П.А.Чапчай

Технические средства судовождения

Министерство образования и науки Украины

НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ «ОДЕССКАЯ МОРСКАЯ АКАДЕМИЯ»

П.А.Чапчай

Технические средства судовождения

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

ОДЕССА – 2019

УДК 629.5.052(075.8) Ч19

Рекомендовано ученым советом Национального университета «Одесская морская академия» в качестве учебного пособия соискателям высшего образования, обучающихся по специальности "Речной и морской транспорт" специализации "Судовождение", протокол № 6 от 31.01.2019 г.

Рецензенты:

- Л.Л. Вагущенко профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой электронных комплексов судовождения национального университета «ОМА»
- В.А. Яровенко профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой электротехники и электрооборудования судов Одесского национального морского университета;
- Е.Д. Пичугин профессор кафедры компьютеризированных систем управления Одесского национального политехнического университета, кандидат технических наук.

Чапчай П.А.

Ч-19

Технические средства судовождения: учебное пособие / П.А.Чапчай. – Одесса: НУ «ОМА», 2019. – 298 с.

Рассмотрены принципы и теория работы маятниковых, корректируемых и бесплатформенных гирокомпасов, спутниковых указателей курса, а также магнитных компасов. Дан обзор принципа действия и построения гидроакстических приборов: навигационных эхолотов, гидролокаторов, многолучевых эхолотов, гидроакустических измерителей скорости судна, а также индукционных лагов. Рассмотрены основы работы авторулевых.

В качестве справочного материала приведены примеры реальных современных приборов, их вид, комплектация, особенности конструкции и основные технические характеристики.

Предназначено для соискателей высшего образования, обучающихся по специальности "Речной и морской транспорт" специализации "Судовождение".

УДК 629.5.052(075.8)

введение

Одним из условий успешной эксплуатации морского флота является обеспечение безопасности мореплавания. Для этой цели на судах устанавливают различные электронавигационные приборы, предназначенные для выбора, измерения и поддержания заданных параметров движения судна. В этом ряду гирокомпас (ГК) занимает особое место, так как с его помощью определяют один из важнейших параметров – курс судна. Данная информация также служит основой для функционирования различных систем автоматического управления движением судна.

Современные системы курсоуказания представлены различными типами гирокомпасов. Так, например, маятниковые гирокомпасы фирм «Anschutz», и «Sperry Marine» в течение многих десятилетий завоевали репутацию точных и стабильных приборов. Поэтому большинство судовладельцев в настоящее время отдает им предпочтение именно из-за сложившейся репутации и, кроме того, наличия широкой сети сервисных центров по обслуживанию таких ГК по всему миру.

Все большее распространение получают динамически настраиваемые гироскопы в качестве чувствительных элементов ГК и индикаторных гиростабилизаторов в основном благодаря своей относительно невысокой стоимости и относительно простой технологии изготовления по сравнению с традиционными гироскопами. При этом они имеют малые габариты, массу и достаточно высокую точность, позволяющую применять их в качестве чувствительных элементов не только в системах указателей курса, но и в стабилизаторах инерциальных навигационных систем.

Появившиеся в последнее время на мировом рынке бесплатформенные системы ориентации аналитического типа, в которых применены оптические гироскопы (лазерные, волоконно-оптические), выводят на новой уровень навигационную технику. В их составе имеется микропроцессор, который непрерывно вычисляет параметры ориентации объекта: курс, крен, дифферент скорость относительно всех трех осей судна, угловые скорости поворота. Бесплатформенные системы обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с традиционными: отсутствие сложных механических элементов, высокая точность измеряемых параметров, повышенная надежность, малое энергопотребление.

Для повышения надежности и резервирования курсоуказания, особенно в составе интегрированных систем ходового мостика, используют спутниковые компасы. С помощью средне орбитальных навигационных спутниковых систем можно получить информацию не только о координатах и составляющих путевой скорости судна, но также и о его курсе. С этой целью используются двух или трех антенные системы.

Магнитный компас – древний навигационный прибор – с успехом применяется на всех флотах мира и сегодня. Без него ни одно судно не может быть выпущено в море. Магнитный компас отличают простота в обращении, автономность и, главное, надежность. Он постоянно совершенствуется и видоизменяется, в последнее время применяется в комплексных системах курсоуказания. Магнитному компасу свойственно наличие и изменение во времени погрешности в его показаниях, называемой девиацией. Поэтому каждый судоводитель должен уметь определить девиацию магнитного компаса и, если она велика, уметь уничтожить ее.

Весьма широк класс гидроакустических приборов, к которым относятся прежде всего эхолоты, измеряющие глубины под килем судна, и лаги – гидроакустические измерители его скорости. Эти приборы используются не только для непосредственного обеспечения процесса судовождения и его безопасности, но и находят широкое применение при исследовании и освоении ресурсов Мирового океана, в частности, разрабатываются и промышленно выпускаются десятки разных типов гидролокаторов для профессиональных и технических исследований. Они применяются, например, для обнаружения косяков рыб, для поиска затонувших объектов, при проведении аварийно-спасательных операций, наблюдений за состоянием подводных сооружений, для исследований шельфа морского и океанического дна и других целей. С помощью многолучевых эхолотов и фазовых гидролокаторов бокового обзора можно получать топографический вид морского дна, строить цифровую модель рельефа дна или же его псевдообъёмное изображение.

Морское судно при движении постоянно испытывает внешние возмущающие воздействия (ветер, волнение, течение). Задача управления движением судна заключается в том, чтобы, компенсируя внешние воздействия, обеспечить перемещение судна между заданными пунктами по заданному пути в заданное время. Для этой цели используют авторулевые – устройства обеспечивающие удержание судна на заданном курсе (автоматический режим) и изменение курса на заданное значение (следящий режим). Независимо от конструктивных особенностей авторулевые имеют однотипную функциональную схему, в контур которой включается один из типов курсоуказателей.

Данное учебное пособие дает возможность изучить принцип, основы теории и особенности работы перечисленных выше навигационных приборов. Должное внимание уделяется причинам возникновения погрешностей измеряемых параметров и их учету в практике судовождения.

Кроме того, в качестве справочного материала приведены примеры реальных приборов, их вид, комплектация, особенности конструкции и основные технические характеристики.

Учебное пособие освещает вопросы, изложенные в программах дисциплин «Электронавигационные приборы» и «Технические средства судовождения» специальности "Речной и морской транспорт" специализации "Судовождение" и в равной степени может быть использовано в подготовке морских специалистов соответствующей образовательным уровням «бакалавр» и «магистр».

1. ГИРОСКОП И ЕГО СВОЙСТВА

1.1. Определение понятия "гироскоп"

Термин "гироскоп" (от греческих слов "гирос" – вращение и "скопео" – наблюдать, видеть) ввел в научный обиход французский физик Леон Фуко (1819–1868) в 1852 г., назвав гироскопом прибор, позволяющий обнаруживать вращение Земли.

В общей динамике твердого тела гироскопом называют тело произвольной формы, совершающее вращение около одной закрепленной точки, являющейся его опорой.

В широком смысле гироскопом называют устройство, позволяющее обнаруживать и измерять в инерциальном пространстве вращение того основания, на котором это устройство установлено.

В технических приложениях, связанных с морскими гироскопическими приборами, под гироскопом понимают динамически симметричное быстровращающееся твердое тело, ось вращения которого может произвольно изменять свое направление в пространстве.

Прототипом гироскопа является известный с древних времен волчок, представляющий собой диск, закрепленный на заостренной ножке. Под действием силы (толчка) быстровращающийся волчок не опрокинется, а лишь отскочит в сторону, сохранив почти неизменным направление оси вращения. Если запустить волчок в наклонном положении, зафиксировав конец оси в углублении, то под действием силы веса ось медленно опишет некоторую коническую поверхность вокруг отвесной линии. Эти свойства быстровращающегося волчка нашли широкое применение в технике.

Постоянно возрастающие требования к точностным и эксплутационным характеристикам гироскопических приборов стимулировали ученых и инженеров многих стран мира не только к дальнейшим усовершенствованиям классических гироскопов с вращающимся ротором, но и к поискам принципиально новых идей, позволяющих решить проблему создания чувствительных датчиков для индикации и измерения угловых движений объекта в пространстве.

В настоящее время разработано множество видов гироскопов, с помощью которых получены наиболее значительные практические результаты, это – гироскопы с воздушной опорой, поплавковые, динамически настраиваемые, кольцевые лазерные, волоконно-оптические, твердотельные волновые, вибрационные, микромеханические, неконтактные.

Широкое распространение на морском флоте для контроля курса судна получили классические роторные гироскопы с различным подвесом. Все большее применение находят динамически настраиваемые и волоконно-оптические гироскопы. На их основе и построены морские гирокомпасы [1-7].

Рассмотрим лабораторный гироскоп (рис. 1.1).

Массивный диск 1, утяжеленный по периферии, называется ротором гироскопа (ГС). Ротор жестко закреплен на оси, входящей в два диаметрально расположенных подшипника внутреннего кольца (рамки) 2. Ось *X*–*X* называется главной осью. Вокруг главной оси ротору сообщается быстрое вращение, называемое собственным или главным вращением.

Цапфы внутреннего кольца входят в подшипники вертикального кольца 3, определяя горизонтальную ось гироскопа Y-Y. Вокруг этой оси ротор гироскопа может поворачиваться вместе с внутренним кольцом. Цапфы вертикального кольца входят в подшипники наружного кольца (на рисунке оно не показано), укрепленного на подставке 4. В наружном кольце ротор ГС может поворачиваться вместе с внутренней и вертикальной рамками вокруг вертикальной оси Z-Z. Оси Y-Y, Z-Z называются экваториальными.

Оси *X–X*, *Y–Y*, *Z–Z* называют еще *осями Резаля* по имени французского ученого Анри Резаля (1828–1896), одного из первых создателей теории гироскопа.



Рис. 1.1. Лабораторный гироскоп, его вид и схематичное изображение

Все три оси ГС пересекаются в одной точке *O*, называемой точкой подвеса ротора ГС. Все три оси взаимно перпендикулярны. Точка подвеса остается неподвижной при вращении ГС вокруг любой из его осей. Подобный подвес называется кардановым по имени итальянского ученого Джероламо Кардано (1501-1576), а кольца подвеса – кардановыми кольцами.

В теории гироскопии рассматриваются только поворотные движения ГС. Если ГС может поворачиваться одновременно вокруг трех осей, то он называется гироскопом с *тремя степенями свободы*.

Если лишить ГС возможности поворачиваться вокруг одной из осей *Y*–*Y* или *Z*–*Z*, то получим ГС с *двумя степенями свободы*. Такой ГС называют связанным гироскопом. Лишив ГС поворачиваться вокруг обеих осей *Y*–*Y* и *Z*–*Z*, получим ГС с *одной степенью свободы*.

Гироскоп с тремя степенями свободы, центр тяжести которого совмещен с точкой подвеса, называется *уравновешенным или астатическим*. Если центр тяжести конструкции (камеры с ротором), в которой установлен гироскоп, не совпадает с точкой подвеса, то такой ГС называется *тяжелым*, т.к. он подвержен воздействию силы тяжести.

Гироскоп, на который не действуют никакие моменты внешних сил, включая силы трения в подвесе, называют *свободным*. Практически таким считают уравновешенный ГС с малым трением в подвесе.

1.2. Подвесы, применяемые в гироскопах

Наиболее простым и распространенным устройством, посредством которого осуществляется подвес гироскопа, является, уже рассмотренный нами, карданов подвес. Но могут быть и другие способы подвеса:

- электромагнитный;
- гидродинамический;
- аэродинамический;
- электростатический;
- упругий вращающийся и др.

Широко применяется в навигационных приборах жидкостный или гидростатический подвес. Он позволяет в значительной мере снизить момент сил трения относительно осей Резаля поскольку герметичная сфера с гироскопом, называемая гиросферой, погружена в жидкость. Однако в чистом виде такой подвес не применяется по двум причинам: во-первых, практически невозможно терморегулированием обеспечить нулевую плавучесть гиросферы (изменение плотности поддерживающей жидкости); во-вторых, нельзя предупредить боковые перемещения гиросферы под действием сил инерции.

Чтобы предотвратить это, гидростатический подвес применяется в сочетании с электромагнитным, например, в маятниковых двухгироскопных компасах типа "Курс" и "Амур", которые ранее эксплуатировались. Принцип комбинированного подвеса заключается в следующем (рис. 1.2).

Гиросфера, получившая название *чувствительного элемента гирокомпаса*, с установленными внутри нее двумя гироскопами помещена внутри следящей сферы *1*, которая в свою очередь находится в резервуаре *2*, заполненном поддерживающей жидкостью *3*.

Центр массы гиросферы (точка G) смещен вдоль вертикальной оси гиросферы вниз относительно ее центра подвеса – геометрического центра (точка O). В результате этого в гравитационном поле гиросфера обладает положительным маятниковым эффектом. Поддерживающая жидкость 3 одновременно выполняет роль электролита, обеспечивающего бесконтактный подвод питания к гироскопам (асинхронным двигателям) через электроды 4, расположенные на поверхности гиросферы и следящей сферы 1. В нижней части гиросферы размещена горизонтально тороидальная обмотка 5, через которую пропускают переменный ток. Магнитное поле обмотки наводит во внешней следящей сфере вихревые токи. Взаимодействие порождаемых магнитных полей вихревых токов с первичным магнитным полем обмотки приводит к появлению центрирующих сил, которые компенсируют остаточную отрицательную плавучесть гиросферы и препятствуют ее перемещению под воздействием сил инерции при маневрировании судна и на качке.



Рис 1.2. Жидкостный электромагнитный повес гиросферы

При отсутствии внешних воздействий гиросфера сохраняет свое положение неизменным. Изменение курса судна синхронно отрабатывается следящей сферой, имеющей связь через стол 6 с указателем курса 7. На столе размещены элементы питания, контроля, коррекции и т.п.

Рассмотренный способ компенсации отрицательного веса гиросферы и ее центрирования внутри следящей сферы называют электромагнитным "дутьем". У гирокомпаса "Амур" такое дутье имеется также и в верхней части гиросферы.

Впервые такой чувствительный элемент был создан в 1927г. в Германии на фирме «Anschutz».

В последних моделях гирокомпасов фирмы «Anschutz» ("Standard-20", "Standard-22") применяется гидродинамический способ центрирования, реализуемый с помощью встроенной миниатюрной помпы (рис. 1.3, слева).

Гиросфера 1, подобная рассмотренной выше, помещена также внутри следящей сферы 2, которая в свою очередь находится в резервуаре 3, заполненном поддерживающей жидкостью 4.

Масса гиросферы и плотность поддерживающей жидкости подобраны так, что при рабочей температуре гиросфера имеет незначительный остаточный вес. Этот остаточный вес уравновешивается струями жидкости, производимыми помпой 5 и направленными снизу вверх относительно гиросферы, которая в результате оказывается подвешенной свободно (обладает нейтральной плавучестью) и центрированной.



Рис.1.3. Гидродинамический подвес гиросферы (слева); жидкостный механический подвес гиросферы (справа)

Немецкая фирма «С. Plath» применила в своих гирокомпасах (рис. 1.3, справа) подвес гиросферы I на основе поддерживающей жидкости 2 и ртутной подушки 3. Эта ртутная подушка создает постоянно действующую на гиросферу вертикальную подъемную силу. Центрирование осуществляется механическим способом при помощи вертикальной иглы 4 и специальной опоры 5, на которую и опирается гиросфера, так как имеет некоторую положительную плавучесть. Центр массы гиросферы (точка G) смещен вдоль вертикальной оси гиросферы Z-Z вниз относительно ее центра подвеса и в результате гиросфера имеет положительную маятниковость.

Данный вид подвеса применен у современных типов гирокомпасов, например, "Navigat X MK2", выпускаемых фирмой «Sperry Marine», но ртутная поддерживающая подушка уже не используется.

Применяется также сочетание жидкостного подвеса с упругим – торсионным подвесом, например, в гирокомпасе типа "Вега", (рис. 1.4).

Гиросфера состоит из двух полусфер *1*, соединенных между собой цилиндрической шейкой. Внутри полусфер размещен гиромотор, имеющий два соосных маховика.

Гиросфера подвешена на горизонтальных и вертикальных торсионах 2 скрепленных со следящей сферой 3 и установочным кольцом 4. Следящая сфера является корпусом гироблока 5. Гироблок заполнен поддерживающей жид-костью 6, которая при стабилизированной рабочей температуре придает гиросфере плавучесть близкую к нейтральной.

Торсионы, изготовленные из тонкой стальной проволоки, не только надежно центрируют гиросферу внутри гироблока, но и позволяют прилагать к ней управляющие и корректирующие моменты. Питание на гиромотор подается также через торсионы.

Взаимное угловое положение следящей сферы (гироблока) и гиросферы отслеживается с помощью электромагнитных датчиков угла 7.



Рис.1.4. Жидкостный упругий подвес гиросферы

1.3. Общий обзор свойств гироскопа

Производя опыты с лабораторным гироскопом можно прийти к некоторым заключениям.

Если ротор ГС не имеет вращения, то такой ГС ничем не отличается от других тел: он может занять в пространстве любое произвольное положение; при воздействии внешней силы (либо удара) на внутреннее кольцо ротор поворачивается в направлении действия силы.

Но если ротору сообщено быстрое вращение, то картина резко изменяется: поворот или наклон подставки не вызовет заметного изменения направления главной оси; действие удара по внутреннему кольцу не приведет к изменению положения оси ГС, а под воздействием постоянной приложенной силы ГС повернется в перпендикулярной ей плоскости. На основании таких опытов можно сформулировать основные свойства трехстепенного гироскопа.

Первое свойство – устойчивость – состоит в том, что главная ось свободного гироскопа стремится удержать свое направление неизменным при любом перемещении основания, на котором установлен ГС.

Второе свойство – прецессия – состоит в том, что под действием внешней силы, приложенной к внутреннему или внешнему кольцу и создающей момент, не совпадающий с направлением главной оси, последняя будет двигаться не по направлению действия силы, а перпендикулярно этому направлению. Подобное свойство гироскопа называется прецессией. Прецессионное движение происходит только при действии момента силы (см. рис. 1.8 – 11 и пояснения к ним).

Третье свойство – устойчивость по отношению к удару. Под действием импульса силы (удара) главная ось ГС практически не изменяет первоначально-

го направления, а лишь совершает быстрые затухающие колебания вокруг положения равновесия с малой амплитудой и большой частотой. Эти колебания называются нутацией. Они особенно заметны при небольшой угловой скорости вращения ротора.

Свойства свободного ГС используются в гирокомпасах, гирогоризонтах, гиростабилизаторах и других гироскопических приборах.

Свойство гироскопа с двумя степенями свободы. Если, например, жестко соединить вертикальное кольцо с основанием, то в этом случае ГС лишается одной степени свободы вокруг оси Z–Z (рис. 1.5).

Гироскоп с двумя степенями свободы не обладает ни одним из тех свойств, которые имеет гироскоп с тремя степенями свободы.





Рис. 1.6. Гироскоп с одной степенью свободы

Рис. 1.5. Гироскоп с двумя степенями свободы

Если придать основанию, на котором установлен гироскоп, вращение вокруг оси, относительно которой ГС лишен степени свободы (в данном случае относительно оси Z-Z), то ротор вместе с кольцом подвеса будет поворачиваться вокруг оси подвеса Y-Y до тех пор, пока ось X-X собственного вращения не совпадет с осью вынужденного вращения основания, т.е. с осью Z-Z.

Свойство гироскопа с одной степенью свободы. Пока основание неподвижно, никаких гироскопических свойств тело не имеет. Они возникают в том случае, если вращение основания вызовет вынужденное вращение тела вокруг оси, не совпадающей с осью его собственного вращения. В этом случае, в соответствии со свойством ГС с двумя степенями свободы ось собственного вращения X-X стремиться совпасть с осью вынужденного вращения. Этому препятствуют опоры главной оси. Действие ротора на опоры выражается в виде приложения к ним сил F_1 и F_2 (рис. 1.6), которые получили название гироскопических сил. Это необходимо учитывать на объектах, изменяющих направление движения – судовая или авиационная турбина, винт вертолета.

1.4. Характеристики вращательного движения гироскопа

Напомним некоторые общие понятия теоретической механики, изучающей движение материальных тел и их взаимодействие.

Материальной частицей называют мысленно выделенную сколь угодно малую часть тела. В отличие от реально существующих материальных частиц материальная точка является абстрактным понятием.

Силой называют меру механического воздействия в данное мгновение на материальную частицу со стороны других материальных тел, учитывающую величину и направление этого воздействия. В механике силу понимают как некоторый вектор, характеризуемый модулем, направлением и точкой приложения. Две силы называются равными по числовому значению, но противоположно направленными, если они, будучи приложенными к материальному телу, не сообщают ему ускорения.

Массой материальной частицы m называют меру ее инерции, численно выражающуюся отношением модуля силы, действующей на частицу, и вызванного ею ускорения a, т.е. m = F/a. Отношение силы к ускорению всегда равно одной и той же величине m = const.

Произведение массы на скорость Q = mv называется импульсом или количеством движения.

Мерой, характеризующей изменение скорости точки в данное мгновение, является ускорение. Ускорение является векторной величиной и выражается первой производной от вектора скорости по времени.

Угловая скорость вращательного движения гироскопа. Вращательное движение – это такое движение, при котором две точки на поверхности тела остаются неподвижными. Прямая, проходящая через эти точки, называется осью вращения.

Рассмотрим движение произвольной точки A_i по окружности с радиусом r_i (рис. 1.7). Скорость изменения ее углового перемещения во времени $d\varphi/dt = \omega$ называется угловой скоростью. Она одинакова для всех точек твердого тела. Если эта скорость постоянна, то она называется круговой частотой ω вращения твердого тела вокруг оси. С периодом вращения T твердого тела она связана соотношением $\omega = 2\pi/T$.

Чтобы охарактеризовать вращательное движение тела (в нашем случае гироскопа) необходимо знать: ось вращения; направление вращения; угол, на который поворачивается каждая точка ГС за единицу времени.

Для этого используют вектор угловой скорости Ω, который строится по правилам:

- вектор угловой скорости всегда располагается по оси вращения;

- направление вектора выбирают таким, чтобы из его конца вращение ротора наблюдалось против направления движения часовой стрелки;
- длина вектора в некотором масштабе выбирается равной численной величине угловой скорости.

Кинетический момент. Выделим мысленно в теле ротора гироскопа материальную точку A_i с массой m_i , движущейся по окружности радиусом r_i с линейной скоростью равной $v_i = r_i \Omega$. (рис. 1.7). Вектор v_i направлен по касательной к окружности, описываемой точкой A_i . Количество движения данной точки $q_i = m_i v_i$ является также векторной величиной.

Произведение количества движения этой точки на ее расстояние до оси вращения называется моментом количества движения:



Рис. 1.7. Кинетический момент гироскопа

$$h_i = q_i r_i = m_i v_i r_i = m_i \Omega_i r_i^2.$$

Для всей суммы из *n* материальных точек, образующих тело ротора ГС, можно записать:

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

Полученный вектор Hназывают кинетическим моментом гироскопа. Так как $\sum_{i=1}^{n} m_{i} r_{i}^{2}$ есть не что иное, как

момент инерции *J* ротора гироскопа, то окончательно получим

 $H = J\Omega$.

Направление вектора кинетического момента H совпадает с направлением вектора угловой скорости Ω и строится на главной оси по тем же правилам.

Момент инерции ротора зависит не только от его массы, но и от распределения этой массы по расстояниям относительно оси вращения. Поэтому для увеличения кинетического момента *H* массу ротора гироскопа стремятся распределить по периферии относительно его оси вращения.

Кинетический момент инерции гироскопа *Н* является наиболее точной и полной его характеристикой.

1.5. Свойства гироскопа, их подтверждение

Теорема о кинетическом моменте имеет важное значение в теории гироскопии, с ее помощью можно доказать основные свойства гироскопа, которые были рассмотрены ранее лишь со стороны их внешнего проявления. Помимо силы, обусловливающей собственное вращение ротора ГС вокруг его главной оси, к ГС могут быть приложены различные внешние силы, стремящиеся развернуть его вокруг оси *Y*–*Y* или *Z*–*Z*.



На рис. 1.8 показана результирующая внешних сил в виде вектора \overline{F} , приложенного в точке A, удаленной от центра O по оси X-X на расстояние a, называемое плечом действия силы. В этом случае момент внешней силы равен $\overline{L} = \overline{F} a \sin(\overline{F} a)$ и, если $\overline{F} a = \overline{F} a$

 $L = F a \sin(F^a)$ и, если F^a 90°, то $\overline{L} = \overline{F} a$.

Момент внешней силы L, также как и угловая скорость $\overline{\Omega}$ и кинетический момент \overline{H} , является векторной величиной.

Рис. 1.8. Момент внешней силы

Вектор момента внешних сил располагается на оси, относительно которой действует сила и направлен так, чтобы из конца этого вектора действие силы наблюдалось против часовой стрелки.

Рассматривая твердое тело как совокупность n материальных точек и считая, что на тело действует k внешних сил, теорема о кинетическом моменте определяет закон изменения вектора кинетического момента при действии на гироскоп внешних сил.

Теорема формулируется и записывается следующим образом: первая производная по времени от вектора кинетического момента вращающегося тела равна вектору главного момента всех внешних сил, действующих на тело, т.е.

$$\frac{d\overline{H}}{dt} = \overline{L}$$

Производную от кинетического момента здесь нужно понимать в векторном смысле. При движении твердого тела, если действует сила, его кинетический момент изменяет с течением времени величину и направление. Конец вектора кинетического момента, перемещаясь в пространстве, описывает некоторую кривую – годограф кинетического момента. Тогда производная кинетического момента $d\overline{H}/dt$ есть скорость точки годографа, т.е. скорость конца вектора \overline{H} .

Известно, что производная по времени от любого вектора равна скорости *U* движения конца этого вектора, т.е.

$$\frac{d\overline{H}}{dt} = \overline{U}$$
 или $\overline{U} = \overline{L}$ (рис. 1.9).



Рис. 1.9. Действие момента внешней силы

Итак, скорость движения конца вектора кинетического момента вращающегося твердого тела относительно некоторой точки равна вектору главного момента всех сил, действующих на тело относительно той же точки. В этой формулировке теорема известна под названием теоремы Резаля.

Рассмотрим свойства гироскопа, подтверждаемые теоремой о кинетическом моменте.

Первое свойство – устойчивость – состоит в том, что главная ось свободного гироскопа стремится удержать свое направление неизменным в инерциальном пространстве.

Этим свойством обладает свободный гироскоп, на который не действуют какие-либо моменты внешних сил, т.е. $\overline{L} = 0$. Следовательно, на основании теоремы о кинетическом моменте $\frac{d\overline{H}}{dt} = 0$, значит, $\overline{H} = \text{const.}$

Но если вектор \overline{H} кинетического момента постоянен по значению и направлению и совпадает для быстро вращающегося ротора гироскопа с вектором $\overline{\Omega}$, т.е. с направлением главной оси, то это свидетельствует о неизменности направления главной оси свободного гироскопа в инерциальном пространстве.

Иными словами, если главная ось направлена, например, на звезду, то при любом перемещении основания, на котором установлен ГС, ось будет неизменно указывать на эту звезду, изменяя лишь свою ориентацию по отношению к системе координат, связанной с Землей. Вектор \overline{H} кинетического момента при этом постоянен по значению и направлению.

Второе свойство – прецессия – движение гироскопа под действием приложенной силы – состоит в том, что под действием внешней силы, приложенной к внутреннему или внешнему кольцу и создающей момент, не совпадающий с направлением главной оси, последняя будет двигаться не по направлению действия силы, а перпендикулярно этому направлению.

Подобное свойство гироскопа называется прецессией. Прецессионное движение происходит только при действии момента силы.

Пусть к гироскопу приложена сила \overline{F} , создающая момент \overline{L} вокруг какой-либо оси, не совпадающей с главной осью гироскопа, например, вокруг оси *Y*-*Y* (рис. 1.9). Согласно теореме Резаля скорость конца вектора кинетического момента по значению и направлению равна главному моменту внешних сил, приложенных к телу, т. е. $\overline{U} = \overline{L}$. Из рисунка 1.9 следует, что конец вектора \overline{H} вместе с главной осью начнет совершать движение не в направлении приложенной силы, а в плоскости, перпендикулярной ей (плоскости *XOY*). В прецессионном движении кинетический момент стремится к моменту внешней силы по кратчайшему угловому расстоянию. Прецессионное движение наблюдается тогда, когда момент \overline{L} приложенных сил не совпадает по направлению с кинетическим моментом \overline{H} .



Рис. 1.10. Движение гироскопа под действием приложенной силы

Физическая сущность этого явления доказывается положениями теоретической механики. Каждая материальная точка ротора стремится сохранить траекторию своего вращательного относительного движения с неизменной угловой скоростью. Под действием силы точки участвуют в сложном движении – относительном и переносном.

Так, например, ила \overline{F} стремится развернуть ротор гироскопа вокруг оси Y - Y, как показано на рис. 1.10. Эта сила сообщает точкам A и B, находящимися в данный момент на оси Z - Z,

дополнительные скорости Δv_i , направленные перпендикулярно плоскости вращения ротора. Значит, скорости точек *A* и *B* изменят свое направление. Новые скорости будут направлены по равнодействующим скоростей v_i и Δv_i . Линейные скорости точек *C* и *D* не изменятся, так как точки лежат на оси *Y* - *Y*, вокруг которой действует сила \overline{F} .

Это заставит главную ось развернуться вокруг оси Z - Z под действием моментов кориолисовых сил инерции, названных по имени французского ученого Г. Кориолиса (1792-1843), что и является причиной прецессионного движения гироскопа в плоскости перпендикулярной действию силы. В действительности такое движение главной оси представляет собой сложный циклический петлеобразный процесс [4].

Определим угловую скорость прецессионного движения $\overline{\omega}_p$. Для этого достаточно определить угловую скорость одной точки гироскопа, например точки, определяющей конец вектора \overline{H} . Так как угловая скорость равна линейной, деленной на радиус вращения, то, как следует из рис. 1.9,

$$\overline{\omega}_p = \frac{\overline{U}}{\overline{H}}$$
, но $\overline{U} = \overline{L}$, следовательно, $\overline{\omega}_p = \frac{\overline{L}}{\overline{H}}$. (1.1)

Таким образом, угловая скорость $\overline{\omega}_p$ прецессии прямо пропорциональна приложенному моменту \overline{L} внешних сил и обратно пропорциональна кинетическому моменту \overline{H} гироскопа.

Вектор угловой скорости прецессии $\overline{\omega}_p$ всегда располагается на оси, вокруг которой совершается прецессионное движение и направлен в сторону, из которой движение вектора \overline{H} к вектору \overline{L} происходит кратчайшим путем и наблюдается против движения часовой стрелки.

На рис 1.11, *а* в качестве примера показана реакция гироскопа, т.е. его прецессионное движение, при действии силы \overline{F} вокруг оси Z - Z гироскопа. Видно, что главная ось ГС (конец вектора \overline{H}) получит перемещение в направлении момента \overline{L} в плоскости перпендикулярной действию силы \overline{F} и ГС будет разворачиваться вокруг оси Y - Y с угловой скоростью $\overline{\varpi}_n$.

В случае, если сила \overline{F} действует относительно главной оси (рис.1.11, δ), то момент \overline{L} направлен по оси вращения ротора и вектор \overline{H} изменит лишь свою длину, а не направление. Действие силы \overline{F} приведет здесь только к уменьшению угловой скорости $\overline{\Omega}$ вращения ротора и прецессионное движение наблюдаться не будет.



Рис. 1.11. Примеры вариантов действия моментов внешней силы

Характерной особенностью прецессионного движения является то, что оно не имеет "инерции" – прекращается сразу же после прекращения действия внешних сил.

Третье свойство – нутация – устойчивость гироскопа к удару (импульсу силы).

Математическое выражение теоремы о кинетическом моменте можно представить не в дифференциальной форме, а в конечных приращениях:

$$\Delta \overline{H} / \Delta t = \overline{L}$$
 или $\Delta \overline{H} = \overline{L} \Delta t.$

Полученное выражение можно трактовать следующим образом: момент \overline{L} внешней силы, действующей на гироскоп в течение малого (в пределе бесконечно малого) времени Δt , вызывает малое (в пределе бесконечно малое) изменение кинетического момента \overline{H} по направлению.

Следовательно, импульс силы (удар) практически не изменяет направление главной оси. При этом возбуждаются лишь быстрые, затухающие, конического вида колебания главной оси, которые называют нутационными колебаниями, а само явление – нутацией.

2. ГИРОКОМПАСЫ С АВТОНОМНЫМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

2.1. Использование гироскопа в качестве курсоуказателя

2.1.1. Горизонтная система координат и ее вращение

На рис. 2.1 изображены сферическая модель северного полушария Земли и горизонтная система координат.

Земля вращается с запада на восток, совершая оборот за звездные сутки. В первом приближении Землю можно считать шаром с радиусом $\tilde{R} = 6378$ км. Суточное вращение Земли происходит с угловой скоростью $\tilde{\omega} = 7,29 \cdot 10^{-5}$ сек⁻¹.

В качестве системы координат выберем горизонтную систему координат *ONEn* и свяжем ее с некоторой точкой *O* на поверхности Земли: ось *ON* направлена по касательной к меридиану на север; ось OE – по касательной к параллели на восток; ось On – по местной отвесной линии к надиру (рис. 2.1).

Вследствие суточного вращения Земли будет вращаться в пространстве и горизонтная система координат *O*NE*n*. На рис. 2.1 показано ее положение через некоторый интервал времени.



Рис. 2.1. Вращение горизонтной системы координат и видимое движение свободного гироскопа

Для определения этого вращения дополнительно построим вспомогательную сферу, поместив в точку *О* место наблюдателя вместе с горизонтной системой координат в центре этой сферы (рис.2.2).



Рис. 2.2. Вспомогательная сфера

где φ – широта наблюдателя.

Все точки на поверхности Земли имеют одинаковую угловую скорость, поэтому вектор $\tilde{\omega}$ можно перенести в точку наблюдателя O.

Разложим вектор угловой скорости вращения Земли $\tilde{\omega}$ на составляющие: ω_1 – вдоль направления полуденной линии NS; ω_2 – вдоль линии отвеса *zn*. Векторы $\tilde{\omega}$, ω_1 , ω_2 находятся в плоскости истинного меридиана.

Для величин угловых скоростей ω_1 и ω_2 имеем очевидные соотношения:

 $\omega_1 = \widetilde{\omega} \cos \varphi$ – горизонтальная составляющая;

 $\omega_2 = \tilde{\omega} \sin \varphi$ – вертикальная составляющая,

Горизонтальная составляющая суточного вращения Земли ω_1 показывает, что плоскость истинного горизонта непрерывно вращается в пространстве вокруг полуденной линии NS так, что восточная половина горизонта опускается, а западная поднимается (причем, из конца вектора ω_1 это вращение наблюдается против хода часовой стрелки). Это справедливо для обоих полушарий.

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 плоскости меридиана непрерывно отходит к западу, а южная – к востоку (из конца вектора ω_2 это вращение наблюдается также против хода часовой стрелки). Для южного полушария – наоборот.

2.1.2. Видимое движение свободного гироскопа

Как было определено ранее, главная ось свободного гироскопа сохраняет неизменным первоначально заданное направление в инерциальном пространстве (первое свойство гироскопа).

Пользуясь свободным ГС можно проследить суточное вращение Земли вокруг ее оси. Так как ось ГС сохраняет свое первоначальное положение, а Земля вместе с наблюдателем вращается, то наблюдатель видит, что ось ГС поворачивается относительно плоскостей истинного меридиана и истинного горизонта, которые связаны с точкой наблюдателя на поверхности Земли.

Если в первоначальный момент ось ГС находится в меридиане и горизонтальна (рис. 2.1, положение гироскопа 1), то через некоторое время из-за вращения Земли она выйдет из меридиана на некоторый угол α (положение 2), так как плоскость горизонта совершает непрерывное вращение вокруг отвесной линии *zn* с угловой скоростью ω_2 . Оказавшись в восточной части горизонта, главная ось получит и видимый подъем над горизонтом на некоторый угол β , поскольку восточная часть горизонта непрерывно опускается с угловой скоростью ω_1 . Эта ситуация нагляднее показана на рисунке 2.3.



Рис. 2.3. Видимое двидение главной оси свободного гироскопа

Таким образом, где бы ни был свободный гироскоп первоначально установленным в средней широте вдоль меридиана, в дальнейшем, из-за вращения Земли, его главная ось выйдет из этого направления, совершая непрерывные периодические суточные колебания отклоняясь от меридиана в восточном направлении и поднимаясь над горизонтом. Максимального подъема ось достигнет через 12 часов, а спустя сутки займет исход-

ное положение *1* как показано на рис. 2.1. В южном полушарии главная ось будет отклоняться к западу и совершать уход под горизонт.

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

Если главную ось гироскопа, установленного *на экваторе*, направить по линии NS (рис. 2.1, положение 3), то есть вектор H совпадает по направлению с вектором $\tilde{\omega}$, то вследствие вращения Земли ось ГС будет поворачиваться вокруг оси X-X, параллельной оси вращения Земли, и наблюдатель не обнаружит видимого движения ГС (положение 4).

Если гироскоп находится на экваторе и его ось *X*–*X* горизонтальна и направлена по линии EW, то в течение суток ось совершит полный видимый оборот в вертикальной плоскости (рис. 2.4, вид земного шара с северного полюса). В действительности же ось гироскопа сохраняет свое первоначальное направление неизменным в инерциальном пространстве.

На полюсе гироскоп в течение суток совершит полный видимый оборот в горизонтальной плоскости в сторону, противоположную вращению Земли, если первоначально он был установлен в плоскости горизонта. Видимого движения ГС наблюдаться не будет, если ось первоначально расположена вертикально.

Рассмотренные ситуации показывают, что только в случае параллельно-



Рис. 2.4. Видимое движение свободного гироскопа, установленного на экваторе по линии E-W

сти главной оси ГС оси Земли наблюдатель не обнаружит видимого движения гироскопа.

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

Поэтому возникает задача, состоящая в том, чтобы привести главную ось гироскопа с произвольного начального положения в плоскость истинного меридиана, а затем стабилизировать ее в этой плоскости в любой широте плавания. То есть, необходимо "заставить" гироскоп непрерыв-

но следовать за плоскостью меридиана наблюдателя с той же скоростью, с которой она совершает свое вращение, т.е. с угловой скоростью ω_2 .

