

Федеральное агентство морского и речного транспорта
Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
ГОСУДАРСТВЕННАЯ МОРСКАЯ АКАДЕМИЯ
имени адмирала С.О.Макарова

КАФЕДРА ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ СУДОВОЖДЕНИЯ

А.В. ЯЛОВЕНКО

ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ НАВИГАЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ

ЧАСТЬ 1. ГИРОКОМПАСЫ С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Тексты лекций с элементами программированного
обучения для студентов заочного обучения

Санкт-Петербург
Издательство ГМА им. адм. С.О.Макарова
2011

- Я51 Яловенко, А.В. Гироскопические навигационные приборы. – Ч. 1. Гирокомпасы с непосредственным управлением: тексты лекций с элементами программированного обучения для студентов заочного обучения. – СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2011. – 116 с.

Соответствует программе дисциплины «Технические средства судовождения».

Рассмотрены следующие вопросы: основы прикладной теории гироскопа, общий принцип построения морского гирокомаса, теория гирокомаса с непосредственным управлением и автономным чувствительным элементом. Особое внимание уделено работе гирокомаса в различных условиях плавания и методам повышения точности курсоуказания.

Предназначено для студентов заочного обучения судоводительского, радиотехнического и арктического факультетов. Может также использоваться курсантами очного обучения.

Рекомендовано к изданию на заседании кафедры технических средств судовождения. Протокол № 16 от 16 февраля 2010 г.

Рецензенты:

Орехов А.В., канд. техн. наук, руковод. программ Морского учебно-тренажерного центра ГМА им. адм. С.О. Макарова;

Новиков П.А., канд. техн. наук, доц., директор ЕМВА-программ Стокгольмской школы экономики.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемое издание (ч. 1) соответствует той части программы дисциплины «Технические средства судовождения», которая предусматривает изучение теории гироскопических навигационных приборов.

В ч. 1 текстов лекций рассматриваются основы прикладной теории гироскопа, изложена теория гирокомпаса с непосредственным управлением и автономным чувствительным элементом класса «Standard», анализируется работа гирокомпаса на судне, движущемся с постоянной скоростью и постоянным курсом, а также маневрирующим, изучаются ошибки гирокомпаса, возникающие при качке судна, анализ которых позволяет наметить пути их уменьшения. Значительное место уделено физическому смыслу гироскопических явлений.

Особенностью предлагаемого издания является то, что оно содержит элементы программированного обучения. Весь материал разбит на отдельные лекции, объем каждой из которых соответствует двум часам учебного времени. В конце каждой лекции приводятся контрольные вопросы, составленные по принципу программированного обучения, т.е. на каждый вопрос дается несколько ответов, среди которых один или несколько являются правильными. В конце издания приводятся комментарии к ответам, позволяющие студенту определить правильность своих ответов на контрольные вопросы, а также приводятся рекомендации относительно его дальнейших действий, направленные на оказание существенной помощи обучаемому в процессе самостоятельной работы.

Автор выражает глубокую благодарность д-ру тех. наук, проф. Е.Л. Смирнову за ценные замечания и рекомендации, которые позволили улучшить содержание рукописи.

ЛЕКЦИЯ 1

1. ВВЕДЕНИЕ

Для управления движением судна необходимо иметь навигационную аппаратуру, позволяющую определять координаты места судна, его курс и скорость, расстояние до подвижных и неподвижных объектов, глубину моря в месте нахождения судна, параметры движения встречных судов и т.п., т.е. получать навигационную информацию, необходимую для обеспечения безаварийного плавания судна по заданному пути в назначенное время. Получение такой информации обеспечивается комплексом различных приборов, которые в совокупности составляют *навигационное оборудование судна*.

Технические средства судовождения (ТСС), изучаемые в дисциплине «Технические средства судовождения», приведены на рис. 1.1.

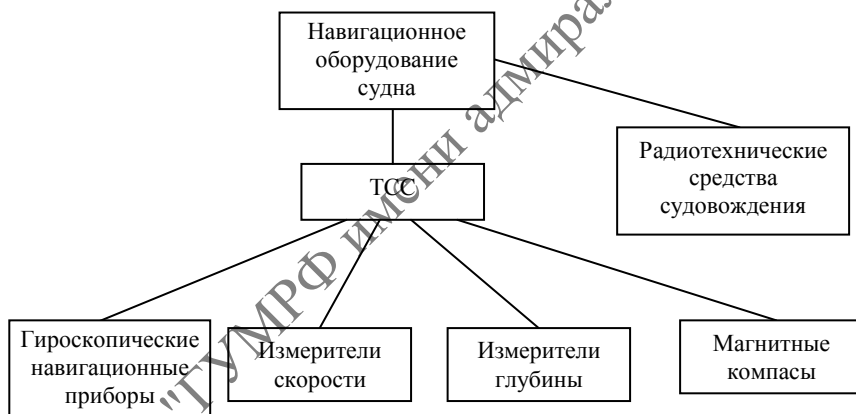


Рис. 1.1

Необходимо отметить, что в настоящее время гироскопические навигационные приборы используются на любом объекте, движущемся на земле, под землей, на воде, под водой, в воздухе и в космосе.

Рассмотрим гироскопические навигационные приборы, используемые на морских судах, в виде рис. 1.2.

Гирокомпас – это прибор, который является указателем плоскости меридиана. К этой группе приборов можно также отнести гироазимут, являющийся указателем азимута. Основным отличием этих двух приборов являет-

ся то, что гирокомпас автоматически удерживается в меридиане, а гироазимут непрерывно дрейфует (уходит) от первоначально заданного направления.

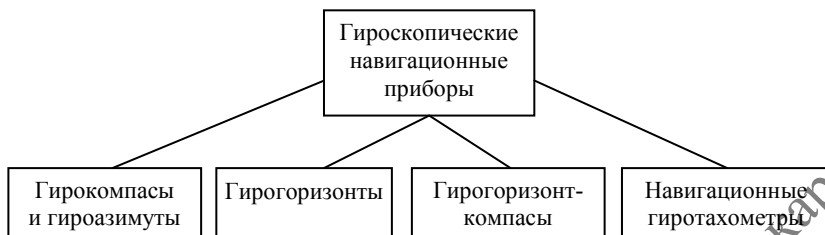


Рис. 1.2

Гирогоризонт – это прибор, обеспечивающий указание плоскости горизонта.

Гирогоризонткомпас – гироскопический навигационный прибор многоцелевого назначения. Он позволяет получить не только направление плоскости меридиана, но и направление плоскости горизонта или вертикали.

Навигационный гиротахометр – прибор, обеспечивающий измерение угловой скорости движения судна по углу курса.

2. ОСНОВЫ ПРИКЛАДНОЙ ТЕОРИИ ГИРОСКОПА

2.1. Определение понятия «гироскоп» и используемая терминология

В соответствии с современным состоянием развития гироскопической техники под гироскопом подразумевается любое устройство, позволяющее обнаружить и измерить угловую скорость вращения в инерциальном пространстве того основания, на котором установлено это устройство. Такому определению соответствует и само значение термина *гироскоп*, который в 1852 г. ввел французский физик Л. Фуко. Этот термин образован из двух греческих слов: *гирос* – вращение и *скопейн* – видеть, наблюдать, т.е. в свободном переводе *гироскоп* – указатель вращения.

В настоящее время наибольшее применение нашёл гироскоп, представляющий собой быстровращающийся динамический симметричный ротор, подвешенный таким образом, чтобы ось его собственного вращения могла произвольно изменять свое направление в пространстве. Следовательно, основными частями гироскопа являются (рис. 2.1) ротор и подвес.

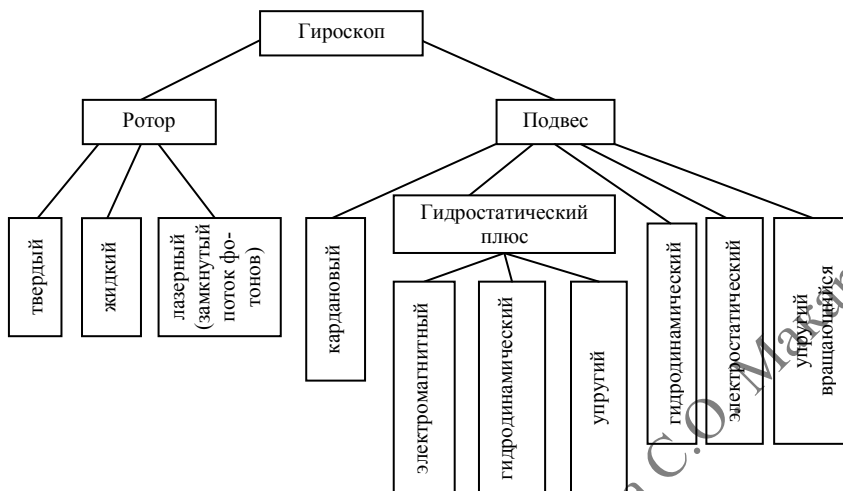


Рис. 2.1

На рис. 2.2 приведена система координат, связанная с гироскопом. Ось собственного вращения ротора (OX) называется *главной осью гироскопа*. Две любые другие оси (OY и OZ), лежащие в плоскости собственного вращения ротора и перпендикулярные между собой и к главной оси, называются *экваториальными*.

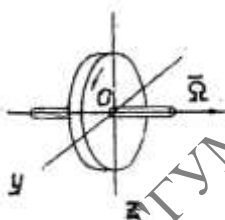


Рис. 2.2

Понятие *динамически симметричный* означает, что экваториальные моменты инерции ротора равны. При этом геометрической симметрии может и не быть.

Понятие *быстровращающийся* означает, что угловая скорость собственного вращения ротора (Ω) на несколько порядков (восемь-девять) больше угловых скоростей вокруг экваториальных осей.

Центр подвеса гироскопа (точка O) – та его точка, которая остается неподвижной при всех вращательных движениях ротора вокруг любой из его осей. Если центр масс гироскопа совпадает с центром подвеса, то гироскоп называется *астатическим*, или *уравновешенным*, в противном случае – *тяжелым*.

Свободным называется такой гироскоп, на который не действуют моменты внешних сил. Гироскоп может быть с тремя и двумя степенями свободы. Если ротор имеет только одну степень свободы (вокруг оси собственного вращения), то это уже не гироскоп, а устройство, обладающее гироскопическим эффектом.

2.2. Подвесы, применяемые в гироскопах

Степень совершенства гироскопа во многом зависит от качества подвеса ротора. Через подвес гироскоп связан с основанием, на котором он установлен. Подвес гироскопа считается тем лучше, чем меньше моменты, передаваемые гироскопу со стороны подвеса, которые вызывают дрейф гироскопа. Например, дрейф гироскопа в кардановом подвесе равен $1^\circ/\text{ч}$ (1 об. за 360 тыс. ч или 15 сут), в электростатическом – $0,0001^\circ/\text{ч}$ (1 об. за 3600 тыс. ч или 150 тыс. сут, что составляет ≈ 410 лет). Рассмотрим несколько типов подвесов.

Кардановый подвес представляет собой систему колец, обеспечивающую ротору три степени свободы.

На рис. 2.3 приведены следующие обозначения: 1 – наружное кольцо; 2 – внутреннее кольцо; 3 – вертикальное кольцо; 4 – ротор; 5 – основание; OX – ось вращения ротора; OZ – вертикальная ось, вокруг которой ротор поворачивается вместе с вертикальным и внутренним кольцами; OY – горизонтальная ось, вокруг которой ротор может поворачиваться вместе с внутренним кольцом.

Если закрепить кольца 1 и 3 или 2 и 3, то получим гироскоп с двумя степенями свободы.

Гидростатический подвес в чистом виде не применяется, так как невозможно обеспечить нулевую плавучесть. Наиболее часто применяются комбинированные подвесы: гидростатический плюс электромагнитный, гидростатический плюс упругий и гидростатический плюс гидродинамический.

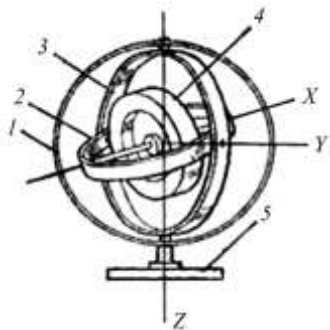


Рис. 2.3

На рис. 2.4 показан комбинированный подвес, который применяется в гироскопах «Амур». Ротор гироскопа помещен в гиросфере 2, которая

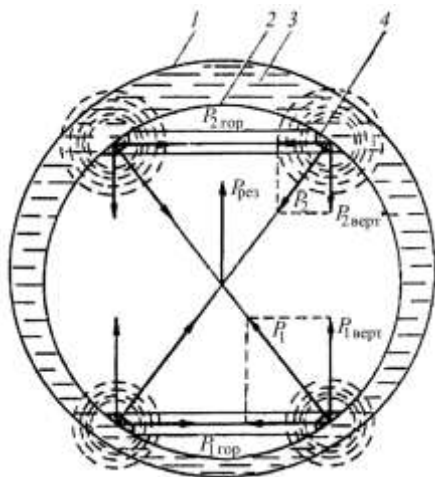


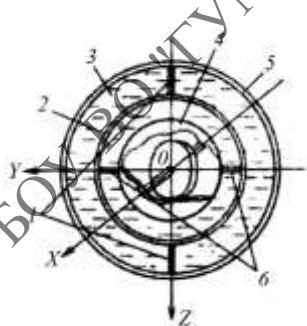
Рис. 2.4

находится в наружной сфере 1. За счет поддерживающей жидкости 3 плавучесть гиросферы близка к нулевой. Остаточная плавучесть (положительная или отрицательная) компенсируется взаимодействием электромагнитного поля катушек электромагнитного дутья 4, расположенных внутри гиросферы с полем вихревых токов, возникающих в наружной сфере.

Аналогичная схема применяется также в гироскопах класса «Курс» (в настоящее время этот компас снят с про-

изводства, но еще встречается на транспортных судах). Однако в этих компасах имеется только нижняя катушка электромагнитного дутья, а гиросфера имеет небольшую отрицательную плавучесть. Такой подвес обеспечивает гиросфере три степени свободы и центровку внутри наружной сферы.

На рис. 2.5 схематично показан комбинированный подвес, который применяется в гироскопах класса «Вега».



Гирисфера 4 помещена в герметичную следящую сферу 2. Между этими сферами находится поддерживающая жидкость 3. Встроенная миниатюрная помпа 1 создает гидродинамическое давление, которое компенсирует незначительную остаточную отрицательную плавучесть гирисферы, а также выполняет ее центровку. Подвес обеспечивает три степени свободы.

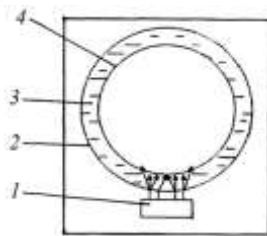


Рис. 2.6

Гидродинамический подвес (рис. 2.7) создает гироскопу три степени свободы. Внутри сферы 1 расположен гироскоп 2. При вращении (от двигателя M) наружной сферы 3

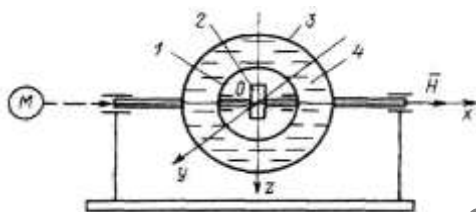


Рис. 2.7

вокруг оси OX за счет гидродинамических сил, возникающих в жидкости 4, внутренняя сфера 1 занимает концентричное положение с наружной. Указанный эффект возникает, если выполняются два условия: внутренняя сфера имеет положительную плавучесть и ее осевой момент инерции

(с учетом гироскопа) больше момента инерции экваториального ($I_0 > I_3$).

Основным преимуществом подвеса является отсутствие сухого трения. Такой подвес может использоваться в дифференцирующих гироскопах.

Электростатический подвес (рис. 2.8) представляет собой ротор 3 гироскопа – полую сферу, выполненную из легкого металла, например, бериллия.

Для обеспечения вращения ротора вокруг определенной оси экватори-

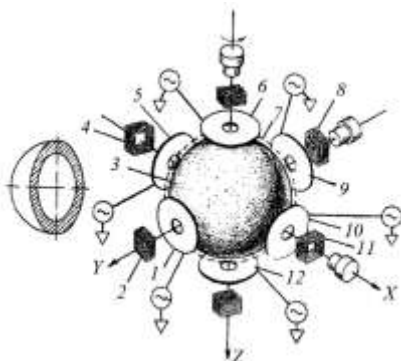


Рис. 2.8

альная часть его несколько утолщается. Ротор помещен в сферическую камеру 7, которая является изолятором, так как выполнена из специальной керамики.

Три пары электродов: 9 и 10; 1 и 12; 5 и 6 создают электростатическое поле, которое удерживает ротор в центре камеры. Вращающимся электромагнитным полем, которое создается обмотками 2, 4, 8 и 11, ротор разгоняется до 100 тыс. об/мин. Затем это поле отключается. Так как в камере создается глубокий вакуум (порядка 10^{-7} мм рт. ст.), ротор вращается по инерции в течение нескольких месяцев. Подвес обеспечивает гироскопу три степени свободы.

Упругий вращающийся подвес (рис. 2.9) представляет собой внешнее кольцо 1, с помощью вертикальных торсионов 2 связанное с промежуточным кольцом 4, которое, в свою очередь,

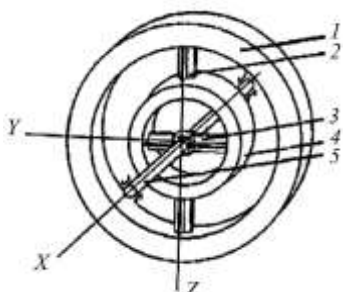


Рис. 2.9

через горизонтальные торсионы 3 соединено с валом 5. Такая схема, по существу, представляет собой вращающийся внутренний карданный подвес.

Особенностью этого подвеса является то, что при определенном соотношении моментов инерции промежуточного кольца, скорости вращения ротора и коэффициента упругости торсионов на кручение момент упругости торсионов компенсируется и ротор становится свободным от действия моментов сил упругости. Такие устройства получили название *динамически настраиваемых гироскопов* (ДНГ). На их основе построены гирокомпасы класса «Меридиан», которые получили широкое распространение как на отечественных судах, так и на судах иностранных судовладельцев.

Контрольные вопросы

1. *Гироскоп* – это любое устройство, способное обнаружить и измерить в инерциальном пространстве, совершаемое основанием, на котором это устройство установлено:

- вращение (см. пояснение 17);
- линейное перемещение (см. пояснение 31).

2. Понятие *быстровращающийся ротор* означает, что угловая скорость собственного вращения ротора больше угловых скоростей, которые он может иметь вокруг других осей:

- на много порядков (см. пояснение 47);
- на порядок (см. пояснение 64);
- в два раза (см. пояснение 69);
- в несколько раз (см. пояснение 89).

3. Понятие *динамически симметричный* ротор означает, что у данного гироскопа

- осевой момент инерции равен экваториальному (см. пояснение 110);
- равны экваториальные моменты инерции (см. пояснение 124);
- осевой момент инерции во много раз больше экваториального (см. пояснение 140);
- экваториальные моменты инерции не равны (см. пояснение 153).

4. Основными частями гироскопа, получившего наибольшее распространение на морском флоте, являются:

- ротор (см. пояснение 24);
- подвес (см. пояснение 36);
- основание (см. пояснение 56).

5. Вращающийся ротор может называться гироскопом, если он имеет:

- одну степень свободы (см. пояснение 66);
- две степени свободы (см. пояснение 77);
- три степени свободы (см. пояснение 95).

ЛЕКЦИЯ 2

2.3. Свойства гироскопа

Трехстепенной гироскоп обладает следующими основными свойствами.

1-е свойство. Главная ось свободного гироскопа стремится удерживать свое направление неизменным в инерциальном пространстве. Впервые это свойство было использовано Л. Фуко для доказательства суточного вращения Земли.

2-е свойство. Под действием внешней силы главная ось гироскопа будет двигаться не в направлении действия силы, а в перпендикулярном направлении. Подобная реакция гироскопа называется *свойством прецес-*

сии. Это движение происходит с постоянной угловой скоростью и является безынерционным.

3-е свойство. Под действием удара главная ось гироскопа практически не меняет первоначального направления, а лишь совершает в реальных условиях затухающие колебания, имеющие высокую частоту и малую амплитуду около нового, смещенного на очень малую величину, положения. Эти колебания называются *нutationными*. Их частота тем больше, а амплитуда тем меньше, чем больше угловая скорость вращения ротора.

Свойство гироскопа с двумя степенями свободы заключается в том, что при повороте основания вокруг вертикальной оси, по которой отсутствует степень свободы, ротор начинает поворачиваться вокруг оси подвеса до тех пор, пока эта ось не совместится с вертикальной осью. Если тело имеет одну степень свободы, то в этом случае возникает добавочное давление на опоры.

2.4. Теорема о кинетическом моменте

Теорема о кинетическом моменте имеет важное значение в гироскопии. Докажем ее для тела произвольной формы, имеющего одну неподвижную точку O . Выделим в этом теле (рис. 2.10) точку A массой m_i . Положение можно определить радиус-вектором $\vec{r}_i$.

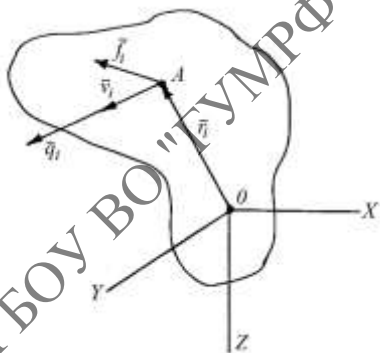


Рис. 2.10

Допустим, что к точке A приложена сила $\vec{f}_i$, момент которой можно определить следующими выражениями:

$$\vec{L}_i = \vec{r}_i \times \vec{f}_i$$

или

$$\vec{L}_i = r_i f_i \sin(\hat{r}_i; \hat{f}_i)$$

Под действием силы $\vec{f}_i$ тело начнет поворачиваться вокруг точки O . При этом каждая точка тела, в том числе точка A , будет иметь линейную скорость. Обозначим скорость точки A через $\vec{v}_i$. Тогда количество движения

точки A определится как произведение массы точки на скорость:

$$\overline{q_i} = m_i \overline{v_i}.$$

Вектор количества движения по направлению совпадает с вектором скорости. Определим теперь момент количества движения, который равен векторному произведению радиус-вектора на вектор количества движения, а именно

$$\overline{h_i} = \overline{r_i} \times \overline{q_i} = \overline{r_i} \times m_i \overline{v_i}.$$

Найдем первую производную по времени от полученного выражения.

Имеем

$$d\overline{h_i} / dt = (d\overline{r_i} / dt) \times m_i \overline{v_i} + \overline{r_i} \times m_i d\overline{v_i} / dt.$$

Так как $(d\overline{r_i} / dt) = \overline{v_i}$, векторное произведение $\overline{v_i} \times m_i \overline{v_i} \equiv 0$, это произведение векторов, совпадающих по направлению (синус угла между ними равен нулю). Следовательно, выражение для $d\overline{h_i} / dt$ примет вид

$$d\overline{h_i} / dt = \overline{r_i} \times m_i d\overline{v_i} / dt.$$

Известно, что $d\overline{v_i} / dt = \overline{j_i}$, а $m_i \overline{j_i} = \overline{f_i}$. Поэтому

$$d\overline{h_i} / dt = \overline{r_i} \times \overline{f_i}.$$

Справа от знака равенства имеем не что иное, как момент силы $\overline{l_i}$, т.е.

$$d\overline{h_i} / dt = \overline{l_i}.$$

Твердое тело состоит из совокупности отдельных n материальных точек, к которым приложены внешние силы.

Поэтому суммируя в пределах от 1 до n , получим

$$(d / dt) \left(\sum_{i=1}^n \overline{h_i} \right) = \sum_{i=1}^n \overline{l_i}.$$

Приняв

$$\sum_{i=1}^n \overline{h_i} = \overline{H}, \quad \text{а} \quad \sum_{i=1}^n \overline{l_i} = \overline{L},$$

где $\overline{H}$ – кинетический момент тела;

$\overline{L}$ – главный момент внешних сил, действующих на тело,
окончательно получим

$$d\overline{H} / dt = \overline{L}.$$

Полученное выражение является математическим представлением теоремы о кинетическом моменте, которую можно формулировать следующим образом: **первая производная по времени от вектора кинетического момента тела равна вектору главного момента всех внешних сил, действующих на тело.**

$d\bar{H}/dt$ следует трактовать как скорость изменения вектора $\bar{H}$, которую можно обозначить через $\bar{U}$. Тогда получим $\bar{U} = \bar{L}$.

Отсюда теорема о кинетическом моменте может быть сформулирована иначе: **скорость изменения конца вектора кинетического момента тела равна вектору главного момента всех внешних сил, действующих на тело.**

Эта формулировка известна как *теорема Резаля*.

Рассмотрим подробнее, что собой представляет кинетический момент $\bar{H}$ применительно к гироскопу (рис. 2.11).

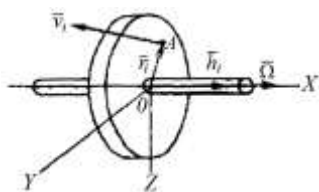


Рис. 2.11

Как было получено ранее,

$$\bar{h}_i = \bar{r}_i \times \bar{q}_i = \bar{r}_i \times m_i \bar{v}_i$$

или

$$h_i = r_i m_i v_i,$$

так как угол между векторами $\bar{r}_i$ и $\bar{v}_i = 90^\circ$.

Известно, что

$$v_i = r_i \Omega,$$

где Ω – угловая скорость вращения ротора.

Тогда получим

$$h_i = m_i r_i^2 \Omega.$$

Суммируя все точки, найдем

$$\sum_{i=1}^n h_i = \Omega \sum_{i=1}^n m_i r_i^2.$$

Здесь

$$\sum_{i=1}^n h_i = H, \text{ а } \sum_{i=1}^n m_i r_i^2 = I_o,$$

где I_o – осевой момент инерции ротора гироскопа.

Тогда окончательно будем иметь

$$H = I_o \Omega.$$

Таким образом, **кинетический момент гироскопа равен произведению осевого момента инерции ротора гироскопа на его собственную скорость вращения.**

Направление вектора кинетического момента всегда совпадает с направлением вектора $\vec{\Omega}$. Кинетический момент гироскопа $\vec{H}$ является наиболее полной характеристикой вращающегося тела, поскольку ни масса, ни момент инерции, ни угловая скорость вращения по отдельности не отражают его гироскопический эффект.

Контрольные вопросы

6. Характеристиками быстровращающегося ротора, имеющего три степени свободы, являются:

- устойчивость главной оси в инерциальном пространстве (см. пояснение 1);
- свойство прецессии (см. пояснение 113);
- устойчивость главной оси к удару (см. пояснение 120);
- стремление главной оси совместиться с направлением, вокруг которого вращается основание, на котором установлен этот ротор (см. пояснение 136);
- возникновение гироскопических сил, создающих нагрузку на опоры главной оси (см. пояснение 144).

7. Теорема о кинетическом моменте имеет вид:

- $d\vec{H} / dt = \vec{L}$ (см. пояснение 151);
- $dH / dt = L$ (см. пояснение 160);
- $\vec{U} = \vec{L}$ (см. пояснение 11);
- $U = L$ (см. пояснение 116).

8. Прецессионное движение гироскопа характеризует ... свойство гироскопа (см. пояснение 131).

9. Укажите в формуле $d\vec{H} / dt = \vec{L}$ кинетический момент гироскопа (см. пояснение 60).

10. Кинетический момент гироскопа определяется выражением:

- $H = I_0 \Omega$ (см. пояснение 73);
- $H = I_3 \Omega$ (см. пояснение 52);
- $dH / dt = L$ (см. пояснение 80).

ЛЕКЦИЯ 3

2.5. Доказательство свойств гироскопа

1-е свойство. Это свойство относится к свободному гироскопу, т.е. к такому, на который не действуют моменты внешних сил. Значит, для данного случая выражение теоремы о кинетическом моменте будет иметь следующий вид:

$$d\vec{H}/dt = 0.$$

Иначе говоря, кинетический момент $\vec{H}$ гироскопа имеет постоянное значение как по величине, так и по направлению. Учитывая, что $I_0 = \text{const}$ и $\Omega = \text{const}$, равенство $\vec{H} = \text{const}$ означает, что вектор кинетического момента гироскопа сохраняет свое направление в пространстве. Так как кинетический момент гироскопа по направлению совпадает с главной осью гироскопа, можно сделать вывод, что главная ось свободного гироскопа сохраняет неизменным свое направление в пространстве.

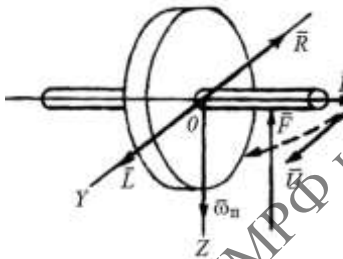


Рис. 2.12

2-е свойство. Рассмотрим поведение гироскопа, к которому приложена сила $\vec{F}$ (рис. 2.12), создающая момент $\vec{L}$ вокруг оси, не совпадающей с главной осью гироскопа.

Как было показано ранее, кинетический момент гироскопа можно считать направленным по главной

оси. Обозначим конец вектора $\vec{H}$ точкой N. Согласно теореме Резаля, под действием момента внешних сил конец вектора $\vec{H}$, т.е. точка N, приобретает линейную скорость, равную и параллельную вектору момента $\vec{L}$.

