение незатухающих колебаний методом горизонтального момента. Жидкостный успокоитель.....	32
2.5. Погашение незатухающих колебаний методом вертикального момента.....	37
<b>Глава 3. Гироскоп на движущемся судне. Погрешности гироскопа.....</b>	<b>38</b>
3.1. Погрешности гироскопа и причины их возникновения.....	38
3.2. Скоростная погрешность.....	38
3.3. Исключение скоростной погрешности гироскопа.....	39
3.4. Влияние ускорения на показания гироскопа.....	41
3.5. Условие аperiодического перехода оси гироскопа в новое положение равновесия.....	42
3.6. Инерционная погрешность первого рода.....	44
3.7. Инерционная погрешность второго рода.....	46
3.8. Методы предупреждения инерционных погрешностей.....	47
3.9. Суммарная инерционная погрешность.....	48
3.10. Влияние качки на гироскоп с пониженным центром тяжести чувствительного элемента.....	49
3.11. Предупреждение влияния качки на гироскоп с пониженным центром тяжести чувствительного элемента.....	50
3.12. Предупреждение влияния качки на гироскоп с электромагнитным управлением.....	52

*Учебное издание*

**Донцов Сергей Владимирович**

**ОСНОВЫ ТЕОРИИ ГИРОСКОПА**

Донцов С.В.

Основы теории гироскопа. — Одесса, 2014,— 5 с.

*Рецензент*    **А.П.Гришин**