2.1.3. Способ превращения гироскопа в гирокомпас

Гирокомпас должен иметь устройство, реагирующее на отклонение отсчетной оси от плоскости истинного меридиана и вырабатывающее управляющий сигнал (или момент) для приведения отсчетной оси в плоскость истинного меридиана. Такое устройство получило название чувствительного элемента (ЧЭ).

Существует несколько способов создания гирокомпасов на базе свободного гироскопа:

- создание положительного маятникового эффекта путем понижения центра тяжести гироскопа с гирокамерой (ГС с твердым маятником);
- создание отрицательного маятникового эффекта путем присоединения к астатическому гироскопу системы сообщающихся сосудов, заполненных маловязкой жидкостью (ГС с жидкостным маятником);
- включение астатического гироскопа в контур управления, содержащий индикатор горизонта (маятник), электрические цепи и датчики выработки управляющих моментов (ГС с электромагнитным управлением);
- гироскоп с геомагнитным управлением.

Первые два способа относят к гирокомпасам с непосредственным управлением, последние два – к гирокомпасам с косвенным управлением.

Рассмотрим физическую сущность превращения ГС в гирокомпас с помощью маятникового устройства (понижение центра тяжести ЧЭ). Для этого ГС помещают в гирокамеру, как это изображено на рис. 2.5, *а*. К нижней ее части присоединяют груз, тем самым понижают центр тяжести всего устройства относительно точки подвеса – создается маятниковый эффект.

Предположим, что такой прибор установлен на экваторе, его главная ось выведена из меридиана на 90° и горизонтально направлена по линии EW (рис. 2.5, *a*). Сила тяжести *P* не будет создавать момента относительно точки подвеса O, т.к. она лежит на оси *Z*–*Z* гироскопа, совпадающей в данном случае с отвесной линией *zn*, нормальной к плоскости горизонта.

В следующий момент из-за вращения Земли восточная половина горизонта опустится на некоторый угол β и ось *X*–*X* гироскопа видимым образом поднимется над плоскостью горизонта на тот же угол β .

Центр тяжести G отойдет от отвесной линии zn, проходящей через точку подвеса O. Сила тяжести P, направленная всегда по отвесной линии, введет относительно оси Y-Y момент L, вектор которого направлен вдоль оси Y-Y к северу (из конца вектора L действие силы тяжести P вокруг оси Y-Y наблюдается против движения часовой стрелки).

Под действием момента L гироскоп начнет совершать прецессионное движение вокруг оси Z–Z. Конец вектора H пойдет в направлении момента L, то есть к северной части меридиана наблюдателя. Таким образом, возникает предпосылка использования такого гироскопического устройства в качестве указателя меридиана или – чувствительного элемента гирокомпаса.

Определим угловую скорость прецессии ЧЭ к меридиану, ссылаясь на рис.2.5, δ , который отражает ту же ситуацию, что и на рис.2.5, a. Здесь (на рис.2.5, δ) ось *Y*–*Y* гироскопа перпендикулярна плоскости рисунка.



Рис. 2.5. Чувствительный элемент с положительным маятниковым эффектом

Расстояние OG, на которое смещен вниз центр массы ЧЭ, называется метацентрической высотой (обозначено буквой a).

К центру масс G приложена сила тяжести P = mg,

где m – масса ЧЭ; g – ускорение свободного падения.

Из треугольника *OGC* плечо действия силы *P* вокруг оси *Y*–*Y* гироскопа равно $OC = l = a \sin\beta$. При малых значениях углов $\sin\beta \approx \beta$, тогда плечо $l = a \beta$. Следовательно, $L = P l = mga \beta$.

Произведение *mga* для данного ЧЭ есть величина постоянная. Обозначив эту величину через *B*, получим $L = B\beta$. Величина *B* носит название модуля маятникового момента. Угловая скорость прецессии ЧЭ к меридиану определится в виде

$$\omega_{\rm p} = -\frac{L}{H} = \frac{B\beta}{H}.$$

Гироскоп с пониженным центром тяжести является гироскопом с неполной связью. Действительно, при горизонтальном положении оси X-X прибора угол β и момент $B\beta$ равны нулю. Но стоит только вывести ось X-X из горизонтального положения, как сразу же появляется угол β и возникает момент $B\beta$, который заставит прибор прецессировать к меридиану.

Ниже будет показано, что угловая скорость этого прецессионного движения в установившемся положении равновесия равна ω_2 – угловой скорости движения плоскости истинного меридиана наблюдателя и главная ось ЧЭ установится точно в этой плоскости.

2.2. Незатухающие колебания чувствительного элемента гирокомпаса

2.2.1. Процесс образования незатухающих колебаний

Понижение центра масс ЧЭ является одним из способов создания управляющего момента в современных гирокомпасах, под действием которого главная ось гироскопа стремится к меридиану. Однако факт движения оси к меридиану еще не позволяет утверждать, что такой прибор может быть использован в качестве указателя меридиана. Рассмотрим более подробно движение главной оси ЧЭ с пониженным центром масс, который расположен в некоторой северной широте φ [1].

Пусть в первоначальный момент ось прибора установлена в плоскости горизонта и отклонена от меридиана на некоторый малый угол α к востоку (рис. 2.6, *a*). На рисунке показаны: NESW – плоскость истинного горизонта; Q – плоскость, перпендикулярная полуденной линии NS наблюдателя; *MM* – след от пересечения вертикальной плоскости P, проходящей по линии NS меридиана наблюдателя, с плоскостью Q; ω_1 – горизонтальная составляющая земного вращения; ω_2 – вертикальная составляющая земного вращения; точка *1* – проекция

полюса гироскопа (конца вектора *H*) на вертикальную плоскость Q – находится на линии пересечения плоскостей Q и NESW.

Проследим траекторию движения полюса гироскопа, наблюдая проекцию конца его вектора H на плоскость Q и отмечая характерные позиции этой траектории – 1)...10), как показано на рис. 2.6, δ .



Рис. 2.6. Схема образования незатухающих колебаний чувствительного элемента: *а*) – первоначальная установка гироскопа; *б*) – фазы движения полюса гироскопа

1) В первоначальный момент ось Х-Х горизонтальна, поэтому:

$$\beta = 0$$
 - угол подъема оси над горизонтом;
 $L = B\beta = 0$ - момент силы;
 $\omega_{\rm p} = \frac{L}{H} = \frac{B\beta}{H} = 0$ - угловая скорость прецессии.

Следовательно, прецессионное движение отсутствует. Но из-за наличия угла α восточная половина горизонта начнет опускаться под северной частью оси ГС и проекция ее на плоскость Q начнет перемещаться вверх с некоторой линейной скоростью v_1 . Одновременно с этим проекция оси ГС начнет перемещаться к востоку со скоростью v_2 , так как меридиан наблюдателя вращается вокруг отвесной линии с постоянной для данной широты угловой скоростью $\omega_2 = \tilde{\omega} \sin \varphi$ и его северная часть отходит к западу – линия *M*-*M* непрерывно смещается к западу.

Таким образом, линейная скорость $v_2 = \text{const}$ во всех случаях, а $v_1 = f(\alpha)$.

2) Вследствие видимого подъема оси ГС над горизонтом появится угол β , возникнет момент $L = B\beta$ и ГС начнет прецессировать к меридиану с угловой скоростью $\omega_{\rm p} = \frac{B\beta}{H}$ (см. рис.2.5 и пояснения к нему). Поэтому проекция оси ГС получит некоторую скорость $v_3 = f(\beta)$. Линейная скорость v_3 , обусловленная действием силы тяжести, непрерывно увеличивается (вследствие увеличения угла β), замедляя уход оси ГС от меридиана. Наступит момент, когда скорости v_2 и v_3 сравняются.

3) В положении 2 уход главной оси ГС от меридиана прекратился ($v_2 = v_3$) и в следующий момент ось начнет перемещаться к меридиану наблюдателя со скоростью ($v_3 - v_2$). Ось ГС продолжает подниматься над горизонтом; угол β увеличивается, v_1 станет меньше, чем в положениях 1 и 2, т.к. угол α уменьшился – горизонт стал медленнее опускаться.

Итак, имеем: v_1 – уменьшается; v_2 = const; v_3 – увеличивается; β – увеличивается.

В дальнейшем увеличение параметра будем обозначать символом ↑, а уменьшение – символом ↓.

4) Ось гироскопа пришла в меридиан, ее подъем над горизонтом прекратился: $\alpha = 0$; $v_1 = 0$.

Здесь наблюдается максимальный подъем оси над горизонтом:

$$\beta = \max; L = B\beta; \omega_p = \frac{B\beta}{H}; v_3 = \max; v_2 = \text{const.}$$

Из-за наличия угла β ГС продолжает прецессировать вокруг оси Z–Z: полюс ГС переходит в западную половину горизонта и, начиная с положения 4, угол β начнет уменьшаться, т.к. западная половина горизонта непрерывно в пространстве поднимается, соответственно наблюдается опускание главной оси к горизонту.

5) По мере отхода главной оси ГС от меридиана угол $\alpha - \uparrow$, $v_1 - \uparrow$, но уже с противоположным знаком, т.к. ось опускается; угол $\beta - \downarrow$ поэтому $v_3 - \downarrow$.

6) Скорости v₂ и v₃ сравняются и уход оси ГС от меридиана прекратится:

 $v_2 = v_3; v_1 = \max$, так как $\alpha = \max$.

7) Ось прибора горизонтальна: $\beta = 0$; $v_3 = 0$; $v_2 = \text{const}$; $v_1 \neq 0$.

8) Начиная с позиции 7 северный конец оси опустится под горизонт, перемещаясь с линейной скоростью v_1 ; появится угол β и ГС начнет прецессировать к меридиану с линейной скоростью ($v_2 + v_3$).

Необходимо отметить, что когда северный конец оси был над горизонтом, вектор момента силы тяжести L был направлен по оси Y-Y к западной части горизонта, поэтому ГС прецессировал к западу. Когда северный конец оси опущен под горизонт, плечо момента силы тяжести P занимает противоположное направление относительно отвесной линии (см. рис. 2.5). Тогда и вектор Lрасположится на оси Y-Y в противоположном направлении – к востоку, следовательно, и полюс ГС устремиться к востоку.

9) Главная ось ГС в меридиане: $\alpha = 0$; $v_1 = 0$; $\beta = \max$; $v_3 = \max$.

С этого момента северный конец оси ГС переходит в восточную половину горизонта, начинается ее видимый подъем.

10) В этом положении: $\alpha - \uparrow$; $v_1 - \uparrow$; $\beta - \downarrow$; $v_3 - \downarrow$.

И, наконец, ось ГС приходит в положение *1* – ось горизонтальна. В дальнейшем все фазы движения оси повторяются.

Можно заметить следующее: когда ось ГС находится в восточной части горизонта, то совершается ее видимый подъем, а, находясь в западной части горизонта, ось опускается; если ось приподнята над горизонтом, то прецессия совершается к западу, а если ось опущена под горизонт, то ГС прецессирует к востоку.

Фигура, полученная на плоскости Q, является эллипсом, причем его большая ось проходит через точки 2 и 6, а малая – совпадает с плоскостью меридиана. В действительности эллипс получается сильно сжатым. Нам будет казаться, что колебания совершаются только в горизонтальной плоскости, а колебания по углу β совершенно незаметны. Отношение малой оси эллипса к большой выражается в сотых долях единицы.

Таким образом, ГС с пониженным центром масс, будучи выведенным из меридиана, совершает около него незатухающие колебания (НЗК).

Значит такой прибор "чувствует" меридиан, и поэтому такой ГС с пониженным центром масс мы с полным основанием можем назвать чувствительным элементом гирокомпаса. Сами же гирокомпасы получили название – *гирокомпасы с автономным чувствительным элементом*. Часто такие гирокомпасы называют *маятниковыми*, поскольку их непосредственное управление осуществляется благодаря маятниковому эффекту – смещению центра масс относительно точки подвеса.

Практически из-за существующих сил трения в подвесе на самом деле колебания совершаются не бесконечно по эллипсовидной траектории, а по крайне медленно сходящейся спирали, и поэтому являются затухающими. После того как колебания затухнут, главная ось прибора установится в положение равновесия.

2.2.2. Анализ незатухающих колебаний

Положение динамического равновесия главной оси ЧЭ. Незатухающие колебания гиросферы по азимуту (α) и высоте (β) важны для изучения, т.к. позволяют судить о движении главной оси ГС относительно плоскостей истинного меридиана и горизонта и определяют основные качественные динамические характеристики прибора.

Имея физические представления о движении оси ЧЭ, определим координаты положения равновесия оси гирокомпаса, т.е. углы α_r и β_r , которые ось составляет с плоскостями меридиана и горизонта соответственно.

Движение главной оси относительно плоскости горизонта определяется линейной скоростью v_1 , которая отсутствует только в том случае, когда ось находится в меридиане, т.е. при $\alpha = 0$ (рис. 2.6, положения 4 и 9).

Движение оси относительно меридиана определяется скоростями v_2 и v_3 . Чтобы ось оставалась неподвижной относительно меридиана, скорости v_2 и v_3 должны быть равны по величине и противоположны по направлению. То есть, прибор должен прецессировать за меридианом с такой же угловой скоростью с какой меридиан уходит от оси прибора. Значит должно быть выполнено равенство $\omega_p = \omega_2$, но

$$\omega_{\rm p} = \frac{B\beta}{H}$$
, а $\omega_2 = \tilde{\omega}\sin\varphi$, тогда $\frac{B\beta}{H} = \tilde{\omega}\sin\varphi$, откуда
 $\beta_{\rm r} = \frac{H\tilde{\omega}\sin\varphi}{B}$.

Угол β_r вполне определен, т.к. *B*, *H*, $\tilde{\omega}$, φ известны.

То есть, в положении равновесия ось прибора должна находиться в меридиане ($\alpha_r = 0$) и приподнята (в северном полушарии) над горизонтом на угол β_r .

Определим теперь положение динамического равновесия главной оси ЧЭ, исследуя дифференциальные уравнения ее движения. Наиболее простым и наглядным способом составления дифференциальных уравнений движения гироскопических устройств, тесно связанных с физической сущностью явлений, является графоаналитический способ суммирования проекций векторов моментов сил, разработанный проф. Б.И. Кудревичем и названный его именем [2 – 5].

Согласно этого способа, получена следующая система дифференциальных уравнений:

$$\begin{array}{c}
H\dot{\alpha} + B\beta = H\widetilde{\omega}\sin\varphi; \\
H\dot{\beta} - H\widetilde{\omega}\cos\varphi\alpha = 0.
\end{array}$$
(2.1)

Положение динамического равновесия определяется частным решением системы уравнений (2.1). Поскольку правая часть системы (2.1) в рассматрива-

емом случае постоянна во времени, ищем частное решение в виде $\alpha = \alpha_r = \text{const};$ $\beta = \beta_r = \text{const}.$

Подставляя в (2.1) значения α_r и β_r и их производные, имеющие нулевое значение (изменения по углам α и β отсутствуют), получим

$$B\beta_{\rm r} = H\widetilde{\omega}\sin\varphi \ ; \\ -H\widetilde{\omega}\cos\varphi\,\alpha_{\rm r} = 0 \ . \end{cases}$$

из чего следует:

$$\beta_{\rm r} = \frac{H\widetilde{\omega}\sin\varphi}{B} \; ; \; \alpha_{\rm r} = 0. \tag{2.2}$$

Эти выражения показывают, что в положении динамического равновесия главная ось ЧЭ располагается точно в плоскости истинного меридиана и в общем случае отклонена от плоскости истинного горизонта на угол β_r . На рисунке 2.6, δ ось соответствует положению точки 11), где видно, что скорость $v_2 = v_3$.

Точно такие же выражения (2.2) были получены выше, при рассуждении о фазах движения главной оси ЧЭ.

Тот факт, что положение динамического равновесия по углу β_r отлично от нуля имеет глубокий физический смысл. Действительно, если существует угол β_r , то имеют место непрерывно действующий момент $L_y = B \beta_r$ и, соответственно, прецессионное движение с угловой скоростью

$$\omega_{\rm p} = \frac{L}{H} = \frac{B\,\beta_{\rm r}}{H}.\tag{2.3}$$

Подставляя (2.2) в (2.3) получим

$$\omega_{\rm p} = \frac{BH\,\widetilde{\omega}\sin\varphi}{BH} = \widetilde{\omega}\,\sin\varphi = \omega_2,$$

т.е. угловая скорость прецессии точно равняется угловой скорости вращения плоскости истинного меридиана в пространстве.

Важно подчеркнуть, что угол β_r создан не конструктивными мерами, а образовался вследствие внутренних свойств гироскопического устройства. Иначе говоря, чтобы получить компас принципиально необходимо иметь гороскоп с $H \neq 0$ с положительным маятниковым эффектом (при данном способе реализации) и собственное вращение планеты ($\tilde{\omega} \neq 0$).

Это обстоятельство делает возможным использование прибора для целей индикации положения плоскости истинного меридиана сколь угодно длительное время без ухудшения точности.

Характер поведения главной оси ЧЭ. Чтобы определить характер поведения главной оси ЧЭ, находят общее решение системы уравнений (2.1), а затем частное при определенных начальных условиях (положим, в начальный момент времени t = 0 положение главной оси определялось угловыми координатами: $\alpha_{t=0} = \alpha_0$ и $\beta_{t=0} = \beta_r$). Результатом решения является определение законов движения оси ЧЭ в азимуте (по углу α) и по высоте (по углу β) [2 - 5]:

$$\alpha = \alpha_0 \cos \omega_0 t$$
 – закон движения оси ЧЭ в азимуте; (2.4)

$$\beta = \beta_{\rm r} + \frac{H}{B} \alpha_{\rm o} \omega_{\rm o} \sin \omega_{\rm o} t$$
 – закон движения оси ЧЭ по высоте. (2.5)

Полученные уравнения показывают, что главная ось ЧЭ и по углу α и по углу β совершают незатухающие колебания, которые находятся в квадратуре по отношению друг к другу, т.е. со сдвигом на 90°. Кроме того, ось приподнята над горизонтом на постоянную величину β_r . Колебания по углам α и β совершаются с одной и той же частотой незатухающих колебаний ω_0 , определяемой по формуле

$$\omega_{\rm o} = \sqrt{\frac{B\,\widetilde{\omega}\cos\varphi}{H}}\,.$$

Соответственно период НЗК То выражается равенством

$$T_{\rm o} = \frac{2\pi}{\omega_{\rm o}} = 2\pi \sqrt{\frac{H}{B\tilde{\omega}\cos\varphi}} \,. \tag{2.6}$$

Видно, что с увеличением широты φ период T_0 возрастает. При конструировании прибора выбирают некоторую расчетную широту, например, $\varphi = 60^{\circ}$ (широта определяется страной, производящей прибор), в которой для выбранных величин модуля маятникового момента *B* и кинетического момента гиросферы *H* период T_0 делают равным 84,4 мин. В широте равной 90° $T_0 = \infty$, т.е. на полюсе гирокомпас никогда не придет в меридиан.

Значение периода *T*₀ является важным расчетным параметром прибора, определяющим точность курсоуказания при маневрировании.

Используя уравнения (2.4) и (2.5), нетрудно найти траекторию движения полюса ГС, применив обычный прием исключения из выражений (2.4) и (2.5) времени *t*.

В результате несложных преобразований получаем уравнение:

$$\left(\frac{\alpha}{\alpha_{\rm o}}\right)^2 + \left(\frac{\beta - \beta_{\rm r}}{\beta_{\rm o}}\right)^2 = 1.$$

Полученное уравнение показывает, что траекторией является сильно сжатый эллипс с полуосями α_0 и β_0 , где $\beta_0 = \frac{H}{B} \alpha_0 \omega_0$ (рис. 2.7). Центр эллипса имеет координаты $\alpha = 0$ и $\beta = \beta_r$. То есть, в плоскости истинного меридиана находится не физическая ось ЧЭ, а центр вокруг которого эта ось совершает незатухающие колебания. Сжатие эллипса определяется отношением малой полуоси β_0 к большой α_0 и составляет $\varepsilon \approx 0,03$.



Рис. 2.7. Эллипс незатухающих колебаний гиросферы

Лишь в установившемся положении динамического равновесия главная ось ЧЭ будет находиться в меридиане, приподнявшись над горизонтом на угол β_r . Так, например, для гирокомпаса "Курс-4" в расчетной широте $\varphi = 60^{\circ}$ угол β_r = 0,1°.

2.3. Затухающие колебания чувствительного элемента гирокомпаса

2.3.1. Масляный успокоитель

Анализ дифференциальных уравнений движения оси ЧЭ с пониженным центром тяжести показал, что его главная ось совершает НЗК как относительно плоскости истинного горизонта так и относительно плоскости меридиана наблюдателя.

Если, например, ЧЭ гирокомпаса типа "Курс" вывести из меридиана на угол порядка 30° и предоставить ему возможность совершать свободные колебания около меридиана, то эти колебания затухнут (из-за существующих сил трения в подвесе ЧЭ) только через 10 – 15 суток [1]. Значит, если такой прибор в условиях плавания по каким-либо причинам выйдет из меридиана, то ему потребуется длительное время для возвращения в меридиан и в течение этого времени он не может быть использован в качестве курсоуказателя.

Очевидно, необходимо искусственно ускорить затухание колебаний и таким образом ускорить приход оси ГК в меридиан. Из рис. 2.6 видно, что для погашения НЗК достаточно было бы ввести дополнительное прецессионное движение ЧЭ в горизонтальной плоскости, причем следующего характера. Если северная часть главной оси ГС находится в восточной половине горизонта, то дополнительная линейная скорость конца вектора H в азимуте должна иметь западное направление – догонять меридиан. Когда же ось ГС находится в западной половине горизонта, то эта дополнительная линейная скорость должна иметь восточное направление – навстречу к меридиану. То есть должен иметь место постоянно действующий дополнительный горизонтальный момент, создающий прецессионное движение ЧЭ к меридиану.



Рис. 2.8. Масляный успокоитель

У гирокомпасов с пониженным центром тяжести ЧЭ для создания горизонтального момента используется так называемый жидкостный успокоитель. Схематически он представляет собой два сообщающихся сосуда (рис. 2.8), укрепленных в верхней части гирокамеры с северной (N) и южной (S) ее сторон. Сосуды примерно до половины заполнены вязкой жидкостью, обычно вазелиновым маслом.

На рис 2.8 показаны линии: 1 – линия, параллельная плоскости горизонта; 2 – средняя линия сосудов; 3 – линия, соединяющая центры зеркал жидкости; ось *Y*-*Y* перпендикулярна плоскости рисунка.

Колебания оси ЧЭ в вертикальной

плоскости по углу β (подъем над горизонтом либо ее опускание под горизонт), происходящие вместе с сосудами успокоителя, вызывают перетекание жидкости из одного сосуда в другой, т.е. приводят к изменению уровней жидкости в сосудах. Конструкция сосудов, диаметр их соединительных трубок и вязкость жидкости побираются такими, чтобы колебания жидкости запаздывали по фазе на 1/4 периода относительно периода незатухающих колебаний оси ЧЭ по высоте, т.е. по углу β ее наклона к плоскости горизонта (при равенстве периодов тех и других колебаний).

Это означает, что когда ось X-X ЧЭ горизонтальна, то в одном из сосудов должен быть максимальный избыток жидкости. Когда же ось X-X имеет β = max, жидкости в сосудах станет поровну.

На рис. 2.8 показана ситуация, когда подъем главной оси над горизонтом только лишь начался. Накопившийся до этого за 1/4 периода избыток жидкости в N-сосуде (т.к. ось была опущена под горизонт) будет уменьшаться, т.е. масло начнет перетекать в S-сосуд.

Избыток жидкости в одном из сосудов характеризуется углом γ между линией ее уровней, соединяющей центры зеркал поверхностей жидкости в сосудах, и осью X–X. Благодаря запаздыванию перетекания масла $\gamma = 0$, когда ось X–X в меридиане ($\alpha = 0$) и имеет максимальный наклон | β | = max. Напротив, при максимальном отклонении оси от меридиана (| α | = max) образуется наибольший избыток жидкости в бывшем опущенном сосуде. Так, при максимальном отклонении оси X–X к востоку наибольший избыток жидкости (γ = max) в северном сосуде, а при отклонении оси X–X к западу – в южном. Перетекание жидкости происходит непрерывно. Скорость перетекания жидкости характеризуется угловой скоростью $\dot{\gamma}$ изменения угла наклона уровней, которая зависит от разности уровней в сосудах над плоскостью горизонта, т.е. от суммы углов ($\beta + \gamma$) и направлена в сторону ее уменьшения:

$$\dot{\gamma} = -F(\beta + \gamma), \tag{2.7}$$

где F – фактор перетекания – конструктивная постоянная, зависящая от физических свойств жидкости, формы и разметов сообщающихся сосудов и определяется опытным путем; знак "–" показывает уменьшение γ при перетекании.

Момент гидравлического маятника L_{x} есть момент, создаваемый весом избытка жидкости P_{x} (отмечен на рис.2.8 штриховкой); он пропорционален углу γ , действует относительно оси Y-Y до тех пор, пока в сосудах жидкости не станет поровну:

$$L_{\mathfrak{K}} = C \,\gamma, \tag{2.8}$$

где *С* – коэффициент, зависящий от физических свойств жидкости и геометрических параметров сосудов; он называется модулем жидкостного маятника или модулем масляного успокоителя.

На рис 2.8 момент *L*_ж направлен за плоскостью рисунка (т.е. к W).

Момент гидравлического маятника эквивалентен моменту отрицательного твердого маятника, т.е. такому моменту, который возникает при расположении точки *G* выше точки *O*. Иначе говоря, моменты $B\beta$ и $C\gamma$ имеют противоположные знаки, т.е. уже сдвинуты по фазе на π при отсутствии запаздывания. С позиций устойчивости движения необходимым условием является соблюдение неравенства: *C* < *B*.

Момент L_{x} , направленный по оси Y-Y ЧЭ, вызывает дополнительную прецессию оси X-X, которая всегда направлена к меридиану и поэтому превращает незатухающие колебания ЧЭ в затухающие колебания (ЗК).

2.3.2. Процесс образования затухающих колебаний

Рассмотрим каково будет движение ЧЭ с укрепленным на нем масляным успокоителем (рис. 2.9) и отметим характерные точки этого движения 1)...8). Рисунок 2.9 отображает траекторию проекции вектора *H* на вертикальную плоскость (те же начальные условия, что и при НЗК – рис.2.6).

Пусть в начальный момент ось X-X прибора горизонтальна и отклонена на угол α_1 к востоку (по аналогии с рис. 2.6, позиция 1). Предположим, что режим колебаний масла в сосудах уже установился, т.е. колебания эти уже запаздывают по фазе относительно колебаний самих сосудов (гиросферы) на 1/4 периода.

1) В данной позиции главная ось ЧЭ горизонтальна, максимальный избы-

ток жидкости будет в северном сосуде, т.к. до этого момента северный конец оси ЧЭ был опущен под горизонт и масло перетекло в северный сосуд.

Сила тяжести избытка жидкости $P_{\mathfrak{K}}$ вводит момент относительно оси Y-Y, вектор которого направлен к западу. Этот момент вызовет прецессию вокруг оси Z–Z, и поэтому главная ось начнет перемещаться к W, т.е. к плоскости меридиана с линейной скоростью ее проекции на вертикальную плоскость $v_4 = f(\gamma)$, которую будем называть результатом действия добавочной прецессии.



Рис. 2.9. Схема образования затухающих колебаний чувствительного элемента

Также как и при НЗК, главная ось ЧЭ в зависимости от ее текущего положения может перемещаться со следующими линейными скоростями:

 $v_1 = f(\alpha)$ – скорость видимого подъема ЧЭ над горизонтом;

 $v_2 = \text{const} - \text{скорость отхода меридиана к W (скорость видимого движения ЧЭ к E), обусловленная вертикальной составляющей угловой скорости вращения Земли <math>\omega_2$;

 $v_3 = f(\beta)$ – линейная скорость ЧЭ, вызванная действием его силы тяжести (назовем ее главной прецессией);

 $v_4 = f(\gamma)$ – линейная скорость ЧЭ в результате добавочной прецессии.

В результате происходит следующее: ось ЧЭ видимым образом уходит от меридиана с линейной скоростью v_2 ; поднимается над плоскостью горизонта с линейной скоростью v_1 ; в результате добавочной прецессии движется к меридиану с линейной скоростью v_4 . Но $v_4 > v_2$ и поэтому в следующий момент ось ЧЭ пойдет к меридиану, а не от него, как это было в случае с НЗК.

2) Наблюдается подъем главной оси над горизонтом (эта фаза движения была показана на рис. 2.8). Избыток масла в северном сосуде уменьшается, т.к. часть жидкости перетекла в южный сосуд вследствие его опускания. Это вызвало уменьшение силы тяжести $P_{\rm ж}$ и, следовательно, уменьшение угловой скорости добавочной прецессии и линейной скорости v_4 .

Но, с другой стороны, угол β увеличивается и действие силы тяжести P приводит к увеличению скорости v_3 . Движение полюса ЧЭ к меридиану происходит со скоростью ($v_3 + v_4$), при этом v_3 непрерывно увеличивается, а v_4 уменьшается. Главная ось стремится "догнать" меридиан.

3) Когда через 1/4 периода колебаний главная ось прибора придет в меридиан, угол β подъема оси над горизонтом будет максимальным и, следовательно, жидкости в сосудах станет поровну:

 $\gamma = 0$ $P_{\text{ж}} = 0$; и $v_4 = 0$, но $v_3 = \max$, т.к. угол $\beta = \max$.

4) В следующий момент ось прибора перейдет в западную половину горизонта, полюс ЧЭ и северный сосуд начнут опускаться. Однако жидкость продолжает перетекать в южный сосуд, образуя в нем все больший избыток жидкости. Момент силы $P_{\rm ж}$, а, следовательно, и линейная скорость v_4 изменяют свои направления на противоположные. Линейная скорость v_4 вновь будет направлена к меридиану. Поскольку v_3 еще преобладает над ($v_2 + v_4$), то будет наблюдаться уход главной оси от меридиана к западу.

Если до прихода ЧЭ в меридиан добавочная прецессия ускоряла его приход к меридиану, то теперь она замедляет уход оси от меридиана. Значит, движение ЧЭ к меридиану будет совершаться быстрее, а от меридиана – медленнее, чем в подобных же случаях при НЗК.

5) В положении 5 наступит равенство: $v_3 = (v_2 + v_4)$; в следующий момент прибор начнет возвращаться к меридиану.

6) Когда ось прибора станет горизонтальной, в южном сосуде образуется максимальный избыток жидкости:

 $P_{\text{\tiny JK}} = \max$, т.к. $\gamma = \max$; $v_4 = \max$; $v_3 = 0$, т.к. $\beta = 0$.

Из рис. 2.9 видно, что наибольшее отклонение главной оси ЧЭ от меридиана к W (α_2) меньше первоначального отклонения к E (α_1), т.е. колебания становятся затухающими.

7) После положения 6 северный конец оси ЧЭ будет опускаться под горизонт и одновременно перемещаться к меридиану. Жидкость начнет перетекать из южного сосуда в северный. Сила тяжести $P_{\rm ж}$ избытка жидкости, угловая скорость добавочной прецессии и линейная скорость v_4 будут уменьшаться и, наконец, уровни жидкости в сосудах выровняются. В этом положении:

 $\beta = \max$ и $v_3 = \max$; $P_{\pi} = 0$, т.к. $\gamma = 0$ и, следовательно, $v_4 = 0$.

8) В следующий момент северный конец оси ЧЭ окажется уже в восточной половине горизонта и начнет совершать видимый подъем над ним. Жидкость продолжает перетекать в северный сосуд, достигнув максимума ее избытка, когда ось выйдет на уровень горизонта. В дальнейшем главная ось ЧЭ, поднявшись над горизонтом, снова получит дополнительное движение к меридиану (по аналогии с положением 2). Здесь ось ЧЭ отклонится к востоку на

угол α_3 значительно меньший, чем это было в предыдущем ее отклонении к западу на угол α_2 . Далее процесс повторяется, отклонения оси от меридиана становятся все менее заметными.

Таким образом, ЧЭ совершает затухающие колебания по сходящейся эллиптической спирали и вскоре достигнет положения равновесия, координаты которого следует определить.

2.3.3. Анализ затухающих колебаний

Положение динамического равновесия главной оси ЧЭ. При наличии масляного успокоителя система дифференциальных уравнений [2-5], описывающая движение главной оси ЧЭ, выглядит следующим образом:

$$\begin{array}{l}
H\dot{\alpha} + B\beta + C\gamma = H\widetilde{\omega}\sin\varphi; \\
H\dot{\beta} - H\widetilde{\omega}\cos\varphi\alpha = 0; \\
\dot{\gamma} + F(\beta + \gamma) = 0.
\end{array}$$
(2.9)

Обратим внимание на то, что данная система уравнений по сравнению с (2.1) содержит уравнение (2.7), характеризующее скорость перетекания масла в сосудах успокоителя, а ее первое уравнение дополнено моментом силы тяжести избытка жидкости – уравнение (2.8).

Для определения положения динамического равновесия ЧЭ найдем частное решение системы (2.8) в виде:

 $\alpha = \alpha_{\rm r} = {\rm const}; \ \beta = \beta_{\rm r} = {\rm const}; \ \gamma = \gamma_{\rm r} = {\rm const}.$

Тогда $\dot{\alpha}_{\rm r} = \dot{\beta}_{\rm r} = \dot{\gamma}_{\rm r} = 0$, т.е. это такое состояние, когда скорость изменения параметра (1-я производная) равна нулю. Исходя из этого, получим:

$$B\beta_{\rm r} + C\gamma_{\rm r} = H\widetilde{\omega}\sin\varphi; -H\widetilde{\omega}\cos\varphi\alpha_{\rm r} = 0; F(\beta_{\rm r} + \gamma_{\rm r}) = 0.$$

$$(2.10)$$

Из второго уравнения системы (2.10) определяем: $\alpha_r = 0$. Это означает, что в положении динамического равновесия ось ЧЭ находится в плоскости меридиана и погрешность отсутствует при условии, что судно неподвижно.

В третьем уравнении видно, что $\gamma_r = -\beta_r$ (поскольку $F \neq 0$) и, подставив это равенство в первое уравнение системы, получим:

$$\beta_{\rm r}(B-C) = H\tilde{\omega}\sin\varphi$$
 или $\beta_{\rm r} = \frac{H\tilde{\omega}\sin\varphi}{B-C}$ (2.11)

Таким образом, для неподвижного гирокомпаса с успокоителем в положении динамического равновесия $\alpha_r = 0$ – главная ось ЧЭ находится в плоско-
сти истинного меридиана.

Угол β_r (уравнение 2.11) показывает, что ось приподнята над горизонтом на угол β_r , который больше при затухающих колебаниях, чем при незатухающих.

Например, для ГК "Курс-4" в расчетной широте $\varphi_* = 60^\circ \beta_r$ при НЗК равен 0,1°, как было указано в п 2.2.2, а β_r при ЗК равен 0,23°.

Угол $\gamma_r = -\beta_r$ показывает, что избыток масла находится в южном сосуде, при этом уровни масла в сосудах расположены в одной плоскости, параллельной плоскости горизонта, и угол γ_r равен углу β_r , но они имеют противоположные знаки.

Наличие углов γ_r и β_r приводит к суммарному моменту $L_y = B\beta_r + C\gamma_r$, действующему относительно оси *Y*-*Y* гиросферы. Вследствие этого гиросфера прецессирует к истинному меридиану с угловой скоростью

$$\omega_{\rm p} = \frac{L_{\rm y}}{H} = \frac{B\beta_{\rm r} + C\gamma_{\rm r}}{H} = \frac{(B-C)(H\tilde{\omega}\sin\varphi)}{(B-C)H} = \tilde{\omega}\sin\varphi = \omega_2,$$

т.е. равной вертикальной составляющей угловой скорости вращения Земли, и, таким образом, главная ось ГК всегда находится в плоскости истинного меридиана.

Закон движения главной оси ЧЭ в азимуте. Для определения закона движения главной оси ЧЭ при наличии масляного успокоителя необходимо решить систему дифференциальных уравнений (2.9) относительно переменных α , β , γ . Наибольший интерес представляет закон движения главной оси гиросферы в азимуте по отношению к плоскости истинного меридиана, т.е. систему необходимо решить относительно α .

Используя методы высшей математики, решением системы относительно а является следующее уравнение [2 - 5]:

$$\alpha = C_1 e^{-mt} + A e^{-ht} \sin(\omega_d t + \psi), \qquad (2.12)$$

где C_1 – произвольная постоянная интегрирования;

А – постоянная интегрирования, определяющая начальную амплитуду колебаний оси ЧЭ по углу *α*;

m, *h* – коэффициенты затухания;

*ω*_d – круговая частота затухающих колебаний гиросферы;

ψ – начальная фаза затухающих колебаний гиросферы.

На рис. 2.10 показан общий вид кривых затухающих колебаний ЧЭ гиро-компаса.

Первое слагаемое уравнения (2.12) $C_1 e^{-mt}$ определяет апериодическое движение ЧЭ, обусловленное действием масляного успокоителя, происходящее по экспотенциальному закону. Второе слагаемое $A e^{-ht} \sin(\omega_d t + \psi) - 3$ атухающее гармоническое колебательное движение, стремящееся с течением време-

ни к нулю. Поэтому какое-либо начальное отклонение главной оси гиросферы от плоскости истинного меридиана с течением времени *t* уменьшается.



Рис. 2.10. Кривые затухающих колебаний ЧЭ гирокомпаса

У ГК типа "Курс" величина m примерно втрое > h, поэтому первый член уравнения (2.12) быстро затухает: за 80 мин. он уменьшается более чем в 100 раз. Учитывая это, кривую затухающих колебаний анализируют, соответственно отступая от начала координат, т.е. без первого члена, используя формулу

$$\alpha = A \ e^{-ht} \sin(\omega_{\rm d} t + \psi).$$

Период затухающих колебаний гиросферы в азимуте T_d и их круговая частота ω_d связаны зависимостями:

$$T_{\rm d} = \frac{2\pi}{\omega_{\rm d}} = 2\pi \sqrt{\frac{H}{(B-C)\widetilde{\omega}\cos\varphi}} ; \qquad \omega_{\rm d} = \sqrt{\frac{(B-C)\widetilde{\omega}\cos\varphi}{H}}$$

Практически, график зависимости α от t может быть получен с курсограммы прибора (при отшвартованном судне). С помощью системы ускоренного приведения в меридиан гиросферу отклоняют на $30^{\circ} - 40^{\circ}$ от меридиана при выключенных гиромоторах. Затем подают питание на гиромоторы и выключат масляный успокоитель. Гиросфера будет совершать незатухающие колебания – перо курсографа будет их вычерчивать. Спустя 1,5 – 2,0 периода, включают масляный успокоитель и получают график на курсограмме – затухающие колебания – по виду как на рис. 2.10.