Из рис. 2.12 видно, что движение главной оси гироскопа происходит не в направлении силы $\vec{F}$, а в плоскости ей перпендикулярной (плоскость XOY). При этом направление линейной скорости конца вектора $\vec{H}$ совпадает с направлением момента внешней силы. Это движение называется *прецессией*. Прецессия возникает всегда, кроме случая, когда векторы $\vec{H}$ и $\vec{L}$ совпадают по направлению.

На основании рис. 1.12 можно сформулировать следующее правило для определения прецессии: **прецессионное движение совершается всегда в таком направлении, чтобы вектор $\vec{H}$ кратчайшим путем стремился совместиться с вектором $\vec{L}$.**

Угловая скорость прецессии может быть определена как отношение линейной скорости к радиусу, т.е. $\omega_n = U / H$. Однако, учитывая, что $U = L$, получим $\omega_n = U / L$. Отсюда можно заключить, что скорость прецессии прямо пропорциональна моменту внешних сил и обратно пропорциональна кинетическому моменту гироскопа.

Рассмотрим теперь частный случай, когда момент внешней силы совпадает по направлению с вектором кинетического момента. В этом случае гироскоп не будет иметь прецессионного движения. Однако по теореме Резаля скорость конца вектора $\vec{H}$ будет направлена вдоль главной оси гироскопа. Следовательно, направление вектора $\vec{H}$, в отличие от длины этого вектора, меняться не будет. Для твердого ротора момент инерции – величина постоянная. Это означает, что величина кинетического момента может изменяться только за счет изменения скорости вращения ротора Ω .

Таким образом, момент силы относительно главной оси собственного вращения ротора не создает прецессии гироскопа, но сообщает ротору угловое ускорение

$$dH / dt = d(I_0 \Omega) / dt = (I_0 d\Omega) dt ,$$

отсюда

$$d\Omega / dt = \Omega' = L / I_0 .$$

Во всех гироскопических приборах относительно оси вращения имеются тормозящий момент трения в подшипниках ротора и момент сопротивления воздуха, однако эти моменты компенсируются вращающим моментом магнитного поля. Поэтому можно считать, что момент внешних сил по оси собственного вращения отсутствует, а кинетический момент гироскопа является величиной постоянной.

3-е свойство. Для доказательства этого свойства, прежде всего, запишем теорему о кинетическом моменте в конечных приращениях:

$$\Delta \vec{H} / \Delta t = \vec{L}.$$

Полученное выражение можно трактовать следующим образом: момент внешней силы $\vec{L}$, действующий на гироскоп малое время Δt (в пределе бесконечно малое время), вызывает малое изменение кинетического момента

$\vec{H}$ как по величине, так и по направлению (в пределе бесконечно малое изменение $\vec{H}$). Отсюда вытекает, что удар (короткое время действия силы – импульс силы) практически не меняет направления оси гироскопа.

2.6. Гироскопический момент

При изучении свойства прецессии было установлено, что главная ось гироскопа движется не в направлении действия силы, а перпендикулярно ей. Такое явление может происходить только в том случае, если со стороны гироскопа возникает реакция, которая уравнивает приложенную к гироскопу внешнюю силу. Эта сила сопротивления, препятствующая движению гироскопа по направлению внешней силы, называется *гироскопической реакцией*. Момент силы сопротивления, уравнивающий момент внешней силы, называется *гироскопическим моментом*.

Из формулы, выражающей закон прецессии, можно получить формулу для момента внешних сил: $L = H\omega_n$.

Этот момент внешних сил уравнивается гироскопическим моментом, т.е. $\vec{R} = \vec{L}$, поэтому $R = H\omega_n$.

Для определения направления гироскопического момента можно применять следующее правило: **вектор гироскопического момента $\vec{R}$ направлен таким образом, что он как бы стремится совместить вектор кинетического момента $\vec{H}$ с вектором угловой скорости прецессии. При этом с конца вектора $\vec{R}$ такое движение наблюдается против часовой стрелки.**

Гироскопический момент является своеобразным проявлением инерционных свойств гироскопа. Можно доказать [2], что момент противодействия, возникающий со стороны ротора гироскопа при одновременном вращении его относительно двух осей и являющийся результатом действия кориолисовых сил инерции и есть гироскопический момент.

Возникновением гироскопического момента, уравнивающего момент внешней силы, объясняется и тот факт, что прецессионное движение гироскопа происходит с постоянной угловой скоростью. Наличие этого уникального свойства гироскопа позволяет с его помощью реализовать опорную систему координат, так как даже при наличии некоторых остаточных вредных моментов гироскоп будет гораздо медленнее изменять свою первоначальную ориентацию по сравнению с любым другим телом, не имеющим

собственного вращения. Появлением гироскопического момента легко объяснить поведение двухстепенного гироскопа и вращающегося тела, обладающего гироскопическим эффектом.

На рис. 2.13 показан двухстепенный гироскоп, основание которого поворачивается вокруг оси OZ с угловой скоростью $\bar{\omega}_z$.

В этом случае возникает гироскопический момент $\bar{R}_y$, под действием которого главная ось гироскопа начнет подниматься вверх, стремясь совместить вектор кинетического момента $\bar{H}$ с вектором внешней угловой скорости $\bar{\omega}_z$.

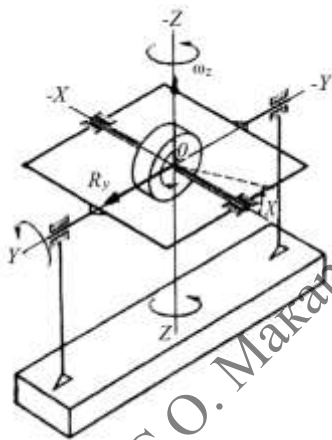


Рис. 2.13

На рис. 2.14 показано влияние бортовой и килевой качки на установленные на судне механизмы, имеющие быстровращающиеся массивные части. Изображены два ротора, ось собственного вращения одного из которых располагается вдоль диаметральной плоскости (ДП) судна, а другого – перпендикулярно ДП. Если ось собственного вращения ротора параллельна ДП судна, то в этом случае бортовая качка сказываться не будет, так как гироскопический момент не возникает, ввиду того, что

собственное вращение ротора совпадает по направлению с вектором угловой скорости бортовой качки $\omega_{кx}$. Из-за килевой качки $\omega_{кy}$ будет возникать

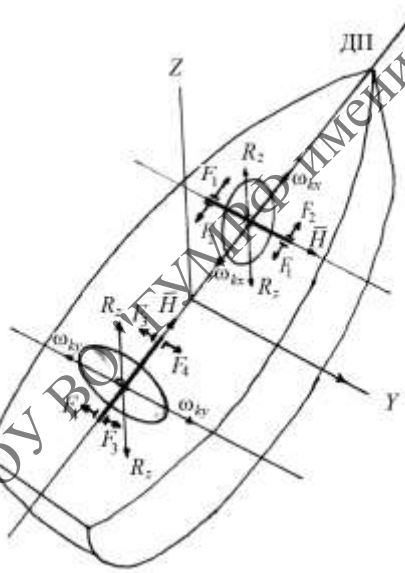


Рис. 2.14

гироскопический момент R_z , который, стараясь повернуть ротор вокруг оси OZ , будет создавать дополнительную нагрузку на подшипники в опорах ротора. Если ось собственного вращения ротора горизонтальна и перпендикулярна ДП судна, то в этом случае килевая качка сказываться не будет, так как гироскопический момент не возникает, ввиду того, что собственное вращение ротора совпадает по направлению с вектором угловой скорости килевой качки ω_{ky} . Из-за бортовой качки ω_{kx} возникает гироскопический момент R_z , который, стараясь повернуть ротор вокруг оси OZ , будет создавать дополнительную нагрузку на подшипники в опорах ротора.

Проанализировав вышеизложенное с учетом того, что килевая качка судна происходит с меньшей угловой скоростью, чем бортовая, можно сделать вывод, что все вращающиеся механизмы следует устанавливать параллельно ДП судна. При таком расположении бортовая качка (наиболее интенсивная) не будет вызывать появление гироскопических эффектов, создающих дополнительную нагрузку на опоры вращающихся механизмов.

Контрольные вопросы

11. Первое основное свойство гироскопа относится:
 - к свободному гироскопу (см. пояснение 2);
 - к любому трехстепенному гироскопу (см. пояснение 92);
 - к двухстепенному гироскопу (см. пояснение 157).
12. Какое из приведенных ниже равенств доказывает первое свойство гироскопа:
 - $d\bar{H}/dt = 0$ (см. пояснение 63);
 - $d\bar{H}/dt = L$ (см. пояснение 100);
 - $dH/dt = 0$ (см. пояснение 12);
13. Второе основное свойство гироскопа относится:
 - к свободному гироскопу (см. пояснение 148);
 - к любому трехстепенному гироскопу (см. пояснение 134);
 - к двухстепенному гироскопу (см. пояснение 154).
14. Скорость прецессии гироскопа определяется выражением:
 - $\omega_{\Pi} = L/H$ (см. пояснение 161);
 - $\omega_{\Pi} = H/L$ (см. пояснение 96);
 - $\omega_{\Pi} = L \cdot H$ (см. пояснение 101).

15. На рис. 2.15 показано направление вращения ротора гироскопа и приложенная к нему внешняя сила, создающая момент. Определите, по какой оси и в какую сторону будет направлен вектор угловой скорости прецессии:

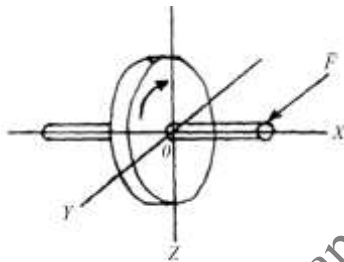


Рис. 2.15

в положительном направлении оси OY (см. пояснение 54);

в отрицательном направлении оси OY (см. пояснение 75);

в положительном направлении оси OZ (см. пояснение 166);

в отрицательном направлении оси OZ (см. пояснение 145).

ЛЕКЦИЯ 4

3. ТЕОРИЯ ГИРОКОМПАСА С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ И АВТОНОМНЫМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

3.1. Общий принцип построения морского гироскопаса

Для обеспечения мореплавания в открытом море необходимо иметь какое-нибудь фиксированное направление, по отношению к которому можно было бы определять путь в море. Обычно выбор направления связан с какими-либо явлениями, происходящими на Земле. На первый взгляд, опорным направлением могло бы быть направление на восход или заход Солнца. Однако люди давно заметили, что место восхода и захода Солнца изо дня в день изменяется. Кроме того, оно изменяется при перемене широты. Но, вместе с тем, было замечено, что положение плоскости меридиана, в которой наблюдается максимальная высота Солнца, остается неизменным в различных широтах и в различное время года. Пересечение плоскости меридиана с плоскостью истинного горизонта образует линию, вокруг которой вращается плоскость горизонта, и направление которой всегда постоянно по отношению к Земле. Необходимо с помощью какого-либо устройства реализовать это направление.

В 1852 г. Л. Фуко изобрёл прибор, который обладает свойством сохранять неизменным направление в инерциальном пространстве – *свободный гироскоп*. Однако возникает вопрос: можно ли использовать свободный гироскоп для того, чтобы запомнить отсчетное направление? К сожалению, на этот вопрос следует отрицательный ответ. Для этой цели свободный гироскоп не годится. Дело в том, что этот прибор, сохраняя неизменным направление в инерциальном пространстве, будет совершать по отношению к Земле движение и в горизонтальной, и в вертикальной плоскости. Это видимое движение свободного гироскопа будет происходить из-за вращения Земли вокруг своей оси. Точно таким же является движение светил по небесной сфере. По-видимому, необходимо сделать так, чтобы главная ось свободного гироскопа, перемещаясь по отношению к инерциальному пространству, оставалась неподвижной по отношению к поверхности Земли. Для того, чтобы заставить гироскоп совершать поворот вокруг экваториальных осей, необходимо приложить к нему моменты внешних сил. Так как эти моменты будут управлять гироскопом, они получили название *управляющих моментов*.

Существует несколько способов управления гироскопом. Все их можно разделить на две группы: *непосредственное управление* и *косвенное управление*. Соответственно гироскопы бывают с непосредственным и косвенным управлением.

Таким образом, общим принципом построения морского гироскопаса является наложение на свободный гироскоп управляющих моментов, под действием которых главная ось займет по отношению к Земле вполне определенное направление, совпадающее с направлением, вокруг которого поворачивается плоскость горизонта.

3.2. Суточное вращение Земли и его составляющие

Для изучения поведения гироскопа по отношению к Земле используется горизонтная система координат ONE_n , связанная с Землей. Вследствие суточного вращения Земли будет вращаться и горизонтная система координат. Построим вспомогательную сферу (рис. 3.1), в центре которой (в точке O) поместим наблюдателя вместе с горизонтной системой координат ONE_n . Земля совершает вращение вокруг линии $P_N - P_S$ с угловой скоростью 1 об / сут или

$$\omega_{\text{З}} \approx 7,29 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}.$$

Разложив вектор $\omega_{\text{З}}$ на горизонтальную (вдоль линии N – S) и вертикальную (вдоль линии отвеса Z – n) составляющие, получим:

$$\omega_1 = \omega_{\text{З}} \cos \varphi;$$

$$\omega_2 = \omega_{\text{З}} \sin \varphi.$$

Горизонтальная составляющая суточного вращения Земли ω_1 показывает, что плоскость истинного горизонта непрерывно вращается в пространстве вокруг линии N – S так, что восточная половина горизонта опускается (точка E идет вниз), а западная поднимается (точка W идет вверх).

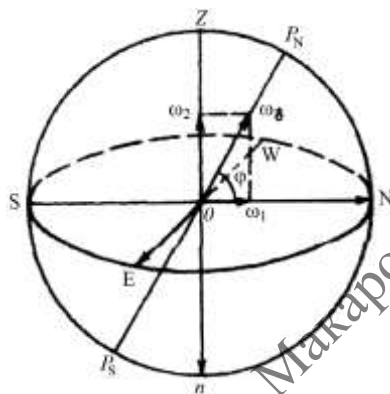


Рис. 3.1

Вертикальная составляющая ω_2 суточного вращения Земли показывает, что для наблюдателя, расположенного в северной широте, плоскость истинного меридиана вращается в пространстве вокруг отвесной линии так, что северная часть отходит к западу, а южная – к востоку. Скорости вращения этих плоскостей зависят от широты места φ .

3.3. Техническая реализация гироскопаса с непосредственным управлением

Для того чтобы свободный гироскоп приобрел свойства гироскопаса, к нему необходимо приложить управляющие моменты. Одним из способов наложения нужного управляющего момента в компасах с непосредственным управлением является понижение центра масс гироскопа относительно точки подвеса, чем создается маятниковый момент (рис. 3.2).

В том случае, когда главная ось гироскопа горизонтальна (угол $\beta = 0$), за счет понижения центра масс гироскопа никакого момента не создается, так как отсутствует плечо действия силы $P = mg$. Если вектор H уйдет из плоскости

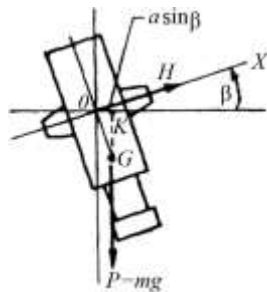


Рис. 3.2

горизонта, т.е. появится угол β , то сила тяжести создаст маятниковый момент L_y , под действием которого гироскоп будет прецессировать вокруг вертикальной оси (в плоскости горизонта):

$$L_y = mga \sin \beta = B \sin \beta,$$

где a – величина понижения центра тяжести гироскопа;

$B = mga$ – модуль маятникового момента.

Теперь рассмотрим поведение такого гироскопа по отношению к плоскостям истинного меридиана и истинного горизонта.

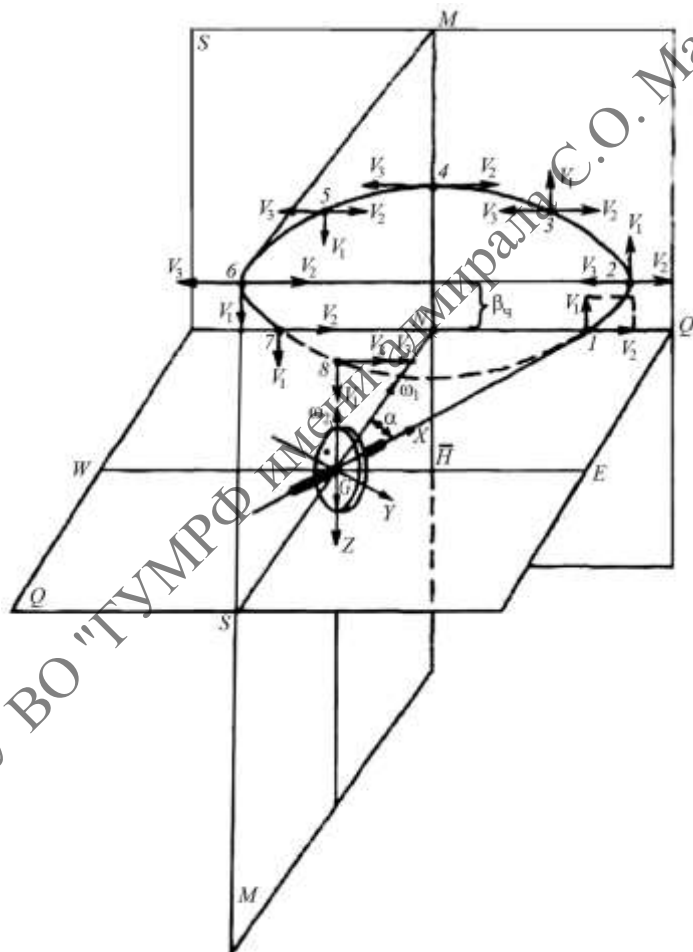


Рис. 3.3

Обозначения на рис. 3.3:

Q – плоскость горизонта;

M – плоскость меридиана;

S – плоскость, на которую проектируется вектор кинетического момента гироскопа в процессе его движения;

α – угол первоначального отклонения главной оси гироскопа от меридиана;

V_1 – видимое движение главной оси гироскопа от плоскости истинного горизонта, обусловленное тем, что плоскость горизонта вращается с угловой скоростью ω_1 ;

V_2 – видимое движение главной оси гироскопа от плоскости истинного меридиана, обусловленное тем, что плоскость меридиана вращается с угловой скоростью ω_2 ;

V_3 – прецессионное движение главной оси гироскопа к меридиану, обусловленное тем, что гироскоп отклонился от плоскости горизонта на угол β и возник маятниковый момент $L_y = B \sin \beta$.

От точки 1 под действием всех трех движений траектория главной оси гироскопа будет направлена к точке 2. В этой точке видимое движение от меридиана уравнивается с прецессионным движением к меридиану. С увеличением угла β скорость прецессионного движения V_3 возрастает. При этом скорость движения V_1 уменьшается, так как главная ось гироскопа приближается к меридиану. В результате траектория движения гироскопа пойдет через точки 2, 3, 4 и главная ось гироскопа окажется в плоскости меридиана. Точка 4 характерна тем, что здесь движение V_1 отсутствует, а прецессионное движение V_3 имеет максимальную скорость, так как $\beta = \max$. Гироскоп уйдет к западу от плоскости меридиана, постепенно приближаясь к горизонту (траектория 4, 5, 6, 7), так как западная часть плоскости горизонта поднимается и направление движения V_1 изменяется на обратное. Дальнейшее движение главной оси гироскопа будет проходить по траектории 7, 8, 1.

Как видно из рис. 3.3, главная ось гироскопа совершает незатухающие колебания относительно плоскости меридиана, описывая эллипс, который приподнят (в северной широте) на некоторый угол β_0 . Таким образом, при наличии одного управляющего момента из свободного гироскопа получили гирокомпас, работающий в режиме незатухающих колебаний.

Для того, чтобы гирокомпас приходил в плоскость меридиана, необходимо к гироскопу приложить второй управляющий момент, который обес-

печивает погашение колебаний и называется *демпфирующим*. Существует несколько способов формирования демпфирующего момента. При создании этого момента необходимо, чтобы его действие было сдвинуто по отношению к маятниковому моменту по фазе на $\pi/2$, если эти моменты действуют относительно одной и той же оси OY , или они должны быть направлены по разным осям (OY и OZ).

Для примера рассмотрим формирование демпфирующего момента с помощью масляного успокоителя (рис. 3.4). Он представляет собой два сообщающихся сосуда, расположенных вдоль линии $N_r - S_r$, которые заполнены сильновязким маслом, свободно перетекающим по масляному трубопроводу.

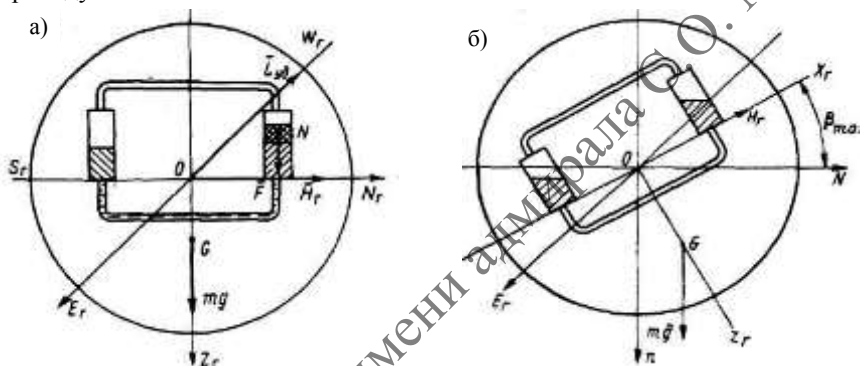


Рис. 3.4

Сверху имеется воздушный трубопровод, соединяющий оба сосуда. Вязкость масла и сечение масляного трубопровода подобраны таким образом, что перетекание масла происходит с отставанием по фазе примерно на $\pi/2$ по отношению к движению гиросферы. Это означает, что в тот момент, когда главная ось гироскопа горизонтальна ($\beta = 0$), в одном из сосудов наблюдается максимальный избыток масла (рис. 3.4 а). Создается демпфирующий момент $L_{уд}$, который действует вокруг оси y и имеет максимальное значение. За счет этого момента возникает дополнительная прецессия гироскопа к меридиану. Если главная ось гироскопа отклонена от плоскости горизонта на максимальный угол (β_{max}) – в сосудах масла будет поровну (рис. 3.4 б). Демпфирующий момент $L_{уд} = 0$.

Определим значение демпфирующего момента, который создается масляным успокоителем.

На рис. 3.5 показаны сосуды масляного успокоителя, который наклонен на угол β к плоскости горизонта. На этом рисунке γ – угол между линией, соединяющей центры зеркал жидкости, и средней линией сосудов. Средняя высота избытка масла в опустившемся сосуде равна $2r \operatorname{tg} \gamma$, а объем составляет $2Sr \operatorname{tg} \beta$ ($\beta = \gamma$). Тогда массу избытка масла можно определить как $2Sr\rho \operatorname{tg} \beta$, где ρ – плотность масла.

Следовательно, демпфирующий момент, создаваемый масляным успокоителем, определится равенством:

$$L_{\text{уд}} = C \sin \gamma$$

или, с учетом малости угла γ ,

$$L_{\text{уд}} = C\gamma,$$

где $C = 2Sr^2\rho g$ – модуль демпфирующего момента; S – площадь сечения сосуда; r – расстояние от вертикальной оси до центра сосуда; g – ускорение силы тяжести.

В гирокомпасах класса «Standard» используется кольцевой масляный успокоитель, разделённый на отсеки перегородками с отверстиями для перетекания масла.

Рассмотрим поведение гироскопа с пониженным центром масс и масляным успокоителем по отношению к Земле. Траектория движения такого гироскопа представлена на рис. 3.6 (пунктирной линией показана траектория движения главной оси гироскопа при отсутствии затухания).

В точке 1 под действием демпфирующего момента к видимым движениям V_1 , из-за вращения плоскости горизонта, и V_2 , из-за вращения плоскости меридиана, добавляется прецессионное движение V_4 к меридиану.

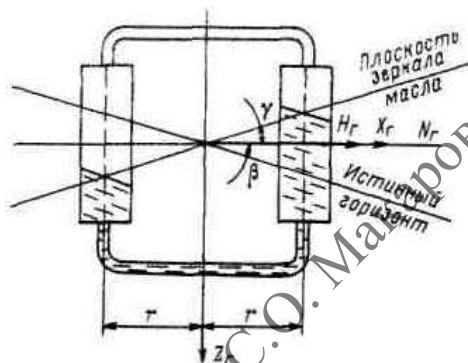


Рис. 3.5

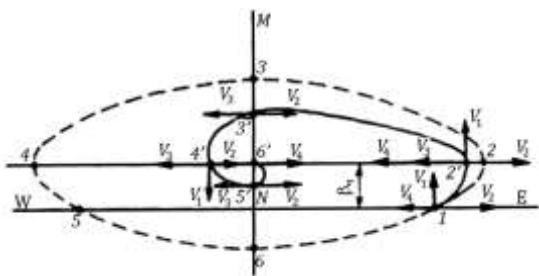


Рис. 3.6

Наличие прецессии V_4 , которая всегда направлена к меридиану, приводит к тому, что траектория движения главной оси гироскопа пройдет ниже пунктирной линии, и колебания завершатся в точке $б'$. Главная ось гироскопа будет находиться в плоскости меридиана и в северной широте приподнята над горизонтом на угол β_4 , который обеспечивает прецессионное движение со скоростью вращения меридиана.

Таким образом, при наличии маятникового и демпфирующего моментов гироскоп становится гирокомпасом, который автоматически приходит в плоскость меридиана. Если по каким-либо причинам главная ось гирокомпаса будет выведена из меридиана, то затем она опять вернется в меридиан.

3.4. Чувствительный элемент двухгироскопного гирокомпаса

Среди гирокомпасов с непосредственным управлением и твердым маятником получили распространение компасы, чувствительный элемент которых представляет собой сферу 1 (рис. 3.7 а), внутри которой размещены два одинаковых гироскопа 2. Оси собственного вращения гироскопов, если они не вращаются, расположены под углом 90° друг к другу и под углом 45° к линии $N_T - S_T$. Оба гироскопа имеют свободу вращения вокруг вертикальной оси. Так как друг с другом они соединены связью типа антипараллелограмм (на рис. 3.7 а два сектора 3), они могут поворачиваться вокруг вертикальной оси только в разные стороны на одинаковые углы. Пружина 4 создает момент вокруг вертикальной оси в том случае, когда главные оси гироскопов не перпендикулярны друг к другу.

Осевой момент инерции каждого из гироскопов равен J_0 , а угловая скорость вращения $-\Omega$. Тогда с учетом того, что гироскопы одинаковы, имеем $H_1 = H_2 = H_0 = J_0 \Omega$.

Учитывая, что кинетический момент гиросферы H_T равен геометрической сумме векторов H_1 и H_2 (рис. 3.7 б), получим

$$H_T = 2H_0 \cos \eta,$$

где η – угол между осью собственного вращения гироскопа и линией $N_T - S_T$ гиросферы.

Вектор кинетического момента гиросферы всегда направлен вдоль линии $N_T - S_T$, а при изменении угла η будет меняться только величина H_T .

Вектор кинетического момента гиросферы H_r стабилизирует гиросферу вокруг вертикальной оси и горизонтальной оси $E_r - W_r$. Стабилизация же гиросферы вокруг оси $N_r - S_r$ обеспечивается составляющими кинетических моментов H_1' и H_2' .

В общем случае на гиросферу могут действовать внешние моменты вокруг всех трех осей: $N_r - S_r$, $E_r - W_r$ и $Z_r - n_r$ (рис. 3.7 в).

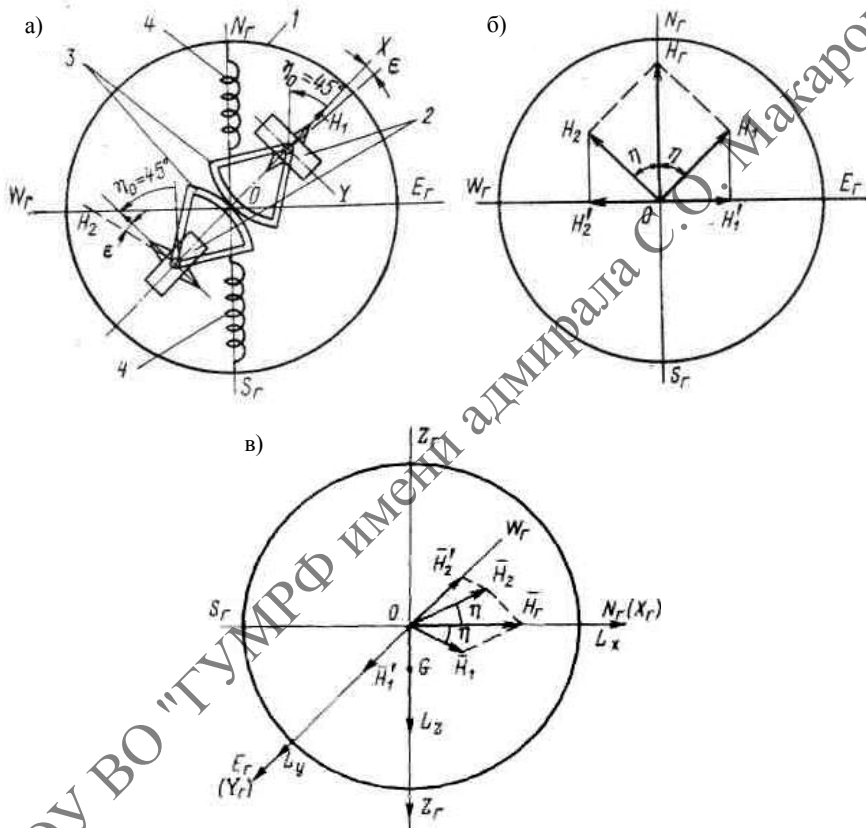


Рис. 3.7

Под действием момента L_x гироскопы внутри гиросферы начнут прецессировать вокруг вертикальных осей до тех пор, пока они не остановятся моментами упругости пружин. При этом они как бы теряют степень свободы вокруг осей прецессии и гиросфера за счет кинетических моментов H_1' и H_2' начнет поворачиваться вокруг оси $N_r - S_r$, т.е. появится крен гиросферы.