С графика определяют T_d и фактор затухания f, равный отношению амплитуд колебаний через полупериод: $f = \alpha_1/\alpha_2 = \alpha_2/\alpha_3 = 2 - 6$ (для ГК типа "Курс"), которые являются показателями качества гиросферы. Сравнивая полученные данные с паспортными данными, судят о пригодности гиросферы к эксплуатации.

2.4. Девиации гирокомпаса и их учет

2.4.1. Скоростная девиация гирокомпаса

Все рассмотренные до сих пор вопросы, связанные с движением главной оси ГК (незатухающие колебания, затухающие колебания, положение динамического равновесия и др.) относились к работе гирокомпаса на неподвижном судне.

На ходу судна условия работы ГК иные. В этом случае на ГК оказывают влияние собственное движение судна, изменение его скорости и курса, качка, вызывая дополнительные отклонения оси ГК от меридиана, т.е. погрешности в его показаниях, которые при определенных условиях могут достигать значительных величин [2-5].

Эти погрешности получили названия, соответствующие причинам их возникновения. Погрешность, которая возникает вследствие движения судна с постоянной скоростью и с постоянным курсом, называется *скоростной по*грешностью или скоростной девиацией.



Рис. 2.11. Составляющие скорости судна

Движение судна однозначно задано, если известны его скорость V_c и истинный курс *ИК*. Но это движение может быть также задано в виде составляющих скорости по меридиану и параллели соответственно (рис. 2.11):

$$V_{\rm N} = V_{\rm c} \cos \mathcal{U} K$$
; $V_{\rm E} = V_{\rm c} \sin \mathcal{U} K$

На рис. 2.12 показана плоскость горизонта наблюдателя связанная с судном в точке O. Движение судна по сферической поверхности Земли, находящегося в некоторой широте φ , задано составляющими $V_{\rm N}$ и $V_{\rm E}$.

Составляющая линейной скорости V_N направлена по дуге большого круга с радиусом Земли \tilde{R} . Это приводит к возникновению угловой скорости ω_N ,

вектор которой направлен по линии EW в данном случае к W (из конца вектора ω_N направление вектора V_N наблюдается против хода часовой стрелки):

$$\omega_{\rm N} = \frac{V_{\rm N}}{\widetilde{R}}.$$

Перемещаясь по параллели (по дуге малого круга радиусом *r*) с составляющей линейной скорости V_E, судно совершает движение по поверхности Земли с угловой скоростью

$$\omega_{\rm E} = \frac{V_{\rm E}}{r} = \frac{V_{\rm E}}{\widetilde{R}\cos\varphi}$$



Рис. 2.12. Составляющие угловых скоростей горизонтной системы координат при движении судна по поверхности Земли

Видно, что вектор $\omega_{\rm E}$ совпадает по направлению с вектором угловой скорости вращения Земли $\tilde{\omega}$. Как известно, ω_1 и ω_2 являются соответственно горизонтальной и вертикальной составляющими угловой скорости вращения плоскости истинного горизонта (см. п. 2.1.1.)

Движение судна по параллели, подобно суточному вращению Земли, вызывает вращение плоскостей истинного горизонта и меридиана наблюдателя в пространстве. Горизонтальную и вертикальную составляющие этого дополнительного вращения найдем, спроецировав ω_E на полуденную линию NS и отвесную *zn*. Из рисунка 2.12 имеем:

$$\omega_{\rm E_1} = \omega_{\rm E} \cos \varphi = \frac{V_{\rm E}}{\tilde{R}} \quad ; \omega_{\rm E_2} = \omega_{\rm E} \sin \varphi = \frac{V_{\rm E}}{\tilde{R}} tg\varphi \quad .$$



Наибольший интерес представляет тот факт, что в плоскости истинного горизонта оказались три составляющие угловых скоростей – ω_1 , ω_{E1} и ω_N . Если раньше (при неподвижном основании ГК) главная ось ЧЭ удерживалась в положении равновесия в вертикальной плоскости истинного меридиана, содержащей только вектор угловой скорости ω_1 , то теперь (при движении судна) эта плоскость содержит вектор равнодействующей составляющих угловых скоростей – вектор ω_{Σ} (рис. 2.13).

Рис. 2.13. Скоростная девиация гирокомпаса

Главная ось гиросферы не обладает избирательностью и установится по результиру-

ющей ω_{Σ} , то есть, отклонится от плоскости истинного меридиана на некоторый угол δ_{ν} , называемый *скоростной девиацией*. Указанная плоскость получает название плоскости *гирокомпасного меридиана*, т.к. именно в этом направлении будет расположена главная ось ЧЭ гирокомпаса.

Найдем угловое отклонение δ_v оси ЧЭ от плоскости истинного меридиана, обращая внимание на то, что знак "минус" при ω_N означает, что при заданных исходных условиях угол δ_v имеет западное наименование:

$$\operatorname{tg} \delta_{v} = -\frac{\omega_{N}}{\omega_{1} + \omega_{E_{1}}} = -\frac{V_{N}/\tilde{R}}{\tilde{\omega}\cos\varphi + V_{E}/\tilde{R}}$$

или, умножая числитель и знаменатель на \widetilde{R} , получим

$$\operatorname{tg} \delta_{v} = -\frac{V_{\rm N}}{\widetilde{R}\widetilde{\omega}\cos\varphi + V_{\rm E}} = -\frac{V_{\rm c}\cos UK}{\widetilde{R}\widetilde{\omega}\cos\varphi + V_{\rm c}\sin UK} \,. \tag{2.13}$$

Из последней формулы и рис. 2.13 видно, что скоростная девиация δ_v имеет полукруговой характер, как это представлено на рис 2.14, где показано также сложение векторов ω_N и ω_{E1} с вектором ω_1 для главных курсов.

Для определения погрешности курса δ_v по формуле (2.13), необходимо знать истинное значение последнего. Поэтому формулу скоростной девиации удобнее выразить в функции гирокомпасного курса (*ГКК*). С этой целью $tg\delta_v$ выразим через отношение $sin\delta_v/cos\delta_v$ и вместо *ИК* подставим известное общее соотношение $MK = \Gamma KK + \delta_v$.

После несложных преобразований формула (2.13) приобретает вид:



Рис. 2.14. Зависимость скоростной девиации от истинного курса судна

При скоростях, не превышающих 25 уз, и широтах плавания не выше 80° скоростная девиация имеет значение, не превышающее 10°. Поэтому допустимо считать, что $\sin \delta_v \approx \delta_v$, а с учетом того, что $\tilde{R} \tilde{\omega} = 900$ уз (линейная скорость точек экватора, обусловленная вращением Земли), получим формулу более удобную для ее практического использования непосредственно в градусах:

$$\delta_{\nu} = -\frac{V_{\rm c} \, \cos \Gamma K K}{900 \cos \varphi} \times 57.3^{\circ} \,. \tag{2.14}$$

Так, при исходных данных: $V_c = 25$ уз.; $\Gamma K K = 180^{\circ}$; $\varphi = 70^{\circ}$ скоростная девиация составит: $\delta_v = +4,7^{\circ}$ (4,7°E).

Основные закономерности проявления скоростной девиации, вытекающие из анализа формулы (2.14), состоят в следующем.

1. Возникновение скоростной девиации обусловлено наличием у судна северной составляющей скорости движения V_N при этом: на северных курсах девиация отрицательна и имеет западное наименование; на южных курсах девиация положительна и имеет восточное наименование.

2. Девиация линейно зависит от скорости судна V_c.

3. Девиация имеет полукруговой характер зависимости от компасного курса: максимальное абсолютное значение на курсах 0° и 180° ; нулевое – на курсах 90° и 270° .

4. Зависимость скоростной девиации от широты определяется функцией $1/\cos\varphi = \sec\varphi$, поэтому особенно резкое увеличение ее численного значения происходит в широтах выше 70°.

5. Девиация зависит от широты плавания, скорости и курса судна и не зависит от каких-либо параметров гирокомпаса и поэтому она *одинаково присуща гирокомпасам всех типов*.

В условиях плавания скоростная девиация учитывается путем ее исключения из показаний репитеров с помощью корректора. Так, в гирокомпасах типа "Курс" используется полуавтоматический электромеханический корректор. Следует заметить, что главная ось ГК продолжает оставаться в плоскости гирокомпасного меридиана (в положении динамического равновесия), а с датчика курса, в результате работы корректора и следящей системы прибора, поступает значение истинного курса.

В современных системах курсоуказания, снабженных микропроцессором, информация о курсе на репитерах (аналоговых и цифровых) свободна от влияния скоростной девиации – коррекция производится непрерывно и автоматически.

2.4.2. Девиации гирокомпаса на маневрирующем судне

Поведение гирокомпаса на маневре. Как было установлено ранее, всем гирокомпасам присуща скоростная девиация. Методы ее коррекции могут быть различны и точность определения последней зависит от точности знания параметров движения судна и широты его места. По этой причине скоростная девиация не может являться показателем качества гирокомпаса, а именно, его точностных характеристик.

Совершенно иначе обстоит дело с влиянием маневрирования судна на ГК. Именно в зависимости от этого влияния определяется действительный класс его точности.

Под маневром судна условимся понимать изменение его скорости, курса или того и другого одновременно.

В любом из этих случаев у основания гирокомпаса появляется линейное ускорение, которому подвержен и чувствительный элемент. Наиболее сильное воздействие на чувствительный элемент гирокомпаса оказывает составляющая линейного ускорения, действующая вдоль меридиана.

Для простоты рассуждений представим, что судно совершает маневр изменением скорости (пусть скорость увеличивается от малого хода вперед до полного) вдоль меридиана в северном направлении.

На рис. 2.15 изображена одногироскопная модель ЧЭ – гиросфера со смещенным центром масс в точке G. Будем считать, что до начала маневра ось X-X чувствительного элемента находилась в положении равновесия, указывая плоскость компасного меридиана $N_{\kappa 1}$, при этом она была отклонена от истинного меридиана на угол скоростной девиации δ_{v1} , соответствующей началу маневра.

При данном маневре все элементы судна, в том числе и гиросфера, будут испытывать ускорение. Вектор ускорения j_N направлен к N_u .

Сила инерции $F_{\rm S}$, вызванная ускорением $j_{\rm N} = \dot{V}_{\rm N}$, приложена к центру масс ЧЭ, всегда направлена в сторону, противоположную ускорению и равна по величине (в соответствии со вторым законом Ньютона) $F_{\rm S} = -m\dot{V}_{\rm N}$, где m – масса ЧЭ.



Рис. 2.15. Инерционное смещение главной оси ЧЭ

Расстояние *a* (метацентрическая высота) от точки подвеса гиросферы *O* до точки *G* является плечом действия силы F_S вокруг оси *Y*–*Y* ЧЭ, следовательно, создается момент этой силы $L_y = F_S a$.

Момент внешней силы (силы инерции) L_y располагается на оси Y-Y (так, чтобы из конца вектора L_y действие силы F_S наблюдалось против часовой стрелки) и вызывает прецессию ЧЭ вокруг оси Z-Z: вектор H стремится к L_y в горизонтальной плоскости кратчайшим путем.

Прецессионное движение ЧЭ, возникающее под действием момента сил инерции, называется инерционной прецессией.

Вследствие инерционной прецессии, которая будет иметь место только в течение времени маневра Δt (а после окончания маневра прекращается) главная ось ЧЭ переместится в горизонтальном направлении на некоторый угол.

Определим величину этого перемещения.

Создаваемый момент L_у приведем к виду

$$L_{\rm y} = F_{\rm S} a = -maV_{\rm N},$$

ИЛИ

$$L_y = -m ga \frac{\dot{V}_N}{g} = -\frac{B}{g} \dot{V}_N,$$

где $B = mga = \text{const} - \text{максимальный момент силы тяжести ЧЭ или модуль ма$ ятникового момента (см. п. 2.1.3).

Угловая скорость инерционной прецессии в соответствии с формулой (1.1)

$$\omega_{\rm pz} = \frac{L_y}{H} = -\frac{B}{Hg} \dot{V}_{\rm N} \,.$$

Угол $\Delta \alpha$, на который ЧЭ повернется в горизонтальной плоскости (вокруг оси Z–Z) в результате инерционной прецессии, называется инерционным перемещением гиросферы:

$$\Delta \alpha = -\frac{B}{Hg} \dot{V}_{N} \Delta t = -\frac{B}{Hg} (V_{N2} - V_{N1}) = -\frac{B}{Hg} \Delta V_{N}, \qquad (2.15)$$

так как ускорение $j_N = \dot{V}_N = (V_{N2} - V_{N1})/\Delta t$ есть изменение скорости судна ΔV_N за время Δt вдоль меридиана от начала маневра в t_1 до его окончания в t_2 .

Знак минус означает, что инерционное перемещение происходит к западу. После завершения маневра вектор *H* кинетического момента ЧЭ укажет новое положение компасного меридиана N_{к2}.

Апериодический переход и его условие. При любом маневрировании судна курсом и (или) скоростью возникает горизонтальное ускорение. На гирокомпас может влиять только составляющая этого ускорения $j_N = \dot{V}_N$ вдоль меридиана. Из рассмотренного выше ясно, что до момента t_1 начала маневра положение динамического равновесия гирокомпаса характеризуется значением его скоростной девиации δ_{v1} , а после момента t_2 завершения маневра – значением δ_{v2} . Так что, за время маневра от t_1 до t_2 положение равновесия изменяется на угол $\Delta \delta_v = \delta_{v2} - \delta_{v1}$ и его новым значением будет δ_{v2} . Напомним, скоростная девиация δ_v как до, так и после маневра, исключается из показаний репитеров гирокомпаса.

Одновременно с этим, как отмечалось выше, за время маневра от t_1 до t_2 происходит инерционное смещение главной оси гирокомпаса в ту же сторону на угол $\Delta \alpha$ (из точки *1* в точку 2 на рис. 2.16). При этом к моменту окончания маневра в t_2 возможно выполнение одного из трех условий:

1)
$$\Delta \alpha < \Delta \delta_{\nu}$$
; 2) $\Delta \alpha = \Delta \delta_{\nu}$; 3) $\Delta \alpha > \Delta \delta_{\nu}$.

Рассмотрим случай 2), когда $\Delta \alpha = \Delta \delta_{\nu}$, т.е. когда угловое перемещение прецессионного движения гиросферы, вызванное действием сил инерции при маневрировании, равно изменению скоростной девиации. Это наиболее благо-приятное для судовождения условие, когда гирокомпас к концу маневра в момент t_2 сразу оказывается в новом положении равновесия и никаких колебаний оси в дальнейшем не происходит. Такой переход гирокомпаса в новое положение динамического равновесия называют *апериодическим переходом главной оси чувствительного элемента гирокомпаса* (изображен на рис. 2.16 сплошной линией, проходящей через точку 2 и указывающей направление компасного меридиана N_к2).

Поскольку углы $\Delta \alpha$ и $\Delta \delta_v$ имеют различную физическую природу, обеспечение равенства $\Delta \alpha = \Delta \delta_v$ возможно только при выполнении некоторого условия.



Рис. 2.16. Апериодический переход и инерционная девиация первого рода

Условие апериодического перехода, имеющее важное значение в теории и практике гирокомпасов, было определено в 1910 г. немецким ученым, профессором Максом Шулером (1882 – 1972) и поэтому его часто называют условием (теоремой) М. Шулера.

Найдем это условие используя формулы (2.14) и (2.15).

Изменение скоростной девиации за время маневра

$$\Delta \delta_{\nu} = \delta_{\nu_2} - \delta_{\nu_1} = -\frac{V_2 \cos KK_2}{\widetilde{R} \,\widetilde{\omega} \cos \varphi} + \frac{V_1 \cos KK_1}{\widetilde{R} \,\widetilde{\omega} \cos \varphi} = -\frac{\Delta V_N}{\widetilde{R} \,\widetilde{\omega} \cos \varphi}, \qquad (2.16)$$

где $\Delta V_{\rm N} = V_2 \cos KK_2 - V_1 \cos KK_1$ – изменение меридиональной составляющей скорости судна за время маневра Δt .

Тогда
$$-\frac{B\Delta V_N}{Hg} = -\frac{\Delta V_N}{\widetilde{R}\widetilde{\varpi}\cos\varphi}.$$
 (2.17)

Возможное сокращение на значение ΔV_N имеет важный физический смысл, состоящий в том, что условие, которое будет найдено, не зависит от вида маневра, т.е. является инвариантным к приращению северной составляющей скорости, возникающему в процессе маневрирования.

Выражение (2.17) преобразуется по свойству пропорций к виду

$$\frac{H}{B\,\widetilde{\omega}\cos\varphi} = \frac{\widetilde{R}}{g}\,.$$

Извлекая из правой и левой частей, полученного равенства, квадратные корни и умножая результат на 2π , получим:

$$2\pi \sqrt{\frac{H}{B\tilde{\omega}\cos\varphi}} = 2\pi \sqrt{\frac{\tilde{R}}{g}}.$$
(2.18)

В левой части равенства (2.18) находится известное выражение для периода T_0 собственных незатухающих колебаний ГК (2.6). В правой части – выражение, которое можно трактовать как период T_* собственных незатухающих колебаний математического маятника, длина нити которого равна радиусу Земли \tilde{R} .

В соответствии с этим выражение (2.18) в наиболее краткой форме принимает вид

$$T_{\rm o} = T_*$$

и представляет собой искомое условие апериодических переходов гирокомпасов.

Таким образом, для того, чтобы главная ось ЧЭ из положения равновесия до маневра перешла в новое положение равновесия после маневра, не совершая при этом каких-либо колебаний, необходимо и достаточно период собственных колебаний ГК сделать равным периоду колебаний математического маятника, длина нити которого равняется радиусу Земли.

Если подставить в (2.18) \tilde{R} =6378 км и g = 9,81м/сек², то получим период М. Шулера T_* = 84,4 мин.

Если этому числу равен период незатухающих колебаний T_0 гирокомпаса, то его переход в новое положение динамического равновесия после маневра происходит апериодически.

Из формулы (2.18) видно, что при неизменных параметрах гиросферы H и B условие или период М.Шулера, а следовательно, и апериодический переход, может выполняться только в определенной расчетной широте φ_* . Расчетной широтой гирокомпаса «Курс - 4» российского производства является $\varphi_* = 60^{\circ}$. В Германии φ_* принята равной 54°, в Англии – 52°, в США – 40°.

То есть, при выполнении условия апериодического перехода инерционная девиация, как результат воздействия сил инерции, приложенных к смещенному центру масс гиросферы, не возникает. Гиросфера занимает устойчивое положение, определяемое лишь изменением скоростной девиации.

Данное условие было реализовано в моделях гирокомпасов российского производства "Курс-5" и "Курс-10". Так, в гирокомпасе "Курс-10" регулировка периода *T*₀ выполнялась за счет изменения параметра *H*. Это достигалось путем

электромеханического сведения или разведения осей вращения двух связанных между собой гироскопов внутри гиросферы в зависимости от широты плавания (см. рис. 2.23 и 2.24). Такой прием позволял использовать гирокомпас в качестве апериодического в диапазоне широт от $\varphi_1 = 20^\circ$ до $\varphi_2 = 80^\circ$. В настоящее время гирокомпасы данного типа из-за их невысокой эксплуатационной надежности не применяются.

Инерционная девиация первого рода. Современные гирокомпасы с автономным чувствительным элементом являются не апериодическими и для них, как было установлено выше, условие апериодического перехода выполняется только в расчетной широте φ_* .

Инерционное перемещение оси ЧЭ $\Delta \alpha$ и приращение скоростной девиации $\Delta \delta_{\nu}$ в одинаковой мере зависят от характера выполняемого маневра (изменения ΔV_N), однако, $\Delta \delta_{\nu}$ зависит еще и от широты плавания. Если условия маневра неизменны, то инерционное смещение будет одинаковым в любой широте и главная ось окажется в положении, определяемом точкой 2 (рис. 2.16).

Но в широте $\varphi < \varphi_*$ установившееся значение скоростной девиации $\delta_{\nu 2(<)}$ к концу маневра будет меньшим, чем инерционное смещение оси. Совершая затухающие колебания, ось в дальнейшем будет устремляться к новому положению динамического равновесия $N_{\kappa 3}$.

При выполнении маневра в широте выше расчетной ($\varphi > \varphi_*$), изменение скоростной девиации $\delta_{\nu_2(>)}$ будет большим, чем инерционное перемещение оси. Ось прибора будет прецессировать (из точки 2 на рис. 2.16) к новому гироско-пическому меридиану N_{к4}.

То есть при маневрировании одновременно происходят два события: изменяется равновесное положение гироскопического меридиана и реальное прецессионное движение гиросферы под действием сил инерции. После завершения маневра, объективно возникающие затухающие колебания, приведут ее в новое равновесное положение.

Таким образом, маневрируя в широте φ не равной $\varphi_* \Delta \alpha \neq \Delta \delta_{\nu}$. Это несоответствие, достигающее своего максимального значения в конце маневра, и определяет *инерционную девиацию первого рода* δ_j^{I} . Затем при работающем масляном успокоителе она постепенно исчезает и ось ЧЭ устанавливается в положение, обусловленное необходимым приращением скоростной девиации.

Исходя из формул (2.15) и (2.16), получим

$$\delta_j^{\rm I} = \Delta \alpha - \Delta \delta_v = -\frac{B \Delta V_{\rm N}}{Hg} + \frac{\Delta V_{\rm N}}{\widetilde{R} \,\widetilde{\omega} \cos \varphi} \,. \tag{2.19}$$

Выполнив несложные преобразования выражения (2.19) с учетом формулы (2.18), в итоге получим

$$\delta_j^{I} = (\delta_{v_2} - \delta_{v_1}) \left(\frac{T_*^2}{T_o^2} - 1 \right).$$

Этот вариант формулы для δ_j^{I} наиболее четко отражает причину появления инерционной девиации первого рода, – существование неравенства периода T_0 гирокомпаса периоду М.Шулера T_* .

Из преобразований выражения (2.18) можно получить еще один вариант формулы, удобной для расчета:

$$\delta_j^{I} = \left(\delta_{\nu_2} - \delta_{\nu_1}\right) \left(\frac{\cos\varphi}{\cos\varphi_*} - 1\right).$$

Знак девиации δ_j^{I} зависит от разности значений скоростных девиаций в конце и начале маневра, а также от различия между широтами плавания и расчетной.

Приведем пример [5].

Рассчитать значения $\Delta \alpha$, $\Delta \delta_{\nu}$ и δ_{j}^{I} для маневра набора скорости от 0 до 25 уз на курсе 0° в широтах φ , равных 0, 60 и 80°.

Для гирокомпаса "Курс-4": B = 0,657 Н·м; H = 15,55 Н·м·с; характеристика маневра: $\Delta V_{\rm N} = 25$ уз = 12,85 м·с⁻¹; g = 9,81 м·с⁻². В результате по формуле (2.15) получим $\Delta \alpha = -3,2^{\circ}$. Значение величины $\Delta \delta_{\nu}$ рассчитываем по формуле (2.14). Используя значения $\tilde{R} = 6,378 \cdot 10^6$ м; $\tilde{\omega} = 7,29 \ 10^{-5} \ c^{-1}$, найдем

$$\Delta \delta_{\nu(\varphi=0^{\circ})} = -1.6^{\circ}; \quad \Delta \delta_{\nu(\varphi=60^{\circ})} = -3.2^{\circ}; \quad \Delta \delta_{\nu(\varphi=80^{\circ})} = -9.2^{\circ}.$$

Окончательно имеем

 $\delta^{\mathrm{I}}_{j_{(\varphi=0^{o})}} = -1.6^{o}; \quad \delta^{\mathrm{I}}_{j_{(\varphi=60^{o})}} = 0.0^{o}; \quad \delta^{\mathrm{I}}_{j_{(\varphi=80^{o})}} = 6^{o}.$

Можно сформулировать следующие основные особенности инерционной девиации первого рода.

1. Возникновение ее обусловлено силами инерции, возникающими при маневрировании, и определяется пониженным центром масс ЧЭ.

2. Проявляется у неапериодических ГК, если судно маневрирует не в расчетной широте ($\phi \neq \phi_*$) так, что изменяется меридиональная составляющая ΔV_N его скорости.

3. Возникает в момент начала маневра, практически линейно увеличивается и достигает максимальной величины в момент окончания маневра.

4. Максимальное значение пропорционально величине ΔV_N и тем больше, чем больше широта места судна φ отличается от расчетной φ_* , а знак этого значения одинаков со знаком ΔV_N при $\varphi > \varphi_*$.

5. Наибольшую величину имеет при поворотах судна с курса N на курс S и обратно; в этих случаях на быстроходных судах и в высоких широтах она может быть $5^{\circ} - 6^{\circ}$ и больше.

6. После завершения маневра δ_j^{I} колебательно уменьшается с периодом затухающих колебаний T_d под действием масляного успокоителя.

7. Инерционная девиация не возникает в расчетной широте $\varphi_* = 60^{\circ}$ (для ГК типа "Курс" $T_{\circ} = 84,4$ мин).

8. Получить в "чистом виде" можно при выключении затухания перед началом маневра.

9. Предотвратить можно при выполнении равенства $T_0 = T_*$.

Инерционная девиация второго рода. Наличие жидкости в сосудах успокоителя при действии сил инерции влияет на переход главной оси в новое положение динамического равновесия и, следовательно, приводит к погрешностям в показаниях ГК.

Погрешность, возникающая при маневре судна из-за наличия в чувствительном элементе гирокомпаса включенного масляного успокоителя, называется инерционной девиацией второго рода.

Пусть характер выполнения маневра будет таким же, как и в предыдущем примере (рис. 2.16) с той лишь разницей, что маневр совершается в расчетной широте $\varphi_* = 60^{\circ}$. Инерционной погрешности первого рода в этом случае не возникает ($T_o = 84,4$ мин.). Главная ось прибора должна будет совершить апериодический переход в новое положение гироскопического меридиана $N_{\kappa 2}$ – к точ-ке 2, как показано на рис. 2.17.

В то же время, поскольку сосуды успокоителя не перекрыты, под действием сил инерции F_S масло начнет перетекать из северного сосуда в южный. В южном сосуде постепенно будет увеличиваться избыток жидкости, момент силы тяжести которого L_{x} действует так же вокруг оси Y-Y, но в противоположном моменту L_y направлении. Следовательно, скорость инерционного движения (под действием момента L_y) замедлится и главная ось ЧЭ к концу маневра не дойдет до нового положения $N_{\kappa 2}$, а займет позицию в точке 3 (рис. 2.17). В показаниях прибора появится инерционная погрешность второго рода δ_i^{Π} .



Рис. 2.17. Инерционная девиация второго рода

В момент окончания маневра сила инерции F_S становится равной нулю, перетекание масла из северного сосуда в южный прекратится, исчезнет момент L_y , вызывающий инерционное перемещение главной оси ЧЭ к N_{к2}. Однако, существующий избыток жидкости в южном сосуде еще будет создавать момент L_x , который будет постепенно (обусловлено вязкостью жидкости и конструкцией успокоителя) уменьшаться, но сохраняя при этом свой прежний знак. В течение четверти периода ($T_d/4$) ось гиросферы будет все дальше отходить в сторону первоначального положения гироскопического меридиана N_{к1}, уменьшая скорость своего движения. Вследствие выравнивания уровней масла в сосудах успокоителя указанное движение прекратится (точка 4); инерционная погрешность второго рода достигает своего максимального значения $\delta_j^{II}_{max}$. В этом положении последствия маневра исчезают и главная ось, совершая затухающие колебания, придет в новое положение гироскопического меридиана N_{к2}.

Инерционная девиация второго рода в обычных условиях плавания не превышает $\pm 0,5^{\circ}$, однако на быстроходных судах и при значительных изменениях курса (скорости) она может достигать 5°. Для ее устранения в некоторых конструкциях гирокомпасов предусмотрен выключатель затухания, перекрывающий на время маневра соединительную трубку сосудов успокоителя (ВЗ на рис. 2.8).

Сформулируем основные особенности инерционной девиации второго рода.

1. Причина появления – наличие не выключенного демпфирующего устройства (гидравлического успокоителя колебаний).

2. Достигает своего максимального значения по времени примерно через четверть периода затухающих колебаний (*T*_d/4) после окончания маневра – запаздывающая погрешность.

3. Величина зависит только от характера маневра и не зависит от широты места.

4. Максимум всегда направлен в сторону первоначального гирокомпасного меридиана

5. Проявляется в "чистом" виде у неапериодических гирокомпасов в расчетной широте.

6. Предотвращение возникновения обеспечивается выключением на время маневра успокоителя колебаний: если $\varphi > \varphi_*$, то использование выключателя затухания целесообразно; если $\varphi < \varphi_*$ то использование выключателя затухания неэффективно.

2.4.3. Суммарная инерционная девиация

Как правило, двухгироскопные ГК, находящиеся в эксплуатации на судах морского флота, являются не апериодическими и, кроме того, не все они имеют выключатель затухания. Это означает, что в общем случае при маневрированиях в показаниях ГК будут возникать одновременно инерционная девиация как первого рода так и второго рода. Результирующая этих девиаций и называется суммарной инерционной девиацией δ_j^{Σ} , которую следует учитывать в течение некоторого интервала времени после завершения маневра.

На рис 2.18 приведены примеры графиков, характеризующих суммарную инерционную девиацию гирокомпаса "Курс-4" при маневре, состоящем в набо-

ре скорости от 0 до 25 узлов на курсе 180° в течение 360 сек [3, 5].

Подробное исследование δ_j^{Σ} показывает, что ее характер зависит от соотношения широт: расчетной φ * и фактической широты φ маневра.

В широте $\varphi < \varphi_*$ девиации δ_i^{I} и δ_i^{II} в течение первой четверти периода за-



Рис. 2.18. Примеры графиков суммарной инерционной девиации

тухающих колебаний противоположны по знаку и близки по величине, поэтому они будут взаимно погашаться. Следовательно, в широтах меньших расчетной нецелесообразно выключать затухание на время маневра.

Если же $\varphi > \varphi^*$, то в течение первой четверти периода погрешности δ_j^{I} и δ_j^{II} имеют одинаковые знаки и суммарная погрешность может быть весьма ощутимой. В этом случае при маневре целесообразно выключать затухание.

Начальное значение суммарной инерционной погрешности может достигать значительных величин в высоких широтах. Она затем медленно уменьшается из-за большого периода затухающих колебаний гирокомпаса.

Начальная фаза затухающих колебаний δ_j^{Σ} , а также ее величина и знак на момент завершения маневра зависят не только от широты плавания, как было сказано, но и от параметров маневра. Поэтому в каждом конкретном случае кривая δ_j^{Σ} может начинаться как из области отрицательных значений, так и из положительных либо с нулевых.

Определенный интерес представляет влияние повторных маневров на показания гирокомпаса. Если судно совершает ряд маневров, следующих один за другим через интервалы времени меньшие, чем это необходимо для того, чтобы δ_j^{Σ} от каждого предыдущего маневра практически исчезла до начала следующего, то ЧЭ ГК как бы "запоминает" девиацию от каждого отдельного маневра. Вследствие этого результирующая девиация представляет собой итог наложения всех составляющих δ_i с учетом времени возникновения каждой. Анализ показывает, что возможна такая последовательность маневров, при которой результирующая девиация может достичь своего максимального значения в 2 – 2,5 раза превышающего значение δ_j при однократном маневре. Это может произойти при маневрировании вдоль меридиана, где ΔV_N имеет наибольшее значение при данной скорости, и если промежутки времени между маневрами примерно равны половине периода T_d затухающих колебаний ГК в данной широте [5].

Хотя приведенная последовательность маневрирования в реальных условиях плавания маловероятна, тем не менее, факт возможности накопления девиации при определенных условиях существует и это обстоятельство следует принимать во внимание, особенно при маневрировании в высоких широтах.

Получение достоверных таблиц или графиков суммарной инерционной девиации представляет значительные трудности, да и их применение по ряду причин совершенно не оправдано.

Наиболее просто оценить влияние δ_j^{Σ} можно, вычислив предварительно перед маневром изменение меридиональной составляющей скорости судна по формуле

$$\Delta V_{\rm N} = V_2 \cos K K_2 - V_1 \cos K K_1,$$

где V_2 , KK_2 и V_1 , KK_1 – значения скорости и курса судна соответственно после и до маневра.

Если $\Delta V_{\rm N} = 5 - 7$ узлов, то суммарная девиация ГК незначительна и может не приниматься в расчет. Если $\Delta V_{\rm N} > 7$ уз, то тогда δ_j^{Σ} следует принимать во внимание, о чем подробнее будет указано ниже.

Учет суммарной инерционной девиации при обсервациях. Из приведенных графиков на рис 2.16 видно, что в результате маневрирования еще в течение 1,5 – 2 часов имеется ощутимая погрешность в показаниях гирокомпаса. В некоторых случаях, особенно в течение первого полупериода колебаний главной оси ЧЭ после завершения маневра, она может достигать значительной величины.

Наличие этой погрешности следует иметь в виду при определении места судна по гирокомпасным или радиолокационным пеленгам (гирокомпас связан с радиолокатором), так как δ_j^{Σ} гирокомпаса полностью войдет в погрешность измерения пеленгов.

Пусть при определении места судна по двум пеленгам M_0 – истинное место (рис. 2.19), через которые проходят безошибочные линии положения, пересекающиеся под углом θ . Радиальная средняя квадратическая погрешность (с.к.п.) определения этого места оценивается по формуле

$$M = \frac{m_{\rm TKII}}{57,3\sin\theta} \sqrt{D_1^2 + D_2^2},$$
 (2.20)

где *т*_{ГКП} – с.к.п. измерения гирокомпасного пеленга;

 θ – угол между пеленгами;

 D_1 и D_2 – расстояния до ориентиров.

Приведем пример. Расстояния до ориентиров O_1 и O_2 равны соответственно: $D_1 = 12$ миль; $D_2 = 15$ миль; $\theta = 50^\circ$; $m_{\Gamma K\Pi} = 0,7^\circ$. Подставив эти данные в (2.20) определяем, что радиальная с.к.п. места судна равна 0,3 мили, а ее удвоенное значение 2*M* (вероятность 95%) составляет 0,6 мили. Здесь еще следует учесть с.к.п. определения поправки гирокомпаса $\Delta \Gamma K$, которая имеет значение соизмеримое с $m_{\Gamma K\Pi}$, и с.к.п. графических построений при прокладке пеленгов на карте [8 - 11].

Если же обсервацию необходимо произвести вскоре после маневра, то результаты измерения пеленгов будут отягощены погрешностью δ_J^{Σ} . Ее величина и знак будут зависеть от характера выполненного маневра и от широты плавания. Тогда при прокладке пеленгов $O\Gamma K\Pi_1$ и $O\Gamma K\Pi_2$ на карте будет получена точка M_1 с уже упомянутой с.к.п., и оцениваемое место судна получает смещение обсервации M_0M_1 . Величину смещения нетрудно найти из треугольника M_0NM_1 , определив стороны NM_0 и NM_1 .

Для примера считаем, что сразу после завершения маневра суммарная инерционная девиация равна $4,0^{\circ}$. При тех же значениях $D_1 = 12$ миль, $D_2 = 15$ миль и угле между пеленгами $\theta = 50^{\circ}$ величина смещения обсервации $M_{\circ}M_1$, обусловленная влиянием только лишь инерционной погрешности, составит 0,8 мили.



Рис.2.19. Учет суммарной инерционной девиации при обсервациях

На рис. 2.19 показаны два варианта маневра (считаем, что широта плавания $\varphi > \varphi *$): первый – уже рассматриваемый нами набор скорости во времени от t_1 до t_2 на курсе *ИК1*, а второй – поворот с курса *ИК2* на курс *ИК1*. В обоих случаях ΔV_N будет иметь положительный знак, приращение скоростной девиации $\Delta \delta_v$ окажется большим, чем инерционное перемещение $\Delta \alpha$ оси ЧЭ. Для данных условий полученное значение суммарной инерционной девиации будет положительным (см. рис.2.16). Измеренные *ОГКП*₁ и *ОГКП*₂ уже будут содержать δ_t^{Σ} и при их прокладке на карте будет получена точка *M*₁.

Этот пример иллюстрирует возможную погрешность в определении места судна вследствие инерционной девиации гирокомпаса. Но поскольку действительное значение δ_j^{Σ} в реальных условиях плавания неизвестно, то данный вид наблюдений рекомендуется производить до маневра или спустя 1,5 – 2,0 часа после маневра.

Поперечное смещение судна. Так как в показаниях ГК в результате маневрирования судна возникает инерционная девиация, существующая определенное время, то это значит, что судно, управляемое по гирокомпасу, в течение этого времени будет следовать неверным курсом – отличным от заданного. В таких условиях неизбежно появится поперечное линейное, иначе говоря, боковое смещение по отношению к линии пути, проложенного на карте.

На (рис. 2.20, *a*) приведен для примера типичный график инерционной девиации и по отмеченным на нем характерным моментам времени t_1 и t_2 построена интегральная кривая, характеризующая боковое смещение судна (рис. 2.20, *б*).



Ось абсцисс нового графика одновременно является и осью времени, и той линией пути, которая проложена на карте и по отношению к которой возникает поперечное линейное смещение судна. К моменту времени t_1 , поскольку девиация имеет неизменный знак, смещение судна достигает максимального значения $d_{1\text{max}}$ в данном случае влево от намеченного пути.

К моменту времени t_2 , вследствие того, что девиация изменяет свой знак, не только компенсируется все смещение, возникающее к моменту t_1 , но и достигает максимального значения смещения противоположного знака d_{2max} . Последующие максимумы малы и их игнорируют.

Рассчитав смещения $d_{1\max}$ и $d_{2\max}$ на моменты t_1 и t_2 соответственно, можно определить максимальную ширину полосы $d_{\max} = d_{1\max} + d_{2\max}$, которую за-хватит судно в процессе движения.

Из примера на рис. 2.20, δ видно, что d_{max} составит примерно 0,7 кб. На рис. 2.20, ϵ отражены выполнение маневра судна в интервале времени от t_{H} до t_{K} и его последующее перемещение в этой полосе шириной d_{max} .

Отсюда вытекает, что если выдерживать заданный курс *3К* по показаниям гирокомпаса после маневра, то судно будет отклоняется в обе стороны от линии курса, захватывая полосу, которую называют полосой сноса или *полосой безопасного движения*. Это необходимо учитывать особенно при плавании в стесненных условиях, например в узкостях, мелководных районах, вблизи затонувших объектов.

Ширина полосы зависит от характера маневра и от широты плавания. Конечное боковое смещение через 1,5 – 5,0 часа после маневра соответственно в широтах от 0° до 80° практически обращается в нуль.

Практические рекомендации по снижению влияния суммарной инерционной девиации гирокомпаса на точность и безопасность судовождения.

Как уже отмечалось, большинство гирокомпасов являются неапериодическими. При маневрировании судна не в расчетной широте, когда изменяется составляющая скорости ΔV_N вдоль меридиана, у них появляется переменная суммарная инерционная девиация. Девиация возникает в момент начала маневрирования, достигает максимума вскоре после его завершения, а затем уменьшается с частотой затухающих колебаний гирокомпаса.

Вычисление инерционной девиации и исключение ее введением поправки в показания гирокомпаса в практике современного судовождения не применяется. Объясняется это тем, что теория вопроса и основанные на ней формулы приблизительны, параметры конкретного гирокомпаса не вполне совпадают с номинальными расчетными и подвержены изменениям и, наконец, ускорения при маневрировании судна недоступны простым измерениям.

В целях снижения инерционных девиаций на точность и безопасность судовождения могут быть предложены следующие практические рекомендации, которые соответствуют требованиям РШСУ – 98 [5,11].

1. Поправку гирокомпаса целесообразнее всего определять на стоянке перед выходом судна в море по береговым ориентирам, когда это можно выполнить с максимально возможной степенью точности.

2. Систематическую проверку стабильности поправки гирокомпаса во время плавания надо выполнять в условиях, когда судно не менее 1,5 – 2,0 ч., а в высоких широтах не менее 3,0 ч., следует неизменным курсом с неизменной скоростью.

3. Сличение показаний гирокомпаса и магнитного компаса выполнить сразу после окончания поворота на тот случай, чтобы знать поправку магнитного компаса хотя бы с точностью до значения инерционной девиации, если гирокомпас выйдет из строя. Затем сличение показаний выполнить через 1,5 – 2,0 ч. и полученную поправку магнитного компаса принимать к учету в дальнейшем.

4. В течение 1,5 – 2,0 ч. после маневра не следует полагаться на обсервации по двум пеленгам, отдавая предпочтение способам определения места, не зависящим от гирокомпаса, например, по радиолокационным расстояниям.

5. Определение девиации магнитного компаса по сличению с гирокомпасом будет выполнено с высокой степенью точности, если судно будет разворачиваться по курсу с помощью подруливающего устройства или буксиров, т.е. практически оставаться на месте.

6. Следует избегать, особенно при плавании в высоких широтах, повторных маневров, следующих один за другим через интервалы времени, примерно равные половине периода затухающих колебаний гирокомпаса в широте места маневра. Особенно нежелательно в указанном случае маневрирование вдоль меридиана, связанное с изменением скорости или поворотом судна на 180°.

7. Имея в виду возникновение поперечного линейного смещения судна после маневра, следует, если это возможно, последний маневр перед входом в узкость или стесненные воды выполнять настолько заблаговременно, чтобы максимальные линейные смещения судна имели место до входа в указанные районы. Если выполнение данной рекомендации невозможно, то контроль места судна и коррекция его пути должны обеспечиваться в соответствии с требованиями точности в конкретной ситуации.

Суммарную инерционную девиацию следует принимать к учету в том случае, если при маневре изменение нордовой составляющей скорости судна $\Delta V_{\rm N}$ составляет не менее 5 – 7 узлов. При меньшем значении $\Delta V_{\rm N}$ влияние маневра судна на гирокомпас становится незначительным.

2.4.4. Применение математических моделей для компенсации инерционных девиаций

Недостатком классических двухгироскопных маятниковых гирокомпасов класса "Standard" — "Курс" являются значительные по величине инерционные девиации, возникающие при маневрировании судна. Этот недостаток особенно сильно проявлялся в высоких широтах и в еще большей степени при повторном (многократном) маневрировании.

С целью повышения точности показаний гирокомпасов данного класса фирмой «Anschutz» – Германия была создана система коррекции "Наутокурс", нашедшая свое применение также в гирокомпасе "Курс-4M/1".

Идея способа повышения точности достаточно проста и состоит в том, что на основе вычисленных с помощью микропроцессора мгновенных значений инерционной девиации, в своей совокупности представляющих закон ее изменения во времени с момента возникновения до полного исчезновения, осуществляется непрерывная коррекция показаний всех репитеров. При этом не оказывается какого-либо воздействия на чувствительный элемент гирокомпаса, т. е. сохраняется его полная автономность [5].

Одновременно вычисляется и также исключается из показаний репитеров скоростная девиация гирокомпаса.

В качестве математической модели, заложенной фирмой «Anschutz» в систему коррекции "Наутокурс", выбрана система дифференциальных уравнений третьего порядка (2.21), отличающаяся достаточной простотой для аналитического исследования и для численного интегрирования [5]:

$$\begin{aligned} H\dot{\alpha} + B\beta - C\gamma &= H\left(\tilde{\omega}\sin\varphi + \frac{V_E}{\tilde{R}}tg\varphi\right) - \frac{B\dot{V_N}}{g}; \\ H\dot{\beta} - H\left(\tilde{\omega}\cos\varphi + \frac{V_E}{\tilde{R}}\right)\alpha &= H\frac{V_N}{\tilde{R}}; \\ \tau_{_{\Gamma,M}}\dot{\gamma} + \gamma - \beta &= \frac{\dot{V_N}}{\tilde{R}}. \end{aligned}$$
(2.21)

Очевидно, что как при аналитическом, так и при компьютерном решении системы дифференциальных уравнений необходимо знание констант, в частности, параметров чувствительного элемента гирокомпаса $H, B, C, \tau_{\Gamma,M}$ – постоянной времени масляного успокоителя (гидравлического маятника), а также необходимо располагать внешней информацией о широте места судна φ , его мгновенной скорости V и его мгновенном ускорении \dot{V} .

Для оценки эффективности рассматриваемого способа снижения инерционной девиации гирокомпаса, возникающей при маневрировании, необходимо проанализировать следующие три фактора, непосредственно влияющих на точность вычисления (а значит, и исключения) указанной девиации:

степень достаточности модели третьего порядка;

степень влияния неточности информации о значениях основных параметров гирокомпаса;

степень влияния неточности внешней информации об ускорении объекта, его скорости и широте.

Выполненный анализ по первому фактору на основе математической модели (2.21) позволил обоснованно расширить пределы использования гирокомпаса "Курс-4M/1" по широте до 82° при скорости до 20 уз базируясь на предельно допустимых погрешностях, которые установлены ИМО.

Второй фактор. Разработчиками системы коррекции "Наутокурс" в микропроцессор заложены численные значения параметров некоторого чувствительного элемента, принятого за эталонный. По технологическим причинам возможны отклонения фактических значений параметров от эталонных: для кинетического момента $\Delta H = \pm 5\% H$, для модуля маятникового момента $\Delta B = \pm 5\% B$, для модуля момента гидравлического маятника $\Delta C = \pm 10\% C$, для постоянной времени гидравлического маятника $\Delta \tau_{\text{г.м}} = \pm 64$ с.

По этой причине в системы "Наутокурс" предусмотрена установка конкретных параметров чувствительного элемента, численные значения которых приведены в его техническом формуляре. Эту операцию необходимо выполнить сразу же после установки чувствительного элемента в центральный прибор гирокомпаса.

Третий фактор. Информация о \dot{V} , V и *KK* поступает в систему "Наутокурс" в импульсной форме. Поскольку коррекция скоростной и инерционной девиаций производится непрерывно, то отличие *KK* от *ИK* всегда невелико и невелики будут и отличия функций этих углов.

Проблема обеспечения системы "Наутокурс" точной информацией, касающейся V и \dot{V} , решается с помощью устройств сопряжения приемоиндикаторов спутниковых РНС с данной системой. Спутниковые РНС обеспечивают измерение мгновенного значения абсолютной скорости судна с точностью до 0,1 – 0,2 уз.

Анализ влияния погрешности информации о широте места не актуален, поскольку на современных судах морского флота всегда имеется несколько дублирующих систем обсервации, и широта места известна с такой степенью точности, которая вполне удовлетворяет потребностям системы коррекции инерционной и скоростной девиаций гирокомпаса.

2.4.5. Влияние качки судна на точность гирокомпаса

Процесс образования девиации. При исследовании качки установлено, что ее физическая сущность проявляется как случайный стационарный процесс, при этом наиболее сильное воздействие на точность показаний гирокомпаса оказывает регулярная бортовая качка. Поэтому рассмотрим только *влияние бортовой качки* на чувствительный элемент гирокомпаса с пониженным центром масс и будем считать, что качка совершается по гармоническому закону.

В процессе качки возникают линейные ускорения j_{κ} . Вектор ускорения j_{κ} расположен в плоскости качаний, перпендикулярной диаметральной плоскости судна. Сила инерции F_{κ} обусловлена ускорением j_{κ} и противоположно ему направлена (рис. 2.21).

В каждый полупериод качки векторы j_{κ} и F_{κ} и соответствующие им составляющие вдоль меридиана и параллели меняют свое направление на противоположное. Они приложены к пониженному центру масс гиросферы.

Рассмотрим действие сил инерции на одногироскопный ЧЭ гирокомпаса.

При следовании судна курсом N_{κ} сила инерции F_{W} направлена вдоль параллели к западу (в первом полупериоде). Создается момент относительно оси

X-X чувствительного элемента, но так как этот момент располагается на главной оси и совпадает с кинетическим моментом H, то прецессионного движения не возникает. Раскачивание ЧЭ происходит относительно главной оси.



Рис. 2.21. Силы инерции, возникающие при качке

На курсе Ек при бортовой качке будет действовать только меридиональная составляющая *F*_N сил инерции, стремящейся повернуть ЧЭ вокруг оси У-У. Создаваемый момент *L*_E в первом полупериоде качки направлен к востоку. Во втором полупериоде момент L_w будет направлен к западу. То есть в течение периода качки среднее значение моментов L_E и L_W равно нулю. Поскольку период качки (5 – 15 с) весьма мал по сравнению с периодом затухающих колебаний, то главная ось гирокомпаса не успевает уходить из меридиана. Заметим, что ЧЭ при этом не раскачивается относительно оси *Y*–*Y*, и сама ось положения не изменяет.

На промежуточных курсах ствуют синхронно

составляющие сил инерции F_N и F_W (F_S и F_E) действуют синхронно.

Силы F_W и F_E раскачивают ЧЭ относительно оси X-X то в одном, то в другом направлениях в течение периода качки – рис. 2.22 (ось X–X направлена перпендикулярно плоскости рисунка). Угол χ меняется достаточно быстро и чувствительный элемент на качке ведет себя как короткопериодный физический маятник. Как отмечалось выше, силы F_W и F_E создают моменты относительно оси X–X и прецессионного движения не возникает. Заметим, что сила тяжести P также действует вокруг главной оси и ее момент прецессии не вызывает.

Действие сил $F_N F_S$ (показаны на рисунке кружком с крестиком – направление за плоскость рисунка и кружком с точкой – направление к читателю соответственно) создают то в одном, то в другом направлениях момент L_y относительно периодически наклоняющейся оси Y-Y. Горизонтальные составляющие L_E и L_W в течение каждого полупериода качки действуют в противоположном направлении. Их среднее значение за полный период качки равно нулю и главная ось ГК не успевает практически уходить из меридиана под действием моментов L_E и L_W .

Составляющая L_z в течение обоих полупериодов качки имеет одинаковые направления. Среднее значение момента L_{zcp} за период качки не равно нулю. Этот момент вызовет прецессию гиросферы вокруг оси Y-Y так, что северный

конец главной оси опустится (вектор H стремиться к вектору L_z), значит, изменится угол β наклона главной оси к горизонту. Как следствие возникает момент силы тяжести вокруг оси Y-Y. В результате гирокомпас выходит из положения равновесия в азимуте (в данном случае отклонение оси будет к E_{κ}). При определенном угле отклонения ЧЭ от меридиана его главная ось придет в равновесное положение. Этот угол отклонения δ_{κ} и представляет собой *девиацию однороторного гирокомпаса на качке*.



Рис. 2.22. Действие сил инерции на гирокомпас при качке: *a*) - влияние составляющей силы инерции *F*_N; *δ*) - влияние составляющей силы инерции *F*_S

Следует заметить, что постоянно действующий момент L_z при качке может быть направлен как вниз, так и вверх – это зависит от курса судна. Тогда, северный конец главной оси ЧЭ получит подъем над горизонтом, в результате перемещение оси δ_{κ} будут направлено к W_{κ} .

Исследования показывают, что девиация имеет четвертной характер зависимости от курса судна *КК*: на главных (кардинальных) курсах 0°, 90°, 180° и 270° $\delta_{\kappa} = 0$; на четвертных курсах 45°, 135°, 225° и 315° δ_{κ} максимальна.

По этой причине девиацию гирокомпаса на качке чаще называют интеркардинальной девиацией.

Девиация возрастает с увеличением: амплитуды угла крена, частоты качки, расстояния от места установки гирокомпаса до центра качаний судна, широты места.

Расчеты и эксперименты показали, что значения интеркардинальной девиации ГК с одногироскопным ЧЭ, обладающим положительным маятниковым эффектом, велики и могут достигать в реальных условиях 20 – 30°. По этой причине такие гирокомпасы не получили распространения. Способ снижения влияния качки на точность показаний ГК рассмотрим ниже. Способ снижения девиации на качке. Из предшествующего материала установлено, что погрешность качки вызывается вертикальной составляющей момента L_z , что является следствием раскачивания ЧЭ вокруг его главной оси силой $F_{W(E)}$. Следовательно, для предупреждения δ_{κ} необходимо стабилизировать ось Y-Y прибора так, чтобы она все время оставалась горизонтальной. Именно на этом и основан метод предупреждения возникновения погрешности δ_{κ} у ГК с чувствительным элементом, имеющим пониженный центр масс.

Чувствительный элемент гирокомпаса представляет собой герметичную сферу, внутри которой размещены два совершенно одинаковых гироскопа, имеющих между собой кинематическую связь. Гироскопы расположены так, что векторы их кинетических моментов H_1 и H_2 образуют с главной осью гиросферы X–X одинаковые углы, в среднем положении равные 45°, а между собой – 90° (рис. 2.23 – вид гиросферы сверху).



Рис. 2.23. Кинетический момент гиросферы

Гирокамеры, в которых заключены гироскопы, связаны собой между механизмом, устроенным следующим образом. К гирокамерам 1 жестко прикреплены кронштейны 2, обращенные в противоположные стороны. Кронштейны соединены шарнирной тягой 3, цапфы которой входят в подшипники кронштейнов. Шарнирная тяга, в свою очередь, связана с корпусом гиросферы при помощи двух пружин 4. Эти пружины устанавливают гироскопы так, что их главные образуют оси между собой угол 90°.

Относительно гиросферы гироскопы могут поворачи-

ваться одновременно только вокруг их вертикальных осей в противоположные стороны и на одинаковые углы, при этом пружины 4 будут растягиваться. Поворот же гироскопов в одинаковом направлении предотвращен жесткостью шарнирной тяги 3.

Если разложить векторы H_1 и H_2 на составляющие по осям гиросферы, то видно, что составляющие H_y направлены в противоположные стороны и компенсируют друг друга. Составляющие H_x одинаковы по величине и направлению, поэтому кинетический момент гиросферы $H_{\Gamma} = 2H_x$. То есть, двухгироскопный ЧЭ можно рассматривать как одногироскопный с $H_{\Gamma} = 2H_x$. На этом основании линию, определяемую вектором $2H_x$, и называют *главной осью гиросферы*. Если гиросфера находится в положении равновесия, то ее главная ось X-X совпадает с гирокомпасным меридианом. Сила $F_{W(E)}$ (см. рис. 2.22), возникающая при качке судна, стремится повернуть гиросферу вокруг оси *X*–*X*, причем направление этой силы меняется через каждые полпериода качки. Момент L_x , создаваемый силой $F_{W(E)}$, располагается на главной оси *X*–*X* и также меняет свое направление каждые полпериода (рис. 2.24, *a* и рис. 2.24, *б* соответственно).



Рис. 2.24. Прецессионное движение гироскопов внутри гиросферы

Согласно свойству прецессии гироскопы начнут поворачиваться вокруг вертикальных осей – H_1 и H_2 стремятся к L_x по кратчайшему пути (на рисунке показано стрелками). При сведении гироскопов в первый полупериод качки шарнирная тяга 3 сместится вправо, а во второй полупериод при разведении гироскопов – влево, что приведет к растягиванию пружин антипараллелограммного механизма.

Противодействующая сила пружин создаст моменты, направленные по вертикальным осям гироскопов L_{z1} и L_{z2} (векторы их перпендикулярны плоскости рисунка). В первый полупериод качки (рис. 2.24, *a*) момент, передаваемый правому гироскопу, будет направлен вверх, а левому – вниз. Во втором полупериоде качки (рис. 2.24, *б*) направление моментов изменится на противоположное. Прецессия гироскопов в направлении возникающих вертикальных моментов невозможна из-за конструкции подвеса, и это усилие будет передаваться всему корпусу гиросферы. Тогда гиросфера будет получать периодические наклоны, но эти наклоны весьма малы, что указывает на эффект гироскопической стабилизации чувствительного элемента вокруг его главной оси.

Благодаря этому гиросфера приобретает значительную динамическую инерцию в плоскости Е – W, в чем и проявляется стабилизирующее действие гироскопов.

Таким образом, вместо того, чтобы разворачивать гиросферу вокруг

главной оси N – S, сила инерции $F_{W(E)}$. будет вызывать прецессионное движение гироскопов вокруг их вертикальных осей то в одну, то в другую сторону.

Итак, ось Y-Y двухгироскопного ЧЭ при качке судна остается практически горизонтальной, а это значит, что составляющая L_z отсутствует и погрешность качки не возникает.

Наличие 2-х гироскопов в гиросфере обеспечивает незатухающие колебания оси *X*–*X* с периодом *T*′_к, составляющим 15 – 20 мин.

В результате показания гирокомпаса при качке искажены некоторой по-грешностью

$$\delta_{\kappa}' = -\delta_{\kappa} \frac{\tau_{\kappa}^2}{{T_{\kappa}'}^2},$$

где δ_{κ} – погрешность качки одногироскопного компаса;

 τ_{κ} – период качки;

Т′_к – период колебаний ЧЭ вокруг оси *X*–*X* (колебания оси *Y*–*Y*).

Отношение $\tau_{\kappa}^2 / T_{\kappa}'^2$ – коэффициент снижения погрешности качки составляет примерно 1/1000.

В реальных условиях этот коэффициент значительно больше и связано это, прежде всего, со следующим: наличие масляного успокоителя – все-таки, создается вертикальный момент из-за смещения центра масс жидкости; конструктивные характеристики – недостаточная жесткость, нелинейность упругости элементов, люфты и т. д.

В итоге суммарная погрешность δ_{κ} у ГК типа "Курс" при значительной качке составляет 1,0 – 1,5°. Существование δ_{κ} следует рассматривать как один из неблагоприятных факторов, общее действие которых может быть обнаружено только путем обсерваций, обеспечивающих необходимую точность судовождения.

2.5. Основные модели гирокомпасов с автономным чувствительным элементом

Рассмотренные выше в общих чертах теоретические положения функционирования чувствительного элемента указателя курса судна, нашли свое воплощение в практической реализации двухгироскопного маятникового чувствительного элемента. Такой ЧЭ был впервые создан еще в 1927г. в Германии на фирме «Anschutz» (Аншютц), в его разработке принимал участие А.Эйнштейн.

Последующая модификация ЧЭ, связанная с совершенствованием технологического процесса его изготовления и новыми инженерными решениями, привела к классическому прототипу двухгироскопного чувствительного элемента гирокомпасов класса "Standard", выпускаемых фирмой «Anschutz». К гирокомпасам данного типа российского производства можно отнести, "Курс-4М", "Курс-4М/1", "Курс-10А", "Амур-3М" и др., которые в известной степени являются аналогами соответствующих моделей класса "Standard".

Некоторые из гирокомпасов типа "Курс" сегодня представляют собой уже исторический интерес. Одним из самых успешных продуктов фирмы «Anschutz» был гирокомпас "Standard-4" ,1960, (российский аналог – "Курс-4"), модифицированная версия которого – "Standard-4S", 1980, как и "Курс 4М", до сих пор продолжает использоваться на некоторых судах.

В 1982 году разработана модель гирокомпаса "Standard-14" с миниатюрным чувствительным элементом и возможностью цифровой передачи курса, которая получила самое широкое распространение в мире на судах любого тоннажа.

Новая модель "Standard-20" появилась только в 1994 году, а ее эволюционная версия "Standard-22" в 2003 году. Сегодня это самые распространенные цифровые высокоточные надежные гирокомпасы с автономным чувствительным элементом.

Принцип действия маятниковых гирокомпасов реализован также и у таких мировых производителей как, например, у фирм «Sperry Marine» (СЩА) и «Yokogawa» (Япония), хотя имеются существенные отличия в способе подвеса двухгироскопной гиросферы. Тем не менее, общие теоретические положения работы маятниковых гирокомпасов сохраняются неизменными в их многочисленном модельном ряду.

2.5.1. Гирокомпасы типа "Курс"

1. Гирокомпас "Курс-4". В комплект гирокомпаса входят следующие приборы (рис.2.25) [6, 7].

1M - Основной прибор. В корпусе основного прибора – нактоузе 1 - находятся: резервуар 2, заполненный поддерживающей токопроводящей жидкостью 3; следящая сфера 4, внутри которой помещена гиросфера 5 – чувствительный элемент гирокомпаса; в верхней части резервуара размещен змеевик 6 системы охлаждения. Резервуар плотно закрывается столом 7 гирокомпаса, имеет кардановый подвес 8 (на рисунке показан условно), к его днищу снаружи закреплен груз 9. На столе размещены: корректор скоростной девиации 10 с устройствами ручного и дистанционного управления (на схеме не показаны), азимут-мотор 11, коллектор 12 с токоведущими кольцами, картушки грубого и точного отсчетов курса судна 13, термодатчик (терморегулятор) 14 температуры поддерживающей жидкости в резервуаре.

9Б – *Трансляционно-усилительный прибор*. Он содержит магнитный усилитель сигнала рассогласования между следящей сферой и гиросферой, исполнительный двигатель, сельсин-датчик для передачи показаний курса на принимающие приборы. На лицевой панели имеется сигнальная лампа «Рассогласование следящей системы».



Рис. 2.25. Функциональная схема гирокомпаса "Курс-4"

34А – Штурманский прибор. Внутри прибора размещены репитер, курсограф, и блок дистанционного управления корректором скоростной девиации. На крышке прибора установлены: вольтметр для контроля напряжения 120 В, 330 Гц; индикатор положения гиросферы 5 по ее высоте внутри следящей сферы 4; сигнальные лампы «Отклонение тока» – при отклонении тока в любой из трех фаз более, чем на 0,25 А от номинального; «Рассогласование следящей системы» – при рассогласовании положений следящей сферы с гиросферой в азимуте на угол больший $0,7 - 2,5^{\circ}$; «Отклонение температуры» – при выходе температуры поддерживающей жидкости 3 за пределы $38 - 42^{\circ}$ С.

15А – Разветвлительная коробка. Прибор предназначен для разветвления и защиты линий синхронной передачи курса на принимающие сельсины. Информация о курсе поступает на штурманский прибор 34А, репитеры курсоуказания (прибор 38А), репитеры для пеленгования (прибор 19А), установленные на пелорусах – приборы 20А (на схеме не показаны).

12М – Циркуляционная помпа. В корпусе помпы размещены: асинхронный двигатель с сегнеровым колесом, создающим давление; резервуар с циркулирующей охлаждающей жидкостью, прокачиваемой через змеевик 6 в основном приборе 1М; змеевик охлаждения от санитарной магистрали. Управление работой помпы осуществляется от терморегулятора 14 основного прибора.

Агрегат питания АМГ-201. Агрегат преобразует техфазный ток судовой сети напряжением 220 В, частотой 50 Гц в трехфазный ток напряжением 120В, 330 Гц. Он состоит из двигателя, генератора и блока стабилизации частоты.

4Д – Пусковой прибор. Он предназначен для пуска и остановки гирокомпаса и защиты основных линий питания. На крышке прибора установлены пакетные выключатель однофазного тока 110 В, 50 Гц и выключатель подачи питания на агрегат АМГ-201 от судовой сети трехфазного тока. Трехфазный ток напряжением 120 В, 330 Гц контролируется амперметрами A₁, A₂, A₃; внутри прибора находится токовый сигнализатор, фиксирующий отклонение тока от номинального.

10М – Сигнальный прибор. Прибор подает звуковую сигнализацию при отклонении температуры поддерживающей жидкости от допустимой и имеет световую индикацию « Отклонение тока» и «Рассогласование следящей систе-мы».

Принцип действия. Гиросфера и ее подвес. Гиросфера гирокомпаса «Курс-4» имеет гидростатический подвес, совмещенный с электромагнитным.

Гиросфера – герметически запаянный шар 5 диаметром 252 мм, массой в воздухе ≈ 8700 г. Внутри гиросферы размещены: 2 гиромотора массой ≈ 2300 г., оси вращения которых установлены под углом 90° (см. рис. 2.23 – вид сверху); в верхней ее части расположен жидкостный успокоитель для гашения незатухающих колебаний (см. рис. 2.8), снабженный электромагнитным реле выключателя затуханий; в нижней части имеется тороидальная центрирующая катушка 21 (катушка электромагнитного "дутья"), показанная также на рис 1. 2. Центр тяжести гиросферы расположен ниже ее геометрического центра на 7,79 мм.

Гиросфера полностью погружена в поддерживающую жидкость 3 определенной плотности и находится внутри следящей сферы 4, при этом, ее отрицательная плавучесть составляет 30 – 40 г.

В работе, когда подано питание на прибор, через центрирующую катушку 21 протекает переменный ток, создается магнитное поле, которое индуцирует в алюминиевом корпусе следящей сферы вихревые токи, поле которых, взаимодействуя с магнитным полем катушки, создает отталкивающие силы, центрирующие гиросферу внутри следящей сферы.

Включение прибора. Через пусковой прибор 4Д вначале подается питание 110 В, 50 Гц, а затем на агрегат АМГ-201 подается трехфазный ток судовой сети. Полученное с преобразователя напряжение 120 В, 330 Гц, через защитные предохранители в приборе 4Д поступает на приборы 1М и 9Б.

В приборе 1М трехфазное питание 120 В, 330Гц подается на кольца коллектора 12 и по токоведущим линиям следящей сферы поступает пофазно на вехний полярный электрод 15, нижний полярный 17 и экваториальный 19 следящей сферы 4. Электроды выполнены в виде графитоэбонитовой смеси, покрывающей внутреннюю поверхность следящей сферы. Через токопроводящую жидкость трехфазный ток указанной частоты проходит на соответствующие электроды гиросферы 16, 18, 20 и приводит в движение гиромоторы. Гиромоторы – основная часть чувствительного элемента – два идентичных асинхронных двигателя трехфазного тока с короткозамкнутым ротором. Номинальное число оборотов 19800 об/мин достигается примерно через 20 мин после подачи питания.

Чувствительный элемент гирокомпаса приходит в меридиан после включения питания в зависимости от широты места в течение 3 – 6 часов. В основном приборе используется устройство для ускоренного приведения ЧЭ в меридиан, работающее по принципу двухфазного асинхронного двигателя: статорная обмотка возбуждения опоясывает весь резервуар снаружи, а роль ротора выполняет гиросфера.

Изменение курса судна. Любое азимутальное движение судна относительно гиросферы непрерывно отрабатывается следящей системой гирокомпаса. При повороте судна вместе с неподвижными частями основного прибора поворачивается следящая сфера относительно гиросферы. Происходит изменение переходных сопротивлений токопроводящей жидкости между следящими контактами следящей сферы 22 и гиросферы 23 и соответственно между контактами 24 и 25. Изменение этих сопротивлений служит датчиком сигнала о рассогласовании следящей сферы и гиросферы. Сигнал поступает в прибор 9Б через магнитный усилитель MY на управляющую обмотку исполнительного двигателя ИД. Отработка двигателя вызывает поворот ротора сельсина-датчика CД и электрически связанного с ним принимающего сельсина 11 (азимутмотора), расположенного на столе основного прибора. Азимут-мотор механически связан со следящей сферой и возвращает ее в согласованное с чувствительным элементом положение. Изменение курса синхронно отображается на всех репитерах.

2. Гирокомпас "Курс-4М". Принцип действия и функциональное назначение приборного состава гирокомпаса "Курс-4М" в целом не отличается от гирокомпаса "Курс-4" Приборы комплекта в той или иной степени модернизированы. Отметим основные отличительные черты этих изменений.

Основной прибор 1МВ. В системе термостабилизации поддерживающей жидкости и чувствительного элемента помпа охлаждения 12М и змеевик 6 в приборе 1М (рис.1.26) исключены и применена воздушная система охлаждения. В корпус резервуара 2 встроены два терморезистора, выполняющие роль датчиков верхнего и нижнего пределов температуры поддерживающей жидкости. Эти датчики подключены к релейной схеме включения (выключения) двигателя вентилятора, расположенного под резервуаром. Наружная поверхность резервуара ребриста – для повышения теплоотдачи при обдуве резервуара вентилятором. Температура поддерживающей жидкости поддерживается на уровне 49±2°C.

Система термостабилизации имеет два режима работы: автоматический и ручной, использующий переключатели «Подогрев» (в начальный пусковой период) и «Охлаждение».

В устройстве ускоренного приведения в меридиан статорные обмотки датчиков моментов размещены в сегментах экваториального пояса следящей сферы. Соответственно изменены конструкция следящей сферы 4 и коллектора подачи питания 12.

Штурманский прибор 34ПМ. Основные узлы прибора и сигнальные табло функционально те же, что и в приборе 34А гирокомпаса "Курс-4". Курсограф штурманского прибора 34 ПМ отличается повышенной точностью записи курса за счет применения в нем стабилизированного по частоте источника питания двигателя лентопротяжного механизма. Запись курса производится термоэлектрическими перьями на ленте с теплочувствительным слоем. На внутренней стороне крышки прибора размещен тумблер «Затухание» для выключения в чувствительном элементе масляного успокоителя.

Трансляционно-усилительный прибор 9В. Прибор применяется в комплектациях гирокомпаса с большим количеством потребителей курса. Он имеет двухкаскадный магнитный усилитель, нагрузкой которого являются два сельсина-датчика синхронной передачи. В цепь обратной связи усилителя включен тахогенератор, чем обеспечивается демпфирование следящей сферы при больших скоростях отработки угла рассогласования.

3.Гирокомпас "Курс-4М/1". Гирокомпас "Курс-4М/1" представляет собой усовершенствованную модель гирокомпаса "Курс-4М", в которой для повышения точности прибора применяется электронное корректирующее устройство.

Идея способа повышения точности гирокомпаса предлагает вычисление с помощью микропроцессора мгновенных значений инерционной и скоростной девиаций, которые в совокупности представляют собой выражение закона их изменения по времени, и использование этих значений для коррекции показаний всех приборов репитерной системы. При этом чувствительный элемент гирокомпаса сохраняет свою автономность.

Гирокомпас "Курс-4М/1" имеет два режима работы: основной и запасной.

В основном режиме работы высокая точность гирокомпаса достигается благодаря использованию автоматического электронного корректирующего устройства, которое исключает из показаний всех репитеров как скоростную, так и инерционные погрешности. В этом режиме работы точностные характеристики гирокомпаса соответствуют требованиям ИМО при движении судна со скоростью до 40 уз в диапазоне широт от 0 до 85° (по заявлению разработчика).

В запасном режиме вместо электронного корректора используют механический, который исключает из показаний репитеров скоростную девиацию, а также выключатель затухания, предупреждающий появление инерционной девиации второго рода. Требования ИМО, предъявляемые к точности гирокомпасов, будут соблюдаться только при плавании судов со скоростью не более 25 уз в широтах от 0 до 70°.

В качестве электронного корректирующего устройства в гирокомпасе "Курс-4М/1" применена система "Nautocourse Plus" ("NC") производства Гер-

мании, а в качестве механического — корректор скоростной девиации гиро-компаса "Курс-4М".

Основная группа приборов, входящих в комплект гирокомпаса "Курс-4M/1", заимствована из гирокомпаса "Курс-4M".

Помимо приборов комплекта гирокомпаса "Курс-4М/1" на судне устанавливают систему "NC" фирмы «Anschutz», обеспечивающую непрерывную и автоматическую компенсацию инерционной и скоростной девиаций.

Система коррекции. Система коррекции предназначена для исключения из показаний гирокомпаса как скоростной, так и инерционных девиаций.

В систему коррекции входят выключатель затухания, механический корректор скоростной девиации и датчик курса, находящиеся в основном приборе 1MB/1, а также вычислитель системы "Nautocourse Plus", который непрерывно рассчитывает текущее значение поправок для компенсации скоростной и инерционной погрешности.

При работе гирокомпаса в основном режиме в составе системы коррекции используются датчик курса, система "NC" и прибор 9Б/1. Механический корректор и выключатель затухания в этом режиме работы гирокомпаса не используются.

В блоке памяти вычислителя системы "NC" смоделирована система уравнений третьего порядка, которая описывает работу чувствительного элемента гирокомпаса в условиях маневрирования судна.

Коэффициентами дифференциальных уравнений являются индивидуальные значения параметров чувствительного элемента, которые вводятся в память с пульта оператора системы "NC". Ввод параметров осуществляют в виде поправок к изначально заложенным номинальным значениям параметров ЧЭ таких как: кинетический момент гиросферы, модуль маятникового момента, модуль жидкостного успокоителя и др.

Диапазоны поправок к номинальным значениям параметров приведены в документации. Ввод поправок осуществляют по методике, которая приведена в инструкции по эксплуатации системы "Nautocourse Plus".

С этого же пульта оператор вводит широту места.

Изменение значений курса или скорости при маневрировании судна вызовет возмущение модели гирокомпаса, реализованной в микропроцессоре, которое будет точно таким же, как и у ЧЭ гирокомпаса. Это означает, что на выход модели гирокомпаса будут поступать в реальном масштабе времени как скоростная, так и инерционные девиации. После сложения в микропроцессоре этих величин девиаций с введенным в него от гирокомпаса текущим значением курса KK(t) на выходе вычислителя системы "NC" будет откорректированный курс KNC(t). Отсюда информация об откорректированном значении курса KNCс помощью сельсина передачи поступает в трансляционный прибор 9Б/1.

При работе гирокомпаса в запасном режиме функционирует только механический корректор скоростной девиации, а датчик курса и система "NC" отключаются.

При маневрировании судна можно применять выключатель затухания, если это оказывается целесообразным.

2.5.2. Гирокомпасы класса "Standard"

1. Гирокомпас "Standard 14". Гирокомпас "Standard 14" (разработка и производство фирмы «Anschutz», Германия) представляет собой одну из самых распространенных в мире моделей гирокомпасов и предназначен для установки на средних и малых судах [7, 12 - 14].

Являясь типичным представителем классической схемы гирокомпаса с двухгироскопным автономным чувствительным элементом с гидростатическим подвесом, этот гирокомпас имеет некоторые отличительные особенности по сравнению с аналогичными гирокомпасами класса "Курс":

1) уменьшенный размер гиросферы (диаметр 115 мм);

2) гидродинамическое центрирование гиросферы, осуществляемое с помощью помпы, встроенной в резервуар;

3) сильфонно-шарнирный подвес резервуара;

4) производится выработка информации об угловой скорости поворота объекта по углу курса (соответствует скорости отработки следящей системы по этому углу);

5) наличие в комплекте гирокомпаса прибора "Nautocourse", обеспечивающего выполнение следующих служебных функций:

- введение коррекции скоростной девиации;

- автоматическую синхронизацию всех репитеров после переключения с одного гирокомпаса на другой или с гирокомпаса на магнитный компас;

- выработку разницы в показаниях двух гирокомпасов или гирокомпаса и магнитного компаса;

6) автоматическое переключение на аварийный источник питания гирокомпаса (24 В постоянного тока) в случае отказа судовой сети;

7) наличие защиты против короткого замыкания в репитерах.

В комплект гирокомпаса входят следующие три основных прибора:

1) центральный прибор;

2) прибор преобразования и соединения (Connection and inverter box);

3) прибор трансляции курса (Course transducer box).

Центральный прибор. Рисунок 2.26, слева дает представление о конструкции центрального прибора, который состоит из жесткого шасси, соединенного с корпусом. Корпус и крышка сделаны из пластика. Стол предназначен для установки механических и электрических компонентов (составляющих). Наружная (следящая) сфера (включая гиросферу) подвешена как маятник с помощью маятникового соединения. В корпусе установлен вентилятор.

Шкала, разбитая на 360°, соединена с корпусом сферы через маятниковое шарнирное соединение. Курс считывается с 360-градусной шкалы с точностью 0,1° через окно в крышке. Системы обогрева и вентиляции обеспечивают постоянство рабочей температуры внутри корпуса прибора.

На рис. 2.26, справа обозначены следующие компоненты: *1* – нулевая отметка; *2* – 360-градусная шкала; *3* – электронная плата; *4* –стол; *5* – маятниковый шарнир с быстрым закреплением; *6* – следящий мотор; *7* – сельсин (первичный датчик курса); 8 – внешняя сфера с гиросферой; 9 – узел помпы; 10 – мотор-вентилятор; 11 – отметка направления на нос судна (курсовая черта).



Рис. 2.26. Центральный прибор гирокомпаса "Standard 14": слева – сильфонно-шарнирный подвес резервуара; справа – общий вид прибора

Гиросфера. Гиросфера (ее продольный разрез представлен на рис. 2.27) представляет собой ориентированную на север двухгироскопную систему. Гиросфера герметизирована и заполнена инертным газом. Она имеет токопроводящие электроды (полярные шапки) на каждом полюсе 1, 3. На экваторе расположен следящий пояс 2 для формирования вместе со следящим поясом наружной сферы датчика угла следящего привода. Внутри, в ее нижней части, размещен гидравлический успокоитель кольцевого типа. Видно, что катушка электромагнитного "дутья", которая имела место у гиросферы гирокомпасов системы "Курс", отсутствует.