При наличии момента L_y оба гироскопа стремятся повернуться в одну и ту же сторону. Так как кинематическая связь между ними этого не позволяет, то их движение передается корпусу гиросферы и чувствительный элемент начнет прецессировать в горизонтальной плоскости (по углу α). При этом гироскопы своего положения относительно корпуса гиросферы не изменяют.

Внешний момент L_z заставляет гиросферу прецессировать в вертикальной плоскости (по углу β). При этом гироскопы своего положения относительно корпуса гиросферы также не изменяют.

В результате рассмотрения поведения гиросферы под действием внешних моментов L_x , L_y и L_z можно сделать следующие выводы:

- при наличии внешнего момента, действующего вокруг оси $N_g - S_g$, появляется крен гиросферы, но при этом кинетический момент H_g не изменяет своего направления;

- под действием внешнего момента вокруг линии $E_g - W_g$ наблюдается прецессионное движение гиросферы в горизонтальной плоскости (по углу α);

- момент внешних сил относительно вертикальной оси приводит к прецессии гиросферы по углу β (в вертикальной плоскости);

- при изучении прецессионного движения гиросферы под действием моментов L_y и L_z двухгироскопный чувствительный элемент с достаточной степенью точности можно заменить одногироскопным прототипом.

Двухгироскопный чувствительный элемент при наличии масляного успокоителя обладает пятью степенями свободы. Если в гиросфере установлен кольцевой масляный успокоитель, то гиросфера будет обладать шестью степенями свободы (за счет перетекания масла в плоскости $E - W$).

Контрольные вопросы

16. Скорость вращения плоскости истинного горизонта определяется выражением:

$$\omega_1 = \omega_0 \cos \varphi \text{ (см. пояснение 3);}$$

$$\omega_2 = \omega_0 \sin \varphi \text{ (см. пояснение 125);}$$

$$\omega_3 = \omega_0 \operatorname{tg} \varphi \text{ (см. пояснение 70).}$$

17. Понижение центра масс гироскопа относительно центра подвеса обуславливает:

- превращение гироскопа в гирокомпас (см. пояснение 83);

– погашение колебаний гирокомпаса относительно плоскости меридиана (см. пояснение 105);

– уменьшение погрешностей гирокомпаса при маневрировании судна (см. пояснение 29);

– снижение девиации гирокомпаса на качке (см. пояснение 167).

18. На рис. 3.3 показаны движения главной оси гирокомпаса V_1 ; V_2 и V_3 .

Какое из этих движений является прецессионным:

– V_1 (см. пояснение 43);

– V_2 (см. пояснение 141);

– V_3 (см. пояснение 13).

19. Масляный успокоитель обеспечивает:

– превращение гироскопа в гирокомпас (см. пояснение 121);

– погашение колебаний главной оси гирокомпаса относительно плоскости меридиана (см. пояснение 111);

– уменьшение ошибок гирокомпаса при маневрировании судна (см. пояснение 85);

– снижение девиации гирокомпаса на качке (см. пояснение 27).

20. Во время работы гирокомпаса к гиросфере могут прикладываться внешние моменты вокруг всех трех осей: L_x ; L_y и L_z . Изучая прецессионное движение, при действии каких моментов двухгироскопную гиросферу можно заменять одногироскопным прототипом:

– при действии момента L_x (см. пояснение 107);

– при действии момента L_y (см. пояснение 88);

– при действии момента L_z (см. пояснение 34).

ЛЕКЦИЯ 5

3.5. Уравнения движения гирокомпаса

Одной из основных задач при изучении любого гироскопического устройства является определение законов его движения, так как они позволяют оценить точность прибора.

Законы движения гироскопических устройств определяются на основании решения дифференциальных уравнений, характеризующих его поведение. Получить исходную систему дифференциальных уравнений можно различными методами. Довольно эффективным, простым и тесно связанным

5. Наносим проекции всех угловых скоростей на оси гиросферы. Введём обозначения суммарных угловых скоростей q – по оси OY и r – по оси OZ .

В нашем случае имеем:

– по оси OY $q = \beta' - \omega_1 \sin \alpha$;

– по оси OZ $r = \alpha' \cos \beta - \omega_2 \cos \beta + \omega_1 \cos \alpha \sin \beta$.

6. Определяем и наносим на рисунок гироскопические моменты:

$$R_z = H_r q \text{ и } R_y = H_r r.$$

7. Наносим на рисунок угловые ускорения движения гиросферы α'' и β'' , совпадающие по направлению с угловыми скоростями α' и β' . Проектируем эти угловые ускорения на оси гироскопа.

8. Определяем и наносим на рисунок инерционные моменты. Направление вектора инерционного момента противоположно угловому ускорению.

9. Определяем и наносим на рисунок моменты внешних сил, которые предполагается учесть в решаемой задаче. В нашем случае имеется маятниковый момент $L_y = mga \sin \beta = B \sin \beta$.

10. Наносим на рисунок моменты сил инерции, если судно движется с ускорением. В нашем случае ускорения отсутствуют, так как судно неподвижно.

11. Суммируем по осям, связанным с гиросферой, все моменты. Полученные суммы приравняем нулю.

В нашем случае имеем:

$$\text{ось } OY \quad -I_3 \beta'' - B \sin \beta - H_r r = 0;$$

$$\text{ось } OZ \quad -I_3 \alpha'' \cos \beta + H_r q = 0$$

или

$$\text{ось } OY \quad -I_3 \beta'' + B \sin \beta + H_r (\alpha' \cos \beta - \omega_2 \cos \beta + \omega_1 \cos \alpha \sin \beta) = 0;$$

$$\text{ось } OZ \quad -I_3 \alpha'' \cos \beta + H_r (\beta' - \omega_1 \sin \alpha) = 0.$$

12. Отбрасываем моменты, отбрасывая те из них, которые окажутся высшего порядка малости. В нашем случае таких моментов нет.

13. Учитывая, что инерционные моменты определяют нутационные колебания, а нас интересует движение прецессионное, в полученных равенствах эти моменты опускаем. Тогда, рассматривая колебания малыми (углы α и β малы), можно заменить $\sin \alpha = \alpha$; $\sin \beta = \beta$; $\cos \alpha = \cos \beta = 1$.

В итоге получим:

$$\text{ось } OY \quad H_r \alpha' + B\beta - H_r \omega_1 \beta = H_r \omega_2;$$

$$\text{ось } OZ \quad H_r \beta' - H_r \omega_1 \alpha = 0,$$

т.е. систему дифференциальных уравнений, которая описывает поведение ЧЭ маятникового гирокомпаса, работающего в режиме незатухающих колебаний на неподвижном судне. С учетом того, что в реальных гирокомпасах $B \gg H\omega_1$, полученную систему уравнений можно записать в виде:

$$\left. \begin{aligned} H_r \alpha' + B\beta &= H_r \omega_2; \\ H_r \beta' - H_r \omega_1 \alpha &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

Полное решение системы уравнений (3.1) состоит из общего и частного решения. Частное решение определяет положение равновесия главной оси гиросферы, а общее описывает переходный процесс, т.е. поведение компаса во время движения к положению равновесия.

Так как в нашей системе уравнений правые части являются постоянными величинами, для нахождения координат положения равновесия гирокомпаса следует принять $\alpha' = \beta' = 0$.

Тогда из уравнений (3.1) получим

$$B\beta_q = H_r \omega_2; \quad H_r \omega_1 \alpha_q = 0 \quad (3.2)$$

откуда

$$\alpha_q = 0; \quad \beta_q = (H_r/B) \omega_2 \sin \varphi. \quad (3.3)$$

Равенства (3.3) свидетельствуют о том, что в положении равновесия главная ось гиросферы должна находиться в плоскости меридиана ($\alpha_q = 0$) и быть приподнятой над плоскостью горизонта на некоторый угол β_q . В этом случае к гиросфере приложен маятниковый момент $L_y = B\beta_q = H_r \omega_2 \sin \varphi$, под действием которого она будет прецессировать в горизонтальной плоскости (по углу α) со скоростью

$$\omega_n = L_y/H_r = \omega_2 \sin \varphi.$$

Если главную ось гиросферы отклонить от плоскости меридиана на некоторый угол α , то она будет совершать незатухающие колебания относительно положения равновесия.

Теперь найдем общее решение системы уравнений (3.1). Для этого, прежде всего, проведем операцию разделения переменных.

Из первого уравнения системы (3.1) имеем

$$B\beta = -H_r \alpha' + H_r \omega_2.$$

Возьмем производную по времени от полученного выражения $B\beta' = -H_r \alpha''$.

Отсюда

$$\beta' = -(H_r / B)\alpha''.$$

Подставив теперь полученное значение β' во второе уравнение системы (3.1), получим

$$-(H_r / B)\alpha'' - \omega_1 \alpha = 0$$

или

$$\alpha'' + (B / H_r) \omega_1 \alpha = 0. \quad (3.4)$$

Как известно, коэффициент перед α – это квадрат частоты собственных колебаний гиросферы, т.е.

$$\omega_0^2 = (B / H_r) \omega_1. \quad (3.5)$$

Значит, уравнение (3.4) получит вид

$$\alpha'' + \omega_0^2 \alpha = 0. \quad (3.6)$$

Уравнение (3.6) описывает движение главной оси гиросферы в горизонтальной плоскости (по углу α). Являясь дифференциальным уравнением второго порядка по одной переменной, решение этого уравнения даст закон изменения угла α . Для нахождения корней этого уравнения составим характеристическое уравнение

$$\rho^2 + \omega_0^2 = 0.$$

Отсюда для корней уравнения (3.6) имеем

$$\rho_{1,2} = \pm \sqrt{-\omega_0^2} = \pm i\omega_0.$$

Тогда общее решение будет

$$\alpha = C_1 e^{\rho_1 t} + C_2 e^{\rho_2 t}$$

или

$$\alpha = C_1 e^{i\omega_0 t} + C_2 e^{-i\omega_0 t} = C_1 \cos \omega_0 t + C_2 \sin \omega_0 t, \quad (3.7)$$

где C_1 и C_2 – постоянные интегрирования.

Для определения C_1 и C_2 зададимся следующими начальными условиями. Предположим, что при $t = 0$, $\alpha = \alpha_0$; $\beta = \beta_0$.

Тогда подставив начальные условия в равенство (3.7), получим

$$C_1 = \alpha_0.$$

Подставив полученное значение C_1 в выражение (3.7), имеем

$$\alpha = \alpha_0 \cos \omega_0 t + C_2 \sin \omega_0 t. \quad (3.8)$$

Взяв первую производную по времени от равенства (3.8), получим

$$\alpha' = -\alpha_0 \omega_0 \sin \omega_0 t + C_2 \omega_0 \cos \omega_0 t. \quad (3.9)$$

Подставив полученное значение α' в первое уравнение системы (3.1), будем иметь

$$-H_r \alpha_0 \omega_0 \sin \omega_0 t + H_r C_2 \omega_0 \cos \omega_0 t + B\beta = H_r \omega_2. \quad (3.10)$$

Если в полученное равенство подставить начальные условия по углу β , а именно при $t = 0$, $\beta = \beta_q$, получим

$$H_r C_2 \omega_0 + B\beta_q = H_r \omega_2. \quad (3.11)$$

$$\text{Откуда} \quad C_2 = 0. \quad (3.12)$$

Тогда для законов изменения координат α и β получим:

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \alpha_0 \cos \omega_0 t; \\ \beta &= (H_r / B) \alpha_0 \omega_0 \sin \omega_0 t + \beta_q. \end{aligned} \right\} \quad (3.13)$$

Полученные равенства являются законами движения главной оси гиросферы в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Определим траекторию движения главной оси гиросферы, которая совершает незатухающие колебания. Для этого выражения (3.13) перепишем следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \alpha / \alpha_0 &= \cos \omega_0 t; \\ (\beta - \beta_q) B / H_r \alpha_0 \omega_0 &= \sin \omega_0 t. \end{aligned} \right\} \quad (3.14)$$

Если теперь оба выражения (3.14) возвести в квадрат и сложить, то в результате получим

$$(\alpha^2 / m_e^2) + [(\beta - \beta_q)^2 / n_e^2] = 1. \quad (3.15)$$

Равенство (3.15) является уравнением эллипса, у которого $m_e = \alpha_0$ – большая полуось; $n_e = H_r \alpha_0 \omega_0 / B$ – малая полуось.

По результатам анализа выражений (3.13) и (3.15) можно сделать следующие выводы.

1. Гиросфера совершает гармонические колебания по закону синуса в вертикальной плоскости и по закону косинуса в горизонтальной.

2. Амплитуда колебаний по координате α равна первоначальному отклонению α_0 .

3. Амплитуда колебаний по координате β зависит как от параметров гироскопа (H_r , B , ω_0), так и от начального отклонения главной оси гиросферы от плоскости меридиана α_0 ;

4. Колебания по координате α совершаются по отношению к плоскости меридиана, а по координате β – по отношению к линии, приподнятой над плоскостью горизонта на величину β_q .

5. Период собственных незатухающих колебаний гиросферы определяется выражением $T_0 = 2\pi / \omega_0$. Подставив сюда значение ω_0 из равенства (3.5), получим

$$T_0 = 2\pi \sqrt{H_r / B\omega_1}. \quad (3.16)$$

Из выражения (3.16) видно, что период собственных незатухающих колебаний гирокомпы зависит от широты места φ . Вид этой зависимости показан на рис. 3.9.

Указанные незатухающие колебания гиросферы происходят относительно динамического положения равновесия, которое определяется координатами $\alpha_{\text{ч}}$ и $\beta_{\text{ч}}$. Из выражений (3.3) видно, что в положении динамического равновесия главная ось гиросферы находится в плоскости меридиана ($\alpha_{\text{ч}} = 0$), но приподнята (в северной широте) на угол $\beta_{\text{ч}}$ над плоскостью горизонта, который обеспечивает прецессию гиросферы со скоростью вращения меридиана.

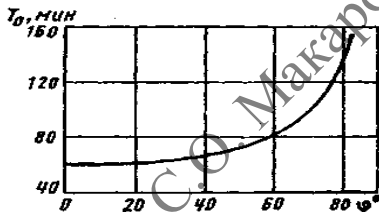


Рис. 3.9

6. Траекторией движения главной оси гиросферы является эллипс, большая полуось которого приподнята над плоскостью горизонта на величину $\beta_{\text{ч}}$. Найдем отношение полуосей эллипса (сжатие эллипса):

$$e_r = m_e / n_e = B / H_r \omega_0. \quad (3.17)$$

Если в выражении (3.17) числитель и знаменатель умножить на ω_1 , то в результате получим

$$e_r = \omega_0 / \omega_1. \quad (3.18)$$

Анализ выражения (3.18) показывает, что амплитуда по углу α в десятки раз больше, чем по углу β , т.е. эллипс сильно вытянут вдоль горизонта.

Контрольные вопросы

21. Какое из слагаемых в системе уравнений (3.1) является гироскопическим моментом, который возникает из-за вращения плоскости меридиана? (См. пояснение 4).

22. Какое из слагаемых в системе уравнений (3.1) является моментом внешней силы? (См. пояснение 114).

23. Какое из слагаемых в системе уравнений (3.1) является гироскопическим моментом, который возникает из-за вращения плоскости горизонта? (См. пояснение 14).

24. Какое из слагаемых в системе уравнений (3.1) является гироскопическим моментом, который возникает из-за движения гироскопа в горизонтальной плоскости? (См. пояснение 130).

25. Какое из слагаемых в системе уравнений (3.1) является гироскопическим моментом, который возникает из-за движения гироскопа в вертикальной плоскости? (См. пояснение 143).

ЛЕКЦИЯ 6

3.6. Демпфирование колебаний гиросферы

Для того чтобы гироскопас был пригоден для судовождения, необходимо, чтобы его главная ось заняла положение, неподвижное относительно плоскости истинного меридиана. Это равносильно тому, чтобы плоскость меридиана стала положением его «статического равновесия», определяемого, как и в случае незатухающих колебаний, координатами $\alpha_{\text{ч}} = 0$; $\beta_{\text{ч}} \neq 0$. Следовательно, независимо от исходного положения (α_0 и β_0) главная ось ЧЭ должна прийти в плоскость меридиана и остаться в ней неограниченное время, т.е. необходимо колебания гиросферы сделать затухающими.

Может сложиться впечатление, что жидкость, в которую погружена гиросфера, за счет вязкого трения способна обеспечить затухание колебаний. Однако, как показывает анализ, в этом случае колебания затухнут примерно через 100 ч, что явно неприемлемо. Использование жидкости с очень большой вязкостью тоже непригодно, так как в такой же степени она будет возбуждать колебания гиросферы при внешнем воздействии (рыскании, качке). Помочь сможет масляный успокоитель, обеспечивающий возникновение демпфирующего момента. В этом случае уравнения, описывающие поведение гиросферы, имеют вид [1]:

$$\left. \begin{aligned} H_{\Gamma} \alpha' + B\beta - C\gamma &= H_{\Gamma} \omega_2; \\ \beta' - \omega_1 \alpha &= 0; \\ \tau_{\text{м}} \gamma' + \gamma &= \beta, \end{aligned} \right\} \quad (3.19)$$

где $\tau_{\text{м}}$ – постоянная времени масляного успокоителя;

γ – угол между линией, соединяющей центры зеркал жидкости и средней линией сосудов (см. рис. 2.5);

C – модуль сосудов (всегда выполняется условие $C < B$).

Найдем частное решение системы уравнений (3.19).

Полагая $\alpha' = \beta' = \gamma' = 0$, получим:

$$\left. \begin{aligned} B\beta_{\text{ч}} - C\gamma_{\text{ч}} &= H_{\Gamma}\omega_2; \\ -\omega_1\alpha_{\text{ч}} &= 0; \\ \gamma_{\text{ч}} &= \beta_{\text{ч}}. \end{aligned} \right\} \quad (3.20)$$

Отсюда имеем $\alpha_{\text{ч}} = 0$; $\beta_{\text{ч}} = H_{\Gamma}\omega_2 / (B - C)$.

Из равенств (3.20) видно, что, в конечном итоге, главная ось гиросферы затухающими колебаниями придет в плоскость меридиана ($\alpha_{\text{ч}} = 0$), но будет приподнята над плоскостью горизонта на угол $\beta_{\text{ч}}$, чтобы иметь прецессионное движение, равное скорости вращения меридиана.

Сравнивая равенства (3.20) и (3.3), можно отметить, что угол $\beta_{\text{ч}}$ при наличии затухания будет несколько больше, чем при незатухающих колебаниях.

Разделив переменные, можно получить уравнение, описывающее колебание главной оси гиросферы в азимуте (по углу α), а именно

$$\tau_{\text{м}}\alpha''' + \alpha'' + (\tau_{\text{м}}B\omega_1 / H_{\Gamma})\alpha + [(B - C)\omega_1 / H_{\Gamma}]\alpha = 0. \quad (3.21)$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$\alpha = C_1 e^{-mt} + e^{-ht} (C_2 \cos \omega_d t + C_3 \sin \omega_d t), \quad (3.22)$$

где C_1, C_2, C_3 – постоянные интегрирования, определяемые заданными начальными условиями;

m, h – коэффициенты затухания;

ω_d – частота затухающих колебаний.

Для удобства анализа выражение (3.22) можно преобразовать, для чего введем новую переменную

$$C_3 / C_2 = \text{ctg } \psi.$$

Тогда подставляя значение $\text{ctg } \psi$ в равенство (3.22), после преобразования получим

$$\alpha = C_1 e^{-mt} + A e^{-ht} \sin(\omega_d t + \psi), \quad (3.23)$$

где $A = C_2 / \sin \psi$ – новая постоянная интегрирования.

В равенстве (3.23) первое слагаемое определяет *аперидическое* движение, а второе – *затухающее колебание*.

Промежуток времени t_1 , необходимый для того, чтобы периодическое слагаемое уменьшилось до одной сотой от первоначального значения, можно определить из равенства

$$0,01 C_1 = C_1 e^{-mt_1},$$

откуда

$$t_1 = -(\ln 0,01)/m. \quad (3.24)$$

Так, в широте $\varphi = 60^\circ$ это время составляет примерно 83 мин. Это означает, что аperiodическое слагаемое в равенстве (3.23) убывает медленно и его наличие в начальный период искажает регулярность затухающих колебаний.

Отношение двух последовательных отклонений главной оси гиросферы от меридиана определяет интенсивность уменьшения амплитуды колебаний и называется *фактором затухания* f_0 .

Фактор затухания периодических колебаний гиросферы в азимуте за полпериода колебаний

$$f_0 = \sin(\omega_d t + \psi) e^{-ht} / \sin[\omega_d(t + T_d/2) + \psi] e^{-h(t+T_d/2)} = e^{-hT_d/2}, \quad (3.25)$$

откуда видно, что фактор затухания есть величина постоянная для данной широты. Необходимо отметить, что выражение (3.25) справедливо лишь тогда, когда аperiodическое слагаемое в равенстве (3.23) уменьшилось настолько, что им можно пренебречь. В противном случае фактор затухания не является величиной постоянной в данной широте, так как он зависит от начального избытка масла в одном из сосудов масляного успокоителя.

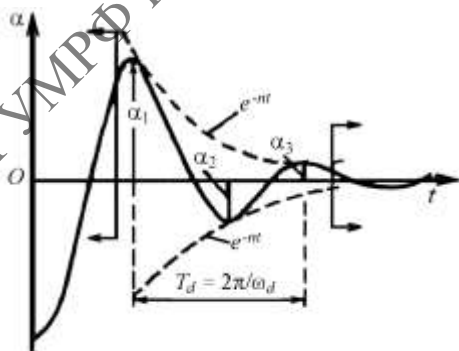


Рис. 3.10

На практике траектория движения гиросферы, определяемая выражением (3.23), может быть записана курсографом или построена по наблюдениям и называется *кривой затухающих колебаний гиросферы*. Обработка этой

кривой позволяет получить значение фактора затухания f_0 и периода затухающих колебаний T_d конкретной гиросферы. Сравнение полученных результатов с техническими характеристиками, приведенными в паспорте гиросферы, позволяет сделать вывод о её пригодности к дальнейшей работе.

Следует иметь в виду, что при обработке кривой затухающих колебаний (рис. 3.10), необходимо отбросить первые примерно 80 мин, когда еще существует влияние аperiодического движения, и последние примерно 40 мин, когда уже трудно точно определить значение полупериода колебаний.

3.7. Влияние движения судна с постоянным курсом и постоянной скоростью на гирокомпас с непосредственным управлением

Гирокомпас устанавливается на судне, которое совершает движение по сферической поверхности Земли. В результате такого движения плоскости истинного горизонта и истинного меридиана наблюдателя получают дополнительное вращение по отношению к ранее изученному вращению Земли.

Пусть судно движется некоторым истинным курсом ИК со скоростью V (рис. 3.11) так, что имеются составляющие движения судна по параллели $V_E = V \sin \text{ИК}$ и по меридиану $V_N = V \cos \text{ИК}$.

Поместим горизонтную систему координат $O_1NE\eta$ в точку O_1 , расположенную на поверхности Земли (рис. 3.12) в какой-то широте. Ось N направим в сторону P_N по касательной к меридиану, ось E – по касательной к параллели, ось η – к центру Земли.

При таком расположении оси $O_1NE\eta$ образуют так называемый *трехгранник Дарбу* с географической ориентацией осей, участвующий в суточном вращении Земли (переносное движение) и в движении судна

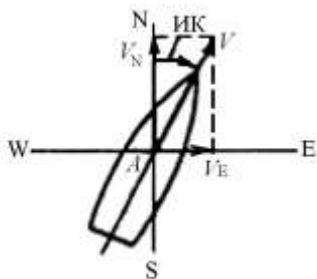


Рис. 3.11

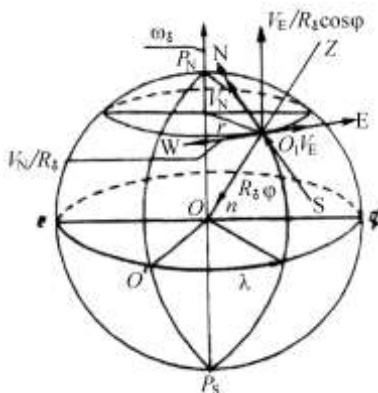


Рис. 3.12

на по отношению к Земле (относительное движение). Вращение Земли определяется вектором $\omega_{\oplus}$. Наличие составляющей скорости судна V_E означает, что судно, двигаясь вдоль параллели, вызывает вращение трехгранника Дарбу в пространстве с угловой скоростью $V_E / R_{\oplus} \cos \varphi$, где $R_{\oplus} \cos \varphi = r$ – радиус параллели. Вектор этой угловой скорости параллелен вектору $\omega_{\oplus}$.

Наличие составляющей V_N означает, что движение судна вызывает вращение трехгранника Дарбу с угловой скоростью $V_N / R_{\oplus}$. Вектор этой угловой скорости направлен по касательной к параллели.

Найдем проекции угловой скорости вращения Земли и указанных скоростей, вызванных движением судна на оси системы координат $O_N E L$.

Эти проекции будут:

– на ось N :

$$U_1 = \omega_{\oplus} \cos \varphi + (V_E \cos \varphi / R_{\oplus} \cos \varphi) = \omega_{\oplus} \cos \varphi + V_E / R_{\oplus}; \quad (3.26)$$

– на ось E :

$$U_2 = -V_N / R_{\oplus}; \quad (3.27)$$

– на ось n :

$$U_3 = -\omega_{\oplus} \sin \varphi - V_E \sin \varphi / R_{\oplus} \cos \varphi = -\omega_{\oplus} \sin \varphi - V_E \operatorname{tg} \varphi / R_{\oplus}. \quad (3.28)$$

С такими скоростями горизонтная система координат вращается в пространстве, а именно:

– со скоростью U_1 плоскость истинного горизонта вращается вокруг оси $N - S$;

– со скоростью U_2 плоскость истинного горизонта вращается вокруг линии $E - W$;

– со скоростью U_3 вращается плоскость истинного меридиана наблюдателя вокруг линии $Z - n$.

Контрольные вопросы

26. В режиме незатухающих колебаний гирокомпас, установленный на неподвижном судне, совершает гармонические колебания:

– относительно плоскости меридиана (см. пояснение 5);

– относительно плоскости горизонта (см. пояснение 49);

– относительно линии, отстоящей от горизонта на β_n (см. пояснение 102);

– относительно линии, отстоящей от меридиана на α_n (см. пояснение 117).

27. Положение динамического равновесия гирокомпаса, работающего в режиме незатухающих колебаний на неподвижном судне, определяется координатами:

- $\alpha_q = \max$; $\beta_q = \max$ (см. пояснение 28);
- $\alpha_q = 0$; $\beta_q = 0$ (см. пояснение 106);
- $\alpha_q = 0$; $\beta_q \neq 0$ (см. пояснение 44);
- $\alpha_q \neq 0$; $\beta_q \neq 0$ (см. пояснение 109);
- $\alpha_q \neq 0$; $\beta_q = 0$ (см. пояснение 15).

28. Период незатухающих колебаний гирокомпаса, установленного на неподвижном судне, зависит:

- от широты места (см. пояснение 122);
- от параметров гирокомпаса (см. пояснение 147);
- от угла отклонения гирокомпаса от меридиана (см. пояснение 30);
- от угла отклонения гирокомпаса от горизонта (см. пояснение 50).

29. Какой из моментов в системе уравнений (3.19) является демпфирующим?

- $B\beta$ (см. пояснение 91);
- $C\gamma$ (см. пояснение 156);
- $H_T \omega_1 \alpha$ (см. пояснение 165);
- $\tau_m \gamma'$ (см. пояснение 59).

30. При движении судна с постоянной скоростью и постоянным курсом горизонтная система координат вращается вокруг всех трех осей. Вокруг какой из осей эта система координат не вращается на неподвижном судне:

- вокруг оси N–S (см. пояснение 150);
- вокруг оси E–W (см. пояснение 158);
- вокруг оси Z–n (см. пояснение 62).