Гиросфера, запитывается переменным током 400 Гц напряжением 55 В, подаваемым на два гиромотора, которые в установившемся режиме вращаются с постоянной скоростью, равной примерно 12 000 об/мин.

Наружная сфера. Наружная сфера с гиросферой приведена на рис 2.28 (продольный разрез). Гиросфера 8 размещена внутри и подвешена в поддерживающей жидкости. Корпус наружной сферы включает нижнюю чашу 11, внутреннюю чашу 5 с крышкой 2 наружной сферы (верхнюю чашу).

Отверстие в корпусе наружной сферы закрывается посредством крышки *1*, которая снабжена прозрачным измерительным конусом для снятия отсчета об уровне поддерживающей жидкости. В центре измерительного конуса имеется крепящий (запечатывающий) винт. Токопроводящие полюса (электроды) наружной сферы *3*, *10* соответствуют токопроводящим полюсам *4*, *9* гиросфе-
ры. Следящий пояс 7, 6 обеспечивает работу следящего привода. Пояс расположен на высоте экватора.

В нижней части наружной сферы установлена помпа струйного подвеса 12 (аналог функционального назначения катушки электромагнитного "дутья").



Рис. 2.27. Гиросфера

Рис.2.28. Наружная сфера

Центрирование гиросферы в наружной (следящей) сфере. Масса гиросферы и плотность поддерживающей жидкости подобраны так, что при температуре +52°C гиросфера имеет незначительный остаточный вес. Этот остаточный вес уравновешивается струями жидкости, производимыми помпой и направленными снизу вверх относительно гиросферы, которая в результате оказывается подвешенной свободно (обладает нейтральной плавучестью) и центрированной.

Поддерживающая жидкость и ее температурная стабилизация. Поддерживающая жидкость представляет собой токопроводящую смесь, составленную из дистиллированной воды, глицерина и специальных добавок.

Стабилизация ее температуры – около +52°С, осуществляется системой подогрева поддерживающей жидкости, управляемой терморезистором, который установлен на плате вместе с помпой струйного подвеса, и системой охлаждения поддерживающей жидкости. Система охлаждения состоит из электронноуправляемого вентилятора, размещенного сбоку на основании гирокомпаса. Если температура жидкости повышается (более чем +52°С) вентилятор включается и прогоняет поток холодного воздуха через отверстие сверху между кожухом компаса и корпусом наружной сферы к выходным отверстиям на дне основания.

Трансляция курса. Исполнительный двигатель следящей системы и принимающие двигатели репитеров являются шаговым. Трансляция курса осуществляется в стандарте шагового сигнала 192 шага/1° или 6 шагов/1°. К основному прибору возможно подключение: репитеров аналоговых (шаговых) и цифровых, авторулевого, системы спутниковой навигации и связи, радиолокатора, сигнального устройства, индикатора угловой скорости, автопрокладчика.

2. Гирокомпас "Standard 20". Гирокомпас "Standard 20" — разработка и производство фирмы «Anschutz», Германия (юридически с 1996 г. входит в объединение Raytheon Electronics, США).

Гирокомпас "Standard 20" представляет собой наиболее совершенный и высокоточный прибор в классе двухгироскопных гирокомпасов с автономным чувствительным элементом, имеющим гидростатический подвес.

Гирокомпас "Standard 20" — это естественное развитие гирокомпасных систем "Standard 4S" mod. 2, аналогом которой является система — гирокомпас "Курс-4M/1", и "Standard 14". В гирокомпасе "Standard 20" микропроцессор на основе заложенной в него математической модели выполняет не только функции вычисления скоростной и инерционной девиаций, как это происходит при его работе в составе прибора "Nautocourse-Plus" гирокомпаса "Standard 4S" mod. 2. В гирокомпасе "Standard 20" микропроцессор осуществляет управление всеми процессами, происходящими в гирокомпасе, в том числе проводит и его тестирование. Это обстоятельство позволило разработчику именовать гирокомпас "Standard 20" "цифровым гирокомпасом".

Другие характерные особенности рассматриваемого гирокомпаса, которые следует отметить, таковы:

а) по точности показаний в условиях маневрирования судна гирокомпас соответствует требованиям резолюции ИМО А 821 для высокоскоростных судов (от 30 до 70 уз). В соответствии с резолюцией А 821 погрешность при маневрировании при скорости до 70 уз не должна превышать $\pm 3^{\circ}$ в широтах до 70°. Разработчик гирокомпаса для этих условий объявляет величину погрешности не более 0,4° sec φ ;

б) гирокомпас имеет самосогласующуюся цифровую систему дистанционной передачи курса на приемники, десинхронизация не наступает даже после перерыва в электропитании;

в) гирокомпас соответствует требованиям GMDSS (Global Maritime Distress and Safety) — Глобальной морской связи для спасения терпящих бедствие на море;

г) кроме цифровой системы передачи курса в гирокомпасе предусмотрена еще аналоговая система и система на шаговых двигателях;

д) сильфонный способ подвеса резервуара основного прибора гирокомпаса исключает возникновение кардановой погрешности при крене судна и на качке;

e) быстродействующая следящая система (75 °/с) позволяет вырабатывать информацию об угловой скорости судна по углу курса, т.е. выполняет функции гиротахометра (RoT (Rate of Turn) output);

ж) помимо одиночного гирокомпаса, предусмотрено формирование следующих систем курсоуказаний: гирокомпас + магнитный компас (GM), гирокомпас + гирокомпас (GG), гирокомпас + гирокомпас + магнитный компас (GGM) с автоматическим контролем разницы в показаниях курсоуказателей объединенной системы.





Рис. 2.29. Основной прибор гирокомпаса "Standard 20"

В базовый комплект гирокомпаса входят следующие приборы:

1) основной прибор (Master compass),

2) распределительный прибор (Connection unit);

3) пульт оператора (Operator unit);

4) курсовой репитер с пультом оператора (Steering repeater including operator unit).

Основной прибор, изображенный на рис. 2.29, слева, показан в разрезе, где видны гиросфера, в верхней части – панель электроники, включая навигационный микропроцессор; на виде сбоку (рис. 2.29, справа) видны помпа, обеспечивающая гидродинамический подвес гиросферы, резервуар с гиросферой, сильфонный подвес, панель электроники).

Гиросфера (диаметром 115 мм) конструктивно аналогична гиросфере гирокомпаса "Standard 14". Следящая сфера имеет также сильфонно-шарнирный повес, но с некоторыми конструктивными отличиями. Питание гиромоторов и помпы осуществляется напряжением 55 В, частотой 400 Гц. Температура поддерживающей жидкости стабилизируется на уровне 50 – 52°С.

Основные технические характеристики гирокомпаса "Standard 20": $<\pm 0,1^{\circ} \sec \varphi;$ Статическая погрешность $<\pm0.4^{\circ}$ sec ϕ : Динамическая погрешность Время прихода в меридиан 3 ч.; (после запуска с точн. $\leq 2^{\circ}$) Скорость отработки следящей системы $75^{\circ}/c;$ Предельные углы качки (бортовой и килевой) 45°; от 30 Вт до 105 Вт (при Потребляемая мощность запуске); Допустимая температура окружающей среды) –10°C – ±55°C (при работе)

Полный вес основного прибора 16 кг.

3. Гирокомпас "Standard 22".

Комплект приборов этого гирокомпаса отличается от комплекта "Standard 20" тем, что к источникам курсоуказания добавляется спутниковый компас двухантенного варианта. Схема комплектации гирокомпаса "Standard 22" в версии GGM + спутниковый компас показана на рис. 2.30. Введение еще одного дополнительного курсоуказателя, принцип действия которого радикально отличается от принципа действия как гироскопического, так и магнитного компасов, в значительной степени повышает навигационную надежность объединенной системы курсоуказания.

Для гирокомпасов, входящих в указанную систему курсоуказания, следует отметить одно важное принципиальное отличие по сравнению с гирокомпасом "Standard-20" или "Standard 20 Plus". Оно заключается в применении нового метода ускоренной готовности гирокомпаса для навигационного использования (quick settling mode).

Суть метода заключается в следующем. При стоянке у причала гирокомпас запускается и на основе анализа закономерности начального участка кривой затухающих колебаний в специальном микропроцессоре в течение времени, примерно равного 1 ч, предвычисляется дальнейшее развитие колебательного процесса, вплоть до его полного затухания и тем самым определяется точное значение истинного курса судна задолго до фактического прихода чувствительного элемента в истинный меридиан.

Как известно, при использовании стандартной процедуры требуется интервал времени 4 - 5 ч после запуска компаса, когда гиросфера естественным путем придет в истинный меридиан. Определив, таким образом, истинный курс судна, стоящего у причала, можно начинать движение, и при совершении любого поворота (изменении курса) соответствующие углы отработки следящей системы будут непрерывно корректироваться предвычисленной величиной отклонения от истинного меридиана. В результате этого в любой момент времени становится известным мгновенное значение истинного курса судна, хотя гиросфера еще фактически не пришла в меридиан. Кроме того, одновременно производится коррекция курса на основе вычисленных навигационным микропроцессором значений скоростной и инерционной девиаций. Что касается основных технических и точностных характеристик гирокомпаса "Standard 22", то они не отличаются от соответствующих характеристик гирокомпаса "Standard 20".



Рис.2.30. Вариант комплектации гирокомпаса "Standard 22"

2.5.3. Гирокомпасы класса «Sperry»

1. Гирокомпас "Navigat X" – разработка и производство фирмы «С.Plath» Navigation Automation, Германия (юридически с 1996 г. входит в объединение Litton, США). В настоящее время совместными усилиями двух мировых брендов – «С. Plath» и «Sperry Marine», выпускаются цифровые гирокомпасы серии "Navigat X", полностью соответствующие требованиям резолюций ИМО А.424 (11) и А.821 (19) [7, 13, 15].

Этот гирокомпас можно устанавливать на судах всех типов: от яхт до крупных океанских судов.

Гирокомпас "Navigat X" относится к классу двухгироскопных гирокомпасов с автономным чувствительным элементом, имеющим гидростатический подвес.

Гиросфера представляет собой герметически закрытый блок 1 диаметром 162 мм с воронкообразным углублением, идущим от наружной поверхности вплоть до ее центра (рис. 2.31, слева). Внутри гиросферы в специальных гирокамерах размещены два гиромотора 2. Их оси вращения расположены в горизонтальной плоскости под углом 90°. Гирокамеры спарены между собой с помощью системы рычагов 4. Такая механическая связь позволяет гироскопам вращаться вокруг вертикальных осей гирокамер лишь в противоположных направлениях. В итоге главные оси гироскопов всегда составляют с линией $N_{\Gamma} - S_{\Gamma}$ гиросферы одинаковые углы. Результирующий вектор горизонтальных составляющих их кинетических моментов образует главную ось гиросферы, совпадающую с гирокомпасным меридианом.



Рис 2.31. Гиросфера и ее способ центрирования в гирокомпасе "Navigat X"

В верхней части гиросферы установлен кольцевой контейнер 5 наполовину заполненный вязкой жидкостью – масляный успокоитель – для демпфирования азимутальных колебаний. Период колебаний гиросферы настроен на период 84,4 минуты (период М. Шулера) для снижения инерционных погрешностей, возникающих при изменении скорости и/или курса. Для обеспечения управляющего гравитационного момента (маятникового эффекта) ее центр тяжести смещен. Смещение центра тяжести обеспечивается конструкцией гиросферы.

Существенным конструктивным отличием этого гирокомпаса является способ центрирования чувствительного элемента (гиросферы), осуществляемый с помощью механического, утонченного на конце стержня (иглы) 3, в который упирается своей специальной опорой 4 гиросфера 1, имеющая всегда положительную плавучесть (рис. 2.31, справа).

Гироскопы представляют собой электродвигатели с короткозамкнутым ротором, которые достигают скорости вращения почти 20000 об/мин при напряжении 100 В переменного тока частотой 337 Гц. Электропитание подается сверху гиросферы через центрирующий штифт 3 и электрический контакт 5 и снизу через электропроводящую поддерживающую жидкость от нижнего контакта 6 следящей сферы (рис. 2.31, справа). Однофазное напряжение с помощью фазосдвигающих конденсаторов, расположенных внутри гиросферы, преобразуется в трехфазное для питания гиромоторов. Принципиально новый способ центрирования, несмотря на значительную технологическую сложность изготовления этого узла, создает значительные преимущества всех моделей гирокомпасов фирмы «С. Plath» по сравнению с другими двухгироскопными компасами, гиросферы которых имеют электромагнитное или гидродинамическое центрирование.

Эти преимущества состоят:

1) в сохранении чувствительным элементом положения, близкого к плоскости истинного меридиана, в случае перерыва в судовом питании в течение нескольких минут (при перерыве питания до 3-х минут ожидаемая девиация не превысит 2°);

2) в отсутствии необходимости применения системы искусственного охлаждения поддерживающей жидкости или регулирования ее температуры.

Для работы в условиях особо сильного волнения разработан гирокомпас "Navigat X" mod. 7. Он снабжен резервуаром (в котором находится гиросфера), с дополнительным кардановым подвесом особой конструкции. Эта конструкция обеспечивает практически неограниченную свободу прокачки резервуару (по крену к дифференту) до $\pm 90^{\circ}$.При создании рассматриваемой модели гирокомпаса в полной мере использована микропроцессорная техника.

Основные технические характеристики гирокомпаса "Navigat X" близки к аналогичным техническим характеристикам гирокомпаса "Standard-20".

2. Гирокомпас SPERRY NAVIGAT X MK1/MK2. Поколение морских гирокомпасов, представленное моделью "Navigat X MK1" (рис. 2.32), разработано с учетом новейших технологий навигационных и управляющих систем XXI века.

В качестве гироблока в этой системе применен чувствительный элемент (гиросфера) гирокомпаса "Navigat". Первый из этой серии гирокомпас "Navigat X MK1" изготовлен компактным моноблоком, имеет небольшой вес и помещен в корпус из жестко вспененного полиуритана, что позволяет размещать гирокомпас на любом мостике от крейсерских яхт до больших океанских судов. Все электронные компоненты выполнены в виде заменяемых модулей. Это обеспечивает быстрое и легкое обслуживание. Цифровая информация о курсе выдается как абсолютная12-битовая величина.

Гирокомпас "Navigat X MK1" имеет блок управления с информационным дисплеем, установленным в передней части крышки моноблока. При необходимости этот блок может быть извлечен из моноблока и установлен отдельно (например, в интегрированном мостике) на некотором удалении от гирокомпаса. Плавучая подвеска гиросферы гарантирует стабилизацию курса во время кратковременных сбоев питания. Например, после 3-минутного сбоя питания погрешность не превысит 2-х градусов. При восстановлении питания гирокомпас быстро вернется в меридиан, не требуя обычного времени отработки.

Комбинированный эффект использования спаренных гиромоторов и жидкостной системы гашения колебаний предотвращает высокоширотную погрешность.



Рис. 2.32. Основные приборы гирокомпасов "Navigat X MK1" и "Navigat X MK2"

Для работы в особо тяжелых условиях, где очень существенна высокая точность информации о курсе, рекомендуется модель "Navigat X MK1" Mod. 7.

В базовый комплект гирокомпаса входят два прибора: основной прибор и электронный блок управления и питания. Возможны следующие конфигурация подключения гирокомпаса:

а) одиночный режим;

б) одиночный режим с возможностью подключения через специальный компасный монитор Navitwin магнитного компаса и/или флюкс-гейт (электронного) компаса и включения гирокомпаса в общесудовую информационную систему, как показано на рис. 2. 35;

в) двойная гирокомпасная система – один компас основной, а другой выполняет роль дублирующего, что значительно повышает надежность и целостность курсоуказания.

Модификацией гирокомпаса SPERRY "Navigat X MK1" является гирокомпас SPERRY "Navigat X MK2" (рис. 2.32, справа). Гирокомпас Northrop Grumman Sperry Marine "Navigat X MK2" имеет все необходимые одобрения.

Основное питание гирокомпаса – 24 В постоянного тока. В гирокомпасе «NAVIGAT X MK2» модификации 10/3 применяется оптическая система получения сигнала об отклонении положения следящей сферы (контейнера) относительно гиросферы. Для этого экваториальный пояс гиросферы имеет двухцветное лаковое покрытие, разделенное на две части: серого цвета и белого. Два фотосчивающих устройства, установленные диаметрально на следящей сфере, фиксируют через прозрачную поддерживающую жидкость моменты перехода одной цветовой зоны в другую и вырабатывают управляющие сигналы для приведения следящей сферы в согласованное положение с гиросферой.

К основному прибору могут подключаться до 4-х репитеров, а так же он имеет 5 дополнительных последовательных выходов и один шаговый выход. Пуль управления встроен и не может быть извлечен. Конфигурация использования – одиночный режим. Новая модификация имеет наработку на отказ, в среднем 40000 часов. Система сохраняет ориентацию при перебое электроэнергии длительностью до 3-х мин.



Общесудовая информационная система

Рис. 2.35. Схема включения гирокомпаса в общесудовую информационную систему

Основные технические характеристики гирокомпасов "Navigat X MK1/MK2"

1 1 1	e
- статическая погрешность	$< 0,1^{\circ} \sec \varphi;$
- динамическая погрешность	$< 0,4^{\circ} \sec \varphi$ в условиях моря;
- килевая и бортовая качка	±40°;
- скорость отработки следящей системы	100°/c;
- электронная регулировка погрешностей ± 18	80°;
- среднее время прихода в меридиан	< 3 час
- диапазон температур эксплуатации	$-10 \div +55^{\circ}C$
- среднее время наработки на отказ	40.000 час;
- напряжение основного питания	
(встроенный конвертор ~220/=24)	$= 24 \text{ B} (18 \div 36) \text{ B}$
- напряжение питания гиросферы	~100 В, 337 Гц
- потребляемая мощность (при пуске)	80 BT;
- потребляемая мощность (работа)	45 Вт

- встроенная система контроля и звуковая/световая сигнализация для всего диапазона напряжений, токов гироскопа и следящей системы;

3. Гирокомпас "Yokogawa CMZ900" (Япония). По принципу действия, конструкции гиросферы и ее подвеса данный гирокомпас можно отнести к гирокомпасам класса «Sperry». Гибкая конфигурация системы CMZ900 позволяет адаптировать ее под требования любого пользователя, независимо от тоннажа судна. Доступны 3 типа конфигурации серии CMZ900 (рис. 2.33):

- СМZ900В: одноблочный, предназначен для небольших судов;

- CMZ900S: одноблочный, предназначен для любых типов судов торгового флота;

- CMZ900D: 2х-блочный, обеспечивает повышенную надежность.



Рис. 2.33. Гирокомпас "Yokogawa CMZ900"

Свойства гирокомпаса СМZ900.

Данные о скорости поворота судна (ROT) выводятся в высокоскоростном формате IEC 61162-2.

Уникальная противовибрационная система, использующая свойство вязкого масла демпфировать внешние факторы, значительно уменьшает влияние вибрации и внешних сотрясений. Небольшой и легкий контейнер улучшает скорость отработки следящей системы. Гирокомпас работает очень мягко и без запаздывания, это очень удобно для небольших высокоскоростных судов.

Компактный дизайн: основной прибор и блок управления (для моделей CMZ900S и CMZ900D) могут быть смонтированы внутри стойки авторулевого.

Время перезапуска может быть установлено от 1 до 99 часов.

Ручная коррекция скоростной девиации.

Автоматическая коррекция скоростной девиации, при поступлении данных скорости судна от лага и позиции от GPS или другого устройства (для моделей CMZ900S и CMZ900D). В случае отсутствия позиции от GPS ее значение рассчитывается из показаний курса и скорости.

Внешний сигнал курса от других приборов (магнитного компаса, GPSкомпаса и т.д.) может передаваться на репитеры или другое оборудование как дублирующий (для моделей CMZ900S и CMZ900D).

Встроенный монитор определяет разницу между показаниями основного прибора и внешних датчиков курса (для моделей CMZ900S и CMZ900D).

Механический переключатель, как и программно управляемый переключатель позволит выбрать, какой основной прибор гирокомпаса будет использоваться (для модели CMZ900D).

В гиросфере использованы титановые капсула и электроды, в результате чистоты внутри контейнера межсервисный интервал весьма продолжительный.

В случае необходимости гиросфера может заменена силами экипажа. Это показано на рис.2.34.



Рис. 2.34. Замена гиросферы

Спецификация гирокомпаса "Yokogawa CMZ900".

Время приведения в меридиан в пределах 5 часов (в рабочем состоянии через 2 часа). Точность показаний курса: Рабочие условия:

- статическая	$\pm 0.25^{\circ} \times \sec \varphi;$	угол качки	$\pm 40^{\circ}$
- динамическая	$\pm 0.75^{\circ} \times \sec \varphi;$	температура	-10 до +55 °С
- точность отработки	менее 0.1°;	питание	24V DC
		при использовании АС адаптеров	

3. ГИРОКОМПАСЫ С КОРРЕКТИРУЕМЫМ ЧУВСТВИ-ТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ (ГК с КЧЭ)

3.1. Способ реализации и анализ работы (базовая модель)

3.1.1. Принцип действия

Гирокомпасы, используемые на флоте, в большинстве своем по виду управления движением чувствительного элемента могут быть представлены в виде двух основных классов: гирокомпасы с непосредственным управлением и гирокомпасы с косвенным управлением. Типичным представителем первого класса является уже изученный гирокомпас типа "Курс".

Теперь дадим определение гирокомпасам второго класса. Гирокомпасом с косвенным управлением называется такой компас, чувствительный элемент которого представляет собой астатический гироскоп, управление движением которого осуществляется с помощью датчиков моментов по сигналам индикатора горизонта, вырабатывающего сигнал, пропорциональный углу отклонения главной оси гироскопа от плоскости горизонта.

Кроме того, гирокомпасы с косвенным управлением, как правило, являются корректируемыми т.е. такими, у которых положение равновесия главной оси чувствительного элемента в азимуте и по высоте можно целенаправленно изменять (как правило, добиваясь нулевых значений погрешностей при установившемся движении судна) с помощью датчиков моментов по выходным данным от вычислительных устройств, вырабатывающих корректирующие сигналы на основе внешней информации о скорости судна, его курсе и географической широте.

Типичным представителем корректируемых гирокомпасов с косвенным управлением является **гироазимуткомпас (ГАК)** "Вега", имеющий два режима работы.

В первом режиме прибор работает в качестве корректируемого ГК с косвенным управлением, главная ось которого при движении судна с постоянной скоростью и неизменным курсом располагается вдоль полуденной линии NS и указывает плоскость истинного меридиана.

Во втором режиме прибор работает в качестве гироазимута. В этом случае главная ось прибора будет с определенной точностью в течение некоторого интервала времени сохранять то азимутальное направление, которое указывал гироскоп при переключении его с режима гирокомпаса на режим гироазимута.

Рассмотрим функциональную схему гироазимуткомпаса (рис. 3.1) в ее упрощенном виде [5, 15].

Основной частью ГАК является гироблок, к которому относятся: гиросфера, подвес, следящая система.

Чувствительным элементом является гиросфера ГС, внутри которой размещен астатический гироскоп (центр тяжести совпадает с точкой подвеса). Ось *X*–*X* является главной и вдоль нее направлен вектор кинетического момента *H*.



Рис. 3.1. Функциональная схема гироазимуткомпаса

Гиросфера размещена внутри следящей сферы *1*, выступающей также и в роли корпуса гироблока.

Пространство между следящей сферой и ЧЭ заполнено поддерживающей жидкостью. При рабочей температуре (75°С) плотность поддерживающей жидкости такова, что обеспечивается нейтральная плавучесть ЧЭ.

Относительно следящей сферы гиросфера центрируется с помощью двух пар торсионов 2 – тонких стальных нитей – горизонтальных и вертикальных. Горизонтальные торсионы жестко связывают гиросферу с промежуточным кольцом 3, а само кольцо посредством вертикальных торсионов имеет такую же жесткую связь с внутренней поверхностью следящей сферы (см. также п.1.2, рис. 1.4).

Кроме этого, через торсионы обеспечивается наложение управляющих моментов на гиросферу и подача электропитания на гиромотор ЧЭ.

Следящая сфера (т.е. весь гироблок) подвешена с помощью системы кардановых колец – установочного горизонтального, внутреннего горизонтального и наружного вертикального (на рисунке 3.1 показано только наружное вертикальное кольцо). К нижней части корпуса гироблока прикреплен груз и, таким образом, гироблок приобретает положительный маятниковый эффект, т.е. становится физическим маятником. Гироблок имеет три степени свободы.

На установочном кардановом кольце, непосредственно связанном с корпусом гироблока, вдоль его оси *Y*–*Y* размещен индикатор горизонта *ИГ* – электромеханическое маятниковое устройство, реагирующее на положение главной оси гиросферы относительно плоскости горизонта.

Для измерения углов рассогласования гиросферы со следящей сферой по двум углам – горизонтальному α и вертикальному β – имеется двухкоординатный электромагнитный датчик углов ДУ. Датчик состоит из пары статоров, расположенных на корпусе гиросферы, и пары роторов, расположенных на следящей сфере.

Функциональная схема реализует три системы: следящая, управления и коррекции.

Следящая система. Положение гироскопа относительно горизонтной системы координат (*ONEn*) определяется углами α и β , а положение следящей сферы – углами α_c и β_c . Тогда, измеряемые датчиком ДУ углы рассогласования следящей сферы и гиросферы по азимуту будут составлять ($\alpha - \alpha_c$), а по высоте – ($\beta - \beta_c$).

Чтобы гиросфера была свободна от внешних моментов, необходимо торсионы постоянно удерживать в раскрученном состоянии. Для этой цели в гироазимуткомпасе имеются две следящие системы стабилизации:

– азимутальная, включающая $\mathcal{A}V$ (по углу α), усилитель Ус.A и двигатель азимутальной стабилизации \mathcal{A}_{BM} ;

– горизонтная, включающая $\mathcal{A}V$ (по углу β), усилитель Ус. Γ и двигатель горизонтной стабилизации $\mathcal{A}_{\Gamma M}$;

С ДУ снимаются электрические сигналы

$$U_{\alpha} = k_{\text{ду}} (\alpha - \alpha_{\text{c}})$$
 и $U_{\beta} = k_{\text{ду}} (\beta - \beta_{\text{c}}),$

где *k*_{ду} – коэффициент передачи датчика угла.

Эти сигналы через соответствующие усилители подаются на двигатели стабилизации, которые работают до тех пор, пока поступающие на них сигналы не станут равными нулю. Как видно из приведенных формул, это произойдет тогда, когда следящая сфера согласуется с гиросферой, т.е. когда выполнятся равенства $\alpha = \alpha_c$ и $\beta = \beta_c$.

Таким образом, любой поворот судна либо его рыскание на волнении, как вокруг вертикальной оси так и вокруг горизонтальной оси, перпендикулярной вектору кинетического момента *H* гироскопа, будут тот час же отрабатываться стабилизирующими двигателями. Следящая сфера будет сохранять согласованное положение с гиросферой, в котором торсионы остаются незакрученными.

В этом режиме работы следящей системы ЧЭ обладает свойством свободного гироскопа, т.е. главная ось гиросферы будет сохранять неизменным свое направление в инерциальном пространстве.

Система управления. Чтобы превратить полученный свободный гироскоп в чувствительный элемент гирокомпаса необходимо обеспечить непрерывное приведение главной оси ГС в плоскость истинного меридиана путем наложения на гиросферу управляющих моментов. В рассматриваемом гироазимуткомпасе применена система косвенного управления – воздействие на гиросферу осуществляется через каналы следящей системы стабилизации гироблока. С этой целью используется управляющий сигнал индикатора горизонта.

Индикатор горизонта представляет собой плоский физический маятник, укрепленный на следящей сфере по оси *Y*–*Y*. Его ось чувствительности параллельна главной оси гироскопа, поэтому он реагирует как на изменение угла β_{c} наклона следящей сферы, так и на линейное ускорение \dot{V}_{N} вследствие маневрирования судна.

В схеме применяются два канала управления:

– горизонтальный – создает горизонтальный момент относительно оси Y– Y и тем самым вызывает прецессию ЧЭ в азимуте – включает в себя индикатор горизонта $M\Gamma$, усилитель Ус. Γ , двигатель горизонтальной стабилизации $\mathcal{Д}_{\Gamma M}$ и горизонтальные торсионы;

– вертикальный (горизонтный)– создает вертикальный момент относительно оси Z–Z и тем самым вызывает прецессию ЧЭ по высоте, т.е. относительно плоскости истинного горизонта – включает в себя индикатор горизонта *ИГ*, усилитель Ус.*А*, двигатель вертикальной стабилизации Д_{вм} и вертикальные торсионы;

Обратим внимание на то, что те же самые стабилизирующие двигатели следящей системы здесь выполняют функцию двигателей или датчиков создания горизонтального и вертикального управляющих моментов.

Для уяснения работы канала управления считаем, что судно неподвижно и главная ось гироскопа первоначально находится в меридиане и параллельна плоскости истинного горизонта. Но, уже в следующий момент времени, из-за вращения Земли, северный конец оси ГС окажется в восточной половине горизонта (появляется угол α), которая, как известно, непрерывно опускается – наблюдается видимый подъем оси над горизонтом – появляется угол β . Следящая система синхронно отрабатывает возникающие углы рассогласования и следящая сфера так же получает подъем по высоте на угол β . Поскольку индикатор горизонта жестко связан со следящей сферой по оси Y-Y, то с его выхода снимается сигнал пропорциональный углу β_c :

$$U_{\rm c} = k_{\rm M\Gamma} \,\beta_{\rm c},$$

где $k_{\rm иг}$ – коэффициент передачи *ИГ*.

В режиме гирокомпаса (на рис. 3.1 переключатель находится в положении *ГК*) сигнал поступает в оба канала управления. Уровни сигналов (напряжений) различны и определяются соответствующими масштабирующими элементами:

$$U_{c1} = k_{\mu\Gamma} m_1 \beta_c; \quad U_{c2} = k_{\mu\Gamma} m_1 m_2 \beta_c,$$

где *m*₁, *m*₂ – коэффициенты передачи масштабирующих элементов.

Эти сигналы вычитаются соответственно из сигналов U β и U α , поступающих от датчиков углов, и полученные разности через усилители подаются на двигатели. Поэтому двигатели горизонтальной и азимутальной стабилизации работают до тех пор, пока результирующие сигналы на входе усилителей не станут равными нулю:

$$\Delta_1 = U_{\beta} - U_{c1} = 0; \quad \Delta_2 = U_{\alpha} - U_{c2} = 0.$$

В результате работы двигателей следящая сфера будет развернута относительно гиросферы на некоторые углы ($\alpha - \alpha_c$) и ($\beta - \beta_c$), что приведет к закрутке горизонтальных и вертикальных торсионов. Торсионы имеют определенную жесткость – сопротивление к закручиванию. Возникшие крутящие моменты через установочное кольцо *3* (на схеме рис. 1.3) будут приложены к гиросфере по осям *Y*–*Y* и *Z*–*Z*:

вокруг горизонтальной оси $L_y = A_y \beta$; вокруг вертикальной оси $L_z = A_z \beta$,

где A_y и A_z – модули горизонтального и вертикального моментов соответственно, учитывающие жесткость торсионов и приведенный коэффициент передачи индикатора горизонта.

При действии на свободный гироскоп двух моментов, значения которых пропорциональны углу β , его главная ось непрерывно будет прецессировать к истинному меридиану и стремиться одновременно занять горизонтальное положение, т.е. гироскоп превращается в чувствительный элемент гирокомпаса.

Каналы следящей системы стабилизации и системы управления обладают высокой чувствительностью — малейшие отклонения в разности улов по азимуту и высоте и появление сигнала от индикатора горизонта тот час приводят к их отработке.

Если провести аналогию с гирокомпасом с непосредственным управлением (типа "Курс"), то можно считать, что момент L_y аналогичен маятниковому моменту гирокомпаса и служит для образования незатухающих колебаний, а A_y аналогичен B – модулю маятникового момента. Соответственно, L_z обеспечивает образование затухающих колебаний, а A_z является модулем вертикального момента.

Информация о текущем значении компасного курса *КК* поступает к внешним потребителям от сельсина-датчика *СД*, который механически связан с двигателем канала азимутальной стабилизации *Д*_{вм}.

Итак, подчеркнем, что при движении судна и любом изменении его курса двухканальная следящая система непрерывно обеспечивает согласование следящей сферы с чувствительным элементом, а двухканальная система управления непрерывно оказывает на него управляющее воздействие, выполняя функцию превращения свободного гироскопа в курсоуказатель.

Система коррекции. Для коррекции статических погрешностей гирокомпаса в блоке коррекции (в его вычислительном устройстве *BУ*) формируются корректирующие сигналы $U_{\kappa 1}$ и $U_{\kappa 2}$, которые подаются в соответствующие каналы управления, где суммируются с управляющими сигналами Δ_1 и Δ_2 . Наличие этих сигналов приводит в конечном счете к дополнительному закручиванию вертикальных и горизонтальных торсионов, т.е. к созданию дополнительных компенсирующих моментов $L_{\gamma\kappa}$ и $L_{z\kappa}$.

На вход *BV* подается внешняя информация о компасном курсе *KK*, скорости судна V_c и широте плавания φ .

На основе данных о *КК*, V_c и φ вырабатывается напряжение $U_{\kappa 1}$, что соответствует создаваемому корректирующему моменту $L_{y\kappa}$, позволяющему компенсировать так называемую широтную погрешность δ_{φ} , возникающую у гирокомпасов данного типа.

При использовании тех же входных данных в BY вырабатывается напряжение $U_{\kappa 2}$, что соответствует создаваемому корректирующему моменту $L_{z\kappa}$, позволяющему компенсировать в показаниях гирокомпаса скоростную погрешность δ_v , неизбежно возникающую при движении судна.

В результате коррекции главная ось ЧЭ в равновесном положении будет находиться в плоскости истинного меридиана и в плоскости горизонта.

В режиме гироазимута (в этом случае переключатель $\Gamma A/\Gamma K$ должен быть разомкнут) сигнал с индикатора горизонта поступает только на вертикальный (горизонтный) канал косвенного управления, благодаря которому главная ось гиросферы удерживается в плоскости горизонта. Горизонтальный же канал отключен (управление от $M\Gamma$ в азимуте отсутствует). Однако, при этом сохраняется действие корректирующего сигнала $U_{\kappa 1}$ – создаваемый момент $L_{y\kappa}$ обеспечивает следование главной оси ЧЭ за меридианом наблюдателя (с определенной точностью).

Этот режим используется при маневрировании судна, особенно в высоких широтах и на больших скоростях, для уменьшения погрешностей, вызываемых действием сил инерции на индикатор горизонта.

3.1.2. Анализ работы гирокомпаса

Система дифференциальных уравнений, описывающих движение главной оси ЧЭ без корректирующих моментов для гирокомпаса, установленного на неподвижном основании, выглядит следующим образом [3 - 5]:

$$\begin{aligned} H \dot{\alpha} + A_y \beta &= H \widetilde{\omega} \sin \varphi \quad ; \\ H \dot{\beta} + A_z \beta - H \widetilde{\omega} \cos \varphi \alpha &= 0, \end{aligned}$$
 (3.1)

где A_y и A_z – модули горизонтального и вертикального моментов соответственно и выражаются через соответствующие коэффициенты передачи данных каналов управления. Модуль A_y выполняет функцию маятникового момента и служит для образования незатухающих колебаний ЧЭ, а A_z – демпфирующего момента и обеспечивает гашение этих колебаний.

Положение динамического равновесия главной оси ЧЭ. Используем систему уравнений (3.1). В равновесном положении ось ЧЭ неподвижна, поэтому $\dot{\alpha} = \dot{\beta} = 0$. Частное решение уравнений в виде $\alpha = \alpha_r = \text{const}$ и $\beta = \beta_r = \text{const}$ даст результат: из первого уравнения находим

$$\beta_{\rm r} = \frac{H\,\widetilde{\omega}\sin\varphi}{A_{\rm v}}\,;$$

подставляя найденное значение β_r во второе уравнение, получим

$$\alpha_{\rm r} = \frac{A_z}{A_v} tg \, \varphi \, .$$

Наличие угла β_r (подъем над горизонтом) обеспечивает угловую скорость прецессионного движения главной оси ЧЭ равной угловой скорости меридиана наблюдателя, следовательно, относительная скорость равна нулю. Этот процесс "погони" главной оси за меридианом наблюдателя происходит непрерывно.

Угол β_r имеет небольшую величину – единицы дуговых минут – и уменьшается с уменьшением широты.

Однако ось не установится точно в плоскости истинного меридиана, как это было у гирокомпаса с автономным чувствительным элементом, а будет сдвинута в азимуте на угол α_r , что видно из решения уравнения (3.1).

У гирокомпаса с непосредственным управлением для образования затухающих колебаний использовался метод горизонтального момента (дополнительный момент по оси Y-Y, создаваемый масляным успокоителем), здесь же используется метод вертикального момента L_z , что приводит к появлению погрешности, называемой девиацией затухания либо *широтной погрешностью*:

$$\delta_{\varphi} = \alpha_r = \frac{A_z}{A_y} tg \varphi \,.$$

Широтная погрешность δ_{φ} зависит от конструктивных параметров гирокомпаса – отношения A_z/A_y и от широты места. Для уменьшения δ_{φ} отношение A_z/A_y стремятся сделать по возможности малым (0,03 – 0,05). В высоких широтах плавания δ_{φ} , имея тангенциальную зависимость, может достигать значительной величины. Для ее исключения используется корректирующее устройство.

Закон движения главной оси ЧЭ в азимуте. Работа ГАК с косвенным управлением (без коррекции), установленного на неподвижном основании, описывается дифференциальными уравнениями (3.1). Общее решение системы уравнений (3.1), определяющее движение главной оси гиросферы в азимуте, имеет вид:

$$\alpha = A e^{-ht} \sin(\omega_{\rm d} t + \psi),$$

где *А* – постоянная интегрирования;

h – коэффициент затухания;

*ω*_d – частота затухающих колебаний;

 ψ – начальная фаза.

Данное равенство состоит из периодического члена, стремящегося с увеличением времени к нулю (на рис. 3.2, *а* показана графическая интерпретация этого выражения). Колебания оси ЧЭ являются затухающими и их амплитуда убывает по экспотенциальному закону.



Рис. 3.2. Движение главной оси в азимуте: *a*) - закон движения главной оси ЧЭ в азимуте; *б*) - кривая затухающих колебаний ЧЭ

Коэффициент затухания *h* определяется формулой $h = A_z/2H$, из которой следует, что именно вертикальный момент является причиной образования затухающих колебаний, годограф которых показан на рис. 3.2, *б*. В установившемся положении ось будет иметь координаты α_r , β_r . При $A_z = 0$ имеем h = 0 и $e^{-ht}=1$, т.е. получим незатухающие колебания.

Период затухающих колебаний $T_d = 2\pi/\omega_d$. Для ГАК "Вега" $T_d = 130 - 150$ мин в средних широтах, а фактор затухания $f \approx 4$ (см. п.2.3.3).

3.1.3. Девиации гирокомпаса и способы их уменьшения

Скоростная и широтная девиации.

При движении судна гирокомпас с косвенным управлением будет иметь как широтную погрешность или, как ее называют, девиацией затухания δ_d , так и скоростную девиацию δ_v , такую же, как и у маятникового гирокомпаса. Иными

словами, в азимуте главная ось будет отклонена от плоскости истинного меридиана на величину алгебраической суммы девиаций δ_d и δ_v :

$$\alpha_r = \delta_d + \delta_v = \frac{A_z}{A_v} tg\varphi - \frac{V_N}{\widetilde{R}\widetilde{\omega}\cos\varphi + V_E}$$

С помощью корректирующего устройства эти девиации компенсируются. В рассматриваемой базовой модели ГАК "Вега" (рис. 3.1) применено вычислительное устройство ВУ (построенное на синусно-косинусных вращающихся трансформаторах), на вход которого подается внешняя информация о компасном курсе *КК*, и вручную со штурманского пульта скорость судна V_c и широта плавания φ .

Вырабатываемое в *BУ* напряжение $U_{\kappa 1}$, пропорциональное δ_d , подается в горизонтальный канал управления – создается компенсирующий момент $L_{\kappa y}$; напряжение $U_{\kappa 2}$, пропорциональное δ_v , подается в вертикальный канал управления – создается компенсирующий момент $L_{\kappa z}$. В результате (при своевременном и точном вводе указанных выше входных данных) главная ось ЧЭ устанавливается в плоскости истинного меридиана и стремится занять положение параллельно плоскости истинного горизонта. Таким образом, отсчет курса судна, снимаемого с репитеров гирокомпаса, свободен от текущего значения скоростной и широтной девиаций.

В современных моделях гирокомпасов данного типа функцию компенсации скоростной и широтной погрешностей автоматически выполняет микропроцессор, управляющий всей работой гирокомпаса, при непрерывном поступлении данных о скорости судна V_c и широте плавания φ от внешних источников, например, от GPS. Предусмотрен также ручной ввод указанных данных.

Влияние ускорений при маневрировании.

В рассматриваемом нами гироазимуткомпасе применяется астатический гироскоп – гироскоп, имеющий три степени свободы и центр тяжести его совпадает с точкой подвеса. Превращение такого гироскопа в курсоуказатель, т.е. обеспечение "связи" с Землей, осуществляется с помощью отдельного чувствительного элемента – индикатора горизонта (ИГ).

Индикатор горизонта представляет собой плоский физический маятник, размещенный в герметичной камере 1, заполненной вязкой жидкостью 2 (модель $U\Gamma$ изображена на рис. 3.3). Маятник выполнен в виде стержня, имеющего на одном конце рабочее тело массой m. Второй конец стержня закреплен к ротору 3 датчику угла, а статор 4 датчика закреплен к камере так, что маятник может перемещаться только вдоль некоторой оси х-х, называемой осью чувствительности $U\Gamma$. Перемещение рабочего тела ограничено упорами 5.

Индикатор горизонта установлен на следящей сфере так, что его ось чувствительности направлена параллельно оси X-X собственного вращения гироскопа. Информация об углах отклонения маятника по отношению к корпусу камеры $U\Gamma$ поступает в виде электрического сигнала U_c , снимаемого с роторной обмотки датчика угла. Этот сигнал уже рассматривался в каналах управления гироазимуткомпаса.



Рис. 3.3. Модель индикатора горизонта

$$L_{\rm y} = -A_{\rm y}\gamma = -\frac{A_{\rm y}\dot{V}_{\rm N}}{g},$$

При маневрировании судна под действием соответствующей силы инерции маятник *ИГ* отклонится от своего положения равновесия на угол *γ*. При этом отклонение произойдет в ту же сторону, как и при подъеме главной оси ЧЭ над плоскостью истинного горизонта.

Быстрота реакции $U\Gamma$ на внешнее возмущение (маятник $U\Gamma$ погружен в очень вязкую жидкость) оценивается постоянной времени $\tau_{\rm иr}$ – интервалом времени между началом воздействия и его результатом. В гироазимуткомпасе "Вега" $\tau_{\rm иr}$ = 60 сек. В результате при ускорениях от $U\Gamma$ будет получен сигнал U_c , соответствующий углу γ . После его усиления и срабатывания соответствующих даттчиков моментов (рис. 3.1) к ЧЭ по оси Y-Y в направлении W будет приложен момент

что приведет к прецессионному движению ЧЭ вокруг оси Z-Z с угловой скоростью

$$\omega_{\rm pz} = -\frac{L_{\rm y}}{H} = -\frac{A_{\rm y}V_{\rm N}}{Hg}.$$

Проинтегрировав последнее выражение, находим, что за время маневра от t_1 до t_2 главная ось ЧЭ переместится на некоторый угол

$$\Delta \alpha = -\frac{A_y \Delta V_{\rm N}}{Hg}.$$
(3.2)

Можно убедится в полной тождественности выражения (3.2) с аналогичным выражением для гирокомпаса с автономным ЧЭ (2.15).

Так как показания гирокомпаса не отягощены скоростной и широтной погрешностями, поскольку они компенсируются благодаря непрерывной работе корректирующего устройства, то полученное перемещение $\Delta \alpha$ и и есть инерционная девиация δ_j , полностью характеризующая погрешность корректируемого гирокомпаса на момент окончания маневра.

Уменьшение влияния ускорений.

Снижение влияния маневрирования на корректируемый гирокомпас достигается следующими мерами.

92

1. Увеличение периода незатухающих колебаний чувствительного элемента. Обращаясь к формуле (3.2) видно, что практически, возможное уменьшение рассматриваемой погрешности может быть достигнуто только лишь уменьшением значения модуля горизонтального момента A_y .

Анализируя поведение ЧЭ корректируемого гирокомпаса при стационарном движении судна, получаем выражение для периода незатухающих колебаний

$$T_{0} = 2\pi \sqrt{\frac{H}{A_{y}(\tilde{\omega}\cos\varphi + \frac{V_{E}}{\tilde{R}})}},$$

из которого видно, что отношение H/A_y определяет его значение. Сама же инерционная девиация δ_i обратно пропорциональна этому отношению.

Следовательно, увеличив T_0 путем увеличения H и уменьшения A_y (насколько это оптимально возможно), можно добиться соответствующего снижения девиации δ_i .

Для примера, в гирокомпасе "Вега" отношение $A_y/H = 0,0171 \text{ c}^{-1}$, что примерно в 2,5 раза меньше, чем аналогичное отношение в гирокомпасе "Курс-4", где $B/H = 0,0422 \text{ c}^{-1}$.

2. Ограничение угла отклонения маятника ИГ путем установки в камере упоров. В камере ИГ (рис.3.3) по его оси чувствительности установлены два упора 5 с оптимально выбранным зазором, ограничивающие углы отклонения маятника. Ограничивая угол отклонения маятника, соответственно ограничивается величина налагаемых на ЧЭ управляющих моментов L_{yy} и L_{yz} . Это приведет к ограничению угловой скорости инерционной прецессии ЧЭ и в конечном итоге к ограничению инерционной девиации гирокомпаса.

3. Увеличение постоянной времени индикатора горизонта. Величина инерционной погрешности δ_j существенно зависит от скорости нарастания сигнала U_c , снимаемого с индикатора горизонта. Погрешность δ_j будет тем больше, чем меньше демпфирование рабочего тела $U\Gamma$, т.е. чем меньше постоянная времени $U\Gamma \tau_{\rm ur}$.

Для современных корректируемых гирокомпасов, в том числе и для ГАК "Вега", постоянная времени $\tau_{\rm иr}$ составляет 60 сек., что является типичным для транспортных судов.

4. Перевод гирокомпаса в режим гироазимута (ГА). Так как основной причиной возникновения погрешности δ_j является инерционное перемещение рабочего тела $U\Gamma$, то отключение его на время маневра может предупредить эту погрешность. В такой ситуации прибор начинает работать в режиме гироазимута, т.е. главная ось чувствительного элемента прибора продолжает сохранять свою ориентацию относительно плоскости истинного меридиана (при наличии сигналов $U_{\kappa 1}$ и $U_{\kappa 2}$ компенсации широтной и скоростной погрешностей корректирующим устройством).

В этом случае на период маневра гирокомпас лишается направляющей силы (отключается горизонтальный канал управления – рис.3.1) – прерывается реакция ЧЭ прибора на вращение Земли или, иными словами, теряется "связь" с Землей.

Возникающий при маневрировании сигнал с $U\Gamma$ поступает лишь на вертикальный канал управления. Но так как отношение модулей A_y/A_z составляет обычно 0,03 – 0,05, то влияние сил инерции на вертикальный канал управления незначительно. В итоге, ложный сигнал с $U\Gamma$ не оказывает никакого влияния на ЧЭ, и его главная ось удерживает азимутальное направление.

В этом режиме имеет место так называемый "дрейф" чувствительного элемента, что выражается в уходе главной оси из азимутального (меридионального) направления не более 1°/час. Причины дрейфа носят инструментальное происхождение.

Применение данного способа снижения δ_j эффективно для судов любого типа при продолжительном маневрировании, особенно в высоких широтах плавания.

Девиация от качки и способ ее уменьшения.

Одногироскопный чувствительный элемент, применяемый в гироазимуткомпасе, имеет некоторую остаточную маятниковость. Объясняется это тем, что очень трудно добиться абсолютно точной балансировки гиросферы при ее изготовлении. Величина ее незначительна и не превышает нескольких десятых долей градуса, что считается в пределах допуска.

Однако наличие маятниковости гироблока приводит к раскачке ЧЭ вокруг оси подвеса в такт с качкой судна. На промежуточных румбах происходят одновременное раскачивание ЧЭ в плоскостях N–S, E–W и приложение к гироскопу знакопеременных моментов L_y и L_z по сигналам с индикатора горизонта. При этом возникает постоянная составляющая момента L_z по оси Z–Z, что неизбежно вызывает появление у ЧЭ гирокомпаса девиации на качке, схема образования которой по существу такая же, как и у маятниковых компасов.

Эффект влияния качки будет уменьшен, если осуществить сдвиг по фазе, близкий к 90°, между ускорением, действующим на $U\Gamma$, и моментом, прилагаемым к гироскопу. Достигается это посредством демпфирования маятника $U\Gamma$ путем увеличения $\tau_{\rm ur}$ (заполнением камеры $U\Gamma$ вязкой жидкостью).

Так, при $\tau_{\rm ur} = 60$ сек. и периоде качки $\tau_{\rm k} = 12$ сек. ($\omega_{\rm k} \approx 0.5 {\rm c}^{-1}$) коэффициент снижения погрешности от качки $\mu \approx 900$.

Погрешность имеет четвертной характер и равна нулю на курсах 0, 90, 180, 270°; на четвертных курсах 45, 135, 225, 315° имеет максимальное значение.

Увеличивается с ростом широты плавания φ , увеличением амплитуды качки θ_0 и ее частоты ω_{κ} , увеличением расстояния l до центра качания судна.

При углах качки θ_0 до 15° погрешность δ'_{κ} не более ± 0,5°; при неблагоприятных условиях ($\theta_0 > 30^\circ, \varphi > 70^\circ$) δ'_{κ} составляет примерно ± 1,5°.

3.1.4. Технические данные некоторых ГК с КЧЭ

1. Гироазимуткомпас "Вега"

Гироазимуткомпас "Вега" является морским навигационным прибором и предназначен для использования на судах в широтах до 80°. Он имеет два режима работы: основной — режим корректируемого гирокомпаса, дополнительный – режим гироазимута. Погрешность показаний прибора в режиме корректируемого гирокомпаса при плавании транспортных судов с неизменной скоростью и постоянным курсом составляет $\pm 0.8^{\circ}$ в диапазоне широт $\pm 70^{\circ}$ и $\pm 1.5^{\circ}$ – в диапазоне широт от 70 до 80° [6, 7].

Скоростная девиация и девиация затухания исключаются из показаний гирокомпаса путем коррекции положения чувствительного элемента. Необходимые корректирующие сигналы формируются в блоке коррекции по данным внешней информации о скорости судна и широте места.

В условиях маневрирования судна погрешность корректируемого гирокомпаса характеризуется значением $\pm 2,0^{\circ}$ в широтах до 70° и значением $\pm 2,5^{\circ}$ – в диапазоне широт от 70 до 80° при скорости судна до 50 уз.

Инерционные девиации корректируемого гирокомпаса существенно уменьшены благодаря увеличению периода его собственных колебаний до 150 мин и использованию индикатора горизонта с нелинейной характеристикой.

В условиях качки судна погрешность гирокомпаса не превышает $\pm 1,5^{\circ}$ в широтах ниже 70° и $\pm 2,0^{\circ}$ – в диапазоне широт от 70 до 80°. Минимизация погрешности прибора при качке достигается путем увеличения постоянной времени индикатора горизонта до 60 с.

В режиме гироазимута дрейф чувствительного элемента составляет 1.5°/ч в широтах до 70° и 2°/ч – в диапазоне широт от 70 до 80°. Время ускоренного приведения чувствительного элемента гироазимуткомпаса в меридиан составляет не более 30 мин. Гарантийный срок службы чувствительного элемента — 10 000 ч. В принудительном охлаждении прибор не нуждается.

Состав комплекта. В него входят основной прибор ВГ-1А и вспомогательные приборы (рис. 3.4).

В приборе ВГ-1А размещены чувствительный элемент, система его подвеса, двухканальная следящая система гироблока, двухканальная система косвенного управления чувствительным элементом и система терморегулирования. Основным узлом прибора ВГ-1А является одногироскопный чувствительный элемент с жидкостно-торсионным подвесом.

Двухканальная следящая система гироблока обеспечивает сохранение чувствительным элементом (гиросферой) свойств свободного гироскопа. Она состоит из следящей сферы, колец карданова подвеса, двух исполнительных (стабилизирующих) двигателей, двух усилителей, двух двухкомпонентных датчиков угла и поворотного трансформатора. Двухканальная система косвенного управления придает чувствительному элементу свойство избирательности по отношению к плоскости меридиана и включает в себя некоторые элементы следящей системы: следящую сферу, кольца карданова подвеса, усилители, исполнительные двигатели, а также индикатор горизонта и две пары торсионов между следящей сферой и гиросферой.



Рис. 3.4. Комплект приборов ГАК "Вега"

Чувствительный элемент. Он одногироскопный и выполнен в виде сферы (рис. 3.5). Диаметр сферы 92 мм. Она состоит из двух соединенных между собой цилиндрической шейкой 2 полусфер 1. Для обеспечения герметичности места соединения полусфер и шейки пропаивают При сборке из гиросферы откачивают воздух и заполняют ее гелием. Центр тяжести гиросферы совмещен с ее геометрическим центром. Масса гиросферы 500 г. Способ подвеса гиросферы – жидкостно-торсионный, благодаря чему полностью устранено сухое трение и гироскоп достаточно защищен от внешних вибраций.



Рис.3.5. Чувствительный элемент

Внутри корпуса 2 гиросферы размещены гиромотор и статоры 1 датчиков углов (рис. 3.5, справа). Двигатель асинхронный, трехфазный. Скорость вращения 15000 об/мин. Статорная обмотка 8 гиромотора укреплена на шейке 5 корпуса гиросферы. Роторная обмотка 4 посажена на валу 7 гироскопа. Ротор гиромотора выполнен в виде двух соосных, расположенных симметрично относительно корпуса гиросферы маховиков 6. Масса ротора 300 г. На статор гиромотора подается переменный ток напряжением 40 В, частотой 500 Гц, который подводится к чувствительному элементу через торсионы, а также посредством гибких, изолированных один от другого проводников. Внутри корпуса гиросферы напротив главных подшипников 3 установлены статоры 1 двухкоординатных датчиков углов. Отностелно следящей сферы, внутри которой гиросфера размещена, она имеет две степени свободы.

Гироблок. В собранном виде гироблок имеет форму куба (рис. 3.6, слева). Внутри этого куба имеется сферическая выточка – следящая сфера, в которую помещена гиросфера. Способ установки гиросферы принципиально показан на функциональной схеме ГАК "Вега" – рис. 3.1. Гиросфера связана горизонтальными торсионами с внутренним установочным кольцом, которое в свою очередь связано с внутренней поверхностью следящей сферы вертикальными торсионами. Все четыре торсиона расположены в плоскости, перпендикулярной оси фигуры гироскопа. Торсионы центрируют гиросферу относительно следящей сферы, а при повороте следящей сферы через торсионы на гиросферу подаются управляющие и корректирующие моменты.

Снаружи в нижней части гироблока прикреплен груз. Центр тяжести следящей сферы благодаря наличию этого груза смещен вниз по отношению к ее геометрическому центру. Таким образом, весь гироблок имеет положительную маятниковость для его устойчивости в кардановом подвесе.



Рис. 3.6. Гироблок (слева), подвес гироблока (справа)

Гироблок установлен внутри гиросекции прибора ВГ-1А с помощью карданова подвеса (рис.3.6, справа), который обеспечивает гироблоку три степени свободы. Основные элементы, обозначенные на рисунке: 1 - гироблок; 2 внутренняя сферическая выточка (следящая сфера); 8 - индикатор горизонта, жестко закрепленный с корпусом гироблока по оси Y-Y; 3 - внутреннее горизонтальное кольцо подвеса (наружное не показано); 4 - вертикальное кольцо подвеса; 5 - датчик горизонтального момента, он же стабилизирующий двигатель по углу β ; 6 - зубчатый сектор; 7 - датчик вертикального момента (стабилизирующий двигатель по углу α).

При работе двигателя 5 посредством зубчатого сектора 6 весь гироблок может разворачиваться вокруг оси Y-Y, а при работе двигателя 7 – вокруг вертикальной оси Z-Z, т.е. относительно осей перпендикулярных вектору кинетического момента гироскопа H (см. п. 3.1).

Внешний вид прибора ВГ-1А показан на рис. 3.7. На нем обозначены: 1 – съемный сферический колпак, 2 – корпус, 3 – переключатель полжений «Подготовка» и «Работа», 4 – рукоятка «Скорость приведения» (в меридиан), 5 – основание, 6 – шкала основания (при установке прибора), 7 – пневматический амортизатор, 8 и 9 – крышки, 10 – табло сигнализаций «Обогрев», «Пуск», «Подготовка», «Гирокомпас» и «Гироазимут», 11 – отсчет курс судна по шкале.



Рис.3.7. Основной прибор ВГ-1А

Прибор ВГ-2А – прибор питания гироазимуткомпаса. В приборе размещены кнопки «Пуск» и «Стоп» для включения компаса, световые табло, трансформаторы, реле, предохранители и вольтметр. Трехфазный ток судовой сети 220/380 В, 50 Гц через пускатель подается на преобразователь-генератор – агрегат АМГ-202, с выхода которого снимается трехфазный ток напряжением 120 В, частотой 500 Гц. В. В приборе ВГ-2А это напряжение формируется в трехфазный ток напряжением 40 В, частотой 500 Гц и распределяется по соответствующим электрическим цепям. Прибор ВГ-3А – штурманский пульт гироазимуткомпаса. Прибор предназначен для формирования корректирующих сигналов, дистанционного управления режимами работы основного прибора и ручного введения данных о широте места и скорости судна. Вычислительное устройство этого прибора относится к двухканальной системе коррекции, которая служит для исключения из показаний чувствительного элемента скоростной девиации и девиации затухания.

Кроме упомянутых, в комплект гироазимуткомпаса входят известные вспомогательные приборы 15М, 23-Т, 19А, 38, 38А, 20А, 22А, ПГК-2 и запасные части, инструменты и приспособления.

Некоторые вспомогательные приборы образуют с различными элементами основного прибора отдельные системы, которые обеспечивают нормальное функционирование чувствительного элемента и электрической схемы гироазимуткомпаса. Такими системами являются: блок питания, следящая система трансляции курса, контрольно-сигнальная система.

2. Гироазимуткомпас "Вега-М"

ГАК "Вега-М" имеет два режима работы [7]. Основной режим – это режим корректируемого гирокомпаса. В этом режиме главная ось чувствительного элемента при стационарном движении судна ориентирована вдоль полуденной линии N–S и, следовательно, располагается как в плоскости истинного меридиана, так и в плоскости истинного горизонта. Поэтому в основном режиме по показаниям гирокомпаса определяют истинный курс судна.

Дополнительный режим – это режим гироазимута. В этом случае ось чувствительного элемента сохраняет то азимутальное направление, которое она имела в момент перевода прибора из режима гирокомпаса в режим гироазимута. Поскольку в режиме гироазимута, в отличие от режима гирокомпаса, прибор не обладает свойством избирательности – ни по отношению к плоскости меридиана, ни по отношению к какому-либо другому азимутальному направлению, — инструментальные погрешности изготовления прибора вызывают "дрейф" гироскопа, и с течением времени точность его понижается.

Гирокомпас "Вега-М" имеет два варианта комплектации. Если в состав гирокомпаса входит штурманский пульт ВГ-ЗВ, то этот комплект приборов используют для навигационных целей в диапазоне широт от 0 до 80° N(S) в режиме гирокомпаса. Режим гироазимута применяют при стоянках судна в порту для юстировки прибора.

Ввод информации о широте, необходимой для коррекции гирокомпаса, производится вручную; информацию о скорости либо вводят вручную, либо она поступает от лага в аналоговой форме.

Второй вариант комплектации "Вега-М" используется для навигационных целей в диапазоне широт от 0 до 90°. В диапазоне широт от 0 до 85° и при скорости судна до 50 уз этот вариант комплектации эксплуатируется в режиме гирокомпаса, а в диапазоне широт от 85 до 90° и при скорости до 70 уз – в режиме гироазимута.

Основной прибор ВГ-1Б гирокомпаса "Вега-М" практически не отличается от прибора ВГ-1А гирокомпаса "Вега" (рис. 3.7).

С 2001 г. завод-изготовитель ввел в эту комплектацию гирокомпаса аналого-цифровой преобразователь ПС-1АЦ. В этом преобразователе угол поворота сельсина, пропорциональный курсу судна, преобразуется в цифровой код по международному стандарту NMEA 0183. Одновременно с этим с выхода ПС-1АЦ снимается информация о курсе судна – в импульсном виде, для приемников с шаговыми двигателями. По желанию заказчика в комплект приборов могут быть включены цифровые репитеры.

Основные технические характеристики гирокомпаса

Допустимые значения:

- фактор затухания в широтах, не менее:	
$0^{\circ} - 3; 60^{\circ} - 6; 80^{\circ} - 30;$	
- периоды затухающих колебаний T_{d} в широтах, не более:	
0° — 100 мин; 60° — 156 мин; 80° — 420 мин;	
- чувствительность следящей системы трансляции курса	не хуже ±0,05°;
 - быстродействие следящей системы 	не менее $6^{\circ}/c$;
- время успокоения следящей системы	не более 5 с;
- азимутальный дрейф гироблока	
(при использовании схемы интегрального управления в $\phi < 70^\circ$)	не более 0,2°/ч;
- допустимые углы отклонения главной оси чувствительного	
элемента от меридиана, при которых разрешено	
использование режима гироазимута	±25°;
- время ускоренного приведения гирокомпаса	
в известный истинный меридиан	не более 30 мин.
Предельно допустимые погрешности ($\phi < 80^{\circ}$):	
 прямой курс, постоянная скорость до 50 уз, 	
качка с амплитудой до 2°,	±0,5°;
 прямой курс, постоянная скорость до 50 уз, 	
качка с амплитудой до 25°,	±2,0°;
- маневрирование на скорости до 50 уз,	±2,5°;
- режим гироазимута: дрейф при качке / маневрировании °/ч	±1,5° / ±2,0°;

Эксплуатационные данные гирокомпаса "Вега-М" соответствуют требованиям резолюции ИМО А.424 (XI).

3. Гирокомпас "SG Brown 1000" (SGB-1000)

Гирокомпас "SG Brown 1000" – разработка фирмы Brown (Великобритания) – относится к гирокомпасам корректируемого класса с косвенным управлением и предназначен для установки на судах всех типов, имеющих скорость до 60 уз и совершающих плавание до широты 80° [16].

В гирокомпасе "SGB 1000" применен чувствительный элемент с жидкостно-торсионным подвесом, управление движением которого происходит по командным сигналам индикатора горизонта.

В принципе, в нем реализована такая же схема, как и в гирокомпасе "Вега". Наиболее характерными чертами этого гирокомпаса являются следующие:

1) полностью автоматизированный процесс запуска и остановки;

2) использование индикатора горизонта (акселерометра) с цифровым выходом;

3) использование оптического кодирующего устройства с целью выработки импульсных сигналов для системы дистанционной передачи курса судна на принимающие;

4) использование электростатического преобразователя в блоке питания;

5) все репитеры снабжены защитой против короткого замыкания и перегрузки.

Базовая комплектация гирокомпаса включает в себя два прибора: основной прибор и блок силового питания, с которым совмещена распределительная коробка. На рис. 3.8 представлен вид гирокомпаса "SGB 1000 SKR".

Гирокомпас "SGB 1000" выпускают в нескольких модификациях: 1000 A, 1000 B, 1000 S. Модификация "SGB 1000 S" наиболее совершенная (в частности, в комплект включен цифровой информационный прибор, указывающий курс судна, а также осуществляющий автоматический ввод скорости и широты места для формирования корректирующих моментов).

Последняя (1999 г.) модификация гирокомпаса "SG Brown" – это модель "SGB 1000SKR", которая предназначена для использования на гидрографических судах, выполняющих промерные работы.

Наиболее характерные отличительные особенности гирокомпаса 'SGB 1000 SKR" таковы:

– повышенная статическая точность $(0,15" \sec \varphi)$;

– повышенная скорость отработки следящей системы (100 °/с);

- увеличенная надежность чувствительного элемента (МТВF — 50000 ч);

 моноблочное исполнение базового прибора (в комплект гирокомпаса входит еще распределительная коробка).



Рис. 3.8. Гирокомпас SGB 1000 SKR

3.2. Новое поколение гирокомпасов с корректируемым чувствительным элементом

3.2.1. Динамически настраиваемый гироскоп

В настоящее время динамически настраиваемые гироскопы (ДНГ) получили широкое распространение в качестве чувствительных элементов индикаторных гиростабилизаторов в основном благодаря своей относительно невысокой стоимости и относительно простой технологии изготовления по сравнению с традиционными гироскопами. При этом они имеют малые габариты, массу и достаточно высокую точность, позволяющую применять их в качестве чувствительных элементов в стабилизаторах инерциальных навигационных систем.

Динамически настраиваемый гироскоп представляет собой трехстепенной гироскоп с вращающимся внутренним упругим кардановым подвесом. В отличие от трехстепенного гироскопа с наружным кардановым подвесом двигатель ДНГ расположен на корпусе прибора. Упругий подвес ДНГ обеспечивает кинематическую связь ротора с двигателем по оси собственного вращения и две степени свободы углового движения относительно вала двигателя. Существует множество вариантов построения кинематической схемы ДНГ, принципиально одна из них показана на рис. 3.9. Схема построения ДНГ представляет собой систему из трех связанных тел: ротора носителя кинетического момента 3 и двух роторов подвеса 4 и 5, которые связаны между собой и основным ротором 3 с помощью четырех пар торсионов – горизонтальных 6 и вертикальных 7.

Особенность специально созданной конструкции торсионов состоит в том, что жесткость на изгиб больше, чем на кручение (рабочая деформация), на 2 – 3 порядка. То есть, для одного ротора подвеса, связывающего жестко за-крепленный вал с собственно ротором, можно вполне считать невозможной деформацию по горизонтальному углу, а для другого внутреннего ротора, соответственно, наоборот – по вертикальному углу.

Такая конструкция обеспечивает динамическую настройку гироскопа, которая возникает при определенной скорости его собственного вращения. Упругий подвес с одной стороны осуществляет эффективное центрирование ротора – носителя кинетического момента. С другой стороны такой подвес не налагает на ротор каких-либо восстанавливающих моментов при любых его угловых отклонениях. При этом следует отметить, что стабильность значения угловой скорости Ω собственного вращения должна обеспечиваться с высокой точностью.

Электропривод 1 (рис. 3.9) по типу является гистерезисным двигателем, который имеет специальную электрическую схему исполнения. Схема обеспечивает высокую стабильность угловой скорости его собственного вращения (порядка 0,1 % - 0,01 %). Из рисунка видно, что двигатель 1 жестко закреплен с основанием (с корпусом прибора), а ротор 3, насаженный через систему подвеса 4, 5, 6, 7 на вал двигателя 2, связи с основанием не имеет.

a)

б)



Рис. 3.9. Динамически настраиваемый гироскоп: *a*) – общая схема устройства; *б*) – принцип действия датчиков углов и датчиков моментов

Угловое положение ротора ДНГ относительно корпуса измеряют с помощью двух пар датчиков угла: ДУ_у и ДУ_z, также жестко укрепленных к корпусу. В индикаторных гиростабилизаторах выходные сигналы с датчиков углов поворота ротора ДНГ относительно корпуса пропорциональны углам поворота стабилизированной платформы в абсолютном пространстве.

Датчик угла индукционного типа состоит из двух диаметрально расположенных измерительных узлов, включенных по дифференциальной схеме, и имеет очень высокую чувствительность (порядка единиц угловой секунды).

Так, например, если основание получило изменение положения по вертикальному углу (поворот относительно оси Y-Y), то это приведет к изменению зазоров между ротором 3 и ДУ_{у1} (например, зазор уменьшится) и ДУ_{у2} (зазор увеличится), как это показано на рис. 3.9, δ , и появлению сигналов на выходе ДУ, пропорциональных углу поворота. Соответственно сигнал $U_{ду1}$ увеличится, а $U_{ду2}$ уменьшится. Магнитопровод ДУ выполнен из феррита. Положение осей чувствительности ДНГ определяется положением магнитопроводов ДУ, которые благодаря шлифовке точно фиксируются относительно базовых поверхностей на корпусе прибора.

Создание управляющих моментов в ДНГ осуществляется с помощью двух пар датчиков момента. Одна пара $ДM_{y1}$ и JM_{y2} расположена по оси чувствительности Z–Z, а другая (JM_{z1} и JM_{z2}) – по оси Y–Y. Датчики момента – магнитоэлектрического типа. При подаче управляющего напряжения U_{ynp} возникает сила взаимодействия магнитного поля катушек 9 ДМ, по которой протекает ток, с полем кольцевого постоянного магнита 8, запресованном в теле ротора гироскопа (рис. 3.9, δ). Так, если сигнал U_{ynp1} будет подан на ДМ_{y1}, а U_{ynp2} будет подан на ДМ_{y2}, то пара сил взаимодействия магнитных полей (притяжения в одном датчике и отталкивания в другом) будет действовать относительно оси *Y*–*Y*, создавая момент L_y – возникает прецессия: ротор 3 совершит поворот вокруг оси *Z*–*Z*.

Статор ДМ содержит 4 основные обмотки для создания управляющих моментов и 2 дополнительные для выставки осей ДМ относительно осей чувствительности ДНГ.

Приведем основные технические характеристики гироблока типа ГБ-23/3, которые по данным разработчика следующие:

время готовности	10 мин
напряжение питания двигателя в рабочем режиме	17,5 B
частота питания двигателя	480 Гц
скорость вращения ротора ДНГ	12000 об/мин
постоянная времени ротора	60 c
напряжение питания датчиков угла	2,5 B
частота питания датчиков угла	19200 Гц
случайный дрейф не более	0,01 °/ч
гарантийный ресурс	30000 ч
габариты (внешний диаметр, длина)	54 мм; 46 мм
масса	350 г

Более детальное представление о вариантах конструкции ДНГ дает рис. 3.10 – конструкция ДНГ типа ГБ-23/3, технические данные которого приведены выше [5] и конструкция ДНГ типа ГВК-3, заимствованная из методического руководства подготовки студентов МГТУ им. Н.Э.Баумана.



Рис. 3.10. Конструкция ДНГ типа ГБ-23/3 (слева) и ГВК-3 (справа)

Обозначения ДНГ ГБ-23/3: 3 – статор электропривода, 5 – ротор электропривода, 1 – вал, установленный в шарикоподшипниках 4 и 15, 8 – ротор гироскопа, 10 – внутренний каданов подвес, 13 – упругие торсионы, 14 – датчик угла, 7 – датчик моментов, 9 – постоянный магнит, 12 – упор, 6 – корпус, 2 и 11 – кожух.

Основными элементами ГВК-3 являются: ротор гироскопа 10, карданов подвес с упругими торсионами 6 и элементами регулировки 8 и 9, датчик угла 1, датчик момента, состоящий из статора 4, магнита 5 и магнитопровода 3, симметрично расположенный привод обращенного типа 12, шарикоподшипниковые опоры 2, кольцо карданова подвеса 7 и герметизированный корпус 11.

В качестве двигателя применен синхронный гистерезисный двигатель, питание которого осуществляется от статического преобразователя, имеющего высокую стабильность частоты. Благодаря этому обеспечивается высокая стабильность скорости собственного вращения ротора ДНГ ГВК-3. Технические характеристики ДНГ ГВК-3 близки к техническим характеристикам гироблока типа ГБ-23/3.

3.2.2. Базовая модель ГК с КЧЭ, использующая ДНГ

Известным представителем класса корректируемых гирокомпасов с косвенным (электромагнитным) управлением чувствительного элемента являются *гирокомпасы серии "Яхта"*. Упрощенная функциональная схема гирокомпаса представлена на рис. 3.11. Рассмотрим его работу [7].

Чувствительным элементом гирокомпаса "Яхта" является гироблок ГБ-23, построенный на динамически настраиваемом гироскопе. Приводной электродвигатель 1 связан через упругий подвес с носителем кинетического момента ротором 2. Принципиальным достоинством ДНГ является то, что вибрации и ускорения (в широком диапазоне) основания, на котором установленный гироскоп, благодаря упругому подвесу не воздействуют на ротор ДНГ.

Однако применение ДНГ требует использования индикаторной гиростабилизированной платформы. Поэтому гироскоп закреплен на платформе 3, которая обладает двумя степенями свободы по отношению к судну относительно осей *Y*–*Y* и *Z*–*Z* гироскопа.

Помимо гироблока на платформе 3 установлены два маятниковых компенсационных оптико-электрических акселерометра: «северный» $A_N 4$ и «восточный» $A_E 5$ типа AK-10, использующиеся в качестве индикаторов горизонта. Их оси чувствительности ориентированы параллельно продольной и поперечной осям гироскопа соответственно.

Платформа 3 по оси, совпадающей с поперечной осью гироблока, подвешена на подшипниках в вертикальном кардановом кольце 6, которое по вертикальной оси подвешено на подшипниках в корпусе прибора 7. То есть платформа с гироблоком и акселерометрами помещена во внешний карданов подвес с двумя степенями свободы.



Рис. 3.11. Функциональная схема гирокомпаса, построенного на ДНГ

Следящая система. Для индикаторной гиростабилизации платформы 3 с ЧЭ используются датчики угла ДУ_у 8 и ДУ_z 11 (попарно по каждой оси – см. рис. 3.9 и пояснения к нему). При отклонении платформы по высоте по углу β (вокруг оси *Y*–*Y*) относительно главной оси ДНГ сигнал рассогласования датчика угла 8 через усилитель 9 поступает на двигатель горизонтальной стабилизации 10. Аналогично, при отклонении платформы в азимуте по углу α (вокруг оси *Z*–*Z*) сигнал рассогласования датчика угла 11 через усилитель 12 поступает на двигатель вертикальной стабилизации 13. Отрабатывая эти сигналы, двигатели обеспечивают постоянное удержание гироблока, и, следовательно, платформы в положении, когда его продольная ось совмещена с главной осью ротора гироскопа. Система управления. Придание гироскопу свойства избирательности по отношению к плоскости истинного меридиана (эффекта гирокомпасирования) и демпфирования его колебаний осуществляется, как и в гирокомпасе "Вега", посредством управляющих сигналов «северного» акселерометра 4.

Приход главной оси гироскопа X-X в плоскость истинного меридиана осуществляется следующим образом. Допустим, гирокомпас находится в северном полушарии и в начальный момент времени главная ось гироскопа расположена в плоскости истинного горизонта и отклонена к востоку от плоскости истинного меридиана. Платформа 3 согласована с главной осью гироскопа и также находится в горизонтальном положении. Из-за вращения плоскости истинного горизонта относительно полуденной линии N–S и в силу первого свойства гироскопа, его главная ось видимым образом поднимается над плоскостью горизонта и происходит ее рассогласование с горизонтальной платформой 3. В этом случае с датчика угла $ДУ_y$ сигнал подается на двигатель горизонтальной стабилизации $ДC_y$ 10, который согласует платформу 3 с осью X-X. При этом платформа 3 отклоняется от плоскости истинного горизонта и с «северного» акселерометра A_N снимается сигнал, пропорциональный данному подъему по углу β , так как A_N закреплен с платформой по оси Y-Y.



Рис. 3.12. Образование моментов L_y и L_z .

Сигнал с A_N подается на усилитель 14, проходит электронный фильтр Ф 15, поступает на аналогово-цифровой вычислитель АЦВ и после преобразования через сумматор подается на датчик горизонтального момента ДM_v (см. рис. 3.9 и пояснения к нему в п. 3.1.1). Датчик момента ДМ_у (пара датчиков по оси Z-Z ротора) создает пару сил F_{v} относительно оси Y-Y, как показано на рис. 3.12, и формирует горизонтальный управляющий момент $L_{\rm v}$, направленный в данном случае к W. Возникает прецесси-

онное движение главной оси гироскопа *X*–*X* к плоскости истинного меридиана. Образовавшийся при этом угол рассогласования между осью гироскопа *X*–*X* и продольной осью платформы *3* в азимуте ведет к появлению сигнала на выходе датчиков угла ДУ_z, обеспечивающего компенсацию сигнала рассогласования с помощью двигателя вертикальной стабилизации ДС_z.