ЛЕКЦИЯ 7

3.8. Скоростная девиация гирокомпаса

При работе на неподвижном судне главная ось гиросферы после прихода в меридиан устанавливается таким образом, что ее вектор кинетического момента H_T совпадает с горизонтальной составляющей суточного вращения Земли, т.е. показывает направление N – S, вокруг которого вращается плос-

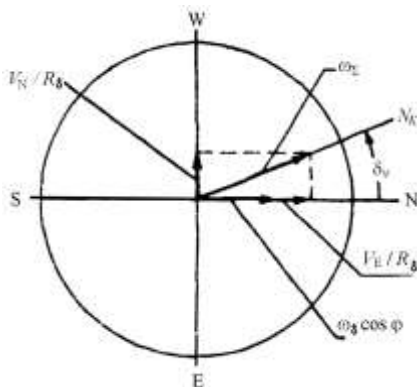


Рис. 3.13

кость истинного горизонта. Если судно перемещается по поверхности Земли, то, как было показано ранее, плоскость горизонта вращается не только вокруг линии $N - S$, но и вокруг линии $E - W$. Это означает, что суммарное вращение плоскости горизонта будет осуществляться вокруг вектора, являющегося суммой двух скоростей U_1 и U_2 , а это направление уже не совпадает с направлением истинного меридиана, т.е. с направлением на N .

Это означает, что компас будет работать с некоторой погрешностью, которая называется *скоростной девиацией* и обозначается δ_v . Для определения скоростной девиации воспользуемся рис. 3.13 (вид сверху на плоскость истинного горизонта), из которого можно определить

$$\operatorname{tg} \delta_v = U_2 / U_1 = (V_N / R_{\delta}) / (\omega_{\delta} \cos \varphi + (V_E / R_{\delta}))$$

или

$$\operatorname{tg} \delta_v = \cos \text{ИК} \cdot (R_{\delta} \omega_{\delta} \cos \varphi + V \sin \text{ИК}). \quad (3.29)$$

Это точная формула скоростной девиации, однако она не может использоваться на практике, так как величина ИК неизвестна. Получим формулу для расчета скоростной девиации через компасный курс. Известно, что $\text{ИК} = \text{КК} + \delta_v$. Подставив это значение истинного курса в выражение (3.29), получим

$$\operatorname{tg} \delta_v = -V \cos (\text{КК} + \delta_v) / [R_{\delta} \omega_{\delta} \cos \varphi + V \sin (\text{КК} + \delta_v)].$$

Умножая обе части равенства на $\cos \delta_v$, имеем

$$\sin \delta_v = -V \cos (\text{КК} + \delta_v) \cos \delta_v / [R_{\delta} \omega_{\delta} \cos \varphi + V \sin (\text{КК} + \delta_v)]$$

или

$$R_{\delta} \omega_{\delta} \cos \varphi \sin \delta_v + V \sin (\text{КК} + \delta_v) \sin \delta_v = -V \cos (\text{КК} + \delta_v) \cos \delta_v.$$

Отсюда

$$R_{\delta} \omega_{\delta} \cos \varphi \sin \delta_v = -V [\sin (\text{КК} + \delta_v) \sin \delta_v + \cos (\text{КК} + \delta_v) \cos \delta_v].$$

Выражение в квадратных скобках есть косинус разности, т.е.

$$[\sin (\text{КК} + \delta_v) \sin \delta_v + \cos (\text{КК} + \delta_v) \cos \delta_v] = \cos [(\text{КК} + \delta_v) - \delta_v] = \cos \text{КК}.$$

$$\text{Тогда } R_{\delta} \omega_{\delta} \cos \varphi \sin \delta_v = -V \cos \text{КК}.$$

Отсюда

$$\sin \delta_v = -V \cos KK / R_{\text{З}} \omega_{\text{З}} \cos \varphi. \quad (3.30)$$

Полученное выражение является точной формулой скоростной девиации в функции компасного курса. Учитывая, что скоростная девиация для обычных судов транспортного флота не превышает 10° , для практических целей можно использовать выражение

$$\delta_v = -57,3 V \cos KK / 900 \cos \varphi, \quad (3.31)$$

где $900 = R_{\text{З}} \omega_{\text{З}}$ – линейная скорость точки экватора, уз.

Необходимо помнить, что знак «-» означает, что главная ось гиросферы от меридиана отклоняется к западу. Проанализируем выражение для скоростной девиации. Как видно из выражения (3.31), зависимость скоростной девиации от скорости – линейная (рис. 3.14). Чем больше скорость, тем больше δ_v .

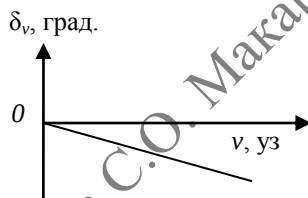


Рис. 3.14

При скорости, равной нулю, девиация $\delta_v = 0$.

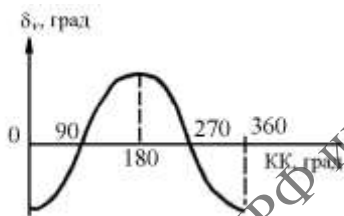


Рис. 3.15

От компасного курса (рис. 3.15) скоростная девиация зависит по закону косинуса.

Характер девиации – полукруговой. Максимальное значение скоростной девиации на курсах 0° и 180° , на курсах 90° и 270° – $\delta_v = 0$.

От широты места скоростная девиация зависит по закону секанса (рис. 3.16).

С увеличением широты девиация увеличивается, при $\varphi \rightarrow 90^\circ$ $\delta_v \rightarrow \infty$.

Нет такой широты, в которой $\delta_v = 0$. На экваторе наблюдается минимальное значение скоростной девиации.

Учет скоростной девиации можно производить следующими способами: по формулам или по таблицам, в современных гирокомпасе («Standard-20», «Standard-22») по информации с вычислителя, поступающей на репитеры для коррекции их показаний.

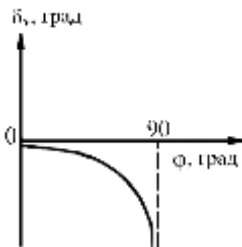


Рис. 3.16

3.9. Влияние движения судна с постоянной скоростью и постоянным курсом на характеристики гирокомпаса

Рассмотрим влияние движения судна на такие характеристики гирокомпаса, как направляющий момент и период собственных незатухающих колебаний. Определим значение направляющего момента, который заставляет главную ось гирокомпаса установиться по направлению меридиана. Таким моментом является гироскопический момент.

Как видно из рис. 3.17, если главная ось гиросферы находится в меридиане, то нет никаких гироскопических моментов, так как векторы H_r и ω_1 по направлению совпадают друг с другом. Если же под действием внешних сил главная ось гиросферы уходит из меридиана на угол α , то появляются проекции вектора H_r на оси горизонтной системы координат:

$$H_y = H_r \sin \alpha \approx H_r \alpha; \quad H_x = H_r \cos \alpha \approx H_r$$

В этом случае проекцией H_y создается гироскопический момент R_z , который препятствует уходу гирокомпаса из меридиана. После исчезновения внешнего воздействия главная ось гиросферы этим гироскопическим моментом возвращается в меридиан. Этот момент, называемый *направляющим моментом*, определяется выражением

$$R_z = H_r \omega_1 \sin \alpha \quad (3.32)$$

Если судно неподвижно, то угловая скорость, с которой плоскость истинного горизонта вращается вокруг линии N – S, $\omega_1 = \omega \cos \varphi$. Тогда направляющий момент гирокомпаса определяется равенством

$$R_z = H_r \sin \alpha \omega \cos \varphi = H_r \alpha \omega \cos \varphi. \quad (3.33)$$

Это и есть направляющий момент гирокомпаса, установленного на неподвижном судне, значение которого зависит от угла ухода гиросферы из меридиана α и широты места φ .

При движении судна вдоль оси N – S действует суммарная угловая скорость $U_1 = \omega \cos \varphi + (V_E / R_\oplus)$. Тогда выражение для направляющего момента примет вид

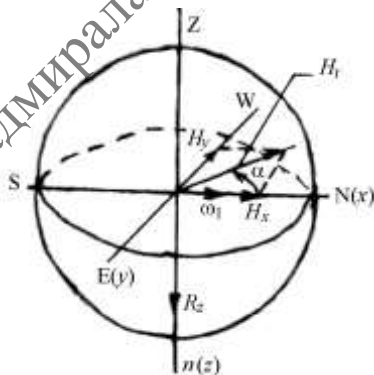


Рис. 3.17

$$R_z = H_r (\omega_{\odot}^{\pm} \cos \varphi + (V_E / R_{\odot}^{\pm})). \quad (3.34)$$

Из полученного равенства (3.34) видно, что в зависимости от курса судна R_z будет больше (при курсах восточной половины) или меньше (при курсах западной половины) направляющего момента компаса, установленного на неподвижном судне. Отсюда также видно, что при курсах западного направления возможно обращение в ноль направляющего момента в широтах менее 90° . Действительно, если судно следует курсами западного направления, то для направляющего момента гирокомпаса имеем

$$R_z = H_r (\omega_{\odot}^{\pm} \cos \varphi - (V_E / R_{\odot}^{\pm})). \quad (3.35)$$

Как видно из полученного выражения, направляющий момент гирокомпаса становится равным нулю в случае, когда

$$(\omega_{\odot}^{\pm} \cos \varphi - (V_E / R_{\odot}^{\pm})) = 0. \quad (3.36)$$

Отсюда находим широту, в которой обращается в ноль направляющий момент гирокомпаса, и, следовательно, компас потеряет свойство устанавливаться в плоскости меридиана. Это будет *критическая широта* гирокомпаса,

$$\varphi_{кр} = \arccos(V_E / 900). \quad (3.37)$$

Данное равенство справедливо, когда судно следует западными курсами. Физическая сущность этого явления заключается в том, что в критической широте угловая скорость вращения плоскости истинного горизонта вокруг линии N – S из-за вращения Земли компенсируется угловой скоростью поворота этой же плоскости, вследствие движения судна вдоль параллели на запад. Возникает эффект «остановки» Земли. Например, при $V = 30$ уз, $\varphi_{кр} = 88^\circ$, а при $V = 40$ уз, $\varphi_{кр} = 87^\circ$.

Для компаса, установленного на неподвижном судне, период незатухающих колебаний составляет

$$T_0 = 2\pi \sqrt{H_r / B \omega_{\odot}^{\pm} \cos \varphi}. \quad (3.38)$$

Известно, что при движении судна вдоль оси N – S действует суммарная угловая скорость

$$V_1 = \omega_{\odot}^{\pm} \cos \varphi + V_E / R_{\odot}^{\pm}.$$

Это означает, что период незатухающих колебаний для компаса, установленного на движущемся судне, будет

$$T_{0v} = 2\pi \sqrt{H_r / B (\omega_{\odot}^{\pm} \cos \varphi + V_E / R_{\odot}^{\pm})}. \quad (3.39)$$

Сравнивая выражения (3.38) и (3.39), можно сделать вывод, что при движении судна период собственных незатухающих колебаний гирокомпаса отличается от периода колебаний на неподвижном судне. T_{0v} всегда больше

T_0 на западных курсах и меньше – на восточных. Как видно из равенства (3.38), при приближении к критической широте период собственных незатухающих колебаний гирокомпаса стремится к бесконечности, т.е. гирокомпас перестает быть компасом.

Контрольные вопросы

31. Если судно движется с постоянной скоростью и постоянным курсом, то суммарное вращение плоскости горизонта происходит вокруг линии:

- N – S (см. пояснение 6);
- E – W (см. пояснение 118);
- отклоненной от линии N – S на некоторый угол α (см. пояснение 162);
- Z – n (см. пояснение 32);
- отклоненной от линии Z – n на некоторый угол β (см. пояснение 155).

32. Если судно движется с постоянной скоростью и постоянным курсом, то суммарное вращение плоскости меридиана происходит вокруг линии

- N – S (см. пояснение 138);
- E – W (см. пояснение 16);
- отклоненной от линии N – S на угол α (см. пояснение 41);
- Z – n (см. пояснение 152);
- отклоненной от линии Z – n на угол β (см. пояснение 128).

33. При движении судна с постоянной скоростью и постоянным курсом у компаса возникает девиация, которая зависит:

- от скорости судна (см. пояснение 163);
- от курса судна (см. пояснение 35);
- от широты места (см. пояснение 42);
- от параметров гирокомпаса (см. пояснение 71).

34. В какой широте скоростная девиация гирокомпаса равна нулю:

- на экваторе (см. пояснение 119);
- на полюсе (см. пояснение 133);
- в любой широте, если судно перемещается вдоль параллели (см. пояснение 51);
- в любой широте, кроме критической, если судно перемещается вдоль параллели (см. пояснение 74).

35. Критической называется широта, в которой:

- гирокомпас перестает быть компасом (см. пояснение 61);

- ## ЛЕКЦИЯ 8

Рис. 3.18

49

$$L_{ny} = F_{иN} a = m a V'_N .$$

Если правую часть полученного равенства умножить и разделить на g , то в итоге получим

$$L_{ny} = B V'_N / g H_\Gamma . \quad (3.40)$$

Наличие этого момента вызывает прецессию гиросферы в горизонтальной плоскости по углу α со скоростью

$$\omega_{nz} = L_{ny} / H_\Gamma = -B V'_N / g H_\Gamma . \quad (3.41)$$

Знак «-» означает, что прецессия будет в сторону запада.

Прецессионное движение, возникающее от действия сил инерции, называется *инерционной прецессией* гироскопа. Угол, на который переместится главная ось гиросферы за время действия ускорения, называется *инерционным перемещением*, определяемым выражением

$$\Delta\alpha = \int_{t_1}^{t_2} \omega_{nz} dt = -(B / g H_\Gamma) \int_{t_1}^{t_2} V'_N dt = (B / g H_\Gamma) (V_{N2} - V_{N1})$$

или

$$\Delta\alpha = B \Delta V_N / g H_\Gamma , \quad (3.42)$$

где t_1 – время начала маневра; t_2 – время окончания маневра; ΔV_N – изменение северной составляющей скорости судна за время маневра.

На первый взгляд, может показаться, что $\Delta\alpha$ это и есть погрешность в показаниях гироскопа, но это не так, поскольку при маневре должна измениться скоростная девиация δ_v . До маневра компас имел скоростную девиацию $\delta_{v1} = -V_{N1} / 900 \cos \varphi$, после маневра – $\delta_{v2} = -V_{N2} / 900 \cos \varphi$.

Таким образом, за время маневра судна произошло изменение скоростной девиации гироскопа, величина которого определяется следующим равенством:

$$\Delta\delta_v = (\delta_{v2} - \delta_{v1}) = -(V_{N2} - V_{N1}) / 900 \cos \varphi = -\Delta V_N / 900 \cos \varphi . \quad (3.43)$$

Следовательно, за время маневра главная ось гироскопа уйдет из первоначального положения равновесия на угол $\Delta\alpha$, а нужно, чтобы ушла на угол $\Delta\delta_v$, тогда к концу маневра она будет находиться в новом положении равновесия.

Инерционная прецессия, возникающая из-за маневра судна, направлена к положению равновесия, соответствующему новым параметрам движения судна. Таким образом, меридиональная составляющая силы инерции, возни-

кающая при маневрировании судна, способствует переходу гирокомпаса в новое положение динамического равновесия. Это происходит при любом маневре судна.

Поведение гирокомпаса, установленного на маневрирующем судне, может характеризоваться следующими вариантами:

- сила инерции $F_{ин}$ обеспечивает такую скорость прецессии, что за время маневра гиросфера придет в новое положение динамического равновесия;
- скорость инерционной прецессии меньше той, которая обеспечивает приход гиросферы в новое положение динамического равновесия к концу маневра;
- скорость инерционной прецессии больше той, которая необходима для прихода гиросферы к моменту окончания маневра в новое положение динамического равновесия.

3.10.1. Условие аperiodического перехода

К моменту окончания маневра главная ось гиросферы будет находиться в новом положении равновесия, если выполняется равенство

$$\Delta\alpha = \Delta\delta_v. \quad (3.44)$$

В этом случае во время маневра главная ось гиросферы как бы «следит» за мгновенным положением динамического равновесия в азимуте, соответствующим мгновенному значению V_N . Такое движение гиросферы называется *aperиодическим переходом* к новому положению динамического равновесия (в новый компасный меридиан). Как видно из рис. 3.19, гирокомпас после окончания маневра никаких колебаний относительно меридиана не имеет.

Сравнив, выражения (3.42) и (3.43), можно сделать вывод, что углы $\Delta\alpha$ и $\Delta\delta_v$ имеют различную физическую природу.

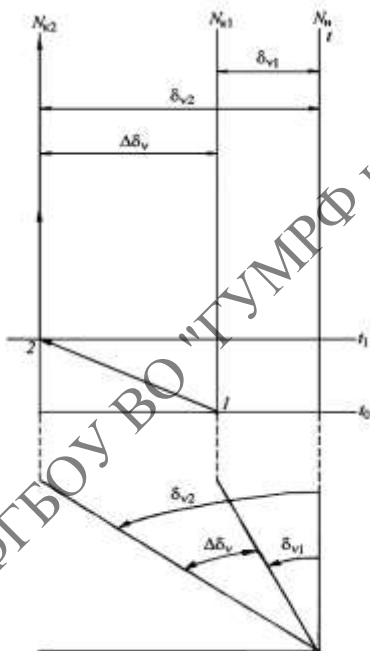


Рис. 3.19

Это может означать, что для выполнения равенства (3.44) необходимо выполнить вполне определенное условие. Найдем условие, при котором гиросфера будет осуществлять аperiодический переход в новое положение динамического равновесия и в показаниях гирокомпы будет отсутствовать ошибка, вызванная маневрированием судна. Для этого в равенство (3.44) подставим значения $\Delta\alpha$ и $\Delta\delta$, из выражений (3.42) и (3.43). Получим

$$-B\Delta V_N / gH_T = -\Delta V_N / 900 \cos \varphi$$

или

$$B/gH_T = 1/R_{\delta} \cdot \omega_{\delta} \cos \varphi.$$

Отсюда имеем

$$H_T / B\omega_{\delta} \cos \varphi = R_{\delta}/g \quad (3.45)$$

или

$$2\pi\sqrt{H_T/B\omega_{\delta}\cos\varphi} = 2\pi\sqrt{R_{\delta}/g}. \quad (3.46)$$

В левой части равенства (3.46) имеем выражение для периода собственных незатухающих колебаний T_0 гирокомпы, установленного на неподвижном судне. Правая часть этого равенства – период собственных незатухающих колебаний T_* математического маятника, длина которого равна радиусу Земли. Следовательно, условием аperiодического перехода главной оси гиросферы в новое положение динамического равновесия является равенство

$$T_0 = T_*, \quad (3.47)$$

впервые полученное немецким ученым М. Шулером, которое известно как *теорема М. Шулера*.

Таким образом, условие аperiодического перехода может быть сформулировано следующим образом: *для того, чтобы при маневрировании судна главная ось гиросферы из компасного меридиана, в котором она находилась до маневра аperiодическим переходом, к моменту окончания маневра точно пришла в новый компасный меридиан, определяемый значением скоростной девиации после маневра, необходимо и достаточно, чтобы период собственных незатухающих колебаний гирокомпы был равен периоду собственных незатухающих колебаний математического маятника, длина которого равна радиусу Земли.*

Период T_* легко рассчитать, для Земли он составляет 84,4 мин.

Из выражения для периода собственных незатухающих колебаний гироскопа видно, что равенство (3.47) можно выполнить только в одной широте, которая называется *расчетной* (φ_*), т.е.

$$T_0 = T_* = 2\pi\sqrt{H_r/\omega_\oplus^2 \cos \varphi}. \quad (3.48)$$

Если гироскоп установлен на движущемся судне, то условие апериодического перехода, без учета северной составляющей скорости судна, можно записать в виде следующего равенства:

$$2\pi\sqrt{H_r/(\omega_\oplus^2 \cos \varphi + V_E/R_\oplus)} = 2\pi\sqrt{R_\oplus/g}. \quad (3.49)$$

В различных странах, выпускающих гироскопические компасы, выбрано свое значение расчетной широты. Как правило, это широта места, в которой располагается предприятие, изготавливающее гироскопы.

3.10.2. Понятие об апериодическом гироскопе

Гироскоп, у которого $T_0 = T_*$ только в расчетной широте, называется *неапериодическим*. Если, у компаса имеется возможность сохранять период собственных незатухающих колебаний, равным 84,4 мин в некотором диапазоне широт от $\varphi = \varphi_1$ до $\varphi = \varphi_2$, то такой гироскоп называется *апериодическим*. Как видно из равенства (3.49), для того, чтобы при изменении широты φ или восточной составляющей скорости судна период собственных незатухающих колебаний оставался неизменным и равным 84,4 мин, необходимо изменять параметры гироскопа H_r или B (целесообразнее изменять параметры H_r .)

Определим из равенства (3.49) закон изменения H_r , реализация которого позволит получить гироскоп с регулируемым периодом собственных незатухающих колебаний гиросферы.

Учитывая, что $H_r = 2H_0 \cos \eta$, а $B = mga$, равенство (3.49) можно преобразовать к следующему виду:

$$2H_0 \cos \eta = maR_\oplus (\omega_\oplus^2 \cos \varphi + V_E / R_\oplus)$$

или

$$\cos \eta = maR_\oplus \omega_\oplus^2 (\cos \varphi + V_E / R_\oplus \omega_\oplus^2) / 2H_0. \quad (3.50)$$

Если подобрать параметры гиросферы таким образом, чтобы выполнялось равенство

$$maR_\oplus \omega_\oplus^2 / 2H_0 = 1,$$

то полученное выражение приобретет вид

$$\cos \eta = \cos \varphi + V_E / R_\oplus \omega_\oplus^2. \quad (3.51)$$

Для судов со скоростью хода до 20 уз с достаточной степенью точности можно считать, что

$$\eta \approx \varphi. \quad (3.52)$$

Данное равенство показывает, что для того, чтобы гироскомпас был аperiодическим, достаточно, чтобы гироскопы внутри гиросферы занимали такое положение, при котором их оси вращения будут отклонены от главной оси гиросферы на угол равный широте места. Из этого же выражения видны ограничения применительно к данному способу реализации аperiодического компаса.

Действительно, при плавании в широте $\varphi = 0^\circ$, в соответствии с выражением (3.52), угол η также должен быть равен 0° , а это означает, что внутри гиросферы гироскопы должны располагаться параллельно главной оси гиросферы. В этом случае будут отсутствовать проекции кинетического момента гиросферы H_1' и H_2' , наличие которых приводит к снижению девиации на качке, т.е. теряется основной смысл двухгироскопной конструкции гиросферы.

Кроме того, при плавании вблизи широты $\varphi = 90^\circ$ гироскопы будут разведены на такой большой угол, что приведет к значительному уменьшению кинетического момента гиросферы, а следовательно, и направляющего момента гироскомпаса, который и так с увеличением широты уменьшается. По этой причине возможность использования реального аperiодического гироскомпаса (например, «Курс-10») как аperiодического была ограничена широтами от 20° до 80° . Необходимо отметить, что такие компасы были только в СССР.

Контрольные вопросы

36. При маневрировании судна прецессионное движение гиросферы возникает в том случае, когда ускорение действует:

- вдоль параллели (см. пояснение 7);
- вдоль меридиана (см. пояснение 58);
- в произвольном направлении (см. пояснение 112).

37. Является ли инерционное перемещение $\Delta\alpha$ погрешностью в показаниях гироскомпаса на момент окончания маневра:

- да (см. пояснение 18);
- нет (см. пояснение 65).

38. Условие аperiodического перехода гироскопа в новое положение равновесия:

- $\Delta\alpha = \Delta\delta_v$ (см. пояснение 164);
- $\Delta\alpha > \Delta\delta_v$ (см. пояснение 25);
- $\Delta\alpha < \Delta\delta_v$ (см. пояснение 72).

39. Расчетной называется широта, в которой выполняется условие

- $\Delta\alpha = \Delta\delta_v$ (см. пояснение 90);
- $T_0 = T_*$ (см. пояснение 103).

40. Аperiodическим называется компас, у которого условие $T_0 = 84,4$ мин выполняется:

- на экваторе (см. пояснение 19);
- в расчетной широте (см. пояснение 57);
- в критической широте (см. пояснение 78);
- в некотором диапазоне широт (см. пояснение 146).

ЛЕКЦИЯ 9

3.10.3. Инерционная девиация I рода

Рассмотрим влияние маневра на гироскоп, который работает в режиме незатухающих колебаний и установлен на судне, совершающем маневр в широте, отличной от расчетной. В этом случае к моменту окончания маневра гиросфера, совершая прецессионное движение под действием момента от сил инерции, не будет находиться в новом положении динамического равновесия.

Определим характер погрешности, которая будет присутствовать в показаниях гироскопа. Предположим, что судно совершает маневр в широте $\varphi > \varphi_*$. Как видно из выражений (3.42) и (3.43), в этом случае $\Delta\alpha < \Delta\delta_v$, т.е. угол инерционного перемещения $\Delta\alpha$ главной оси гиросферы будет меньше угла изменения скоростной девиации $\Delta\delta_v$, и значит, главная ось гиросферы не дойдет на некоторый угол до нового положения динамического равновесия (точка 3 на рис. 3.20). Это и является погрешностью в показаниях гироскопа, которая называется *инерционной девиацией I рода*. С этого момента гироскоп будет совершать незатухающие колебания относительно нового компасного меридиана с амплитудой $\delta_{j\max}^I$. Если включить затухание, то

гирисфера затухающими колебаниями придет в положение динамического равновесия (новый компасный меридиан).

Как видно из рис. 3.20, максимальное значение инерционной девиации первого рода приходится на момент окончания маневра.

На рис. 3.21 показана ситуация, когда судно совершает маневр в широте, меньшей расчетной ($\varphi < \varphi_*$). В этом случае $\Delta\alpha > \Delta\delta_v$. Значит, к концу маневра главная ось гирисферы будет находиться в точке 4, т.е. «проскочит» плоскость компасного меридиана. В этом случае в показаниях гирокомпаса появится погрешность, но с обратным знаком.

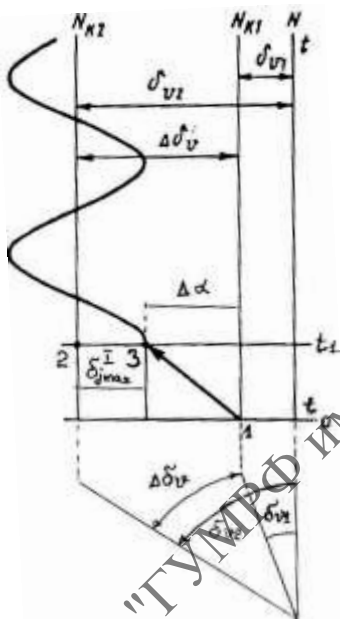


Рис. 3.20

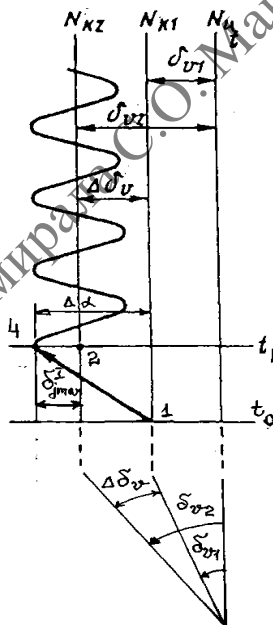


Рис. 3.21

Определим величину инерционной девиации первого рода на момент окончания маневра. Учитывая тот факт, что возникающая при маневрировании судна погрешность является разностью между фактическим инерционным перемещением главной оси гирисферы и необходимым изменением скоростной девиации, имеем

$$\delta_{j\max}^I = \Delta\alpha - \Delta\delta_v. \quad (3.53)$$

Подставив в равенство (3.53) значения $\Delta\alpha$ и $\Delta\delta_v$ из выражений (3.42) и (3.43), получим

$$\delta_{j\max}^I = -(B\Delta V_N / gH_r) + (\Delta V_N / R \dot{\omega} \dot{\omega} \cos \varphi).$$

После несложных преобразований окончательно получим

$$\delta_{j\max}^I = (\delta_{V2} - \delta_{V1})[(\cos \varphi / \cos \varphi_*) - 1]. \quad (3.54)$$

Полученное равенство позволяет определить величину инерционной девиации I рода на момент окончания маневра. Проанализировав его, можно сделать следующие выводы:

- инерционная девиация I рода у гирокомпаса возникает в том случае, когда судно совершает маневр не в расчетной широте;

- у гирокомпаса инерционная девиация I рода отсутствует, если судно маневрирует в расчетной широте или если оно совершается маневр, при котором не возникает северная составляющая скорости судна (например, при маневрировании вдоль параллели, на курсах $90^\circ - 270^\circ$);

- если судно совершает один и тот же маневр в различных широтах, то при переходе через расчетную широту у девиации изменяется знак (рис. 3.22).

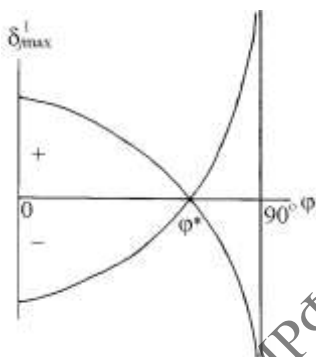


Рис. 3.22

К основным особенностям инерционной девиации I рода можно отнести следующие:

- причиной возникновения этой девиации является то обстоятельство, что период собственных незатухающих колебаний гирокомпаса не равен величине 84,4 мин;

- максимальное значение девиация имеет сразу после окончания маневра;

- в чистом виде инерционная девиация I рода имеет место в том случае, когда на время маневра у компаса выключено затухание (в современных гирокомпасах нет возможности выключать затухание).

3.10.4. Инерционная девиация II рода

Погрешность, возникающая у гирокомпаса из-за наличия приспособления для затухания, называется *инерционной девиацией II рода*.

Рассмотрим причины возникновения этой девиации (рис. 3.23). Предположим, что судно совершает маневр в расчетной широте, при котором возникает ускорение вдоль меридиана (V_N'). В этом случае у компаса будет отсутствовать инерционная девиация I рода, так как $\Delta\alpha = \Delta\delta$, т.е. за время

Diagram illustrating a mechanical system with a spring and a damper. The system consists of a mass m connected to a fixed support by a spring with stiffness k and a damper with coefficient γ . The displacement of the mass is denoted by $z(t)$. The diagram shows the mass, the spring, and the damper, with labels for the mass m , the spring stiffness k , the damper coefficient γ , and the displacement $z(t)$.

точки 1 в точку 2 на рис. 3.24). Но из-за наличия момента L_{y2} ось не дойдет до нового положения равновесия (придет в точку 5).

Рис. 3.24

Основными особенностями инерционной девиации второго рода являются следующие:

- При изучении поведения гиросферы на маневрирующем судне мы рассматривали ее в виде одногироскопного прототипа. Поэтому сила инерции $F_{иЕ}$ (см. рис. 3.18), создающая момент вокруг главной оси гиросферы, не учитывалась, так как она не приводила к прецессии гиросферы. Однако в двухгироскопном чувствительном элементе под действием этого момента гироскопы внутри гиросферы начнут прецессировать, что приведет к изме-

V'_N и V'_E . Под действием ускорения V'_E появится крен гиросферы θ_r (рис. 3.25). Тогда сила F_{H_N} (от ускорения V'_N) приведет к возникновению моментов L_{ny} и L_{nz} . За счет момента L_{nz} изменится угол β , который определится выражением

где $\Delta\beta$ – дополнительный угол в вертикальной плоскости за счет одновременного действия ускорений V'_N и V'_E .

Рис. 3.26.

образом, у двухгиро-
полнительная погреш-
ода (δ_j^{III}).
ие выводы:
I имеет максимальное
ра судна;
направления V'_N и V'_E .
оционная девиация III
и в NE, SW четверти)
(ускорения в NW и SE
гироскопного компаса

– как и инерционная девиация второго рода, δ_j^{III} имеет максимальное значение примерно через $1/4 T_d$ после окончания маневра судна;

Это означает, что при определенных маневрах инерционная девиация III рода может частично компенсировать δ_j^{II} (ускорения в NE, SW четверти) или суммироваться с инерционной девиацией II рода (ускорения в NW и SE четверти);

– максимальные значения δ_j^{III} не превышают нескольких десятых долей градуса. По этой причине наличие инерционной девиации III рода в судовождении можно игнорировать.

В случае, когда судно совершает маневр в широте, отличной от расчетной, и компас работает в режиме затухающих колебаний, у него будут возникать обе

инерционные девиации: и I, и II рода. Инерционная девиация I рода имеет знак, зависящий от широты маневра судна, а инерционная девиация II рода, независимо от широты, всегда в течение полупериода затухающих колебаний гиросферы после окончания маневра возникает из-за прецессии гиросферы в сторону первоначального положения динамического равновесия. В широтах меньше расчетной в первую четверть периода затухающих колебаний инерционные девиации I и II рода имеют разные знаки (рис. 3.27 а) и инерционная девиация II рода в некоторой мере компенсирует девиацию I рода.

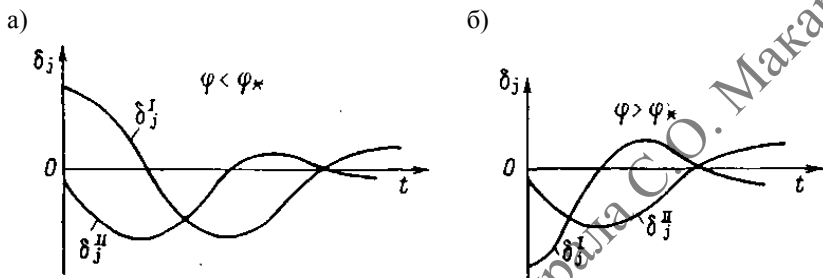


Рис. 3.27

В широтах больше расчетной (рис. 3.27 б) обе девиации имеют одинаковые знаки, т.е. они суммируются, что приводит к увеличению отклонения главной оси гиросферы от положения динамического равновесия. Из этого можно сделать вывод, что при маневрировании в широтах ниже расчетной использовать выключатель затухания нецелесообразно, а в широтах выше расчетной – целесообразно. Целесообразно также использовать выключатель затухания у апериодических гироскопов.

Контрольные вопросы

41. Величина инерционной девиации I рода на момент окончания маневра определяется выражением:

- $\delta_j^I = \Delta\alpha$ (см. пояснение 8);
- $\delta_j^I = \Delta\delta_V$ (см. пояснение 48);
- $\delta_j^I = \Delta\alpha - \Delta\delta_V$ (см. пояснение 159);
- $\delta_j^I = (\delta_{V2} - \delta_{V1})[(\cos \varphi / \cos \varphi_0) - 1]$ (см. пояснение 139).

42. Инерционная девиация I рода равна нулю:

- в критической широте (см. пояснение 98);

– в расчетной широте (см. пояснение 149);
– в любой широте, если судно совершает маневр вдоль параллели (см. пояснение 67).

43. Причинами возникновения инерционной девиации II рода являются:

– движение судна по поверхности Земли (см. пояснение 26);
– неравенство $T_0 \neq T_*$ (см. пояснение 142);
– наличие у компаса устройства для погашения колебаний (см. пояснение 104).

44. Максимальное значение инерционной девиации II рода приходится

– на момент окончания маневра (см. пояснение 38);
– примерно через $0,25 T_d$ после окончания маневра (см. пояснение 81);
– примерно через $0,5 T_d$ после окончания маневра (см. пояснение 20).

45. Выключатель затухания целесообразно использовать в широте:

– $\varphi = \varphi_*$ (см. пояснение 137);
– $\varphi > \varphi_*$ (см. пояснение 94);
– $\varphi < \varphi_*$ (см. пояснение 127).

ЛЕКЦИЯ 10

3.10.5. Суммарная инерционная девиация

При маневре судна возникающие силы инерции воздействуют непосредственно на гироскоп и на устройство для затухания колебаний. В связи с этим у компаса в общем случае появляется суммарная девиация $\delta_J(t) = \delta_J^I(t) + \delta_J^{II}(t)$.

Для общей оценки этой девиации имеются специальные таблицы и графики [1], которые составлены для различных широт в функции времени. Ввиду того, что рассчитать такие таблицы невозможно на все маневры, расчет выполнен для определенного маневра, который характеризуется изменением северной составляющей скорости в 25 уз.

Для того чтобы с помощью графика (или таблицы) получить значение δ_J для своего маневра, необходимо полученное значение $\delta_{J\text{таб}}$ умножить на коэффициент $k_1 = \Delta V_{N\text{факт}}/25$.

В практике судовождения может встретиться такой случай, когда несколько маневров следуют один за другим через небольшие промежутки времени. Это означает, что к моменту начала следующего маневра еще бу-

дуг иметь место инерционные девиации предыдущих маневров. По этой причине накопленная девиация будет существенно отличаться как по величине, так и по характеру изменения во времени от той, которая может возникнуть при однократном маневре. В этом случае судоводителя могут интересовать следующие вопросы:

- при какой последовательности маневров по времени девиация будет накапливаться наиболее интенсивно?
- чему может быть равна максимальная величина накопленной девиации?

При многократном маневрировании возможна такая последовательность маневров, при которой инерционные девиации накапливаются и могут достигнуть величины, в 2 – 2,5 раза большей, чем максимальная величина инерционной девиации при однократном маневре. Примером (рис. 3.28) может служить маневрирование судна через промежутки времени, равные половине периода T_d в данной широте.

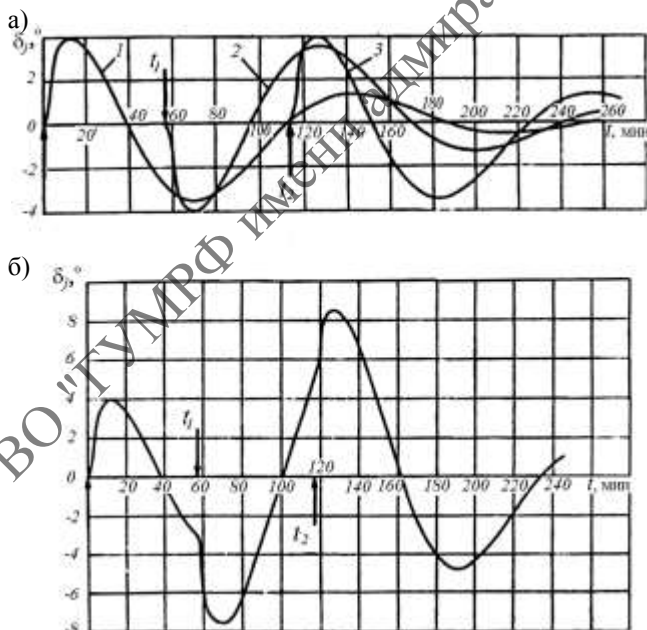


Рис. 3.28

На рис. 3.28 а приведены графики суммарных инерционных девиаций трех последовательных маневров, которые выполнялись через промежутки

времени, когда первый максимум суммарной девиации второго маневра приходился на момент второго максимума первого маневра, а первый максимум третьего маневра со вторым максимумом второго маневра. График результирующей девиации, получившейся в результате накопления от трех маневров, показан на рис. 3.28 б.

На основе анализа этих рисунков можно сделать следующие выводы:

– выбранное время между началами маневров является самым неблагоприятным, так как имеет место максимальное накопление девиаций;

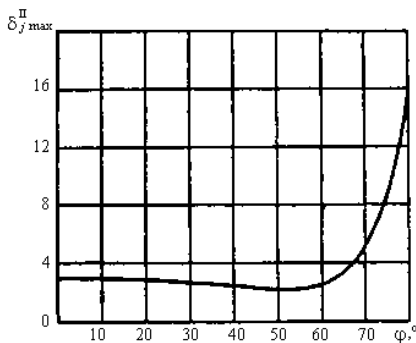


Рис. 3.29

– накопленная девиация в 2 – 2,5 раза превышает максимальную величину суммарной инерционной девиации от каждого из маневров;

– так как суммарная инерционная девиация от предыдущих маневров со временем исчезает, накопленная девиация практически после трёх-четырёх маневров достигнет своего максимума и ее дальнейшее накопление прекратится.

На рис. 3.29 показана качественная картина изменения накопленной девиации в зависимости от широты места выполнения маневров.

3.10.6. Поперечный снос судна, обусловленный инерционной девиацией компаса

Наличие в показаниях гирокомпасе некоторое время после маневра суммарной инерционной девиации приведет к тому, что судно будет перемещаться не по линии курса, проложенной на карте, а с некоторыми отклонениями. Для рассмотрения этого явления обратимся к какому-нибудь типичному случаю изменения инерционной девиации (рис. 3.30 а). Из анализа этого графика можно сде-

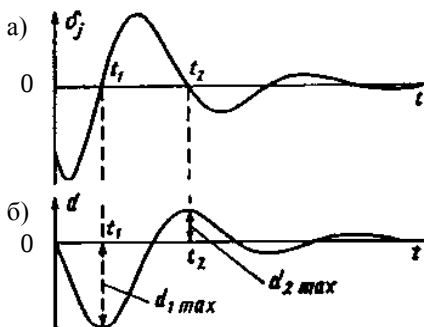


Рис. 3.30

лать вывод, что в течение некоторого времени после маневра судно будет управляться по гирокомпасу, в показаниях которого присутствует переменная во времени погрешность.

Одной из особенностей двухгироскопного компаса является то, что первый и второй максимумы суммарной инерционной девиации отличаются друг от друга незначительно и только последующие максимумы убывают в соответствии с фактором затухания. Это приводит к тому, что сумма площадей, расположенных выше оси времени, равна сумме площадей, расположенных ниже оси времени. Следовательно, поперечный снос судна, который оно будет получать, в конечном счете, компенсируется, и судно окажется на линии курса.

Таким образом, при управлении судном по двухгироскопному компасу из-за суммарной инерционной девиации у судна возникнут (рис. 3.30 б) два поперечных сноса (в одну и в другую сторону от курса). Это обстоятельство необходимо учитывать, когда судно после маневра следует в стесненных условиях.

В современных гирокомпасах, например «Standard-20», «Standard-22», в специальном процессоре вырабатывается поступающая в репитеры информация о величине суммарной инерционной девиации, которая исключается из показаний репитера.

3.10.7. Практические рекомендации по учету суммарной инерционной девиации

Если на судне, совершающем маневр, установлен гирокомпас, у которого отсутствует возможность исключения суммарной инерционной девиации из показаний репитеров, то необходимо выполнять следующие рекомендации.

1. Определение поправки гирокомпаса производить либо на стоянке судна, либо не менее чем через 1,5 – 2 ч после завершения маневра.

2. После изменения курса необходимо произвести сличение магнитного и гироскопического компасов. Повторное сличение выполнить через 1,5 – 2 ч после окончания маневра.

3. Избегать обсерваций по двум пеленгам сразу после маневра (можно по трем, если брать пеленги быстро и определять место судна по двум углам).

4. Проверку стабильности $\Delta Г К$ нужно выполнять не менее, чем через 2 ч, а в высоких широтах – через 3 ч после последнего маневра.

5. Желательно, если позволяет обстановка, выполнять длительный маневр (при этом будут меньше погрешности).

6. Следует избегать повторных маневров примерно через половину периода T_d , особенно вдоль меридиана.

7. Учитывая возникновение сносов, следует последний маневр (если это возможно) выполнить заблаговременно, чтобы к моменту входа в узкость сносы исчезли. Если этого сделать нельзя, то необходимо иметь в виду данное обстоятельство при прокладке курса и чаще контролировать место судна.

8. Все эти рекомендации имеют смысл при маневре, когда $\Delta V_N > 10 \text{ уз}$.

Контрольные вопросы

46. Если судно совершает маневр в расчетной широте, то суммарная инерционная девиация гирокомпаса равна:

- инерционной девиации I рода (см. пояснение 9);
- инерционной девиации II рода (см. пояснение 55);
- сумме обеих девиаций (см. пояснение 132).

47. Если судно совершает маневр не в расчетной широте, то суммарная инерционная девиация гирокомпаса равна:

- инерционной девиации I рода (см. пояснение 68);
- инерционной девиации II рода (см. пояснение 21);
- сумме обеих девиаций (см. пояснение 46).

48. Если судно совершает один и тот же маневр в различных широтах, то суммарная инерционная девиация имеет большее значение:

- в расчетной широте (см. пояснение 123);
- в широте выше расчетной (см. пояснение 79);
- в широте меньше расчетной (см. пояснение 37).

49. Накапливается ли суммарная инерционная девиация у компаса, если судно совершает несколько маневров подряд:

- да, накапливается (см. пояснение 129);
- нет, не накапливается (см. пояснение 86).

50. Появляется ли у судна снос из-за того, что после маневра в показаниях гирокомпаса присутствует суммарная инерционная девиация:

- да (см. пояснение 22);
- нет (см. пояснение 97).

3.11. Влияние качки на одnogироскопный компас с пониженным центром масс

В отличие от ускорений, возникающих при маневрировании, ускорения на качке носят периодический характер с относительно малым периодом (10 – 20 с) и поэтому, на первый взгляд, не должны вызывать каких-либо погрешностей в показаниях гирокомпаса.

В первых конструкциях гирокомпасов не были предусмотрены меры по устранению влияния качки. Устроенный таким образом ЧЭ стабилизировался вращением ротора только относительно двух осей: OY и OZ . Что касается оси OX , то по отношению к ней одnogироскопный ЧЭ вращением ротора не стабилизировался, а вел себя как обычный физический маятник с малым (порядка секунды) периодом колебаний. Это и явилось основной причиной неудовлетворительной работы одnogироскопного компаса на качке.

Было замечено, что при качке одnogироскопный компас имеет значительные погрешности, носящие четвертной характер, т.е. *максимальные* на румбах NE, SE, SW и NW и *нулевые* – на румбах N, E, S, W.

Неудовлетворительная работа первых гирокомпасов на качке послужила толчком к развитию более современных схем. Так, в частности, появились двухгироскопные компасы.

Определим, какие ускорения действуют на гирокомпас, установленный на качающемся судне. На рис. 3.31 показан гирокомпас, который установлен

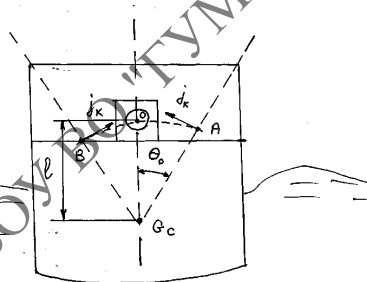


Рис. 3.31

в диаметральной плоскости судна, но центр подвеса ЧЭ (точка O) находится выше центра качаний судна (точка G_c) на величину l .

При рассмотрении влияния качки судна на гирокомпас сделаем следующие допущения:

- предположим, что судно качается вокруг центра масс, т.е. центр качаний судна совпадает с его центром масс;

– будем считать, что качка судна регулярная. Это означает, что в данный отрезок времени период и амплитуда качки постоянны по величине, а угол θ изменяется по гармоническому закону:

$$\theta = \theta_0 \sin \omega_k t. \quad (3.55)$$

В процессе качки судна с амплитудой θ_0 точка подвеса ЧЭ будет совершать движение по дуге OA . Для углов до 20° с достаточной степенью точности можно считать, что точка O перемещается по прямой (касательная к дуге). Тогда для линейного ускорения, которое испытывает на качке чувствительный элемент гирокомпаса, будем иметь

$$j_k = \theta'' l. \quad (3.56)$$

Возьмем вторую производную по времени от равенства (3.55):

$$\theta'' = -\theta_0 \omega_k^2 \sin \omega_k t. \quad (3.57)$$

Подставим полученное значение θ'' из равенства (3.57) в выражение (3.56). Окончательно будем иметь

$$j_k = j_0 \sin \omega_k t, \quad (3.58)$$

где $j_0 = -\theta_0 l \omega_k^2$ – амплитуда ускорения, возникающего на качке.

Так как в общем случае направление ускорения, возникающего на качающемся судне, может быть произвольным относительно компасного меридиана, будут возникать составляющие этого ускорения как вдоль меридиана, так и вдоль параллели. Определим их значения.

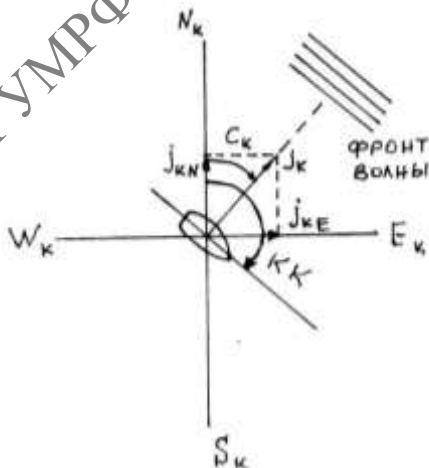


Рис. 3.32

Тогда для составляющих ускорения вдоль меридиана и параллели получим:

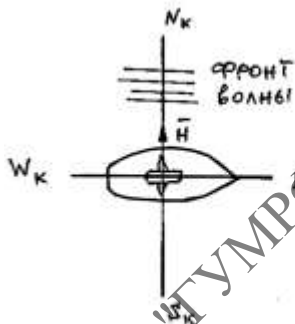
Как видно из рис. 3.32, для угла C_K имеем

$$C_K = KK - 90^\circ. \quad (3.60)$$

$$j_{\text{KN}} = j_{\text{K}} \sin \text{KK}; \quad (3.61)$$

$$j_{\text{KE}} = -j_{\text{K}} \cos KK. \quad (3.62)$$

a)



6)

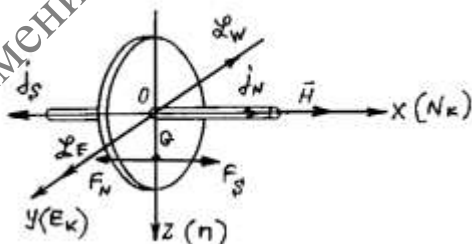


Рис. 3.33

69

гую половину периода – в противоположную. Эта сила инерции вызовет появление момента L_E (L_W), направление которого каждую половину периода качки также изменяется на обратное. Наличие момента по оси OY , в принципе, должно привести к прецессии ЧЭ в горизонтальной плоскости.

Однако, учитывая тот факт, что период собственных колебаний гирокомпаза составляет более часа, а период качки – не более 20 с, ЧЭ не успевает реагировать на моменты сил инерции, которые возникают из-за ускорений на качке. Это позволяет сделать вывод, что ускорение от качки, действующее вдоль меридиана (J_{KN}), не сказывается на поведении гирокомпаза.

На рис. 3.34 а показано судно, которое следует $KK = 0^\circ$. В этом случае волна, создающая бортовую качку, движется вдоль параллели. Возникающее от качки ускорение также будет действовать вдоль параллели.

Как видно из рис. 3.34 б, в рассматриваемом случае будет возникать момент вокруг оси OX , который, в принципе, не может привести к прецессионному движению ЧЭ, так как по направлению совпадает с вектором кинетического момента H . Таким образом, ускорение от качки, действующее вдоль параллели, также не сказывается на поведении гирокомпаза.

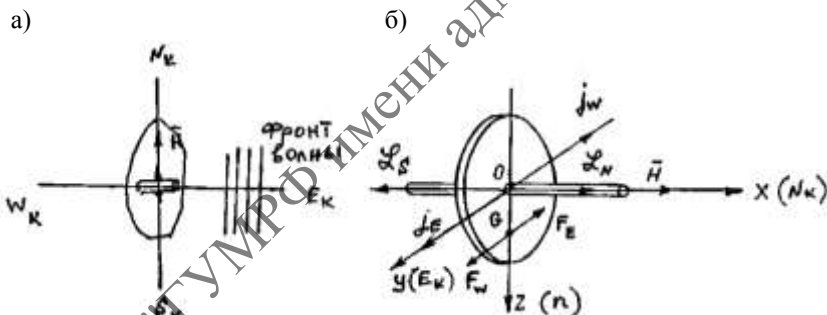


Рис. 3.34

Однако, учитывая тот факт, что ЧЭ не стабилизирован относительно оси OX , под действием силы F_E (F_W) он будет раскачиваться. При этом центр масс ЧЭ будет отклоняться от вертикали то к западу, то к востоку на угол

$$\psi = F_E / mg \quad (3.63)$$

Рассмотрим теперь случай, когда судно движется таким курсом, что возникают ускорения от качки и вдоль меридиана, и вдоль параллели.

Верхняя часть рис. 3.35 показывает положение центра масс гироскопа (вид сверху) каждые полпериода качки, который силой F_E или F_W попеременно смещается от вертикали то к востоку, то к западу.

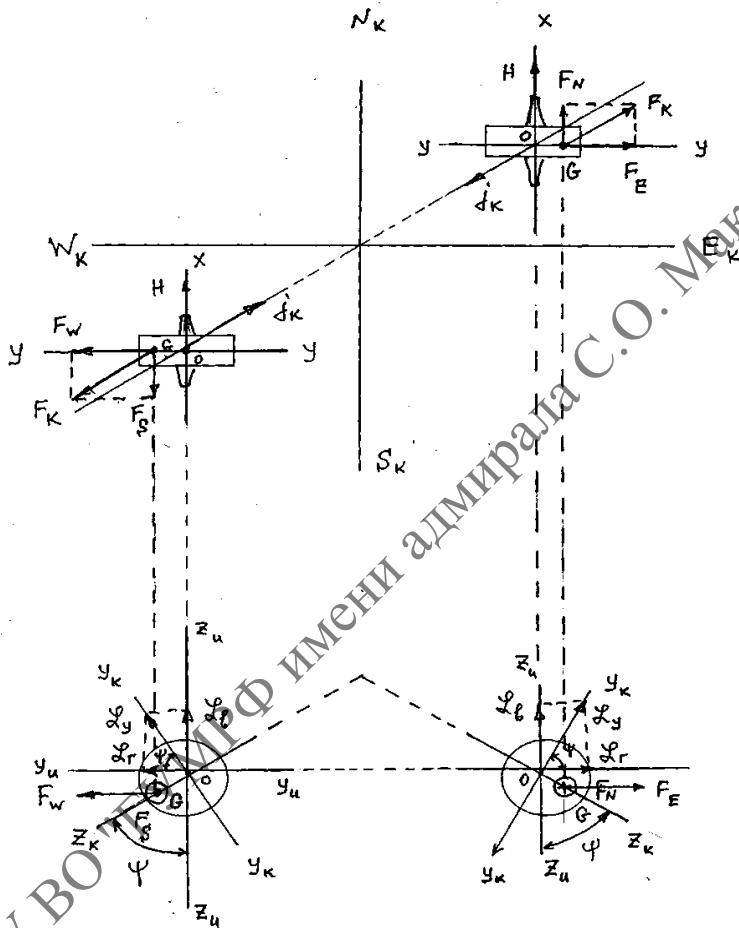


Рис. 3.35

В нижней части рис. 3.35 показан вид гироскопа спереди. Здесь показано синхронное действие на гироскоп сил инерции F_E (F_W) и F_N (F_S). Как следует из этого рисунка, когда сила F_W отклоняет центр масс гироскопа к западу, сила F_S действует от нас. Когда в следующую половину периода качки сила F_E отклоняет центр масс гироскопа к востоку, сила F_N действует на нас. Такое синхронное воздействие на гироскоп сил инерции от качки F_W (F_E)

и F_S (F_N) приводит к появлению момента L_y , который каждые полпериода качки имеет горизонтальную составляющую L_Γ , направленную в противоположные стороны, и вертикальную составляющую L_B , которая всегда направлена в одну и ту же сторону.

Таким образом, когда при качке судна возникает ускорение как вдоль меридиана, так и вдоль параллели, на гироскоп будет постоянно действовать момент вокруг вертикальной оси:

$$L_B = L_y \psi = F_N a m g .$$

Подставляя в это равенство значения $F_N = m j_k \sin KK$ и $F_E = -m j_k \cos KK$, получим

$$L_B = -m a j_k^2 \sin KK \cos KK / g$$

или с учетом значения j_k , полученного из равенства (3.58), имеем

$$L_B = -(m g a \theta_0^2 l^2 \omega_k^4 \sin^2 \omega_k t \sin KK \cos KK) / g^2 \quad (3.64)$$

Учитывая, что среднее значение функции $\sin^2 \omega_k t$ за период качки τ_k :

$$\left(\int_0^{\tau_k} \sin^2 \omega_k t dt \right) / \tau_k = 0,5 ,$$

а $\sin KK \cos KK = 0,5 \sin 2KK$ и $m g a = B$, окончательно для значения постоянно действующего вертикального момента получим

$$L_B = -(B \theta_0^2 l^2 \omega_k^4 \sin 2KK) / 4g^2 . \quad (3.65)$$

Наличие вертикального момента приведет к тому, что главная ось гиросферы начнет прецессировать в вертикальной плоскости, что, в свою очередь, вызовет появление момента вокруг оси OY из-за пониженного центра масс.

Под действием этого момента гироскопас начнет уходить из меридиана. Это будет продолжаться до тех пор, пока направляющий момент гироскопаса не скомпенсирует возникший на качке вертикальный момент, т.е.

$$L_B = R_z .$$

Подставляя в данное равенство значения L_B из выражения (3.65) и R_z из выражения (3.33), получим

$$-(B \theta_0^2 l^2 \omega_k^4 \sin 2KK) / 4g^2 = H_\Gamma \omega_\delta \cos \varphi \sin \alpha ,$$

откуда

$$\sin \alpha = \sin \delta_{kl} = -(B \theta_0^2 l^2 \omega_k^4 \sin 2KK) / 4g^2 H_\Gamma \omega_\delta \cos \varphi . \quad (3.66)$$

Здесь B – модуль маятникового момента гиросферы;

H_T – кинетический момент гиросферы;
 θ_0 – максимальный угол крена судна при качке;
 l – расстояние по вертикали от центра масс судна до точки подвеса гиросферы;

ω_k – частота качки;

КК – компасный курс;

g – ускорение свободного падения;

$\omega_\oplus$ – угловая скорость вращения Земли;

φ – широта места.

Выражение (3.66) определяет величину девиации, которая возникает на качке у одnogирoскопного компаса с пониженным центром масс. Анализ данного выражения позволяет сделать следующие выводы.

1. Максимальное значение девиации возникает на четвертных курсах, т.е. девиация на качке имеет четвертной характер.

2. Величина девиации на качке в значительной степени зависит от места установки компаса на судне. Рекомендуется устанавливать основной прибор гирокомпаса как можно ближе к центру качаний судна. В соответствии с Правилами РМРС отстояние точки подвеса гиросферы по вертикали от центра масс судна не должно превышать 5 м.

3. Девиация при качке от величины максимального угла крена при качке изменяется по квадратичному закону.

4. Очень сильная степень зависимости девиации от частоты качки.

5. С увеличением широты девиация от качки увеличивается.