С помощью датчиков угла ДУ_у и ДУ_z и двигателей горизонтальной ДС_у и вертикальной стабилизации ДС_z обеспечивается совпадение продольной оси платформы *3* с главной осью гироскопа.
«Северный» акселерометр A_N , установленный на платформе 3, формирует сигнал, пропорциональный углу отклонения главной оси гироскопа по высоте относительно плоскости истинного горизонта. Горизонтальный управляющий момент L_y вызывает прецессию главной оси X–X гироскопа к западу, если ось поднята над плоскостью горизонта, и к востоку, если она опущена под горизонт. Таким образом, под действием управляющего момента L_y главная ось гироскопа X–X совершает незатухающие колебания относительно плоскости истинного меридиана.

Демпфирование незатухающих колебаний производится вертикальным моментом L_z , который формируется датчиком вертикального момента $ДM_z$ по сигналу «северного» акселерометра A_N . Схема образования момента L_z аналогична L_y , но здесь уже фигурирует пара сил F_z (рис. 3.12). При этом направление демпфирующего момента L_z противоположно отклонению главной оси гироскопа относительно плоскости истинного горизонта. Под действием моментов L_y и L_z главная ось гироскопа X-X, совершая затухающие колебания, приходит в положение равновесия, угловые координаты которого имеют определенное значение по отношению к плоскости истинного меридиана и истинного горизонта. Это положение главной оси определяется значениями скоростной и широтной погрешностей.

Система коррекции. В условиях, когда действуют два момента L_y и L_z и, следовательно, непрерывно существуют два прецессионных движения, положение равновесия главной оси гирокомпаса принципиально не может находиться в плоскости истинного меридиана – образуется широтная девиация δ_{φ} ; при движении с постоянной скоростью и постоянным курсом у гирокомпаса неизбежно возникает скоростная девиация δ_{ν} . То есть в азимуте главная ось будет отклонена от плоскости истинного меридиана на величину алгебраической суммы девиаций δ_{φ} и δ_{ν} :

$$\alpha_r = \delta_{\varphi} + \delta_v = \frac{A_z}{A_y} tg\varphi - \frac{V_N}{\widetilde{R}\widetilde{\omega}\cos\varphi + V_E},$$

как это уже было рассмотрено в работе гирокомпаса "Вега" (см. п. п. 3.1.2 и 3.1.3).

Для компенсации влияния указанных выше погрешностей применен аналогово-цифровой вычислитель АЦВ. На его блоки подаются значения скорости V и курса ГКК судна, а также широты плавания φ и вырабатываются сигналы пропорциональные составляющим, реализующим выше приведенную формулу. Кроме того, в АЦВ формируются сигналы, пропорциональные азимутальному, горизонтному и температурному дрейфам гироскопа $U_{дру}$ и $U_{дрz}$. Результирующие сигналы поступают на датчики моментов ДМ_у и ДМ_z. В результате этого формируются корректирующие моменты, обеспечивающие компенсацию скоростной, широтной и инструментальной погрешностей и, следовательно, нулевое значение координат положения равновесия главной оси гироскопа при движении судна без ускорений.

Влияние ускорений. При маневрировании судна, а также в условиях качки возникают силы инерции, которые воздействуют на «северный» акселерометр и вызывают у гирокомпаса значительные девиации. Для их снижения предусмотрена электронная схема, которая включает в себя электронный активный фильтр Φ , осуществляющий задержку сигнала, что эквивалентно введению некоторой постоянной времени, как в индикаторе горизонта некоторых типов корректируемых гирокомпасов с косвенным управлением (например, ГАК "Вега"). Эта же электронная схема ограничивает величину сигнала (аналогично упорам индикатора горизонта). Еще одной функцией упомянутой электронной схемы является отключение «северного» акселерометров, т.е. перевод гирокомпаса в режим гироазимута, если появляются возмущения определенной величины при маневрировании судна. После окончания маневра пробор снова автоматически переключается в режим гирокомпаса.

Если в течение достаточно длительного времени обнаруживают наличие сигнала «северного» акселерометра, что свидетельствует об установившемся отклонении гирокомпаса от меридиана, то срабатывает сигнализация о неисправности гирокомпаса.

Назначение «восточного» акселерометра A_E 5 состоит в следующем. С его помощью вырабатывается сигнал, пропорциональный углу отклонения поперечной оси гироблока от плоскости горизонта (вокруг продольной оси). Этот сигнал необходим для обеспечения аналитической стабилизации платформы 3 относительно продольной оси в связи с тем, что использован двухстепенной карданный подвес, не позволяющий реализовать маятниковую стабилизацию платформы 3 в плоскости вращения ротора гироскопа.

Аналитическая стабилизация заключается в том, что с обоих акселерометров сигналы после усиления подаются на блок АЦВ, в котором производится преобразование координат с учетом угла крена относительно главной оси ротора гироблока, в результате чего управляющий и демпфирующий моменты формируются датчиками моментов по осям горизонтной системы координат (а не по осям судна), что предупреждает появление погрешности на качке.

При отработке двигателя азимутальной стабилизации 15 одновременно отрабатывает и двухотсчетный синусно-косинусный вращающийся трансформатор (*CKBT*) 11, являющийся первичным датчиком курса судна *KK*. Сигналы грубого и точного отсчета этого датчика поступают в вычислитель *АЦВ* и на внешние репитеры в цифровой и аналоговой форме.

При запуске гирокомпаса автоматически, по жесткому временному графику (по командным сигналам таймера), последовательно выполняются следующие операции: горизонтирование гироблока, разгон ротора гиромотора, включение и согласование систем стабилизации, включение режима автоматического приведения в меридиан.

В процессе эксплуатации гирокомпаса в рейсе предусмотрен ручной ввод текущих значений широты плавания и скорости судна, либо автоматический ввод скорости от лага и ручной ввод широты.

Отметим основные отличительные черты гирокомпасов, построенных на основе ДНГ и гирокомпасов, чувствительный элемент которых имеет жидкостно-торсионный подвес [5].

Принципиальная разница, которая определяет основное преимущество ДНГ как чувствительного элемента, заключается в том, что управляющий и демпфирующий моменты L_y и L_z , создаваемые датчиками ДМ_y и ДM_z соответственно, — это те, которые приложены только к роторной части ДНГ, отделенной подвесом от всех остальных элементов конструкции. В то время как в гирокомпасе «Вега» источником моментов является весь сложный узел гироскопического чувствительного элемента. Управляющие моменты в ДНГ гораздо меньше, и, что очень важно, гораздо стабильнее по значению.

Таким образом, происходит разделение функции: стабилизирующие двигатели обеспечивают только согласование стабилизированного элемента с ротором ДНГ, а датчики момента реализуют управление движением ротора ДНГ (по командным сигналам с акселерометра) и его коррекцию от вычислительных устройств. В этом состоит главное схемное отличие рассматриваемого гирокомпаса от тех гирокомпасов, в которых чувствительный элемент имеет не вращающийся упругий подвес.

В результате в гирокомпасах, построенных на ДНГ, дрейф главной оси гироскопа, по крайней мере, на порядок меньше, чем в гирокомпасах, построенных на гироскопическом чувствительном элементе с не вращающимся торсионным подвесом. Следствием этого является на порядок большая точность гирокомпаса в стационарных (при отсутствии маневрирования и качки) условиях плавания. Применение ДНГ в схеме гирокомпаса — это пример реализации на практике первого условия получения высокоточного корректируемого гирокомпаса.

Следует отметить также малые размеры ДНГ (масса его ротора составляет всего 40 — 50 г), что имеет большое значение с энергетической точки зрения, как для электропривода, так и для реализации каналов управления и коррекции.

3.2.3. Некоторые модели ГК с КЧЭ, построенные на ДНГ

1. Гирокомпасы серии "Гюйс"

Создание гирокомпасов серии "Гюйс" (разработка и производство Пермской научно-производственной приборостроительной компании) явилось значительным шагом в развитии систем курсоуказания, относящихся к классу корректируемых гирокомпасов с косвенным (электромагнитным) управлением [5].

Основные отличительные особенности гирокомпасов класса "Гюйс", по сравнению с корректируемыми гирокомпасами предшествующего поколения (класса "Вега-М"), состоят в следующем:

1) достигнута высокая степень автоматизации гирокомпаса; в частности, процедура запуска и остановка осуществляются автоматически по программе, реализуемой на основе сигналов таймера;

2) применен автоматический переход из режима "Гирокомпас" в режим "Гироазимут" при маневрировании судна;

3) реализованы автоматическое введение информации о скорости судна и широте его местонахождения от системы GPS, а также автоматическая сигнализация о неисправности при исчезновении указанной информации;

4) применен новый гироскопический чувствительный элемент – динамически настраиваемый гироскоп (ДНГ);

5) применен новый акселерометр – кварцевый, компенсационного типа;

6) осуществлена автоматическая компенсация температурного дрейфа гироскопического чувствительного элемента;

7) значительно расширен спектр систем дистанционной передачи курса судна.

Указанные системы могут быть построены:

а) на базе сельсинов,

б) на базе вращающихся трансформаторов,

в) на шаговых двигателях,

г) в цифровом коде (стандарт NMEA0183, интерфейсы RS-232/422);

8) расширена система сигнализации о неисправностях гирокомпаса;

9) предусмотрено автоматическое переключение гирокомпаса на аварийный источник питания в случае выхода из строя судового питания;

10) система двухосной стабилизации платформы, на которой установлен гироскопический чувствительный элемент, обладает свойством астатизма по отношению к постоянным возмущаемым моментам.

Гирокомпас "Гюйс", имеющий модификации "Гюйс-1" и "Гюйс-2", предназначен для оснащения любых судов морского и речного флота. Благодаря высокой точности, малым размерам, малой потребляемой мощности, он является наилучшим выбором для навигации на малотоннажных судах и особенно для высокоскоростных судов.

Базовая комплектация гирокомпаса "Гюйс": центральный прибор, блок электроники, пульт оператора, распределительная коробка с подключаемыми к ней цифровыми и аналоговыми приемниками курса, блок питания.

2. Гирокомпас "Гюйс-М"

Гирокомпас "Гюйс-М" представляет собой усовершенствованную модель гирокомпасов серии "Гюйс" Выпускается с 1999 г.

Существенное отличие гирокомпаса "Гюйс-М" от "Гюйс" состоит в том, что он является цифровым комплексом, а гиросекция и блок электроники совмещены в одном (центральном) приборе.

По данным разработчика, гирокомпас "Гюйс-М" предназначен для использования на речных и морских судах различного класса, от катеров до быстроходных паромов и круизных лайнеров. Гирокомпас предоставляет пользователю информацию о курсе с точностью 0,1 и 0,01°, а также угловую скорость судна.

Кроме того, на основе данных от GPS и лага на дисплей пульта оператора может быть выведена следующая информация: скорость судна, широта и долгота места, северная и восточная составляющие скорости судна по лагу, северная и восточная составляющие скорости течения, текущее время и время в пути.

Информация поступает в виде цифрового (RS-232/422/485), шагового или синхросигнала. Гирокомпас обеспечивает выдачу необходимой информации при скорости судна до 90 уз, максимальных углах дифферента и крена до 50° и широте до 75° (в режиме гироазимута — до 90°). При использовании распределительной коробки и транслятора курса число потребителей информации может быть расширено до 14-ти.

Гирокомпас "Гюйс-М" соответствует требованиям IMO A.424(X1), A.821 (19), МЭК 945-95, ИСО 9728-1987.

Базовая комплектация гирокомпаса "Гюйс-М" отличается от комплектации гирокомпаса "Гюйс" и включает в себя всего два прибора: центральный прибор (содержит гиросекцию и электронный блок) и пульт оператора (несколько уменьшенной массы, но с расширенными информационными возможностями).

Ниже приведены основные технические характеристики "Гюйс-М", которые являются типичными для всех серий "Гюйс" и "Яхта":

<60 мин
$<\pm0,25^{\circ} \sec\varphi$
$<\pm0,25^{\circ} \sec\varphi$
$<\pm 0,6^{\circ} \sec \varphi$
<±2,0°
<±3,0°
300°/c (±10)
<0,5°/c ±5%
200°/c
24 B
<30 Bt
<25 кг
30000 ч
12 лет

3. Гирокомпас "Меридиан"

Гирокомпас "Меридиан" разработан и производится совместно английской компанией «SG Brown» и Пермской научно-производственной приборостроительной компанией. Новый гирокомпас соответствует всем современным требованиям, в число которых входят высокая точность при низкой стоимости и универсальность системы.

Благодаря небольшому размеру и времени выставки, не превышающему 45 мин, для использования "Меридиана" не существует ограничений по типу судов. "Меридиан" представляет собой модификацию гирокомпаса "Гюйс" и отличается от него тем, что имеет моноблочное исполнение в базовой комплектации. Его внешний вид показан на рис. 3.13.



Рис 3.13. Моноблок гирокомпаса "Меридиан":

1 (слева) – пульт дистанционного управления; 1 (справа) – гиросекция, построенная на основе ДНГ; 2 – аналоговая плата управления; 3 – блок питания ЦП; 4 – пластина с сальниками; 5 – плата распределения; 6 – цифровая плата управления; 7 – тестовый разъем; 8 – курсовая черта (неподвижный индекс); 9 – картушка; 10 – гироблок.

Указанный моноблок включает в себя:

- гиросекцию, построенную на основе динамически настраиваемого гироскопа;

- электронные платы, вырабатывающие сигнал для формирования управляющих и корректирующих моментов, а также вторичные напряжения, преобразующие аналоговый сигнал курса в цифровой код и шаговое напряжение (6 шагов/⁰, 24 B, диаграмма Sperry);

- съемный пульт оператора, осуществляющий функцию управления и отображения входящей и выходящей информации. На пульте оператора расположены кнопки управления, индикаторы готовности гирокомпаса к работе и индикаторы неисправности.

Гиросекция и электронные платы размещены на алюминиевом основании. Корпус моноблока выполнен из вспененного полиуретана и снабжен двумя окнами: круглым для курсовой шкалы и прямоугольным – для пульта оператора.

4. Гирокомпас ''PGM-C-009'' и ''PGM - Surveyor''

Новый гирокомпас "PGM-C-009" – самый миниатюрный в мире (рис. 3.14). Он соответствует всем современным требованиям рынка морских навигационных систем и, благодаря небольшому размеру, малому времени готовности и высокой точности, для его использования не существует ограничений по типу судов. [8].

Гирокомпас обеспечивает следующие данные:

- курс относительно географического меридиана при скорости до 90 узлов при максимальных углах дифферента и крена до 50° и широте до 80°;

- угловую скорость поворота;

- информацию о режиме работы и неисправностях.



Рис. 3.14. Гирокомпас "РGM-С-009"

Комплектация: гирокомпас представляет собой моноблок, корпус которого выполнен из вспененного полиуретана с окном вверху для курсовой шкалы и отверстием для установки пульта оператора.

Встроенный пульт оператора, при необходимости, может быть вынесен на расстояние до 100 метров от основного прибора. Сердцем гирокомпаса является динамически настраиваемый гироскоп – высокоточный датчик, обеспечивающий скорость отслеживания до 200°/сек.

Свойства:

- экономичная моноблочная конструкция;

- компактность и универсальность;

- автоматический запуск и выставка относительно меридиана;

- быстрая начальная выставка;

- высокая надежность;

- высокая точность показания в статическом и динамическом режимах (компенсация широтной и скоростной погрешностей, автоматическая компенсация тепловых дрейфов);

- удобство и простота установки и настройки, самотестирование;

- простота в обслуживании (нет необходимости в смене поддерживающей жидкости, в дополнительном обогреве или охлаждении, периодическом определении и компенсации азимутального дрейфа, упрощенная методика периодического определения и компенсации горизонтального дрейфа);

- регулировка уровня освещенности шкалы;

- экологичность.

Гирокомпас "PGM - Surveyor", использующий динамически настраиваемый гироскоп, является модификацией гирокомпаса "PGM-C-009".

Гирокомпас "PGM - Surveyor", обеспечивает судовое гидрографическое оборудование точными данными о движении корабля: крен, дифферент, курс, вертикальная качка в различных, выбираемых пользователем форматах. Легкая, прочная и компактная конструкция гирокомпаса соответствует требованиям гидрографического применения.

Спецификация:	
Время готовности:	≤45 мин с погрешностью до 0,7°
Установившаяся погрешность:	$\leq \pm 0,2^{\circ} \sec \varphi$
Динамическая погрешность:	$\leq \pm 0,6^{\circ} \sec \varphi$
Погрешность от пуска к пуску:	$\leq \pm 0,2^{\circ} \sec \varphi$
Скорость отслеживания:	≥200°/c
Сетевое питание:	24 (18-36) B
Потребляемая мощность:	
режим запуска	50 Вт
рабочий режим	25 Вт
Масса системы:	15,5 кг
Габаритные размеры:	$288 \times 240 \times 329$ мм
Технический ресурс:	90000 часов

4. БЕСПЛАТФОРМЕННЫЕ ГИРОГОРИЗОНТКОМПАСЫ

Появившиеся в последнее время на мировом рынке бесплатформенные системы ориентации, в которых применены оптические гироскопы, выводят на новой уровень навигационную технику.

В этих системах находят применение как гироскопы со свободным ротором, так и, особенно часто, гироскопические измерители угловой скорости, в качестве которых используются оптические гироскопы – лазерные и волоконно-оптические. Оптические гироскопы (блоки, состоящие из трех устройств) жестко устанавливаются на объекте и измеряют составляющие его абсолютной угловой скорости вокруг осей чувствительности гироскопов, ориентированных определенным образом по отношению к объекту.

Такая триада оптических гироскопов с взаимно ортогональными осями чувствительности позволяет получить полную информацию о векторе абсолютной угловой скорости объекта по отношению к инерциальному пространству.

4.1. Эффект Саньяка

В 1913 г. французский физик Ж.М.М. Саньяк (1869 – 1928), проводя эксперименты по обнаружению увлечения "эфира" вращающейся установкой, открыл "вихревой оптический эффект", позволяющий оптическими методами измерять скорость ее вращения. Он доказал возможность определения скорости вращения системы координат наблюдателя (эффект Саньяка) с помощью оптической системы – интерферометра. В его интерферометре свет разделяется на два луча, распространяется по одному и тому же оптическому пути в противоположных направлениях и сводится полупрозрачными зеркалами обратно. Тогда же ученый высказал мнение о возможности практического применения открытого эффекта для автономного определения угловой скорости вращения корабля относительно его вертикальной оси.

Схема опыта Саньяка имеет вид, приведенный на рис. 4.1, *а* [18, 19]. Сколлимированный (тонкий параллельно идущий) и поляризованный пучок света заводился в интерферометр, в котором разделялся на два пучка, обходивших интерферометр во встречных направлениях. После обхода пучки совмещались и интерференционная картина (результат наложения встречных волн друг на друга) регистрировалась на фотопластинке. Эксперименты показали, что при вращении установки интерференционная картина сдвигалась, причем сдвиг оказался пропорциональным скорости вращения. Сдвиг интерференционной картины говорит о том, что при вращении оптическая длина пути или время обхода интерферометра становятся различными для встречных пучков света.

Рассмотрим распространение двух световых пучков по окружности с радиусом R (рис. 4.1, δ). В неподвижном интерферометре время обхода контура одинаково для обоих пучков и равно

$$t_{\rm o}=2\pi R/c,$$

где *с* – скорость света. При вращении за время обхода контура точка *А* переместится в точку *A*', из-за чего условия распространения для встречных пучков становятся неодинаковыми.

Путь, который необходимо пройти пучку, распространяющемуся в направлении вращения:

$$L_{+} = 2\pi R + \Omega R t_{\rm o},$$

где Ω – скорость вращения. Для другого пучка $L_{-} = 2\pi R - \Omega R t_{0}$.



Рис. 4.1. Схема опыта Саньяка

Подставляя значение t_0 и учитывая, что скорость распространения пучков в соответствии с постулатом Эйнштейна, равна *с* для любой инерциальной системы независимо от скорости ее движения, находим времена обхода контура светом в одном из направлений:

$$t_{\pm} = \frac{L_{\pm}}{c} = t_0 \pm \frac{2\pi R^2}{c^2} \Omega$$

т. е. разность времен обхода для встречных пучков

$$\Delta t = \frac{4\pi R^2}{c^2} \Omega \tag{4.1}$$

пропорциональна скорости вращения Ω .

Из разности времен обхода получаем разность оптических длин путей распространения света в противоположных направлениях:

$$\Delta L = c\Delta t = \frac{4\pi R^2}{c} \Omega \quad \text{или} \quad \Delta L = \frac{4S}{c} \Omega , \qquad (4.2)$$

где *S* – проекция площади, охватываемой замкнутым контуром, на плоскость, перпендикулярную оси вращения.

Наличие разности путей и приводит к сдвигу интерференционной картины на фотопластине в виде световых полос, который необходимо было измерить и таким образом определить угловую скорость вращения данной экспериментальной установки.

В опыте Саньяка $\Omega = 2\pi \cdot 2,35 \text{ c}^{-1}$, $S = 866 \text{ см}^2$, тогда $\Delta L = 0,017$ мкм. При длине волны $\lambda = 0,43$ мкм это составляет 0,04 полосы. Смещение полос при изменении направления вращения оказывается равным 0,08 полосы. В данном опыте было получено 0,077 полосы.

Чувствительность метода оказывается сравнительно не большой. Повысить чувствительность можно, увеличивая размеры интерферометра, учитывая ее пропорциональность площади контура.

Используя это свойство, А. Майкельсон и Х. Гейль в 1925 г. провели удивительный эксперимент, в котором площадь контура составляла 0,2 км². Опыт состоял в следующем. На земле были уложены водопроводные трубы диаметром 30 см в виде двухконтурного прямоугольника. Стороны прямоугольника длиной 613 м были направлены точно с запада на восток, а стороны 339,5 м — с севера на юг. Воздух был откачан насосом до давления 1 см ртутного столба. Чтобы обнаружить смещение, Майкельсон сравнивает в поле зрительной трубы интерференционные полосы, получаемые при обегании большого и малого контура. Один пучок света шёл по часовой стрелке, другой против. Смещение полос, вызываемое вращением Земли, разные люди регистрировали в различные дни при полной перестановке зеркал. Всего было сделано 269 измерений. Теоретически предполагая "эфир" неподвижным, следует ожидать смещения полосы на 0,236±0,002. Обработка данных наблюдений дала смещение 0,230±0,005, таким образом подтвердив существование и величину эффекта Саньяка.

Для практического использования эффекта Саньяка при измерении скоростей вращения необходимо увеличение чувствительности. Одним из путей повышения чувствительности является *переход от фазовых измерений к частотным*. Именно поэтому сразу после создания первых лазеров появилась идея измерения угловых перемещений с помощью кольцевых лазеров, т.е. идея создания лазерного гироскопа.

4.2. Принцип действия лазерных источника света

В основе действия квантового генератора лежит открытый А. Эйнштейном тип взаимодействия электромагнитного излучения с веществом – вынужденное испускание. При воздействии на данный атом светового потока (электромагнитного излучения оптического спектра) один из электронов с энергией E_1 может поглотить пролетающий фотон, квант энергии, и этот электрон перейдет на более удаленную от ядра орбиту. Произойдет акт поглощения света веществом, атом перейдет в электронно-возбужденное состояние, уровень его энергии повысится и станет равной E_2 . Число атомов, находящихся в электронно-возбужденное состояние и обладающих энергией E_2 , называется населенностью энергетического уровня данного вещества.

Если через вещество, атомы которого находятся в электронновозбужденном состоянии пропустить световой поток определенной длины волны, энергия фотонов которой равна разнице энергетических уровней атомов данного вещества, то произойдет усиление светового потока в результате вынужденного испускания.

Для усиления света необходимо, чтобы в среде (веществе) было превышение населенности верхнего энергетического уровня (E_2) над нижним (E_1), т. е. следует создать инверсную заселенность. Процесс ее создания называется накачкой, а среда, в которой создана инверсная заселенность, называется активной.

В квантовом генераторе нет внешнего потока фотонов, инверсная заселенность создается внутри него с помощью различных источников накачки. В зависимости от источников существуют различные способы накачки.

Применительно к современным оптическим гироскопам, в качестве активных оптических источников лазерного излучения получили распространение газовые лазеры и полупроводниковые лазерные диоды.

Гелий - неоновый (атомный) лазер. Лазер (квантовый генератор), источник мощного оптического излучения (laser – аббревиатура выражения light amplification by stimulated emission of radiation – усиление света вынужденным излучением). Существует большое количество различных лазеров, однако все они имеют одну и ту же и притом простую принципиальную схему устройства, которая изложена в многочисленных источниках, посвященных данному вопросу. Основные конструктивные элементы лазеров включают в себя рабочее вещество с определенными энергетическими уровнями составляющих их атомов и молекул, источник накачки, создающий инверсную заселенность в рабочем веществе, и оптический резонатор.

Устройство лазера на газовой смеси He-Ne (гелий – неон) схематически показано на рис. 4.2. Стеклянная или кварцевая трубка *1* – газовая кювета заполнена смесью газов гелия и неона. Концентрация гелия значительно преобладает над неоном (Ne составляет обычно менее 10%).

Длина кюветы в различных генераторах может быть разной – от нескольких сантиметров до нескольких метров; диаметр кюветы – от миллиметров до сантиметров. К торцам кюветы приварены плоскопараллельные стеклянные или кварцевые пластины 2, расположенные относительно оси кюветы под определенным углом. По обе стороны кюветы располагаются вогнутые или плоские зеркала 3, образующие оптический резонатор. Одно из этих зеркал, через которое световой луч выходит наружу, делают полупрозрачным или снабжают центральным отверстием. Положение зеркал тщательно регулируют.

Снаружи на кювету надеваются кольцевые электроды 4, с помощью которых в кювете возбуждается высокочастотный тлеющий разряд. Электроды питаются от мощного генератора высокой частоты. К этим электродам подводят высокое напряжение: порядка 2 кВ на метр разрядного промежутка.



Рис. 4.2. Принципиальная схема устройства гелий-неонового лазера

При подаче напряжения газовый разряд в рабочем веществе (смеси He-Ne) вызывает световой поток определенной длины волны. Электронные удары возбуждают атомы примесного He, переводя их на верхние энергетические уровни. Затем за счет неупругих столкновений атомы He передают свою энергию атомам Ne. Атомы смеси переходят в электронно-возбужденное состояние и создается их инверсная заселенность. При переходе на нижние энергетические уровни атомы Ne излучают фотоны или световые волны. Возникшее вынужденное излучение проходит через активную среду, усиливается, отражается от зеркала, вновь проходит через среду и еще более усиливается. Через полупрозрачное зеркало часть излучения испускается во внешнюю среду, а часть отражается обратно в среду и снова усиливается. При определенных условиях поток фотонов внутри рабочего вещества начнет лавинообразно нарастать, начнется генерация монохроматического когерентного света.

Непрерывный переход атомов неона из одного энергетического состояния в другое сопровождается излучением световой энергии с длиной волны 632,816 нм (≈ 0,633 мкм) – это световой диапазон излучения.

Полупроводниковые лазерные диоды. В отличие от проводников, имеющих много свободных электронов, и изоляторов, практически их не имеющих, полупроводники содержат небольшое количество свободных электронов и

так называемые дырки — вакантные места, оставленные свободными электронами. И дырки и электроны проводят электрический ток.

Если в полупроводник, например, в четырехвалентный кремний Si, ввести несколько атомов пятивалентного мышьяка As, имеющего «избыток» электронов, то в этом случае свободные электроны мышьяка помогут кремнию переносить отрицательный заряд – образуется полупроводник с отрицательной (N) проводимостью. Эти примеси называются донорными, а полупроводник с такими примесями — *n*-полупроводником.

При замене нескольких атомов полупроводника трехвалентным индием In, который легко присоединяет к себе дополнительные электроны, в полупроводнике образуются не занятые электронами «свободные места», или, как говорят физики, «дырки», которые переносят положительный заряд – это полупроводники с положительной (Р) проводимостью. Такие примеси являются акцепторными, а полупроводник – *p*-полупроводником.

Если между двумя такими полупроводниками установить контакт, то возникнет диффузионный ток – основные носители заряда (электроны и дырки) хаотично перетекают из той области, где их больше, в ту область, где их меньше, и рекомбинируют друг с другом. Как следствие, область в полупроводнике *p*-типа, которая примыкает к границе, получает при этом отрицательный заряд, приносимый электронами, а пограничная область в полупроводнике *n*-типа получает положительный заряд, приносимый дырками (точнее, теряет уносимый электронами отрицательный заряд).

Таким образом, на границе полупроводников образуются два слоя с пространственными зарядами противоположного знака, порождающие в переходе электрическое поле. Это поле вызывает дрейфовый ток в направлении, противоположном диффузионному току. В конце концов, между диффузионным и дрейфовым токами устанавливается динамическое равновесие, и изменение пространственных зарядов прекращается. Обеднённые области с неподвижными пространственными зарядами и называют *p-n*-переходом.

Если в этой области создать электрическое напряжение так, чтобы со стороны *p*-полупроводника был положительный полюс, а со стороны *n*-полупроводника отрицательный, то под действием электрического поля электроны из *n*-полупроводника и дырки из *p*-полупроводника будут перемещаться (инжектироваться) в область *p-n* – перехода (рис. 4.3). Энергия, необходимая для создания пары электрон – дырка, измеряется шириной запрещенной зоны. Когда возбужденные электроны переходят из зоны проводимости в валентную зону (а дырки в это же время совершают переход в противоположном направлении), происходит рекомбинация пар электрон – дырка; при этом выделяется энергия в виде квантов светового излучения (фотонов). При наличии оптического резонатора возможна генерация лазерного излучения.

Инжекционный лазер (лазер на *p-n* переходе). В качестве лазерных материалов доминируют кристаллы арсенида галлия GaAs *n*-типа. Расширение физических и технических возможностей полупроводниковых лазеров обеспечивают твердые растворы арсенида галлия, в которых атомы дополнительных элементов (алюминия – Al, индия – In, фосфора – P, сурьмы – Sb) смешаны и жестко фиксированы в общей кристаллической решетке базовой структуры – образуется слой трехэлементного соединения.

Лазер такого типа представляет собой многослойную структуру, а в упрощенном виде его устройство показано на рис. 4.4. К металлической пластине 5 припаян кристалл полупроводника. Чаще всего в инжекционных лазерах в качестве активного вещества используется арсенид галлия (GaAs) – соединение галлия и мышьяка 4 и 2. Электронно-дырочный переход образуется методом диффузии в пластину GaAs *n*-типа атомов Al или Zn (акцепторных атомов, создающих *p*-проводимость). Концентрации свободных носителей как в *p*-, так и в *n*-области весьма высоки.



Рис. 4.3. Процесс инжекции в области *p-n* – перехода

Рис. 4.4. Устройство инжекционного лазера

Внешняя поверхность *p*-слоя металлизируется и к ней, как и к металлической пластине - основанию, привариваются контактные выводы *I*. Кристалл полупроводника с линейными размерами порядка десятых долей миллиметра имеет форму неправильной усеченной четырехгранной пирамиды. Две боковые грани строго параллельны, их поверхности тщательно полируются, чтобы получился оптический резонатор. При подаче питания даже один <u>фотон</u> света, образовавшийся в *p-n* области *3* и имеющий направление движение, перпендикулярное этим отполированным торцам, будет многократно отражаться (рис. 4.3) и создавать все больше и больше новых фотонов. Интенсивность актов рекомбинации и, следовательно, излучения естественно зависит от величины тока, текущего через *p-n* переход. Генерация возникает при величинах токов, превышающих пороговое значение. Во избежание оптического резонанса между двумя другими гранями они скошены под углом к основанию, а поверхности их оставлены необработанными.

Длина волны излучения лазера на GaAs лежит в пределах $\lambda \approx 0.82 \div 0.9$ мкм. Варьируя состав лазерного материала, можно изменять ширину запрещенной зоны и, как следствие, длину волны лазерного излучения.

Лазерный луч на выходе из активной зоны p-n перехода достаточно тонок, но он сразу же начинает расходиться (рассеиваться). Углы расхождения луча инжекционного лазера весьма велики: до 1° в плоскости, перпендикулярной плоскости p-n перехода, и до 6-7° в параллельной плоскости (рис. 4.4). Чтобы собрать луч снова используют специальные собирающие линзы.

4.3. Кольцевой лазерный гироскоп

Существует два вида лазерных гироскопов. В основе одного лежит кольцевой лазер, другого – волоконно-оптический.

В кольцевом газовом лазерном гироскопе (КЛГ) носителем информации об угловой скорости относительно инерциального пространства является электромагнитное излучение, параметры которого изменяются в зависимости от вектора угловой скорости вращения. Фактически, это квантовый прибор с кольцевым активным резонатором, в котором излучения распространяются навстречу друг другу и выводятся на интерференционный оптический смеситель. На его выходе образуется сигнал разностной частоты интерферирующих встречных волн. Практически здесь реализуется известный эффект Саньяка.

Кольцевым резонатором является оптическая система, состоящая из трех или более отражателей, в которой траектория лазерного луча замкнута и лазерный луч, пройдя через все оптические элементы, замыкается сам на себя в плоскости резонатора. В настоящее время получили распространение моноблочные конструкции кольцевого газового лазера треугольной и четырех угольной схем построения [19, 21 - 24].

На рисунке 4.5 показан прибор с четырьмя отражателями, изготовленный на основе ситаллового моноблока 1. Ситалл – стеклокристаллический материал с заданными свойствами, получаемый направленной кристаллизацией стекол при их термической обработке. В нем просверливают каналы 2 и заполняют смесью газов: рабочего – неона (Ne) и примесного – гелия (He).

К симметрично расположенным электродам (3 – катод, 4 – аноды) подводится высокое напряжение от генератора накачки. В активной зоне газовой смеси возникает электрический разряд – атомы смеси переходят в возбужденное состояние. При обратном переходе на нижние энергетические уровни атомы Ne излучают световые волны лазерного (когерентного) излучения, которые возвращаются в исходную точку активной среды после полного обхода оптического контура. Устойчивая работа КЛГ обеспечивается вибрационной частотной подставкой 5.

Кольцевое движение оптических волн 6 достигается системой зеркал 7, 8. Причем, зеркала 7 являются зеркалами полного (100%) отражения, а зеркало 8 – полупрозрачным. Отраженные лучи с помощью полупрозрачного зеркала 8 и с помощью специального устройства, называемого оптическим смесителем 9, выводятся за пределы контура. В результате их сложения формируется интерференционная картина, перемещение полос которой в точности повторяет движение стоячей волны. Стоячая волна, обладает свойством неподвижности в инерциальном пространстве по отношению к вращательному движению. Наблюдая за положением (перемещением) этой волны относительно корпуса прибора, можно судить об угловом положении и угловой скорости гироскопа.



Рис. 4.5. Кольцевой оптический резонатор

Стоячая волна, в отличие от бегущей, не перемещается в пространстве со скоростью света. Одной из ее особенностей является наличие характерных точек, называемых узлами и пучностями. В узлах амплитуда колебаний равна нулю, а в пучностях достигает максимальных значений (рис. 4.6).



Рис. 4.6. Образование стоячей волны

На длине резонатора L должно укладываться целое число полудлин волн:

$$L = N \frac{\lambda}{2}$$

где *N* – некоторое целое число; *λ* – длина волны.

Выполнение этого условия достигается точной юстировкой отражающих зеркал. Стоячая волна всегда занимает такое положение, при котором узлы привязаны к зеркалам.

Частота следования интерференционных полос равна числу пучностей (узлов) стоячей волны N, проходящих через заданную точку в единицу времени, или, иначе говоря, укладывающихся на дуге, соответствующей углу φ , на который повернется прибор за ту же единицу времени:

$$f = \frac{N}{t} = \frac{\varphi}{\varphi_{\rm o}t} = \frac{\omega}{\varphi_{\rm o}},$$

где ω – угловая скорость (изменение угла во времени) равная φ/t ;

*ф*о – угол между соседними узлами стоячей волны.

Если принять, что в оптической схеме имеется круговой оптический контур радиуса R, получим:

$$\varphi_{\rm o} = \frac{\lambda}{2R} = \frac{\lambda \cdot 2\pi R}{4\pi R^2} = \frac{\lambda L}{4S}.$$

Здесь L – длина резонатора, S – площадь, охватываемая кольцевым резонатором, $\lambda/2$ – расстояние между узлами (пучностями).

В итоге, частота следования интерференционных полос при реализации эффекта Саньяка, будет определяться следующим выражением:

$$f = \frac{\Omega}{\varphi_0} = \frac{4S}{\lambda L} \Omega = K\Omega.$$
(4.3)

Здесь $K = \frac{4S}{\lambda L}$ – масштабный коэффициент лазерного гироскопа, Ω – скорость вращение гироскопа в рад/с в плоскости резонатора.

В известных конструкциях КЛГ величина масштабного коэффициента имеет порядок 10⁵ Гц/(рад/с).

Если представить масштабный коэффициент в виде $K = \frac{2S}{\lambda/2 \cdot L}$, то можно отметить, что входящее в него отношение 2S/L всегда равно радиусу окружности $R_{3\phi}$, которую можно вписать в оптический контур КЛГ (рис.4.7). Тогда выражение для масштабного коэффициента можно записать в виде

$$K = \frac{2\pi R_{\rm sp}}{\lambda/2} \tag{4.4}$$

т.е. масштабный коэффициент *К* равен числу полудлин волн генерируемого излучения, укладывающихся на длине окружности, вписанной в оптический контур [19].



Рис. 4.7. Оптический контур КЛ

Поскольку λ/2 – расстояние между узлами стоячей волны, приведенный вид масштабного коэффициента дает возможность интерпретировать измерение с помощью КЛГ угловой скорости следующим наглядным образом.

Стоячая волна, образующаяся в резонаторе суперпозицией (наложением) встречных волн, сохраняет свое положение относительно инерциальной системы отсчета независимо от углового перемещения резонатора.

В таком случае наблюдатель, связанный с резонатором, зафиксирует при угловых перемещениях резонатора КЛГ узлы или пучности стоячей волны электромагнитного поля, число которых в единицу времени даст разностную частоту Δf . При таком рассмотрении мож-

но условно провести аналогию между кольцевым лазерным гироскопом и механическим гироскопом. В механическом гироскопе используется инерция вращающейся массы, а в КЛГ – инерция покоящейся стоячей волны электромагнитного поля.

Таким образом, измеренная разностная частота на выходе кольцевого резонатора прямо пропорциональна угловой скорости вращения основания.

Измерение разностной частоты Δf (4.3) осуществляется системой съема информации КЛГ. Лучи λ_1 и λ_2 через полупрозрачное зеркало 8 и смесительную призму 9 выводятся из резонатора (используется небольшая доля их энергии – порядка 0,1%) под малым углом ε (~30") и поступают на двухэлементный фотоприемник ФП1 и ФП2, где интерферируют (рис. 4.5). Интерференционная картина характеризуется распределением в плоскости фотоприемника, например, вдоль оси *x*, интенсивности света *I* [19].