Для примера определим девиацию на качке одnogирoскопного компаса, параметры которого соответствуют параметрам гирокомпаса типа «Курс». Имеем:

$$H_T = 15,55 \text{ Н} \cdot \text{м} / \text{с}; B = 0,657 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}; \omega_\oplus = 7,29 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1};$$

$$l = 3 \text{ м}; \theta_0 = 15^\circ; \tau_k = 10,0 \text{ с} (\omega_k = 0,6 \text{ с}^{-1}); \varphi = 60^\circ; \text{КК} = 45^\circ.$$

Если эти данные подставить в формулу (3.67), то получим, что $\delta_{k1} = -14,5^\circ$.

Пример показывает, что такой компас непригоден для работы в условиях качки судна.

3.12. Влияние качки на двухгироскопный компас с пониженным центром масс

Под действием сил инерции, возникающих от ускорений на качке, которые действуют вдоль параллели, одногироскопная гиросфера раскачивается вокруг оси OX , т.е. у нее появляется угол крена ψ . В этом случае уравнение движения одногироскопного чувствительного элемента с пониженным центром масс по углу крена будет [2]:

$$I_0 \psi'' + B\psi = (Bj_0 / g) \cos KK \sin \omega_k t \quad (3.67)$$

или

$$\psi'' + \omega_{x1}^2 \psi = (\omega_{x1}^2 / g) \cos KK \sin \omega_k t, \quad (3.68)$$

где I_0 – осевой момент инерции гиросферы одногироскопного компаса;

$j_0 = -\theta_0 l \omega_k^2$ – амплитуда ускорения на качке;

$B = mga$ – модуль маятникового момента гироскопа;

$\omega_{x1}^2 = (B/I_0)$ – квадрат частоты собственных колебаний гиросферы одногироскопного компаса вокруг оси OX .

Из уравнения (3.67) видно, что рассматриваемый чувствительный элемент не является гироскопическим устройством. Это означает, что гиросфера никак не стабилизируется находящимся внутри нее гироскопом относительно ее главной оси.

Частное решение уравнения (3.68), полученное методом неопределенных коэффициентов, имеет вид

$$\psi_{ч1} = \left[\omega_{x1}^2 j_0 / g (\omega_{x1}^2 - \omega_k^2) \right] \cos KK \sin \omega_k t$$

или учитывая, что в реальных условиях $\omega_{x1}^2 \gg \omega_k^2$, окончательно получим

$$\psi_{ч1} = (j_0 / g) \cos KK \sin \omega_k t. \quad (3.69)$$

Поскольку погрешность на качке обусловлена величиной вертикального момента $L_b = L_y \psi$, для уменьшения девиации от качки необходимо этот момент сделать как можно меньше. Одним из способов уменьшения L_b является стабилизация гиросферы вокруг оси OX , реализованная в двухгироскопных компасах. Конструкция гиросферы такого компаса показана на рис. 3.7.

Уравнение, описывающее движение гиросферы по углу крена (вокруг оси OX), имеет вид [2]:

$$(2H_E^2 / c_n) \psi'' + B\psi = (Bj_0 / g) \cos KK \sin \omega_k t. \quad (3.70)$$

Сравнивая выражения (3.67) и (3.70), можно отметить, что система двухгироскопного компаса имеет гораздо больший динамический момент инерции по сравнению с осевым моментом инерции гиросферы одnogироскопного компаса. На этом основании можно предположить, что угол крена ψ компаса двухгироскопного будет меньше, чем одnogироскопного.

Определим значение коэффициента снижения девиации на качке.

Приведем уравнение (3.70) к нормальному виду, получим

$$\psi'' + (Bc_{\Pi} / 2H_E^2) \psi = (Bc_{\Pi} j_0 / 2H_E^2 g) \cos KK \sin \omega_K t$$

или

$$\psi'' + \omega_{x2}^2 \psi = (\omega_{x2}^2 j_0 / g) \cos KK \sin \omega_K t, \quad (3.71)$$

где $\omega_{x2}^2 = Bc_{\Pi} / 2H_E^2$ – квадрат частоты собственных колебаний гиросферы двухгироскопного компаса вокруг оси OX ;

c_{Π} – коэффициент упругости пружин кинематической связи гироскопов;

H_E – проекция кинетического момента гироскопа на ось $E - W$.

Частное решение уравнения (3.71) имеет вид

$$\psi_{\chi 2} = \left[\omega_{x2}^2 j_0 / g (\omega_{x2}^2 - \omega_K^2) \right] \cos KK \sin \omega_K t$$

или с учетом того, что $\omega_{x2}^2 \ll \omega_K^2$, получим

$$\psi_{\chi 2} = -(\omega_{x2}^2 j_0 / \omega_K^2 g) \cos KK \sin \omega_K t. \quad (3.72)$$

Из сравнения равенств (3.70) и (3.72) можно найти коэффициент снижения девиации на качке за счет применения двухгироскопной схемы, а именно

$$M = \psi_{\chi 2} / \psi_{\chi 1} = -\omega_{x2}^2 / \omega_K^2.$$

Переходя от частот к периодам колебаний, окончательно получим

$$M = -\tau_K^2 / T_{x2}^2, \quad (3.73)$$

где τ_K – период качки; T_{x2} – период собственных колебаний гиросферы двухгироскопного компаса вокруг оси OX .

Знак «-» в выражении (3.73) означает, что девиация на качке у двухгироскопного компаса имеет противоположный знак (при одинаковом компасном курсе) девиации одnogироскопного компаса.

Физическая сущность снижения девиации двухгироскопного компаса на качке заключается в следующем. Одnogироскопный компас под действием сил инерции, возникающих из-за ускорений от качки вдоль меридиана, совершает колебательное движение относительно оси OX как обычный ко-

роткопериодный маятник. Синхронное воздействие сил инерции от качки вдоль параллели и вдоль меридиана приводит к появлению постоянно действующего вертикального момента, величина которого зависит от угла отклонения кажущейся вертикали от истинной. Это и приводит к возникновению больших девиаций одnogироскопного компаса на качке.

В случае двухгироскопного компаса под действием ускорения вдоль параллели возникает сила инерции, приложенная к центру масс гиросферы. Создаваемый этой силой момент вокруг оси OX заставляет гироскопы внутри гиросферы прецессировать в горизонтальной плоскости (сходиться или расходиться), что, в свою очередь, приводит к растяжению пружин кинематической связи гироскопов. Вокруг вертикальных осей гироскопов возникают моменты упругости пружин, под действием которых гироскопы вместе с гиросферой начинают прецессировать вокруг оси OX гиросферы. Появится угол крена гиросферы. Однако он возникает как результат прецессионного движения, которое является медленным движением и, значит, за половину периода качки может образоваться весьма малый угол крена.

Определим девиацию на качке двухгироскопного компаса с параметрами одnogироскопного, рассмотренного в п. 3.11. Как было установлено, одnogироскопный компас имел девиацию $\delta_{к1} = -14,5^\circ$.

Если двухгироскопный компас имеет период колебаний вокруг оси OX $T_{x2} = 15,0$ мин, то для коэффициента снижения девиации на качке из равенства (2.73) имеем $M = -(10)^2/(900)^2 = -0,0001$. Значит, девиация на качке у этого гироскопного компаса составит

$$\delta_{к2} = M \delta_{к1} = -0,0001(-14,5^\circ) \approx 0,001^\circ.$$

Исходя из полученного результата, можно сделать вывод, что качка практически не влияет на точность двухгироскопного компаса. Однако на практике девиация двухгироскопного компаса на качке намного больше той, которую определяют теория и приведенные расчеты. Причиной этого являются следующие особенности конструкции чувствительного элемента.

1. Наличие свободной поверхности жидкости в масляном успокоителе, который обеспечивает погашение собственных незатухающих колебаний гиросферы. Хотя сосуды успокоителя и разделены на секции, возникающие на качке силы инерции приводят к появлению избытка масла внутри каждой секции, а это, в свою очередь, вызывает появление постоянно действующего (за период качки) вертикального момента и, как следствие, дополнительной девиации.

2. Недостаточная угловая жесткость элементов связи корпуса чувствительного элемента с гиromоторами при условии возникновения ускорения на качке приводит к появлению угловых отклонений корпуса гиросферы относительно гиromоторов, сохраняющих неизменной свою ориентацию.

3. Линейная неравножесткость элементов конструкции гиросферы приводит к смещению центра масс чувствительного элемента не по направлению действия сил инерции, возникающих на качке.

В результате действия указанных факторов девиация на качке двухгироскопного компаса класса «Курс» в широтах до 60° может достигать до $1,5^\circ$, что не превышает требований ИМО ($\delta_k = 1^\circ \text{ sec } \varphi$).

Контрольные вопросы

51. Во время качки судна возникают ускорения, которые действуют как вдоль параллели, так и вдоль меридиана. Ускорение, действующее вдоль меридиана, приводит:

- к прецессии гиросферы вокруг оси OY (см. пояснение 10);
- к прецессии гиросферы вокруг оси OZ (см. пояснение 39);
- к появлению крена гиросферы (см. пояснение 93).

52. Во время качки судна возникают ускорения, которые действуют как вдоль параллели, так и вдоль меридиана. Ускорение, действующее вдоль параллели, приводит:

- к прецессии гиросферы вокруг оси OY (см. пояснение 135);
- к прецессии гиросферы вокруг оси OZ (см. пояснение 33);
- к появлению крена гиросферы (см. пояснение 87).

53. Девиация одногироскопного компаса на качке возникает в том случае, когда ускорение от качки действует:

- вдоль меридиана (см. пояснение 126);
- вдоль параллели (см. пояснение 23);
- по промежуточному румбу (см. пояснение 40).

54. Максимальное значение девиации одногироскопного компаса на качке имеет место в том случае, когда судно следует:

- курсом 0° или 180° (см. пояснение 82);
- курсом 90° или 270° (см. пояснение 99);
- четвертными курсами (см. пояснение 115),

55. Снижение девиации на качке у двухгироскопного компаса происходит за счет обеспечения гироскопической стабилизации гиросферы вокруг:

- оси OX (см. пояснение 84);
- оси OY (см. пояснение 45);
- оси OZ (см. пояснение 53).

ЛЕКЦИЯ 12

3.13. Использование математической модели для повышения точности гирокомпасов классов «Standard» и «Курс» при маневрировании судна

В течение более чем полувека двухгироскопные маятниковые компасы, к которым относятся «Курс» (СССР, Россия), «Standard» (Германия), «Navigator» (Германия) и др., занимали господствующее положение в мировом флоте, обеспечивая приемлемую точность судовождения при скорости до 20 уз в диапазоне широт от 0° до 70° .

С появлением в середине 80-х гг. XX в. гирокомпасов корректируемого класса типа «Вега» (СССР, Россия), «Brown» (Великобритания), а позднее гаммы компасов корректируемого класса нового поколения типа «Гюйс», «Гюйс-М», «Яхта», «Меридиан», «Гирокин» (Россия) и др. выявилось их большое преимущество в отношении точности показаний при маневрировании, особенно в высоких широтах. Такое положение вещей заставило производителей двухгироскопных маятниковых гирокомпасов (и, прежде всего, немецкую фирму «Anschütz», которая обеспечивала до 30 % мирового рынка гирокомпасов) искать пути повышения точности этих гирокомпасов в условиях маневрирования.

Решение проблемы было найдено на основе использования математической модели гирокомпаса, которая представляла собой простую линейную систему дифференциальных уравнений третьего порядка. Микропроцессор, в который была заложена эта система дифференциальных уравнений, вошел в состав отдельного блока, получившего название «Nautocourse Plus». Для функционирования указанного блока необходимо было вводить в него сведения обо всех константах чувствительного элемента гирокомпаса, непрерывно снабжая информацией о скорости судна и широте места. Вычисленные мгновенные значения скоростной и инерционной девиации создавали сигнал, который через цифро-аналоговый преобразователь воздействовал на дополнительную следящую систему и вводил, таким образом, корректирующую информацию в пока-

зания всех принимающих репитеров. Первым гирокомпасом фирмы «Anschütz» (Германия), в котором был реализован изложенный принцип, был гирокомпас «Standard-4S mod.2». В середине 90-х гг. XX в. фирма «Anschütz», создает гирокомпас «Standard-20», названный *цифровым гирокомпасом*. В нём была установлена микропроцессорная система, осуществляющая не только функции вычисления девиаций, но и обеспечивающая управление работой всех систем гирокомпаса, их контроль и тестирование.

Гирокомпас «Standard-20» выпускается серийно и имеет достаточно широкой спрос на мировом рынке, хотя его цена почти вдвое больше простого широко распространенного гирокомпаса «Standard-14». Точностные характеристики гирокомпаса «Standard-20» на маневрировании таковы, что он соответствует требованиям Резолюции ИМО А.821, т.е. обеспечивает при скорости объекта до 70 уз в диапазоне широт от 0° до 70° при изменении скорости $\Delta V = 70$ уз погрешность не более 2° и при быстром повороте на 180° со скоростью 70 уз погрешность не более 3°.

Идея метода повышения точности гирокомпаса при маневрировании судна достаточно проста и заключается в том, что с помощью микропроцессора вычисляются мгновенные дискретные значения суммарной инерционной девиации. Они в своей совокупности будут представлять полный закон изменения указанной девиации во времени с момента возникновения до полного ее исчезновения. На основе вычисленных дискретных значений осуществляется дискретная коррекция показаний всех репитеров.

Из вышеизложенного становится ясно, что в рассматриваемом методе не оказывается каких-либо искусственных воздействий на чувствительный элемент реального гирокомпаса, т.е. сохраняется его полная автономность

В гирокомпасе фирмы «Anschütz» (Германия) «Standard-20» в качестве математической модели использована известная система линейных дифференциальных уравнений третьего порядка, полученная отечественным ученым Б.В. Булгаковым. Эта система имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \alpha' + B\beta - C\gamma &= H (\omega_{\delta} \sin \varphi + V_E \operatorname{tg} \varphi / R_{\delta}) - BV'_N / g; \\ B\beta' - (\omega_{\delta} \cos \varphi + V_E / R_{\delta}) \alpha &= V_N / R_{\delta}; \\ \tau_{\text{ГМ}} \gamma' + \gamma - \beta &= V'_N / g. \end{aligned} \quad (3.74)$$

Для оценки эффективности выбранного способа учета инерционной девиации гирокомпаса необходимо проанализировать следующие три фактора, которые могут влиять на точность вычисления этой девиации:

– влияние неточности информации о значениях основных параметров гироскопа;

– влияние неточности информации об ускорении и скорости судна, а также о широте места;

– степень достаточности модели третьего порядка.

Анализ этих факторов, выполненный профессором Е.Л. Смирновым, позволяет сделать следующие выводы.

1. Во время эксплуатации значения параметров H , B , C и $\tau_{\text{ГМ}}$ реального гироскопа неизбежно изменяют свое первоначальное значение. Однако, учитывая высокий технологический уровень немецкой специализированной промышленности, можно с высокой степенью достоверности считать, что указанные изменения будут весьма незначительны (не более 1 %) и, соответственно, столь же незначительно модельные инерционные девиации $\delta_{\text{жм}}$ будут отличаться от инерционных девиаций δ_j реального гироскопа. Указанное обстоятельство позволяет утверждать, что технологические факторы могут привести к таким расхождениям $\delta_{\text{жм}}$ и δ_j , которые не имеют значения с точки зрения требований к точности морского судовождения.

2. В абсолютном большинстве случаев на современных морских судах широта места и скорость объекта определяются по показаниям приемопередатчика GPS или других глобальных спутниковых систем навигации. Зная их высокую точность, можно прийти к выводу, что погрешности в определении $\delta_{\text{жм}}$ и δ_j будут лежать далеко за пределами требуемой точности курсоуказания в морском судовождении в самых сложных условиях плавания.

Ускорение $V'_{\text{НМ}}$, которое в навигационном микропроцессоре определяется путем численного дифференцирования дискретных значений $V_{\text{НМ}}$, также имеет достаточно высокую точность.

3. Вопрос о степени достаточности выбранной модели в виде линейных дифференциальных уравнений третьего порядка является важнейшим по сравнению с другими факторами.

Дело заключается в том, что фактически наиболее точное описание поведения двухгироскопного чувствительного гироскопа осуществляется системой нелинейных дифференциальных уравнений шестого порядка, причем переменные представлены в конечных углах. (Следует отметить, что в чувствительном элементе гироскопов класса «Standard» устанавливается кольцевой гидравлический успокоитель колебаний и поэтому движение

жидкости в успокоителе характеризуется двумя дифференциальными уравнениями).

Впервые указанную полную систему дифференциальных уравнений получил известный отечественный ученый Я.Н. Ройтенберг. Эта система имела пятый порядок, так как была составлена для отечественного гирокомпаса типа «Курс», который был снабжен секторным успокоителем. На основе этой наиболее полной и строгой системы профессором Е.Л. Смирновым была получена система нелинейных дифференциальных уравнений шестого порядка, характеризующая в конечных углах движение двухгироскопного чувствительного элемента, с дополнением, учитывающим тот фактор, что в гиросферах компаса класса «Standard» применяется кольцевой гидравлический успокоитель колебаний.

В расчетах фирмы «Anschütz», относящихся к гирокомпасу «Standard-20», указывается, что его точность соответствует требованиям Резолюции ИМО А.821. Это означает, что при изменении скорости в пределах до 70 уз ($\Delta V = 70$ уз) в диапазоне широт φ от 0° до 70° погрешность не превышает 2° , а при быстром повороте на 180° в том же диапазоне широт погрешность не более 3° . В то же время в разделе «Динамическая погрешность гирокомпаса» указывается, что значение этой погрешности не более чем 0,4 сек φ , т.е. она превышает значения, установленные в Резолюции ИМО А.821.

Системы уравнений третьего и шестого порядков были численно проинтегрированы на персональном компьютере. На рис. 3.36 приведено значение инерционной девиации, рассчитанной по модели шестого порядка для случая, когда $KK = 315^\circ$, $t_1 = 360$ с, $\Delta V = 70$ уз. Как видно из рисунка, в широте 70° максимальное значение инерционной девиации более 8° .

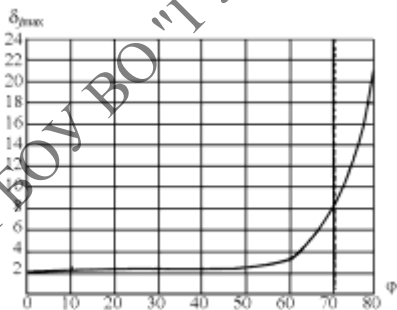


Рис. 3.36

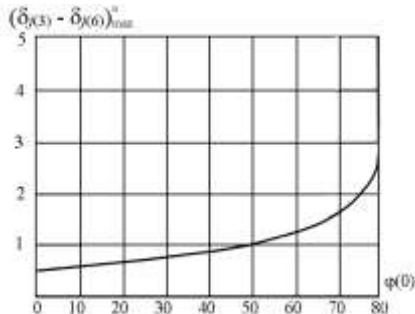


Рис. 3.37

На рис. 3.37 показана зависимость максимальной погрешности в вычислении инерционной девиации компаса (для тех же условий плавания), возникшей из-за использования вместо точной модели шестого порядка модели третьего порядка, откуда можно сделать вывод, что погрешность гирокомпаса «Standard-20» действительно находится в пределах требований Резолюции ИМО А.821, но существенно превосходит погрешность, определяемую формулой $0,4^\circ \text{ sec } \varphi$.

В случае маневра полуциркуляции с курса 135° на курс 315° при скорости $V = 70$ уз значение погрешности, приведенной на рис. 3.37, удваивается, при этом лишь незначительно превосходя значение в 3° , допускаемое указанной Резолюцией ИМО. Правда, оно при этом более чем в три раза будет превышать значение $0,4^\circ \text{ sec } \varphi$. Тем не менее, если сравнить максимальные значения погрешностей гирокомпаса, рассчитанные на модели шестого порядка (рис. 3.37), с погрешностями, приведенными на рис. 3.36, то становится очевидным вывод о высокой эффективности модели третьего порядка при ее использовании в целях учета инерционных девиаций гирокомпаса «Standard-20» на маневрировании. При этом погрешность, определяемую значением $0,4^\circ \text{ sec } \varphi$, следует считать заниженной.

В начале XXI в. фирма «Anschütz» создала гирокомпас «Standard-22», в котором появился еще один навигационный микропроцессор, обеспечивающий ускоренную готовность компаса к навигационному использованию после запуска. Сущность нового метода использования заключается в следующем. Обеспечив на стоянке такое положение неподвижного судна, чтобы его цилиндрическая вставка плотно и неподвижно (в смысле изменения курса) касалась причала, азимут которого известен, производят запуск гирокомпаса. После того как гиromоторы чувствительного элемента выйдут на номинальное число оборотов, возникнет ситуация, представленная на рис. 3.38, характерной особенностью которой является то, что компасный курс судна в некоторый момент времени $KK_{t=t_i}$ будет равен компасному курсу (азимуту) причала KK_{Π} , т.е.

$$KK_{t=t_i} = KK_{\Pi}.$$

Для того чтобы судно могло начать безопасное движение, необходимо в любой момент времени знать его истинный курс (ИК).

Значение ИК судна, вследствие отсутствия информации об угле $\alpha_{t=t_i}$ неизвестно. Действительно, угол $KK_{t=t_i}$ может быть снят с репитера в любой момент времени, но эта информация ничего не дает для определения ИК

судна вплоть до того момента времени (через 3 – 6 ч после запуска компаса), когда чувствительный элемент, совершая затухающие колебания, не придет в плоскость истинного меридиана.

Для того, чтобы гирокомпас приобрел состояние ускоренной готовности к навигационному использованию, т.е. способность выдавать информацию об истинном курсе судна задолго до прихода в истинный меридиан, необходимо наличие информации о значении угла $\alpha_{t=t_i}$, начиная с некоторого приемлемого момента времени (например, примерно через 1 ч после запуска компаса, как это реализовано в гирокомпасе «Standard-22»).

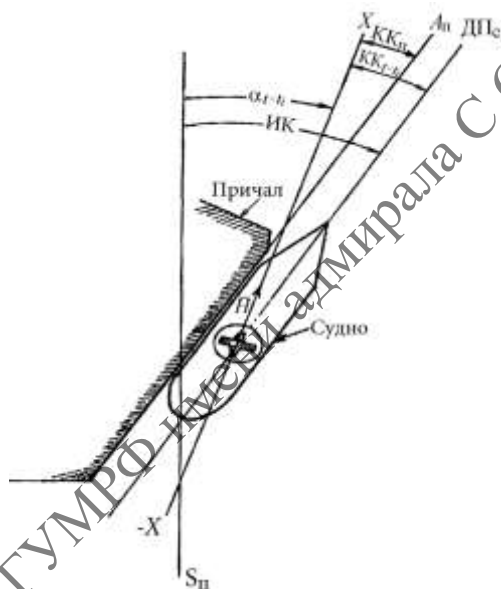


Рис. 3.38

Из рис. 3.38 следует очевидное выражение для значения истинного курса:

$$ИК = KK_{t=t_i} + \alpha_{t=t_i}. \quad (3.75)$$

Определение значения угла α в любой момент времени $t = t_i$ осуществляется в навигационном микропроцессоре № 2, в который заложена математическая модель в виде системы дифференциальных уравнений третьего порядка, характеризующая колебания чувствительного элемента гирокомпаса на неподвижном основании. Указанная система известна и имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 H\alpha' + B\beta - C\gamma &= H \omega_{\delta} \sin \varphi; \\
 \beta' - \omega_{\delta} \cos \varphi \alpha &= 0 \\
 \tau_{\text{ГМ}} \gamma' + \gamma &= \beta.
 \end{aligned}
 \tag{3.76}$$

Выполнив операцию разделения переменных по отношению к приведенной системе уравнений, получим следующее уравнение, которое характеризует поведение гироскопического чувствительного элемента в азимуте, т.е. по углу α :

$$\tau_{\text{ГМ}} \alpha''' + \alpha'' + (\tau_{\text{ГМ}} B \omega_{\delta} \cos \varphi / H) \alpha' + [(B - C) \omega_{\delta} \cos \varphi / H] \alpha = 0. \tag{3.77}$$

Решение уравнения (3.77) может иметь вид равенства, состоящего из двух слагаемых, первое из которых отображает чисто аperiodическое движение, а второе – затухающее колебательное,

$$\alpha = C_1 e^{-mt} + e^{-nt} (C_2 \cos qt + C_3 \sin qt), \tag{3.78}$$

где C_1, C_2, C_3 – постоянные интегрирования;

m, n – коэффициенты затухания;

q – частота затухающих колебаний.

Для того чтобы это решение стало законом движения чувствительного элемента гироскопаса, характеризующего его движение на любой момент времени t , необходимо определить значение произвольных постоянных интегрирования C_1, C_2, C_3 . Это может быть выполнено следующим образом: в математический процессор вводятся три значения угла α : $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, с интервалом 20 мин после включения гироскопаса (рис. 3.39).

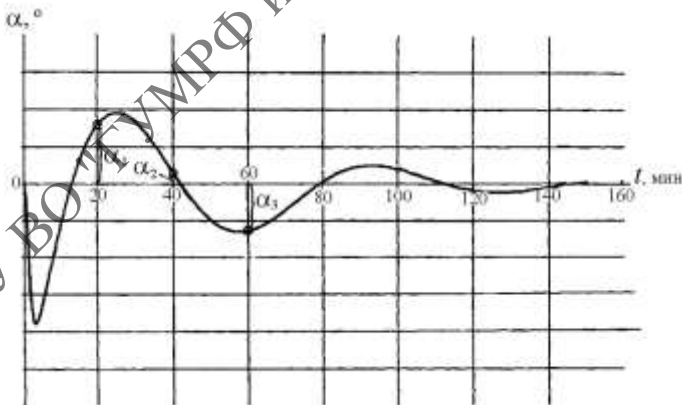


Рис. 3.39

В результате в навигационном математическом процессе будут получены три уравнения:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= C_1 e^{-mt_1} + e^{-nt_1} (C_2 \cos qt_1 + C_3 \sin qt_1); \\ \alpha_2 &= C_1 e^{-mt_2} + e^{-nt_2} (C_2 \cos qt_2 + C_3 \sin qt_2); \\ \alpha_3 &= C_1 e^{-mt_3} + e^{-nt_3} (C_2 \cos qt_3 + C_3 \sin qt_3),\end{aligned}\quad (3.79)$$

где $t_1 = 20$ мин (1200 с); $t_2 = 40$ мин (2400 с); $t_3 = 60$ мин (3600 с).

Полученное уравнение образует систему из трех трансцендентных уравнений, где неизвестными являются C_1, C_2, C_3 .

В результате решения указанной системы уравнений находятся значения произвольных постоянных интегрирования. Обозначим их следующим образом:

$$C_1 = A_1; C_2 = A_2; C_3 = A_3.$$

Подставляя найденные значения C_1, C_2, C_3 в решение (3.79), получим полное решение, позволяющее определить значение $\alpha_{t=t_i}$ для любого момента времени $t = t_i$, лежащего за пределами 60 мин:

$$\alpha_i = A_1 e^{-mt_i} + e^{-nt_i} (A_2 \cos qt_i + A_3 \sin qt_i), \quad (3.80)$$

Из рис. 3.38 видно, что в любой момент времени t_i справедливо соотношение

$$\alpha_{t=t_i} = \text{ИК} - \text{КК}_{t=t_i}. \quad (3.81)$$

Полученные дискретные значения $\alpha_{t=t_i}$ используются в качестве поправок компасного курса $\text{КК}_{t=t_i}$ для всех принимающих курса. В результате введения указанных поправок курса все принимающие курса выдают значения ИК, так как из соотношения (3.81) следует

$$\alpha_{t=t_i} + \text{КК}_{t=t_i} = \text{ИК}. \quad (3.82)$$

Таким образом, по истечении 60 мин после завершения пуска гирокомпаса, когда гиromотopы наберут полные обороты, судно может начинать управляемое движение при известном истинном курсе, хотя чувствительный элемент гирокомпаса, совершая затухающие колебания в течение несколько часов, будет приходить в положение равновесия. Коррекция показаний курса скоростной девиации, а также суммарной инерционной девиации при маневрировании судна, подтверждена результатами вычислений, выполняемых навигационными процессорами. Очевидно, оба микропроцессора могут функционировать одновременно до того момента времени, когда чувствительный элемент придет в меридиан.

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

1. Гироскоп, у которого центр масс совпадает с центром подвеса, называется:

- а) свободным;
- б) астатическим;
- в) уравновешенным;
- г) тяжелым.

2. Гироскоп, на который не действуют моменты внешних сил, называется:

- а) свободным;
- б) астатическим;
- в) уравновешенным;
- г) тяжелым.

3. Центром подвеса гироскопа называется точка:

- а) в которой размещен центр масс ротора;
- б) в которой размещен геометрический центр ротора;
- в) которая остается неподвижной при любых вращательных движениях ротора.

4. Основными частями гироскопа, получившими наибольшее распространение на морском флоте, являются:

- а) основание;
- б) ротор;
- в) подвес.

5. В гирокомпасах, чувствительные элементы которых представляют собой оболочку с быстровращающимся ротором или системой роторов, применяется подвес:

- а) гидростатический в сочетании с электромагнитным;
- б) гидростатический в сочетании с упругим;
- в) электростатический;
- г) электромагнитный.

6. Какой из подвесов, указанных в ответах, не используется в реальных схемах:

- а) электростатический;
- б) электромагнитный;
- в) гидродинамический.

7. Трехстепенный гироскоп характеризуется:
- а) тремя основными свойствами;
 - б) двумя основными свойствами;
 - в) четырьмя основными свойствами.
8. Третье основное свойство гироскопа относится:
- а) к свободному гироскопу;
 - б) к любому трехстепенному гироскопу;
 - в) к двухстепенному гироскопу.
9. Какой гироскоп обладает устойчивостью главной оси в инерциальном пространстве:
- а) свободный гироскоп;
 - б) трехстепенный гироскоп, у которого центр масс не совпадает с центром подвеса;
 - в) двухстепенный гироскоп.
10. Теорема о кинетическом моменте имеет вид:
- а) $\bar{U} = \bar{L}$; б) $U = L$; в) $\bar{U} \neq \bar{L}$.

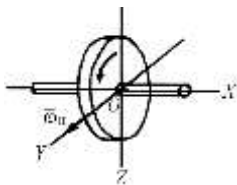


Рис. 1

11. На рис. 1 показаны направление вращения ротора гироскопа и вектор скорости прецессии.

Определите, по какой оси и в какую сторону направлен момент внешней силы, вызывающей такую прецессию:

- а) в положительном направлении оси OX ;
 - б) в отрицательном направлении оси OX ;
 - в) в положительном направлении оси OY ;
 - г) в отрицательном направлении оси OY ;
 - д) в положительном направлении оси OZ ;
 - е) в отрицательном направлении оси OZ .
12. На рис. 2 показана внешняя сила F и вектор угловой скорости прецессии ω_p . Определите направление кинетического момента гироскопа:

- а) в положительном направлении оси OX ;
- б) в отрицательном направлении оси OX ;

13. С помощью какого из приведённых равенств можно доказать устойчивость главной оси гироскопа к удару:

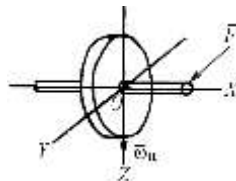


Рис. 2

а) $d\bar{H} / dt = 0$;

б) $dH / dt = 0$;

в) $\bar{U} = \bar{L}$;

г) $\Delta\bar{H} / \Delta t = \bar{L}$.

14. Какое из приведенных равенств доказывает второе свойство гироскопа:

а) $d\bar{H} / dt = 0$;

б) $dH / dt = 0$;

в) $\bar{U} = \bar{L}$;

г) $\Delta\bar{H} / \Delta t = \bar{L}$.

15. На рис. 3 показана сторона вращения ротора гироскопа и внешняя угловая скорость, с которой поворачивается гироскоп. В каком направлении будет действовать возникающий при этом гироскопический момент:

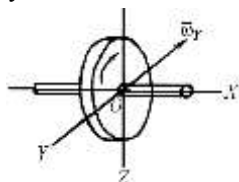


Рис. 3

а) в положительном направлении оси OX ;

б) в отрицательном направлении оси OX ;

в) в положительном направлении оси OY ;

г) в отрицательном направлении оси OY ;

д) в положительном направлении оси OZ ;

е) в отрицательном направлении оси OZ .

16. На рис. 4 показана сторона вращения ротора и вектор гироскопического момента R_y . Этот гироскопический момент возник из-за внешней угловой скорости, вектор которой направлен:

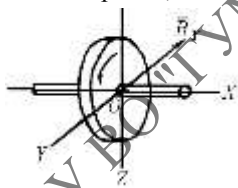


Рис. 4

а) в положительном направлении оси OX ;

б) в положительном направлении оси OY ;

в) в положительном направлении оси OZ ;

г) в отрицательном направлении оси OZ ;

д) в отрицательном направлении оси OY ;

е) в отрицательном направлении оси OX .

17. К какому классу гирокомпасов относятся гирокомпасы, у которых центр масс чувствительного элемента смещен вниз относительно центра подвеса:

а) с косвенным управлением;

б) с непосредственным управлением.

18. Главная ось чувствительного элемента гирокомпаса стремится установиться по направлению, вокруг которого вращается:

- а) плоскость горизонта;
- б) плоскость меридиана;
- в) Земля.

19. Вращение плоскости меридиана на неподвижном судне происходит со скоростью:

- а) $\omega_1 = \omega_{\delta} \cos \varphi$;
- б) $\omega_2 = \omega_{\delta} \sin \varphi$;
- в) $U_1 = \omega_{\delta} \cos \varphi + V_E / R_{\delta}$;
- г) $U_2 = \omega_{\delta} \sin \varphi + (V_E / R_{\delta}) \operatorname{tg} \varphi$.

20. Главная ось гирокомпаса, который установлен на неподвижном судне ($\varphi \neq 0$) и работает в режиме незатухающих колебаний, движется по траектории, которая представляет собой:

- а) окружность, центр которой находится на плоскости горизонта;
- б) окружность, центр которой находится на линии, отстоящей от плоскости горизонта на величину $\beta_{\text{ч}}$;
- в) эллипс, большая полуось которого находится в плоскости горизонта;
- г) эллипс, большая полуось которого приподнята над плоскостью горизонта на величину $\beta_{\text{ч}}$.

21. Период собственных незатухающих колебаний гирокомпаса с увеличением широты:

- а) увеличивается;
- б) уменьшается;
- в) остается неизменным.

22. Какой необходим момент, для того чтобы главная ось гирокомпаса пришла в меридиан:

- а) маятниковый;
- б) демпфирующий;

23. угол $\beta_{\text{ч}}$ при работе гирокомпаса в режиме затухающих колебаний:

- а) такой же, как и при незатухающих колебаниях;
- б) больше, чем в случае незатухающих колебаний;
- в) меньше, чем в случае незатухающих колебаний.

24. На каком из приведенных рис. 5 показана зависимость скоростной девиации от широты?

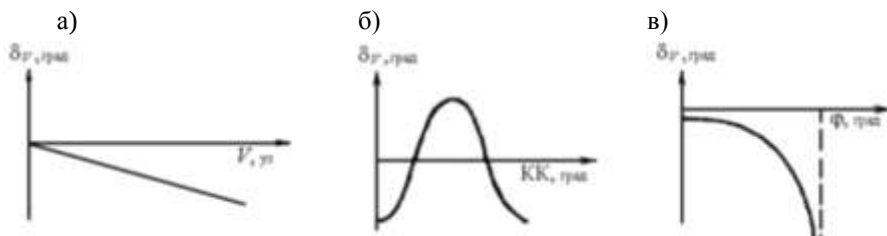


Рис. 5

25. На каком из приведенных рис. 5 показана зависимость скоростной девиации от курса судна?

26. На каком из приведенных рис. 5 показана зависимость скоростной девиации от скорости судна?

27. Название широты, в которой выполняется равенство $T_0 = T_*$:

- а) расчетная;
- б) критическая.

28. Максимальное значение, которое имеет инерционная девиация на момент окончания маневра:

- а) первого рода; б) второго рода.

29. Через четверть периода T_d после окончания маневра максимальное значение имеет инерционная девиация:

- а) первого рода; б) второго рода.

30. При маневрировании судна в расчетной широте возникает ли (да или нет) инерционная девиация первого рода:

- а) да;
- б) нет.

31. При маневрировании судна в расчетной широте возникает ли (да или нет) инерционная девиация второго рода:

- а) да;
- б) нет.

32. При маневрировании судна вне расчетной широты возникает ли (да или нет) инерционная девиация первого рода:

- а) да; б) нет.

33. При маневрировании судна вне расчетной широты возникает ли (да или нет) инерционная девиация второго рода?

- а) да; б) нет.

34. Ускорение от качки, которое действует вдоль меридиана, определяется выражением:

а) $j_{кN} = j_k \sin KK$; б) $j_{кN} = -j_k \sin KK$; в) $j_{кN} = j_k \cos KK$; г) $j_{кN} = -j_k \cos KK$.

35. Ускорение от качки, которое действует вдоль параллели, определяется выражением

а) $j_{кE} = j_k \sin KK$; б) $j_{кE} = -j_k \sin KK$; в) $j_{кE} = j_k \cos KK$; г) $j_{кE} = -j_k \cos KK$.

36. Ускорение от качки, действующее вдоль меридиана, создает силы инерции, которые, в принципе, приводят к появлению прецессии одногироскопного чувствительного элемента в горизонтальной плоскости. Однако это не способствует возникновению девиации от качки, так как

а) $\tau_k \approx T_0$; б) $\tau_k \gg T_0$; в) $\tau_k \ll T_0$.

37. Двухгироскопная гиросфера применяется для уменьшения:

- а) скоростной девиации;
- б) суммарной инерционной девиации;
- в) девиации от качки.

38. При плавании каким из приведенных курсов у гирокомпаса будет отсутствовать девиация от качки:

а) 0° ; б) 45° ; в) 60° ; г) 130° .

39. В гирокомпасах класса «Standard» имеются процессоры для обработки определенной информации. При стоянке судна в порту вырабатываемая информация используется в следующих целях:

- а) для ускоренной готовности компаса к навигационному использованию;
- б) для исключения из показаний репитеров скоростной девиации;
- в) для исключения из показаний репитеров суммарной инерционной девиации;
- г) для исключения из показаний репитеров погрешности из-за неточной установки основного прибора гирокомпаса относительно ДП судна.

40. В гирокомпасах класса «Standard» имеются процессоры для обработки определенной информации. При движении судна в море с постоянной скоростью и постоянным курсом вырабатываемая информация используется в следующих целях:

- а) для ускоренной готовности компаса к навигационному использованию;
- б) для исключения из показаний репитеров скоростной девиации;
- в) для исключения из показаний репитеров суммарной инерционной девиации;

г) для исключения из показаний репитеров погрешности из-за неточной установки основного прибора гирокомпаса относительно ДП судна.

41. В гирокомпасах класса «Standard» имеются процессоры для выработки определенной информации. При маневрировании судна вырабатываемая информация используется в следующих целях:

- а) для ускоренной готовности компаса к навигационному использованию;
- б) для исключения из показаний репитеров скоростной девиации;
- в) для исключения из показаний репитеров суммарной инерционной девиации;

г) для исключения из показаний репитеров погрешности из-за неточной установки основного прибора гирокомпаса относительно ДП судна.

ПОЯСНЕНИЯ К ОТВЕТАМ НА КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Ответ правильный, но неполный. Это одно из свойств трехстепенного гирокомпаса, но есть еще и другие. Попробуйте их найти среди приведенных ответов. Если найдете, то можете переходить к ответу на вопрос 7.

2. Да, Вы правы. Только свободный гироскоп стремится сохранить направление своей главной оси неизменным в инерциальном пространстве. Переходите к ответу на вопрос 12.

3. Вы ответили правильно. Именно это равенство определяет скорость вращения плоскости истинного горизонта. Можете отвечать на вопрос 17.

4. Если Вы ответили, что это $H_1\omega_2$, то Вы абсолютно правы. Можете переходить к ответу на вопрос 22. Если Вы назвали другое слагаемое, еще раз прочитайте материал лекции 5 и выберите правильный ответ.

5. Ответ правильный, но неполный. Действительно, в горизонтальной плоскости главная ось гирокомпаса совершает незатухающие колебания по закону косинуса относительно плоскости меридиана. Однако колебания совершаются и в вертикальной плоскости. Если Вы определите правильный ответ и по этим колебаниям, то можете переходить к ответу на контрольный вопрос 27.

6. Ответ ошибочный. Плоскость горизонта вращается только вокруг этой линии, когда судно не имеет хода. Если же судно движется, то плоскость горизонта получает вращение и вокруг другой оси. В этом случае направление вектора суммарного вращения плоскости горизонта не может совпадать с линией N – S. Попробуйте выбрать другой ответ.

7. Вы ошиблись. Как видно из рис. 3.18, если ускорение действует вдоль параллели V'_N , то возникающая сила инерции $F_{иЕ}$ создает момент вокруг оси собственного вращения L_x . Такой момент не может вызвать прецессионного движения главной оси гирокомпаса. Пользуясь рисунком, попробуйте найти правильный ответ.

8. Вы не правы. Величина $\Delta\alpha$ определяет угол, на который главная ось гирокомпаса отклонится за время маневра от компасного меридиана, в котором она находилась до маневра, но при маневре изменяется скоростная девиация, определяющая компасный меридиан после маневра. Это означает, что есть угол, на который главная ось гирокомпаса должна изменить свое направление за время маневра. Прочитайте еще раз материал лекции 9 и попробуйте выбрать правильный ответ.

9. Вы допустили ошибку. Если судно совершает маневр в расчетной широте, то у компаса отсутствует инерционная девиация I рода. Попробуйте выбрать другой вариант ответа.

10. Ответ ошибочный. Для того, чтобы прецессионное движение возникло вокруг оси OY , необходимо иметь момент, создаваемый силой инерции вокруг оси OZ . Ускорение, действующее вдоль меридиана, никак не может привести к появлению момента вокруг оси OZ . Еще раз проанализируйте ситуацию и выберите другой вариант ответа.

11. Вы ответили правильно. Это и есть теорема о кинетическом моменте в форме Резаля. Однако имеется и другая форма записи этой теоремы. Попробуйте найти ее среди приведенных ответов. Если Вам это удалось, то можете переходить к ответу на вопрос 8.

12. Ответ неправильный. Такое равенство не доказывает, что главная ось гироскопа стремится сохранить неизменным свое направление в инерциальном пространстве. Попробуйте выбрать другой ответ.

13. Вы совершенно правы. Движение V_3 является прецессией главной оси гирокомпаса под действием маятникового момента. Можете приступить к ответу на вопрос 19.

14. Если Вы ответили, что это $H_T \omega_1 \alpha$, то Вы абсолютно правы. Можете переходить к ответу на вопрос 24. Если Вы назвали другое слагаемое, еще раз прочитайте материал лекции 5 и выберите правильный ответ.

15. Вы ошиблись. Еще раз внимательно прочитайте материал лекции 6 и попробуйте выбрать правильный ответ.

16. Грубая ошибка. Так как линия $E - W$ лежит в плоскости горизонта, то вокруг нее никак не может вращаться плоскость меридиана. Изучите материал лекции 7 и выберите другой ответ.

17. Да, Вы правы. Именно угловую скорость поворота объекта, на котором установлен гироскоп, он обнаруживает и измеряет. Переходите к ответу на вопрос 2.

18. Нет, неправильно. Инерционное перемещение – это угол, на который главная ось гирокомпаса уходит из компасного меридиана, в котором она находилась до маневра под действием сил инерции, возникающих на маневрирующем судне. Максимальное значение $\Delta\alpha$ имеет на момент окончания маневра. Положение нового компасного меридиана, в который должен прийти гирокомпас после маневра, определяется величиной скоростной девиации на момент окончания маневра. Выберите другой вариант ответа.

19. Ошибка. На экваторе период собственных незатухающих колебаний $T_0 \neq 84,4$ мин. Прочитайте еще раз материал лекции 8 и попробуйте определить правильный ответ.

20. Нет, Вы не правы. Попробуйте выбрать другой вариант ответа.

21. Вы ответили неправильно. Инерционная девиация второго рода у компаса присутствует при маневрировании в любой широте. Но при маневре вне расчетной широты у компаса возникает не только эта девиация. Прочитайте еще раз материал лекции 10 и выберите другой ответ.

22. Вы ответили правильно. Если управлять судном по гирокомпасу, в показаниях которого присутствует уменьшающаяся со временем суммарная инерционная девиация, то у судна появятся два поперечных сноса: сначала в одну сторону от линии курса, а затем в другую. Можете начинать изучать материал лекции 11.

23. Ваш ответ ошибочный. Ускорение от качки, действующее вдоль параллели, приводит к возникновению момента вокруг оси OX . Так как этот момент направлен по той же оси, что и кинетический момент гиросферы, прецессионного движения не может возникнуть в принципе. Однако появление такого момента приводит к другим последствиям. Еще раз внимательно прочитайте материал п. 2.8 лекции 11, и выберите другой ответ.

24. Ответ правильный, но неполный. Ротор действительно является одной из основных частей гироскопа. Выберите еще один ответ, в котором названа вторая основная часть гироскопа. При удачном выборе переходите к ответу на вопрос 5.

25. Ответ ошибочный. Неравенство $\Delta\alpha > \Delta\delta_0$, означает, что к моменту окончания маневра главная ось гирокомпаса прецессионным движением проскочит компасный меридиан, в котором она должна находиться после маневра. Затем гирокомпас затухающими колебаниями будет приходить в новый компасный меридиан. Такое движение не может считаться аperiодическим переходом в новое положение равновесия. Прочитайте еще раз материал и попробуйте найти правильный ответ.

26. Вы не правы. Движение судна по криволинейной поверхности Земли приводит к возникновению скоростной девиации. Инерционная девиация возникает в том случае, когда на судне, которое совершает маневр, появляются силы инерции. Выберите другой вариант ответа.

27. Неверно. Для снижения ошибок гирокомпаса на качке применяется двухгироскопный чувствительный элемент, а не момент, создаваемый масляным успокоителем. Выберите другой вариант ответа.

28. Вы ошиблись. Попробуйте выбрать другой ответ.

29. Ваш ответ ошибочен. Маятниковый момент не приводит к уменьшению ошибок гирокомпаса, возникающих при маневрировании судна. Прочитайте еще раз материал лекции 4 и найдите правильный ответ.

30. Вы не правы. От этой величины не может зависеть период незатухающих колебаний гирокомпаса T_0 . Прочитайте еще раз материал лекции 6 и попробуйте найти правильный ответ.

31. Вы ошиблись. Выберите другой вариант ответа.

32. Абсолютно неверно. Плоскость истинного горизонта не вращается вокруг вертикальной линии. Внимательно изучите материал лекции 7 и выберите другой ответ.

33. Ответ абсолютно неверный. Если Вы внимательно посмотрите на рис. 2.34, то поймете, что ускорение вдоль параллели не может вызвать появление момента, который создает прецессию вокруг оси OX . Выберите другой вариант ответа.

34. Ваш ответ правильный, но неполный. Под действием момента L_z одnogироскопная и двухгироскопная гиросферы будут прецессировать одинаково. Внимательно прочитайте материал лекции 4 и выберите другой правильный ответ, а затем переходите к изучению материала лекции 5.

35. Ответ правильный, но неполный. Действительно, скоростная девиация зависит не только от курса судна, но и от других величин. Если Вы правильно определили ответы, в которых указаны величины, влияющие на

скоростную девиацию гирокомпаса, то можете отвечать на контрольный вопрос 34.

36. Ответ правильный, но неполный. Найдите среди оставшихся ответов вторую основную часть гироскопа. При правильном выборе второго ответа можете приступить к ответу на следующий вопрос.

37. Вы ошибаетесь. Суммарная инерционная девиация гирокомпаса состоит из девиации первого и второго рода. Инерционная девиация второго рода не зависит от широты, а девиация первого рода определяется равенством $\Delta\delta_{j\max}^1 = \Delta\alpha - \Delta\delta_v$. Пользуясь материалом лекции 9, проанализируйте и определите, как зависят от широты слагаемые $\Delta\alpha$ и $\Delta\delta_v$, тогда Вы сможете найти правильный ответ.

38. Ответ ошибочный. Если гирокомпас работает в режиме незатухающих колебаний, то прецессионное движение главной оси компаса прекратится с завершением маневра. В этом случае величина $\Delta\alpha$ будет иметь максимальное значение на момент окончания маневра. Если же включен масляный успокоитель, т.е. имеют место затухающие колебания гирокомпаса, то с окончанием маневра прецессионное движение гиросферы будет продолжаться за счет избытка масла в одном из сосудов, которое мгновенно выровняется в сосудах не может. Это означает, что на момент окончания маневра инерциальная девиация второго рода не может быть максимальной. Прочитайте еще раз материал лекции 9 и попробуйте найти правильный ответ.

39. Вы совершенно правы. Ускорение вдоль меридиана вызывает появление силы инерции, приложенной к центру масс гиросферы, которой создается момент вокруг оси OY . В таком случае возникает прецессия вокруг оси OZ . Можете приступить к ответу на контрольный вопрос 52.

40. Вы ответили правильно. Когда ускорение от качки действует по промежуточному румбу, в этом случае есть и ускорение вдоль меридиана, и ускорение вдоль параллели. Сила инерции от ускорения вдоль меридиана будет прикладываться к центру масс, который под действием силы инерции от ускорения вдоль параллели смещается с вертикали то в одну, то в другую сторону. Такое совместное действие ускорений приводит к тому, что к гиросфере будет постоянно приложен момент вокруг вертикальной оси, что в конечном итоге приводит к возникновению девиации компаса на качке. Можете приступить к ответу на контрольный вопрос 54.

41. Вы ошиблись. Плоскость меридиана не вращается вокруг линии, которая лежит в плоскости горизонта. Попробуйте выбрать другой ответ.

42. Ответ правильный, но неполный. Если Вы найдете другие правильные ответы, в которых указаны величины, влияющие на скоростную девиацию, то можете приступить к ответу на вопрос 34.

43. Вы ошиблись. Движение V_1 является видимым движением главной оси гирокомпаса из-за вращения плоскости истинного горизонта. Еще раз внимательно прочитайте материал лекции 4 и найдите правильный ответ.

44. Ответ правильный. Действительно, в положении динамического равновесия главная ось гирокомпаса находится в плоскости меридиана и приподнята (в северных широтах) над плоскостью горизонта на угол $\beta_{\text{ч}}$. В частном случае (на экваторе), когда угол $\beta_{\text{ч}} = 0$, главная ось гирокомпаса будет находиться в плоскости горизонта. Дело в том, что на экваторе плоскость меридиана не вращается, поэтому момент, который заставляет главную ось гирокомпаса прецессировать со скоростью вращения меридиана не нужен. Приступайте к ответу на вопрос 28.

45. Неверно. Гироскопическая стабилизация чувствительного элемента одногироскопного компаса относительно оси OY обеспечена, так что это не может привести к снижению девиаций на качке. Выберите другой вариант ответа.

46. Да, Вы правы. В этом случае суммарная инерционная девиация гирокомпаса будет складываться из двух девиаций: I и II ряда. Можете отвечать на следующий контрольный вопрос.

47. Вы правы. Понятие *быстровращающийся* означает, что угловая скорость собственного вращения на 8 – 9 порядков больше, чем скорость вращения вокруг других осей. Переходите к ответу на вопрос 3.

48. Вы ошиблись. Величина $\Delta\delta_v$ определяет изменение скоростной девиации компаса за время маневра, т.е. угол, на который главная ось гирокомпаса должна изменить свое направление к концу маневра. По этой причине $\Delta\delta_v$ не может быть погрешностью в показаниях гирокомпаса. Выберите другой ответ.

49. Не совсем правильно. Главная ось гирокомпаса совершает незатухающие колебания в вертикальной плоскости относительно плоскости горизонта, но только в одной широте (на экваторе). Прочитайте еще раз материал лекции 6 и выберите другой ответ.

50. Нет, Вы не правы. Попробуйте выбрать другой ответ.

51. Ответ не совсем верный. Дело в том, что при плавании вдоль параллели на запад в некоторой широте компас перестает работать, что касается других широт, то для них этот ответ будет правильным. Попробуйте найти другой ответ, который будет правильным без всяких исключений.

52. Вы не правы. Произведение экваториального момента инерции на угловую скорость вращения гироскопа не является кинетическим моментом гироскопа. Прочитайте материал лекции 2 и выберите правильный ответ.

53. Ответ неправильный. У одного гироскопного компаса уже существует стабилизация гиросферы вокруг оси OZ и, тем не менее, на качке этот компас имеет значительную девиацию. Внимательно прочитайте еще раз материал п. 2.9 лекции 11 и попробуйте определить правильный ответ.

54. Вы правы. Действительно, сила $\vec{F}$ создает момент, который заставляет гироскоп прецессировать вокруг оси OY . При этом из конца вектора $\vec{\omega}$ будет наблюдаться движение кинетического момента гироскопа к вектору момента внешней силы против часовой стрелки. Переходите к изучению материала лекции 4.

55. Да, Вы правы. При маневрировании в расчетной широте у гирокомпаса нет инерционной девиации I рода. Это означает, что суммарная инерционная девиация в этом случае равна инерционной девиации II рода. Переходите к ответу на контрольный вопрос 47.

56. Ответ абсолютно неверный. Прочитайте еще раз материал лекции 1 и найдите правильный ответ на вопрос.

57. Вы правы. Эта широта называется расчетной, так как параметры гирокомпаса H_r и B подбираются таким образом, чтобы в этой широте $T_0 = 84,4$ мин. Однако, если у компаса такое условие выполняется только в одной широте, то он не является аperiодическим. Выберите другой вариант ответа.

58. Вы совершенно правы. Если ускорение действует вдоль меридиана, то возникающая при этом сила инерции будет создавать момент вокруг оси OY , который заставит главную ось гирокомпаса прецессировать в горизонтальной плоскости (по углу α). Однако среди приведенных ответов имеется еще один верный. Попробуйте его определить. Если Вам удалось найти и второй верный ответ, то Вы можете переходить к ответу на контрольный вопрос 37.

59. Ваш ответ ошибочный. Прочитайте еще раз материал лекции 6 и попробуйте найти правильный ответ.

60. Если Вы ответили, что это $\bar{H}$, то это правильный ответ и Вы можете приступить к ответу на вопрос 10.

61. Абсолютно верный ответ. В критической широте при плавании западными курсами (когда есть V_E) возникает эффект «остановки» Земли и компас перестает быть компасом. Переходите к изучению материала лекции 8.

62. Вы ошиблись. При движении судна плоскость меридиана, вращающаяся вокруг линии $Z - n$, получает дополнительное вращение. Значит, если судно неподвижно, то просто будет другая скорость вращения меридиана. Попробуйте выбрать другой ответ.

63. Правильно. Это равенство позволяет доказать первое свойство гироскопа. Приступайте к ответу на вопрос 13.

64. Вы не правы. Ротор не может считаться «быстровращающимся», если его скорость собственного вращения отличается от угловых скоростей вокруг других осей всего на порядок. Выберите другой вариант ответа.

65. Да, Вы правы. Угол $\Delta\alpha$ сам по себе не определяет положение динамического равновесия главной оси гироскопа. Чтобы после маневра гироскоп был в новом компасном меридиане, необходимо, чтобы $\Delta\alpha$ был такой же, как изменение скоростной девиации гироскопа за время маневра. Это означает, что погрешность в показаниях гироскопа на момент окончания маневра определяется разностью этих величин. Переходите к ответу на контрольный вопрос 38.

66. Вы ошиблись. Одноступенных гироскопов не бывает. Выберите другой вариант ответа.

67. Вы правы. Если судно совершает маневр таким образом, что имеется только восточная составляющая ускорения судна V'_E , то за время маневра главная ось гироскопа не изменит своего положения. Изменения скоростной девиации также не будет. Это означает, что не будет возникать инерционная девиация I рода. Причем это будет в любой широте. Среди ответов имеется еще один правильный. Попробуйте его найти. Если у Вас получится, то можете переходить к ответу на следующий контрольный вопрос.

68. Вы ошиблись. Если судно маневрирует вне расчетной широты, то $T_0 \neq T_*$. В этом случае у компаса имеет место инерционная девиация I рода, но не только она. Выберите другой ответ.

69. Ответ ошибочный. Отличие скорости собственного вращения от угловых скоростей вокруг других осей всего в два раза не может служить признаком быстровращающегося ротора. Выберите другой вариант ответа.

70. Грубая ошибка. Еще раз внимательно прочитайте материал лекции 4 и выберите правильный ответ.

71. Грубая ошибка. Скоростная девиация от параметров гирокомпаса не зависит. Найдете в материалах лекции 7 формулу для определения скоростной девиации и убедитесь в этом. Выберите другой ответ.

72. Вы ошиблись. При таком неравенстве за время маневра главная ось гирокомпаса не может совершить аperiодический переход в новое положение равновесия. К концу маневра в показаниях гирокомпаса будет погрешность. Попробуйте выбрать другой ответ.

73. Вы правы. Действительно, кинетический момент гироскопа равен произведению осевого момента инерции на угловую скорость собственного вращения ротора. Переходите к изучению материала.

74. Вы абсолютно правы. При плавании курсами 90° или 270° в любой широте, кроме критической, где компас перестает быть компасом, его скоростная девиация будет равна нулю. Переходите к ответу на контрольный вопрос 35.

75. Вы не совсем точны. Определите, в какую сторону (по часовой стрелке или против) наблюдается из конца вектора $\vec{\omega}$ движение $\vec{N}$ к $\vec{L}$ и выберите другой вариант ответа.

76. Вы ошибаетесь. Критическая широта потому так и называется, что в ней гирокомпас не работает. Внимательно еще раз прочитайте материал п. 3.9 лекции 7 и попробуйте найти правильный ответ.

77. Ответ правильный. Вращающийся ротор, который имеет две степени свободы, является гироскопом. Но не только он. Изучите еще раз материал лекции 1 и найдите другой правильный ответ. Если Вы его найдете, то можете приступить к ответу на вопрос 6.

78. Нет, Вы не правы. В критической широте T_0 никак не может быть равным 84,4 мин, потому что в этой широте гирокомпас перестает быть компасом. Выберите другой ответ.

79. Вы правы. Действительно большее значение девиации будет, если маневр совершается в широте выше расчетной. Переходите к ответу на контрольный вопрос 49.

80. Вы ошиблись. Внимательно прочитайте еще раз материал лекции 2 и выберите правильный ответ.

81. Вы совершенно правы. Примерно через $1/4 T_d$ после окончания маневра масло в сосудах масляного успокоителя выровняется и исчезнет момент от избытка масла, который приводил к дополнительному прецессионному движению главной оси компаса и, как следствие, к возникновению инерционной девиации второго рода. Можете приступить к ответу на контрольный вопрос 45.

82. Вы не правы. Как видно из равенств, определяющих величину ускорения вдоль меридиана и вдоль параллели:

$$J_{\text{кН}} = j_{\text{к}} \sin \text{КК}; \quad j_{\text{кЕ}} = -j_{\text{к}} \cos \text{КК},$$

при $\text{КК} = 0$ (180°) существует только ускорение вдоль параллели, которое не приводит к появлению девиации гирокомпаса на качке. Попробуйте выбрать другой вариант ответа.

83. Вы правы. За счет понижения центра масс возникает маятниковый момент, который заставляет свободный гироскоп совершать незатухающие колебания относительно меридиана. Таким образом, получаем фактически гирокомпас, работающий в режиме незатухающих колебаний. Можете приступить к ответу на вопрос 18.

84. Да, Вы совершенно правы. Отсутствие стабилизации одногироскопного чувствительного элемента вокруг оси OX приводило к возникновению на качке (за счет ускорения вдоль параллели) больших углов крена, что, в свою очередь, вызывало появление большой девиации. В двухгироскопных компасах гиросфера имеет стабилизацию вокруг всех трех осей. Это, в свою очередь, ведет к уменьшению угла крена в условиях качки и, как следствие, к значительному снижению девиации на качке. Можете приступить к изучению материала лекции 12.

85. Ваш ответ ошибочен. Момент, создаваемый масляным успокоителем, не приводит к уменьшению ошибок гирокомпаса, возникающих при маневрировании судна. Прочитайте еще раз материал лекции 4 и найдите правильный ответ.

86. Вы не правы. Если время между маневрами невелико, то к моменту начала следующего маневра еще будут иметь место инерционные девиации

от предыдущих маневров. Это приведет к накоплению суммарной инерционной девиации. Выберите другой ответ.

87. Вы абсолютно правы. Ускорения вдоль параллели создают силы инерции, которые приводят к появлению момента вокруг оси OX . Так как одnogироскопная гиросфера не имеет стабилизации относительно оси OX , будет появляться крен гиросферы то в одну, то в другую сторону. Можете отвечать на контрольный вопрос 53.

88. Ваш ответ правильный, но неполный. Под действием момента M и одnogироскопная, и двухгироскопная гиросферы будут прецессировать одинаково. Внимательно прочитайте материал лекции 4 и выберите другой правильный ответ, а затем переходите к изучению материала лекции 5.

89. Нет, Вы не правы. Прочитайте еще раз материал лекции 1 и найдите правильный ответ.

90. Вы абсолютно правы. Так как $\Delta\alpha$ от широты не зависит, а $\Delta\delta_v$ зависит, равенство $\Delta\alpha = \Delta\delta_v$, которое обеспечивает апериодический переход главной оси гирокомпас в новое положение равновесия, может существовать только в одной широте, которая называется *расчетной*. Но есть и другое равенство, выполняющееся в расчетной широте. Найдите другой ответ и переходите к ответу на вопрос 40.

91. Неверно. Указанный Вами момент является моментом внешней силы, но он не может обеспечить погашение колебаний, так как изменяется синхронно с движением главной оси гирокомпас в вертикальной плоскости, а должен отставать от движения гирокомпас примерно на $\pi/2$. Попробуйте выбрать другой вариант ответа.

92. Вы ошиблись. Первое свойство гороскопа относится не к любому трехстепенному гороскопу, а только к тому, на который не действуют моменты внешних сил. Выберите другой вариант ответа.

93. Нет, Вы не правы. Крен гиросферы может вызвать только момент, который действует вокруг оси OX . Ускорение, действующее вдоль меридиана, не может привести к моменту вокруг оси OX . Еще раз прочитайте п. 3.8 лекции 7 и попробуйте выбрать правильный ответ.

94. Вы ответили правильно. При маневре в широте выше расчетной ($\varphi > \varphi_*$), как видно из рис. 3.27, в первую четверть периода колебаний и девиации первого и второго рода имеют одинаковые знаки. Это означает, что при $\varphi > \varphi_*$ целесообразно на время маневра выключать затухание, чтобы за счет отсутствия девиации второго рода уменьшить значение суммарной

инерционной девиации. Однако среди приведенных ответов имеется еще один правильный. Если Вы его определите, то можете приступить к изучению материала лекции 10.

95. Вы правы. Это трехстепенной гироскоп, но гироскопом может называться не только ротор, имеющий три степени свободы. Внимательно прочитайте материал лекции 1 и выберите еще один правильный ответ. Если Ваш выбор окажется удачным, то можете приступить к ответу на вопрос 6.

96. Неверно. Не может быть скорость процессии гироскопа пропорциональной его кинетическому моменту. Изучите еще раз материал лекции 3 и выберите правильный ответ.

97. Вы ошибаетесь. Управление судном по компасу, в показаниях которого некоторое время после маневра присутствует суммарная инерционная девиация, приведет к тому, что траектория движения судна будет отличаться от прямой линии, проложенной на карте.

98. Ответ ошибочный. Критическая широта потому так и называется, что в этой широте гирокомпас перестает быть компасом. Поэтому в ней вообще не может идти речь об инерционной девиации. Внимательно изучите материал лекции 9 и выберите другой ответ.

99. Ответ ошибочный. Внимательно еще раз прочитайте материал п. 3.8 лекции 11, обратив внимание на равенства (3.62) и (3.63). Анализ их позволит Вам определить возможность возникновения девиации гирокомпаса от качки, если судно следует курсом 90° и 270° . По результатам анализа попробуйте выбрать правильный ответ.

100. Неверно. Такое равенство не позволяет доказать первое свойство гироскопа, так как оно справедливо для гироскопа, к которому приложен момент внешних сил. Прочитайте еще раз материал лекции 3 и попробуйте определить правильный ответ.

101. Ответ ошибочный. Определите размерность ω_n в этом равенстве и сделайте вывод, в чем заключается Ваша ошибка, а потом выберите другой вариант ответа.

102. Совершенно верно, по углу β главная ось гирокомпаса совершает гармонические колебания относительно линии, которая приподнята над плоскостью горизонта (в северных широтах) на угол β_n . Так как в широте $\varphi = 0^\circ$ угол $\beta_n = 0$, получается, что на экваторе колебания главной оси гирокомпаса совершаются относительно плоскости горизонта. Однако они совершаются и в горизонтальной плоскости. Если Вы нашли правильный от-

вет и по этим колебаниям, то можете приступить к ответу на контрольный вопрос 27.

103. Правильно. В расчетной широте период собственный незатухающих колебаний гирокомпаса должен быть равен периоду колебаний математического маятника, длина которого равна радиусу Земли. Однако в этой широте также должно выполняться условие апериодического перехода главной оси гирокомпаса в новое положение равновесия. Посмотрите пояснение на второй ответ и приступайте к вопросу 40.

104. Вы совершенно правы. Причиной возникновения у гирокомпаса инерционной девиации II рода является наличие устройства для погашения колебаний. Можете переходить к ответу на контрольный вопрос 44.

105. Неверно. Этот момент не может обеспечить погашение колебаний, так как он прикладывается к гироскопу синфазно с движением гиросферы по углу β (в вертикальной плоскости). При $\beta = 0$ маятниковый момент также равен нулю. Попробуйте выбрать другой вариант ответа.

106. Ответ не совсем правильный. Такими координатами определяется положение динамического равновесия главной оси гирокомпаса только на экваторе. В других широтах набор координат будет иным. Попробуйте выбрать другой ответ.

107. Вы ошиблись. При наличии момента L_x гиросфера получит крен, что в условиях качки вызовет появление больших погрешностей. Для уменьшения этих погрешностей и нужна двухгироскопная схема. Прочитайте еще раз материал лекции 4 и выберите другой ответ.

108. Ответ ошибочный. В критической широте направляющий момент гирокомпаса вообще равен нулю. Попробуйте выбрать другой ответ.

109. Неверно. У гирокомпаса с пониженным центром масс на неподвижном судне нет причин, чтобы положением динамического равновесия его главной оси был не меридиан. Попробуйте выбрать другой ответ.

110. Вы ошиблись. Равенство осевого момента инерции экваториальному не может служить признаком *динамически симметричного ротора*. Прочитайте еще раз материал лекции 1 и выберите правильный ответ.

111. Вы совершенно правы. Под действием момента от масляного успокоителя обеспечивается демпфирование колебаний главной оси гирокомпаса относительно меридиана. Можете отвечать на контрольный вопрос 20.

112. Этот ответ правильный. Дело том, что ускорение, действующее в произвольном направлении, можно разложить на две составляющие: вдоль

меридиана и вдоль параллели. Одна из этих составляющих ускорения приводит к возникновению прецессионного движения главной оси гироскопа. Однако среди приведенных ответов имеется еще один правильный. Если Вы его нашли, то можете приступить к ответу на контрольный вопрос 37.

113. Ответ правильный, но неполный. Это одно из свойств трехстепенного гироскопа, но есть еще и другие. Попробуйте их найти среди приведенных ответов. Если найдете, то можете переходить к ответу на вопрос 7.

114. Если Вы ответили, что это $B\beta$, то абсолютно правы. Можете переходить к ответу на вопрос 23. Если Вы назвали другое слагаемое, еще раз прочитайте материал лекции 5 и выберите правильный ответ.

115. Вы абсолютно правы. Девиация от качки возникает в том случае, когда одновременно имеются ускорения как вдоль меридиана, так и вдоль параллели. Как видно из формулы (3.67), максимальное значение этой девиации возникает на четвертных курсах. Можете приступить к ответу на контрольный вопрос 55.

116. Вы ошиблись. В таком виде равенство не соответствует формулировке теоремы о кинетическом моменте в форме Резаля. Изучите еще раз материал лекции 2 и попытайтесь найти правильный ответ.

117. Ответ абсолютно неправильный. Такие колебания были бы возможны только в том случае, если бы у гироскопа, установленного на неподвижном судне $\alpha_{\text{ч}} \neq 0$. Попробуйте выбрать другой ответ.

118. Ответ неверный. Действительно, при движении судна плоскость горизонта получает дополнительно вращение вокруг линии $E - W$. Но это не единственное направление, вокруг которого эта плоскость вращается. Внимательно прочитайте еще раз материал лекции 7 и попробуйте найти правильный ответ.

119. Неверно. Найдите в материалах лекции 7 (п. 3.8) выражение для скоростной девиации в функции компасного курса и проанализируйте его. Это поможет Вам найти правильный ответ.

120. Ответ правильный, но неполный. Это одно из свойств трехстепенного гироскопа, но есть еще и другие. Попробуйте их найти среди приведенных ответов. Если найдете, то можете переходить к ответу на вопрос 7.

121. Неверно. Момент, который создается масляным успокоителем, не может способствовать превращению гироскопа в гироскоп, так как он сдвинут на $\pi/2$ по отношению к движению главной оси гироскопа в вертикальной плоскости (по углу β). При $\beta = \max$ этот момент равен нулю,

а при $\beta = 0$ он имеет максимальное значение. Такой момент служит для других целей. Еще раз прочитайте материал лекции 4 и выберите правильный ответ.

122. Вы правы. Действительно, период собственных незатухающих колебаний гирокомпаса T_0 зависит от широты места, но не только от нее. Если Вы нашли ответ, в котором указаны и другие величины, от которых зависит значение T_0 , то можете переходить к ответу на следующий вопрос.

123. Вы ошиблись. В расчетной широте у компаса имеет место только инерционная девиация II рода. Прочитайте еще раз материал лекции 10 и выберите другой ответ.

124. Ответ правильный. Равенство экваториальных моментов инерции, даже при отсутствии геометрической симметрии, является признаком *динамической симметрии* ротора гироскопа. Переходите к ответу на следующий вопрос.

125. Ответ неправильный. Это выражение не может определять скорость вращения плоскости истинного горизонта, так как скорость вращения этой плоскости равна нулю не на экваторе, а на полюсе. Выберите другой вариант ответа.

126. Вы ошиблись, Ускорение вдоль меридиана создает момент, действующий вдоль оси OY , но изменяющий свое направление на обратное с частотой качки. Такой момент способен вызвать прецессионное движение главной оси гирокомпаса вокруг вертикальной оси. Однако, учитывая, что частота качки намного выше частоты собственных колебаний гиросферы, главная ось гирокомпаса не успевает изменить свое направление. По этой причине ускорение вдоль меридиана не приводит к возникновению девиации гирокомпаса на качке. Еще раз прочитайте п. 3.11 лекции 11 и попробуйте найти правильный ответ.

127. Вы ошибаетесь. При маневре в широте ниже расчетной ($\varphi < \varphi_*$), обе инерционные девиации в первоначальный момент после маневра имеют разные знаки, т.е. инерционная девиация II рода частично компенсирует девиацию I рода. Это означает, что при плавании в широтах менее расчетной выключатель затухания использовать нецелесообразно. Прочитайте еще раз материал лекции 9, обратив особое внимание на рис. 3.27 и попробуйте найти правильный ответ

128. Ответ неверный. На неподвижном судне плоскость меридиана вращается вокруг линии $Z - n$. Если судно имеет ход, то вокруг этой же линии $Z - n$ плоскость меридиана получает дополнительное вращение. Это означает, что

суммарное вращение плоскости меридиана будет происходить вокруг одной и той же линии. Попробуйте выбрать другой вариант ответа.

129. Да, Вы правы. Если судно совершает подряд несколько маневров, то происходит накопление суммарной инерционной девиации. Причем величина этой накопленной девиации зависит от промежутка времени между началами маневров. Можете приступить к ответу на контрольный вопрос 50.

130. Если Вы ответили, что это $H_T \alpha'$, то вы абсолютно правы. Можете переходить к ответу на вопрос 24. Если Вы назвали другое слагаемое, еще раз прочитайте материал лекции 5 и выберите правильный ответ.

131. Если Вы ответили, что прецессионное движение гироскопа характеризует второе свойство гироскопа, то Вы правы и можете переходить к ответу на следующий вопрос.

132. Вы не совсем правы. Действительно суммарная инерционная девиация потому так и называется, что она представляет собой сумму девиаций I и II рода. Так как судно маневрирует в расчетной широте, то инерционная девиация первого рода отсутствует, и нет суммы девиаций. Внимательно еще раз прочитайте материал лекции 10 и попробуйте определить правильный ответ.

133. Грубейшая ошибка. Какой разговор может идти о скоростной девиации на полюсе, если в широте 90° гирокомпас не работает, так как на полюсе плоскость горизонта не вращается, и нет направления, по которому должна установиться главная ось гирокомаса. Внимательно прочитайте еще раз материал лекции 7 и попробуйте найти правильный ответ.

134. Вы правы. Свойство прецессии относится к любому трехстепенному гироскопу, к которому приложен момент внешней силы. Приступайте к ответу на вопрос 14.

135. Ответ абсолютно неверный. Если Вы внимательно посмотрите на рис. 3.34, то поймете, что ускорение вдоль параллели не может вызвать появление момента, который создает прецессию вокруг оси OY . Выберите другой вариант ответа.

136. Ответ ошибочный. Таким свойством трехстепенной гироскоп не обладает. Внимательно прочитайте еще раз материал лекции 2 и выберите правильный вариант ответа.

137. Правильно. Если судно маневрирует в расчетной широте ($\varphi = \varphi_*$), то в этом случае у гирокомаса будет отсутствовать инерционная девиация I

рода. Следовательно, имеет смысл на время маневра выключить затухание, чтобы не было и инерционной девиации II рода. Однако среди приведенных ответов имеется еще один правильный, попробуйте его определить. В случае успеха переходите к изучению материала лекции 10.

138. Ошибка. Плоскость меридиана не может вращаться вокруг линии $N - S$, так как эта линия лежит в плоскости горизонта. Прочитайте еще раз материал лекции 7 и выберите правильный ответ.

139. Вы опять ответили правильно. Именно это выражение определяет значение инерционной девиации первого рода на момент окончания маневра, но среди ответов есть еще один правильный. Если Вы его обнаружите, то можете переходить к ответу на следующий вопрос.

140. Неверно. Если осевой момент инерции во много раз больше экваториального, то это еще не значит, что ротор «динамически симметричный». Прочитайте еще раз материал лекции 1 и выберите правильный ответ.

141. Вы не правы. Движение V_2 является видимым движением главной оси гирокомпаса из-за вращения плоскости истинного меридиана. Выберите другой ответ.

142. Вы ошиблись. Неравенство $T_0 \neq T_*$ действительно приводит к возникновению инерционной девиации. Но это не инерционная девиация второго рода. Прочитайте еще раз внимательно материал лекции 9 (п. 3.10.4) и попробуйте найти правильный ответ.

143. Если Вы ответили, что это $H_T \beta'$, то Вы абсолютно правы. Можете переходить к изучению лекции 6.

144. Неверно. У гироскопа, который имеет три степени свободы, такого эффекта не возникает. Попробуйте выбрать другой вариант ответа.

145. Ошибка. Вектор угловой скорости прецессии может быть направлен только по той оси, где нет ни вектора кинетического момента гироскопа, ни момента внешней силы. Выберите другой вариант ответа.

146. Вы ответили правильно. Действительно, у аperiodического гирокомаса условие $T_0 = 84,4$ мин выполняется в некотором диапазоне широт, однако среди ответов есть еще один правильный. Если Вы его определили, то можете переходить к изучению материала лекции 9.

147. Ответ правильный, но неполный. Если Вы нашли и другой ответ, где правильно указано, от чего зависит период незатухающих колебаний гирокомаса, то можете приступать к ответу на контрольный вопрос 29.

148. Ответ ошибочный. Свойство прецессии не относится к свободному гироскопу, так как к нему не приложены моменты внешних сил. Выберите другой вариант ответа.

149. Вы правы. У гироскопа отсутствует инерционная девиация I рода в том случае, когда $T_0 = 84,4$ мин, а это условие выполняется в расчетной широте. Однако среди ответов имеется еще один правильный. Если Вы его нашли, то можете переходить к ответу на контрольный вопрос 48.

150. Неверно. Вокруг этой оси вращается плоскость горизонта и при движущемся судне, и при неподвижном. Внимательно изучите материал лекции 6 (п. 3.7) и попробуйте найти правильный ответ.

151. Правильно. Это и есть теорема о кинетическом моменте. Однако имеется и другая форма записи этой теоремы. Попробуйте ее найти среди приведенных ответов. Если Вам это удалось, то можете переходить к ответу на вопрос 8.

152. Вы абсолютно правы. И на неподвижном, и на движущемся судне плоскость меридиана вращается вокруг линии $Z - n$, но с разными скоростями. Переходите к ответу на вопрос 33.

153. Ответ неправильный. Если экваториальные моменты ротора не равны, то это означает отсутствие *динамической симметрии*. Попробуйте выбрать другой вариант ответа.

154. Ошибка. Основные свойства гороскопа не имеют никакого отношения к двухстепенному гироскопу. Прочитайте внимательно еще раз материал лекции 3 и выберите правильный ответ.

155. Ответ ошибочный. Плоскость горизонта не может вращаться вокруг линии, которая не лежит в этой плоскости. Выберите другой ответ.

156. Вы правы. Именно этот момент создается масляным успокоителем, и обеспечивает погашение колебаний. Можете отвечать на вопрос 30.

157. Вы не правы. Основные свойства гироскопа не относятся к двухстепенному гироскопу. Прочитайте еще раз материал лекции 3 и попробуйте определить правильный ответ.

158. Совершенно верно. Вокруг этой оси вращается плоскость горизонта только в том случае, когда судно движется, причем таким курсом, что имеется северная составляющая скорости судна V_N . Можете приступить к изучению материала лекции 8.

159. Да, Вы правы. Разность между углом, на который главная ось гироскопа изменила свое направление за время маневра, и углом, на кото-

рый она должна изменить направление, является погрешностью в показаниях гирокомпаса на момент окончания маневра. Но среди ответов есть еще один правильный. Попробуйте его найти. Если у Вас получится, то можете переходить к ответу на вопрос 47.

160. Ответ ошибочный. В таком виде равенство не соответствует формулировке теоремы о кинетическом моменте. Изучите еще раз материал лекции 2 и попробуйте найти правильный ответ.

161. Правильно. Это равенство определяет скорость прецессии гироскопа. Переходите к ответу на вопрос 15.

162. Точно. Если судно движется, то плоскость горизонта вращается как вокруг линии N – S, так и вокруг линии E – W. В этом случае вектор суммарного значения плоскости горизонта будет направлен вдоль линии, которая отклонена от направления N – S на некоторый угол α . Переходите к ответу на контрольный ответ 32.

163. Ответ правильный, но неполный. Скоростная девиация зависит не только от скорости судна, но и от других величин. Если Вы правильно определили все ответы, в которых указаны величины, от которых зависит скоростная девиация, то можете приступить к ответу на контрольный вопрос 34.

164. Вы совершенно правы. Если $\Delta\alpha = \Delta\delta_v$, то это означает, что на момент окончания маневра главная ось гирокомпаса будет находиться в новом компасном меридиане, т.е. за время маневра гирокомпас совершил апериодический переход из положения равновесия, которое он занимал до маневра в положение равновесия, которое он должен занимать после маневра. Переходите к ответу на вопрос 39.

165. Вы ошиблись. По своей природе это гироскопический момент, который называется *направляющим моментом гирокомпаса*. Момент, который обеспечивает погашение колебаний, относится к моментам, которые создаются внешними силами. Внимательно изучите материал лекции 6 и выберите другой ответ.

166. Грубая ошибка. Не может вектор скорости прецессии совпадать с вектором момента внешней силы. Прочитайте еще раз материал лекции 3 и выберите правильный ответ.

167. Ответ неправильный. Для снижения ошибок гирокомпаса на качке применяется двухгироскопный чувствительный элемент, а не понижение центра масс гиросферы. Выберите другой вариант ответа.

ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

- | | | | |
|----------|--------|--------|----------|
| 1) б, в; | 2) а; | 3) в; | 4) б, в; |
| 5) а, б; | 6) б; | 7) а; | 8) б; |
| 9) а; | 10) а; | 11) д; | 12) б; |
| 13) г; | 14) б; | 15) д; | 16) в; |
| 17) б; | 18) а; | 19) б; | 20) г; |
| 21) а; | 22) б; | 23) б; | 24) б; |
| 25) в; | 26) а; | 27) а; | 28) а; |
| 29) б; | 30) б; | 31) а; | 32) а; |
| 33) а; | 34) а; | 35) г; | 36) а; |
| 37) в; | 38) а; | 39) а; | 40) б; |
| 41) в | | | |

ФГБОУ ВО "ТУМРФ имени адмирала С.О. Макарова"

Библиографический список

1. Смирнов Е.Л., Яловенко А.В., Воронов В.В. Технические средства судовождения. Теория. – СПб.: Элмор, 1996. – 544 с.

2. Смирнов Е.Л., Яловенко А.В., Перфильев В.К. Теория гироскопических навигационных приборов. – Л.: ЛВИМУ, 1972. – 165 с.

3. Яловенко А.В., Богданович М.М. Судовые гироскопические приборы. – Л.: Судостроение, 1990. – 224 с.

ФГБОУ ВО "ТУМРФ имени адмирала С.О. Макарова"

Оглавление

ПРЕДИСЛОВИЕ	3
ЛЕКЦИЯ 1	4
1. ВВЕДЕНИЕ	4
2. ОСНОВЫ ПРИКЛАДНОЙ ТЕОРИИ ГИРОСКОПА	5
2.1. Определение понятия «гироскоп» и используемая терминология	5
2.2. Подвесы, применяемые в гироскопах	7
ЛЕКЦИЯ 2	11
2.3. Свойства гироскопа	11
2.4. Теорема о кинетическом моменте	12
ЛЕКЦИЯ 3	16
2.5. Доказательство свойств гироскопа	16
2.6. Гироскопический момент	18
ЛЕКЦИЯ 4	21
3. ТЕОРИЯ ГИРОКОМПАСА С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ И АВТОНОМНЫМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ	21
3.1. Общий принцип построения морского гироскопа	21
3.2. Суточное вращение Земли и его составляющие	22
3.3. Техническая реализация гироскопа с непосредственным управлением	23
3.4. Чувствительный элемент двухгироскопного гироскопа	28
ЛЕКЦИЯ 5	31
3.5. Уравнения движения гироскопа	31
ЛЕКЦИЯ 6	38
3.6. Демпфирование колебаний гиросферы	38
3.7. Влияние движения судна с постоянным курсом и постоянной скоростью на гироскоп с непосредственным управлением ..	41
ЛЕКЦИЯ 7	43
3.8. Скоростная девиация гироскопа	43
3.9. Влияние движения судна с постоянной скоростью и постоянным курсом на характеристики гироскопа	46
ЛЕКЦИЯ 8	49
3.10. Влияние маневрирования судна на гироскоп	49
3.10.1. Условие аperiодического перехода	51

3.10.2. Понятие об аperiодическом гиpокомпасе	53
<i>ЛЕКЦИЯ 9</i>	55
3.10.3. Инерционная девиация I рода	55
3.10.4. Инерционная девиация II рода	57
<i>ЛЕКЦИЯ 10</i>	62
3.10.5. Суммарная инерционная девиация	62
3.10.6. Поперечный снос судна, обусловленный инерционной девиацией компаса	64
3.10.7. Практические рекомендации по учету суммарной инерционной девиации	65
<i>ЛЕКЦИЯ 11</i>	67
3.11. Влияние качки на однопериоскопный компас с пониженным центром масс	67
3.12. Влияние качки на двухгироскопный компас с пониженным центром масс	74
<i>ЛЕКЦИЯ 12</i>	78
3.13. Использование математической модели для повышения точности гиpокомпасов классов «Standard» и «Kурс» при маневрировании судна	78
Контрольная работа	86
Пояснения к ответам на контрольные вопросы	92
Ответы на вопросы контрольной работы	111
Библиографический список	112



Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

**ГОСУДАРСТВЕННАЯ МОРСКАЯ АКАДЕМИЯ
имени адмирала С.О. Макарова**

**Предлагаем Вашему вниманию
издания ГМА им. адм. С.О. Макарова,
изданные в 2008 – 2010 гг.**

*Курсантам и студентам
Судоводительского факультета*

1. Брусенцов В.П. Практическая мореходная астрономия: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2008. – 120 с.
2. Захаров А.В. [и др.]. Краткий словарь морских терминов / А.В. Захаров, В.П. Махин, С.Ю. Развозов, В.И. Самарин, А.Н. Страшко / под ред. С.Ю. Развозова. – СПб.: Изд-во ГМА им. адм. С.О. Макарова, 2008. – 96 с.
3. Развозов С.Ю. [и др.]. Морские узлы: учеб. пособие / В.П. Махин, А.Н. Страшко, А.Р. Захаров. – Изд. 2-е. – СПб., 2008. – 64 с.
4. Смирнов Е.Л., Сизов В.В., Воронов В.В., Яловенко А.В. Гироскопические компасы класса «STANDARD»: учеб. пособие / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. Е.Л. Смирнова. – Изд. 2-е. – СПб., 2009. – 84 с.
5. Ершов А.А., Коротков Б.П., Милькин Г.Т., Овсянников М.С. Теория судна. Статика: учеб. пособие. – СПб., 2009. – 170 с.
6. Воронов В.В., Яловенко А.В. Индукционный лаг ЛИ 2-1: программированное учеб. пособие. – СПб., 2009. – 96 с.
7. Брусенцов В.П. Курс лекций по мореходной астрономии: учеб. пособие. – СПб., 2010. – 120 с.
8. Задачник по мореходной астрономии (с приложениями) / сост. В.П. Брусенцов. – Изд. 5-е, испр. и доп. – СПб., 2010. – 120 с.
9. Авербах Н.Н., Антонов В.Н., Клименко В.Д., Кузьмин В.Е. Практикум по навигации: учеб. пособие / под общ. ред. Н.В. Авербаха. – Изд. 2-е, испр. и доп. – СПб., 2010. – 110 с.
10. Кожухов И.В. Основы экологической безопасности: учеб. пособие. – СПб., 2010. – 216 с.

*Контактный телефон/факс
издательства ГМА: (812) 322-3342
e-mail: reklama@gma.ru*

Яловенко Александр Васильевич,
канд. техн. наук, проф.

ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ НАВИГАЦИОННЫЕ ПРИБОРЫ
Часть 1. ГИРОКОМПАСЫ С НЕПОСРЕДСТВЕННЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

Тексты лекций с элементами программированного
обучения для студентов заочного обучения



199106, Санкт-Петербург, Косая линия, 15-А
тел./факс 812 -322-33-42, 322-77-26
www.gma.ru
e-mail: izdat@gma.ru
e-mail: reklama@gma.ru

Ответственный за выпуск
Главный редактор
Компьютерная верстка

Сатикова Т.Ф.
Карамзина Н.А.
Тюленева Е.И.

Подписано в печать 24.01.2011
Формат 60×90/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman
Усл. печ. л. 7,25. Тираж 300 экз. Заказ № 238/10