При отсутствии вращения КЛГ ($\Delta f = 0$) интерференционная картина стационарна и имеет пространственный период *d*, составляющий λ/ε (~ 3 мм); при вращении КЛГ интерференционные полосы перемещаются по поверхности фотоприемника в направлении, определяемом знаком Ω , а интенсивность света *I* в фиксированной точке изменяется с частотой Δf . Фототок I_{ϕ} на выходе фотоприемников, имеющих размер чувствительной поверхности много меньший периода *d*, пропорционален *I* и также изменяется с частотой Δf . Таким образом, по частоте изменения фототока можно судить об измеряемой угловой скорости Ω .

Два фотоприемника разнесены вдоль оси x на четверть периода интерференционной картины $\lambda/4\varepsilon$. Это обеспечивает фазовый сдвиг фототоков на $\pi/2$ со знаком, определяемым направлением смещения интерференционных полос, и позволяет с помощью фазового детектора определить знак Ω .

Каждому из периодов появления фототока ставится в соответствие импульс, поступающий с формирователя импульсов на реверсивный счетчик, который суммирует их с учетом знака, определяемым фазовым детектором. Реверсивный счет позволяет правильно определить угловое перемещение объекта, на котором установлен КЛГ.

Использование оптического диапазона частот, т.е. очень малых длин волн, позволяет реализовать чрезвычайно высокую чувствительность лазерного гироскопа к угловой скорости вследствие большой величины масштабного коэффициента (4.4). Так, например, лазерный гироскоп, построенный на оптическом квантовом генераторе, представляющем собой четырехугольный резонатор со стороной 10 см, при длине волны $\lambda = 0,633$ мкм обладает чувствительностью 1,2" угл. сек – это цена одного импульса равная 1/К. Таким образом, полный оборот на 360° даст 0,5·10⁶ импульсов отсчета.

Рассмотренные принцип действия и устройство газового лазерного гироскопа дают информацию об угловой скорости, действующей вдоль его одной оси чувствительности, которая перпендикулярна плоскости распространения лазерных лучей. Для получения полной информации относительно всех трех осей объекта используют датчики угловой скорости в виде моноблока, во взаимно перпендикулярных плоскостях которого установлены одноосные лазерные измерители угловых скоростей (рис. 4.8).



Рис. 4.8. Вариант конструкции трехосного КЛГ

Обычно трехосные моноблочные лазерные *гирометры* имеют периметр от 10 до 24 см (в каждом одноосном), позволяющие создавать *безинерционные* информационные навгационные системы (БИНС) высокой, средней и умеренной точности для различных типов самолетов, морских судов, наземного транспорта и др.

Достоинствами лазерного гироскопа являются:

- относительно малые габариты и компактность конструктивного плана;
- отсутствие вращающихся механических частей;

- практически мгновенный запуск;

- малая потребляемая мощность (единицы ватт);

 высокая точность измеряемых угловых скоростей в широком динамическом диапазоне (от 10⁻³ °/ч до 10³ °/с);

 совместимость лазерного гироскопа с цифровой вычислительной техникой.

Недостатки:

- высокая стоимость комплектующих изделий;

- сложность технологии изготовления;

- наличие высоковольтного источника питания;

– введение в оптический контур дополнительных корректирующих элементов снижающих общую добротность контура.

Полупроводниковый лазерный гироскоп. Для создания двунаправленного режима лазерного луча можно использовать пассивный внешний оптический резонатор с использованием полупроводникового лазера. При этом вся оптическая конструкция может быть реализована, например, на базе органического стекла без дополнительных условий на герметизацию оптических каналов моноблока. Данное положение определяет более простую технологию изготовления при прочих равных параметрах изделия.

Один из вариантов построения полупроводникового лазерного гироскопа в виде треугольного оптического моноблока показан на рис. (4.9) [19, 23].



Рис. 4.9. Полупроводниковый лазерный гироскоп

Треугольный оптический моноблок 1 изготовлен из оптически прозрачного материала (ситалла), в котором просверлены цилиндрические каналы 2. Оси этих каналов лежат в одной плоскости и образуют равносторонний треугольник, в вершинах которого расположены зеркала 3, 4 и 5. Зеркала 3 и 4 имеют отражательную поверхность с очень высокой отражательной способностью в диапазоне рабочих частот излучения, что достигается применением многослойного диэлектрического покрытия. Зеркало 5 является полупрозрачным, благодаря чему осуществляется вывод лучевой энергии из контура для съема выходного сигнала. Поверхность отражающего зеркала 4 выполнена в виде участка сферы большого радиуса, что позволяет значительно упростить юстировку оптического контура моноблока 1.

Устройство лазерного гироскопа работает следующим образом. При подаче низковольтного питания (2,5 – 5,0 В) на лазерный диод 8 последний генерирует многомодовое излучение. Для нормального функционирования устройства целесообразно, чтобы излучение было максимально близко к одномодовому, у которого ширина спектра излучения представляется одним весьма узким диапазоном $\delta \lambda = 0,1 - 0,4$ нм. Дополнительный оптический резонатор 7 фактически является пассивным резонатором.

Оптический резонатор представляет собой усеченную полусферу, изготовленную из того же материала, что и весь моноблок. Под полупроводниковый лазерный диод 8 имеется посадочное место. На боковых гранях сформированы два оптически прозрачных отверстия 9 на уровне, совпадающем с уровнем оптических цилиндрических каналов моноблока интерферометра. Полусфера покрыта тонкопленочным светоотражающим покрытием, например, серебра (Ag) или алюминия (Al). В итоге, образуется оптический резонатор, в котором излучение от полупроводникового лазера формируется в виде параллельного пучка вдоль созданного канала, т.е. имеет место почти плоский волновой фронт, а излучение является узконаправленным и двухсторонним.

Для съема выходного сигнала лазерного датчика угловых скоростей (лазерного гироскопа) полупрозрачным зеркалом 5 и призмой 6 встречные лучи λ_1 и λ_2 выводятся из контура под малым углом ε друг к другу (рис. 4.5). Образуемая при этом интерференционная картина, представляющая собой интерференционные полосы, следующие друг за другом с определенной разностью частот, фиксируется фотоприемником, входящим в систему обработки информационного сигнала от лазерного гироскопа, как это уже было рассмотрено выше. В итоге обеспечивается цифровая обработка информационного сигнала гироскопа в интересах потребителя.

4.4. Волоконно-оптический гироскоп (ВОГ)

Интерферометрический волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) является достаточно распространенным высокоточным датчиком угловой скорости объекта. ВОГ является логическим продолжением кольцевого лазерного гироскопа, выпускаемого в настоящее время. В КЛГ чувствительным контуром является кольцевой самовозбуждающийся резонатор с активной газовой средой и отражающими зеркалами, в то время как в ВОГ пассивный многовитковый диэлектрический световодный контур возбуждается внешним источником света [18 - 20].

По сравнению с кольцевыми лазерными гироскопами волоконнооптические оказались существенно более простыми в изготовлении, более надежными и, что самое важное, с позиции их гражданского применения, более дешевыми и в этой связи весьма перспективным с позиций применения на судах морского флота.

Существуют и другие чисто технические преимущества волоконнооптических гироскопов по сравнению с лазерными: в них практически отсутствует явление "захвата", отпадает необходимость в таком сложном блоке как резонатор, отсутствуют сложные в изготовлении зеркала и т.д.

Принцип действия волоконно-оптического гироскопа схож с принципом действия лазерного гироскопа и основан на вихревом (вращательном) эффекте Саньяка. Отличие состоит лишь в том, что свет распространяется в канале замкнутого контура, представляющем собой катушку оптического волокна При вращении катушки с некоторой угловой скоростью вокруг оси, ортогональной плоскости витков катушки, происходят явления, аналогичные тем, что были рассмотрены в лазерном гироскопе.

То есть, если в замкнутом оптическом контуре распространяются два луча в противоположных направлениях, то при неподвижном контуре фазовые набеги обоих лучей, прошедших весь контур, будут одинаковыми. При вращении контура вокруг своей оси порождается фазовая невзаимность, выражающаяся в возникновении разности фаз лучей на выходе пропорциональной угловой скорости вращения контура.

Принципиальная схема организации волоконно-оптического гироскопа приведена на рис.4.10.



Рис. 4.10. Принципиальная схема ВОГ

Основными составными элементами волоконно-оптического гироскопа являются:

- чувствительный элемент, который представляет собой оптическое волокно определенной длины, уложенное в многовитковый контур;

- источник излучения - суперлюминесцентный эрбиевый волоконный диод;

- фотоприемный модуль, преобразующий интерферированный сигнал в электрический;

- блок обработки - это электронная плата, способная обрабатывать сигналы, получаемые с фотодетектора, рассчитывать времена прохождения контура двумя световыми волнами, двигающимися навстречу друг другу, и по их разности фаз определять угловую скорость вращения датчика чувствительности.

Возможность создания реального высокочувствительного ВОГ появилась лишь с промышленной разработкой одномодового диэлектрического световода с малым затуханием. Конструирование ВОГ именно на таких световодах определяет уникальные свойства прибора. К этим свойствам относят:

• высокую чувствительность (точность) прибора, которая уже сейчас достигает 0,01 град/ч и менее;

• малые габариты и масса конструкции, благодаря возможности создания ВОГ полностью на интегральных оптических схемах;

• широкий динамический диапазон измеряемых угловых скоростей (в частности, например, одним прибором можно измерять скорость поворота от 1 град/ч до 500 град/с);

• малое потребление энергии, что имеет немаловажное значение при использовании ВОГ на автономных движущихся объектах;

• отсутствие вращающихся механических элементов (роторов) и подшипников, что повышает надежность приборов и удешевляет их производство;

• быстрое время готовности к работе, поскольку нет необходимости в раскрутке массивного ротора динамического гироскопа.

Эти свойства ВОГ, позволяющие создать простые высокоточные конструкции полностью на дешевых твердых интегральных оптических схемах при серийном производстве привлекают пристальное внимание разработчиков систем управления. Благодаря своим уникальным техническим возможностям волоконные гироскопы несомненно будут лежать в основе создания современных транспортных навигационных систем.

Рассмотрим более детально работу ВОГ, анализируя прохождение световых лучей в контуре, показанном на рис. 4.11 [19].

В отсутствие вращения контура точка A расщепления лучей неподвижна и встречные волны обходят его за одинаковое время. При вращении время обхода волны (+) увеличивается, а для волны (-) уменьшается. Получим величину $4\pi R^2$

эффекта, то есть разность времен обхода для встречных волн $\Delta t = \frac{4\pi R^2}{c^2} \Omega$, про-

порциональной скорости вращения Ω (формула 4.1). Значит, лучи пройдут различные расстояния, а их разность составит $\Delta L = c\Delta t$.

Разность фаз встречных волн на выходе интерферометра Саньяка определяется разностью оптических длин $\varphi = 2\pi \frac{\Delta L}{\lambda}$. Учитывая, что разность оптических длин в интерферометре Саньяка $\Delta L = c\Delta t = \frac{4\pi R^2}{c} \Omega$ пропорциональна скорости вращения (выражение (4.2)), получаем для разности фаз в радианах $\varphi_S = \frac{8\pi S}{\lambda c} \Omega$. Здесь под φ_S понимаем разность фаз, обусловленную эффектом Са-

ньяка или вращением. Если замкнутый контур образуется катушкой волокна с *N* витками, то эффективная площадь интерферометра увеличивается в *N* раз. В этом случае получаем разность фаз встречных волн после обхода контура в виде

$$\varphi_{S} = \frac{8\pi NS}{\lambda c} \Omega = \frac{4\pi RL}{\lambda c} \Omega$$
 или $\varphi_{S} = K\Omega$,

где *L* – длина волокна в оптическом контуре, учитываем, что $S = \pi R^2$.

Коэффициент пропорциональности $K = \frac{4\pi RL}{\lambda c}$ между угловой скоростью и фазой Саньяка называется оптическим масштабным коэффициентом преобразователя и определяет диапазон измеряемых угловых скоростей.



Рис. 4.11 Принцип возникновения эффекта Саньяка

При сложении световых пучков на выходе интерферометра (на фотодетекторе) получается интерференционная картина с некоторым распределением интенсивности света по пространственной координате.

Зависимость интенсивности света I в интерференционной картине от разности фаз встречных волн или скорости вращения Ω (в радианах) показана на рис. 4.12. Как видно из рисунка, выходная характеристика ВОГ пропорциональна функции косинуса и обладает существенной нелинейностью.

Кроме того, в области малых скоростей вращения чувствительность к вращению минимальна, поскольку рабочая точка в этой области находится на плоской вершине косинуса. Техника обработки выходного сигнала позволяет устранить этот недостаток.



Рис. 4.12. Зависимость интенсивности света в интерференционной картине от разности фаз встречных волн



Рис.4.13. Полезный сигнал в блоке обработки

Производя демодуляцию, т.е. выделяя составляющую на 1-ой гармонике частоты модуляции, получают сигнал *S* (постоянный после фильтрации и выпрямления), пропорциональный синусу саньяковского сдвига фаз φ_S и соответственно скорости вращения Ω (рис. 4.13).

Сигнал *S*, полученный после демодуляции, является полезным сигналом со стабильным нулем. Путем последующей обработки сигнала *S* добиваются практически линейной зависимости первичного сигнала φ_S от угловой скорости вращения Ω , как это показано на рис.4.14 уже с учетом параметра *LR* – эффективной площади всего контура.

Можно увеличивать или уменьшать чувствительность ВОГ, изменяя площадь волоконной катушки. Такая гибкость в изменении параметров ВОГ путем изменения его геометрии является важным преимуществом технологии ВОГ, поскольку одни и те же компоненты и техника сборки могут быть использованы для создания гироскопов разной точности без изменения особенностей конструкции.



В типичных конструкциях гироскопов используется катушка с радиусом R =50...100 мм при длине волокна L =500...2000 м. Обнаружение скорости вращения в 1 град/ч требует регистрации фазы с разрешением порядка 10⁻⁵ рад. В работе ВОГ крайне важно, чтобы фаза луча, распространяющегося по часовой стрелке, не отличалась от фазы луча, распространяющегося против часовой стрелки, в отсутствии вращения, т.е. чтобы соблюдался *принцип взаимности*.

Рис.4.14. Зависимости фазы φ_S от угловой скорости вращения Ω в ВОГ

Фазовая невзаимность в ВОГ определяется дифференциальной разностью фаз встречно бегущих лучей. Любая фазовая невзаимность для двух направле-

ний дает изменения в показаниях гироскопа. Если невзаимность является функцией времени, то имеет место некоторый временной дрейф в показаниях гироскопа. Волокно длиной 500 м дает фазовую задержку порядка 10⁻¹⁰ рад. Таким образом, для того чтобы зарегистрировать скорость вращения 0,05 град/ч, нужно, чтобы пути распространения противоположно бегущих лучей согласовывались с относительной точностью до 10⁻¹⁷ рад.

Чувствительность ВОГ к скорости вращения выражается в специфических единицах Ω_{μ} . При скорости вращения, равной Ω_{μ} , разность фаз встречных волн равна 1 микрорадиану, что хорошо соответствует оценке шумового предела или нестабильности сдвига нуля ВОГ, лежащих обычно в диапазоне от 0,1 до 10 мкрад.

Например, для ВОГ, имеющего диаметр катушки D = 10 см при длине оптического волокна L = 1000 м и длине волны излучения $\lambda = 1,55$ мкм, получены следующие параметры: при разности фаз встречных волн, равной π скорость вращения $\Omega_{\pi} = 133$ град/сек; чувствительность $\Omega_{\mu} = 0,15$ град/ час. Видно, что данный прибор имеет высокую чувствительность и широкий диапазон измеряемых угловых скоростей.

При разработке ВОГ приходится сталкиваться с рядом трудностей: производство качественного одномодового волокна и сопутствующих компонентов, подавление паразитных дрейфов и тепловых шумов, обеспечение устойчивости к ударам и вибрациям и ряд других.

Разработчиками ВОГ эти задачи решаются. Совершенствуется технология производства элементов в ВОГ, теоретически и экспериментально исследуются физическая природа возмущений и нестабильностей, создаются и испытываются различные схемные варианты ВОГ с компенсацией этих возмущений, разрабатываются фундаментальные вопросы использования интегральной оптики. Точность ВОГ уже сейчас близка к требуемой в *инерциальных системах управления*.

4.5. Особенности конструкции ВОГ

ВОГ минимальной конфигурации. В качестве примера рассмотрим общие принципы технического построения волоконно-оптического преобразователя «минимальной конфигурации» ВГ951 производства компании «Физопти-ка», схема которого показана на рис. 4.15 [25, 26].

Преобразователь состоит из двух основных узлов:

• Кольцевой интерферометр, содержащий волоконный контур (катушка), сварные волоконно-оптические ответвители, волоконно-кристаллический поляризатор, пьезокерамический фазовый модулятор (ФМ) и светодиодный излучающий модуль (СЛД).

• Плата обрабатывающей электроники с интегрированным фотоприемным усилителем (УФП).

Устройство является оптическим интерферометрическим датчиком вращения. Это датчик, в котором разность фаз интерферирующих волн определяется внешним физическим эффектом. Хотя волоконно-оптические датчики вращения часто называют *гироскопами*, принцип их функционирование не имеет ничего общего с классическим гироскопическим эффектом, обусловленным силой Кориолиса. Принцип работы волоконно-оптического датчика вращения основан на релятивистском эффекте Саньяка Используемое в датчике оптическое волокно, сохраняющее поляризацию излучения, устраняет эффекты вращения поля и обеспечивает исключительную стабильность и точность измерения угловой скорости. Точность измерения определяется качеством оптических компонентов, которое определяется их степенью подавления паразитных оптических лучей.



Рис. 4.15. Основные узлы и компоненты ВОГ минимальной конфигурации: *1* – плата УФП; *2* – фотодиод; *3* – СЛД; *4* – фазовые модуляторы; *5* – катушка волоконного контура; *6* – корпус

Основные узлы и компоненты. Данный преобразователь вращения включает:

Волоконно-оптический контур, который изготовлен из особо тонкого анизотропного оптического волокна (диаметр – 45 мкм, световедущая жила – 2 мкм). Длина волокна около 180м, диаметр катушки 130 мм. Применяется специальный тип намотки.

Типичными параметрами одномодового волокна являются следующие: диаметр сердцевины 7 мкм, диаметр оболочки 125 мкм, полный диаметр волокна 200 мкм, длина волны 1,55 или 1,3 мкм, потери 0,2 дБ/км. Часто материалом для изготовления световодов служит чистый кварц, покрытый светоотражающей полимерной оболочкой, либо легированный окислами бора, фосфора, германия и т.д. Длина периметра контура 200...2000 м, диаметр катушки 70...250 мм.

Фазовый модулятор представляет собой отрезок волокна, намотанный на боковую поверхность пьезокерамического цилиндра (ПЗТ).

Волоконный биконический ответвитель осуществляет оптическую связь между двумя волокнами. Используется для смешивания/деления световых потоков, изготавливается по сварной технологии.

Волоконно-кристаллический поляризатор. Слово «поляризация» означает, что колебания волн происходят в каком-то одном направлении. В данном случае применен монокристалл натриевой селитры, обладающий определенным показателем преломления и путем подбора геометрических размеров отрезка волокна d добиваются требуемого направления β (рис. 4.16) распространения волны для дальнейшего анализа интерференции встречных волн.

Светодиодный модуль – относится к источникам излучения, получившим название суперлюминесцентных диодов (СЛД). При использовании GaAlAs в качестве структурного материала диод работает в диапазоне 0,85 мкм. Принцип действия был рассмотрен в п.4.2 (инжекторный источник лазерного излучениия). Данный СЛД оптически согласован с волокном, обладает высокой яркостью при низкой когерентности. Применение этих СЛД обеспечило существенное уменьшение нестабильности сдвига нуля и подавление избыточного шума в интерферометре.

Оптическая заглушка - специально обработанный торец волокна для подавления обратного отражения.



Рис.4.16. Принцип поляризации света в оптическом волокне

Оптические компоненты изготавливаются последовательно на одном отрезке оптического волокна заданной длины. При этом стыковки отдельных оптических компонентов не требуется и оптические потери минимальны.

На рис. 4.17. показаны виды конструкций одноосного ОИУС-2000 (слева) и трехосного БЧЭ-1000 (справа) ВОГ, выпускаемых компанией "Оптолинк" [27]. Ниже в таблице приведены параметры этих моделей, которые характерны и для ВОГ, выпускаемых рядом других ведущих компаний, специализирующихся в данной области.



Рис. 4.17. Варианты конструкций одноосного (слева) и трехосного (справа) ВОГ.

Парамотр	ОИУС-2000	БЧЭ-1000
Параметр	Одноосный	Трехосный
Диапазон измеряемых угловых скоростей, °/сек	±30	±90
Смещение нуля при фиксированной температуре, 10, °/час	0,005	0,01
Погрешность масштабного коэффициента, %	0,008	0,001
Спектральная плотность шума, °/√час	0,0005	0,0007
Длина волоконного контура, м	2000	3x1000
Акселерометры (АТ-110), диапазон измеряемых линейных		+10 +50
ускорений, д		±10 ±30
Питание, В	5 или 18-36	5 или 24 ~ 36
Диапазон рабочих температур, °С		-40 ~ +60
Масса, кг	1,7	5
Габариты, мм	Ø 250x40	215x217x175
Выходной сигнал	Цифровой	Цифровой

Параметры некоторых ВОГ компании ОПТОЛИНК

Высокоточные ВОГ. Интерес ведущих фирм к оптическому гироскопу базируется на его потенциальных возможностях применения в качестве чувствительного элемента вращения в инерциальных системах навигации, управления и стабилизации. Этот прибор в ряде случаев может полностью заменить сложные и дорогостоящие электромеханические (роторные) гироскопы и трехосные гиростабилизированные платформы. По данным зарубежной печати в будущем в США около 50% всех гироскопов, используемых в системах навигации, управления и стабилизации объектов различного назначения, предполагается заменить волоконными оптическими гироскопами. Основным назначением морских *инерциальных навигационных систем* (ИНС) является определение местоположения объекта и начальная выставка объекта относительно земной системы координат. Гироскоп в этих ИНС обычно должен иметь стабильность не хуже 0,006°/ч.

При использовании в катушке ВОГ волокна с сохранением поляризации и реализации ряда дополнительных методов и средств построения ВОГ его точностные характеристики могут быть доведены до уровня требований к гироскопам, использующимся в высокоточных ИНС для подводных лодок и некоторых космических аппаратов. (В этом случае нестабильность сдвига нуля должна быть менее 0,001°/ч.) К таким методам и средствам прежде всего относится использование волоконного суперлюминесцентного источника излучения, обеспечивающего работу на длине волны 1,55 мкм (сердцевина волокна активизируется ионами редкоземельных элементов, в частности, ионами эрбия).

В настоящее время в данном направлении получены следующие результаты. Стабильность сдвига нуля оказалась на уровне 0,0003 °/ч, случайный дрейф примерно 0,0002°/ч. Указанная стабильность сдвига нуля эквивалентна скорости вращения порядка одного оборота за 150 лет!

4.6. Волоконно-оптический компас

Волоконно-оптический компас NAVIGAT 3000 – новый продукт компании Northrop Grumman Sperry Marine, являющийся развитием модели NAVIGAT 2100, параметры которого существенно улучшены, а габариты уменьшены.

Волоконно-оптический компас NAVIGAT 3000 – это электронная цифровая система для навигации на море [28].

Принцип действия компаса NAVIGAT 3000 основан на инвариантности (постоянстве) скорости света и эффекте Саньяка.

Чувствительные элементы гирогоризонткомпаса — три волоконнооптических гироскопа (fiber-optic gyroscope) и два горизонтальных электронных акселерометра (electronic level sensors).

По данным от трех датчиков угловой скорости – гироскопов, ориентированных по осям судна, и двух акселерометров, измеряющих ускорения, с использованием фильтра Калмана вычисляются параметры ориентации судна (курс, крен, дифферент, скорость перемещения относительно всех трех осей) определенные в горизонтной (географической) системе координат. Микропроцессор осуществляет функции пересчета с высоким быстродействием.

Разработанный с применением бесплатформенных технологий, волоконно-оптический компас NAVIGAT 3000 устанавливается непосредственно на судне без использования системы карданного подвеса.

Волоконно-оптический компас NAVIGAT 3000 может также использоваться в качестве датчика стабилизационных систем не только на обычных судах, но и на судах на подводных крыльях и катамаранах. Чрезвычайно малое время вхождения в меридиан, равное 30 минутам, является большим преимуществом компаса. Высокая динамическая точность и отсутствие широтной погрешности существенно повышает безопасность мореплавания для всех типов судов.

Компас NAVIGAT 3000 имеет совершенно жесткую конструкцию без вращающихся или других подвижных частей. Благодаря этому, среднее время безотказной работы значительно выше, чем у стандартных гирокомпасов. Компас NAVIGAT 3000 не нуждается в техническом обслуживании в течение всего срока эксплуатации.

Кроме датчика базовая система компаса NAVIGAT 3000 включает устройство управления и дисплей, а также модуль интерфейса и блока питания, показанные на рис. 4.18.

Аналоговые и цифровые дисплеи и другая периферийная аппаратура получают выходные данные через последовательные интерфейсы. Также возможно добавить к системе в качестве резерва гирокомпас стандартного типа или систему магнитного компаса с передающим устройством.



Рис. 4.18. Базовая система компаса NAVIGAT 3000

Основные технические характеристики			
Характеристики в соответствии с требованиями IMO.			
Точность определения данных:			
Курс:	≤0.4° sec <i>φ</i> , ср кв.;		
Угол килевой/бортовой качки:	≤0.1° для углов≤ 45° ср. кв.;		
Скорость поворота:	≤0.018°/мин;		
Диапазон определения данных:			
Курс:	0° 360°;		
Килевая и бортовая качка (доп.):	±45°;		
Угловые скорости (Х, Ү, Ζ):	±90°/c;		
Температура окружающей среды:	-15°C +55°C.		
Время приведения в меридиан:			
статические условия ≤ 10 мин. в широтах $\leq 78^{\circ}$; ≤ 4 мин. в широтах $\leq 45^{\circ}$;			
в условиях моря ≤30 мин;			
ПИТАНИЕ: ≈115/230 В пер. тока 50/60 Гц и/или 24 В пост тока (18 В 36 В)			
ВЕС: Датчик – 3,5 кг; Блок интерфейса и питания: – 15 кг;			
Блок отображения и управления: – 1,6 кг.			

Ниже на рис 4.19 приведен вид датчика волоконно-оптического гироком-

паса **NAVIGAT 2100**, предшествующей модели гирокомпаса NAVIGAT 3000, для общего представления о конструкции гирокомпасов данного типа.

На рис. 4.19, *а* показан внешний вид основного измерительного прибора, а на рис 4.19, *б* видны его главные компоненты: 1 – центральный процессор и блок питания; 2 – волоконно-оптический датчик по оси X; 3 – волоконнооптический датчик по оси Y; 4 – волоконно-оптический датчик по оси Z; 5 – электронные датчики положения. Из этого вида ясно, что гирокомпасы данного типа представляют собой вычислительный комплекс, основанный на самых последних достижениях науки и технологий.

В основном технические характеристики компаса NAVIGAT 2100 аналогичны компасу NAVIGAT 3000, однако, последний является более совершенной моделью.



Рис 4.19. Вид датчика волоконно-оптического гирокомпаса NAVIGAT 2100

4.7. Понятие об инерциальных навигационных системах

Обычные методы решения задач навигации основываются на использовании внешних ориентиров или сигналов (например, звезд, маяков, радиосигналов и т.п.). Эти методы в принципе достаточно просты, но в ряде случаев не обладают необходимой точностью, особенно при больших скоростях движения объекта (летательного аппарата), и не всегда могут быть осуществлены из-за отсутствия видимости или наличия помех для радиосигналов и др. причин (например, в случае подводного плавания). Необходимость создания навигационных систем, свободных от этих недостатков, явилась причиной возникновения инерциальной навигации (ИН). Разработка основ ИН относится к 30-м гг. 20-го века. Принципы ИН базируются на сформулированных еще Ньютоном законах механики, которым подчиняется движение тел по отношению к *инерциальной системе отсчета* (ИСО) – для движений в пределах Солнечной системы по отношению к звездам.

С очень высокой степенью точности ИСО можно считать гелиоцентрическую (звездную) систему с началом в центре Солнца (точнее в центре масс Солнечной системы) и с осями, направленными на три звезды. Такая ИСО используется главным образом в задачах небесной механики и космонавтики.

Для определения положения и перемещения объкта (судна) на поверхности Земли используют горизонтную систему координат ONEn. Она жестко связана с некоторой точкой O наблюдателя и имеет оси: ON, направленную по касательной к меридиану на север; OE – по касательной к параллели на восток; On – по местной отвесной линии zn к надиру. Это горизонтная система координат. Такую систему называют еще *трехгранником* с вершиной в точке O, которая может быть совмещена с центром масс объекта, находящегося в движении.

Трехгранник $OX_cY_cZ_c$ определяет систему координат, связанную с корпусом судна. Чтобы непрерывно знать направление движения судна и его текущие координаты, необходимо чтобы трехгранник $OX_cY_cZ_c$ непрерывно сохранял географическую ориентацию. Для этого необходимо найти кинематические элементы движения трехгранника $OX_cY_cZ_c$: проекции абсолютной угловой скорости вращения трехгранника на оси горизонтной системы координат и проекции абсолютного линейного ускорения его вершины.

Представим, что на судне установлена платформа, стабилизированная каким-то образом в горизонтной системе координат, причем ось $X_0 - X_0$ платформы в любой момент времени совпадает с линией N – S, а ось $Y_0 - Y_0$ – с линией E – W [1].

Если установить на такой платформе *акселерометры* – высокоточные приборы, непрерывно измеряющие ускорения судна W_N и W_E по линиям N – S, и E – W, то по величинам этих ускорений после интегрирования, введя начальные значения составляющих скорости $V_N(0)$ и $V_E(0)$, вычисляют текущие значения северной и восточной составляющих скорости судна по меридиану и параллели в любой момент времени.

Имея эти данные легко определить составляющие *S* пути судна – по меридиану $S_{\rm M}$ и по параллели $S_{\rm n}$, а также приращения широты $\Delta \varphi$ и долготы $\Delta \lambda$. Таким образом, система инерциальной навигации есть система счисления пути.

Ускорение является векторной величиной, которая имеет не только численное значение, но и направление. Следовательно, система датчиков, определяющая ускорение, должна измерять и его величину и его направление. Акселерометр измеряет величину. Информацию о направлении дают гироскопы, обеспечивающие опорную систему координат для акселерометров. Акселерометры, измеряя фактическое ускорение, скажем, летательного аппарата, судна, в то же время реагируют на гравитационное поле. Для компенсации этого ускорения система инерциальной навигации вычитает из выходных данных акселерометров вычисленное значение *g*. Величина *g* вычисляется как функция местоположения (координат), в частности долготы и широты.

Итак, система инерциальной навигации измеряет кажущееся ускорение, в которое входит ускорение свободного падения. Затем она, дважды интегрируя эту величину, находит местоположение. И, наконец, исходя из этого вычисленного местоположения, вычисляет величину g, которая вычитается из кажущегося ускорения, определяя тем самым истинное ускорение движения судна. Такая система с обратной связью второго порядка (рис. 4.20) ведет себя, как генератор колебаний очень низкой частоты в двух ортогональных горизонтальных направлениях. Период колебаний на уровне моря равен 84,4 мин – это известный период колебаний М.Шулера (см. п. 2.4.2).



Рис. 4.20. Инерциальная навигационная система с обратной связью

В прежних системах инерциальной навигации опорная система координат обеспечивалась установкой акселерометров и гироскопов на стабилизированной платформе в кардановом подвесе. Такой подвес изолировал платформу от поворотов судна. Это позволяло удерживать акселерометры в неизменной ориентации относительно Земли при движении объекта. В современных системах инерциальной навигации применяются компьютеры, следящие за ориентацией акселерометров. Такие системы называются *бесплатформенными*. Выходные данные гироскопов поступают непосредственно на компьютер, который вычисляет мгновенное направление акселерометров в опорной системе координат и соответствующие корректирующие сигналы.

Рассмотрим более подробно процесс счисления пути, реализованный в судовых инерциальных навигационных системах [7].

Обобщенная функциональная схема приведена на рис. 4.21.

Функциональная схема иллюстрирует алгоритм системы, работающей в подвижной системе координат. Гироскопы и акселерометры вместе с сервисной электроникой объединяются в инерциальный измерительный модуль (ИИМ), являющийся источником первичной навигационной информации.



Рис. 4.21. Функциональная схема судовой инерциальной навигационной системы

Информация с гироскопов в виде проекций вектора абсолютной угловой скорости Ω_a на связанные с судном оси подается в блок ориентации вычислителя. Алгоритм работы блока основан на решении кинематических уравнений, записанных относительно искомых параметров ориентации – рассчитываются курс *K*, крен θ и дифферент судна ψ .

Алгоритм ориентации также формирует матрицу C, с помощью которой осуществляется пересчет информации из связанной системы координат в горизонтную (географическую). Для определения матрицы C необходимым является привлечение информации об абсолютной угловой скорости горизонтного трехгранника $\Omega_{\rm g}$.

Информация с акселерометров в виде проекций вектора кажущегося ускорения W_c на оси связанной системы координат передается в блок пересчета, с помощью которого осуществляется проектирование проекций кажущегося ускорения W_c , измеренных акселерометрами, на оси горизонтной системы координат W_g . Информация о проекциях кажущегося ускорения на оси горизонтной системы координат поступает в навигационный алгоритм, где вырабатываются координаты местоположения объекта φ , λ и скорость V_c . Здесь же определяется абсолютная угловая скорость Ω_g горизонтной системы координат, поступающая в алгоритм ориентации.

Начальные значения курса, крена и дифферента в условиях неподвижного объекта могут быть определены, находя положение вектора угловой скорости Земли посредством измерения его трех составляющих с помощью блока гироскопов, а также вектора ускорения силы тяжести на основе измерения его трех составляющих с помощью блока акселерометров. Оба указанных вектора нахо-
дятся в плоскости истинного меридиана, что является определяющим обстоятельством для поиска ее положения. Плоскость ортогональная вектору ускорения силы тяжести однозначно определяет плоскость истинного горизонта.

Поскольку все измерения выполняются с помощью гироскопов и акселерометров, имеющих определенную ориентацию по отношению к осям системы координат, жестко связанным с судном, то всегда имеется возможность расчета начальных значений угловых координат судна по отношению к плоскостям истинного меридиана и горизонта, т.е. углов $K_{(0)}$, $\theta_{(0)}$ и $\psi_{(0)}$.

Основним недостатком систем инерциальной навигации является накопление погрешностей с течением времени. Тем не менее, непрерывное совершенствование технологических процессов их производства позволяет надеяться на постепенное вытеснение ими традиционных гироскопических систем, использующих подвижные механические элементы.

Главные требования, предъявляемые к современным инерциальным навигационным системам: точность, надёжность, долговечность, простота эксплуатации и обслуживания. Этим требованиям отвечают применяемые в мировом кораблестроении бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС). Так, ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» разработана бесплатформенная инерциальная навигационная система "Бемоль-Н" [29]. Достоинства системы: высокая точность вырабатываемых навигационных данных (позволяющая осуществлять навигацию в автономном режиме с погрешностью определения курса не более 6 угловых минут) и динамических параметров (бортовой и килевой качки – с погрешностью не более 1 угловой минуты; угловых скоростей качки – с погрешностью не более 0,2 градуса в секунду), а также малое время начальной выставки (1 час). "Бемоль-Н" рассчитана на эксплуатацию в течение 25 лет и обеспечивает неограниченное время работы в пределах полного среднего ресурса (не менее 120 000 часов).

Для морских применений компанией IXCEEA OCEANO (Франция) разработан волоконно-оптический гирокомпас **OCTANS** со встроенным датчиком движения (рис. 4.22) [30]. В основе OCTANS лежит уникальная технология сверхпроизводительного бесплатформенного оптоволоконного гироскопа (FOG); он состоит из 3-х ВОГ и 3-х кварцевых акселерометров.

ОСТАNS пятого поколения даже в самых сложных условиях способен предоставлять высокоточные оперативные сведения о курсе, крене, дифференте, магнитном направлении (точность до $0,05^{\circ} \sec \varphi$), вертикальной качке (при волнах с периодом до 30 секунд), а также ускорении и угловой скорости поворота. Причем, нет необходимости в использовании GPS/GNSS. Это позволяет устанавливать новый стандарт в сегменте морского навигационного оборудования.



Рис. 4.22. Вид гирогоризонткомпаса Octans IV

ОСТАNS сертифицирован по требованиям IMO и предназначен для разнообразных гражданских и оборонных нужд, включая морские геодезические операции (MBES/Lidar), офшорную добычу нефти и газа, динамическую локацию (DP), мониторинг движения, стабилизацию платформ, а также безопасную и надежную навигацию в отсутствии GPS (например, в тоннелях и оборонных системах). Также может быть использован для подводного контроля и управления (на аппаратах с глубиной погружения до 6000 м).

Преимуществами бесплатформенного гирогоризонткомпаса Octans IV являются:

- минимальные размеры (280х136х150 мм) и вес (4,6 кг);
- не имеет ограничений по крену и дифференту;
- не требует технического обслуживания;
- не требует калибровки в течение всего периода эксплуатации;
- надежный, не чувствительный к удару, среднее время наработки на отказ 80 000 часов;
- быстрая установка показаний без GPS на истинный север с полной точностью менее чем за 1 минуту, даже под водой;
- высокие эксплуатационные характеристики при любом состоянии моря: 0,1° точность курса; 0,01° точность по крену и дифференту;
 5 см точность определения качки; от 0,03 сек до 1000 сек период качки;
- рабочий диапазон температур от 40°C до +60°C;
- питание 24В, потребляемая мощность 15 Вт.

5. СПУТНИКОВЫЕ КОМПАСЫ

5.1. Краткий обзор спутниковых навигационных систем

Спутниковая навигационная система (СНС) – комплексная электроннотехническая система, состоящая из совокупности наземного и космического оборудования, предназначенная для определения местоположения (географических координат и высоты), а также параметров движения (скорости, направления, динамика движения и т. д.) для наземных, водных и воздушных объектов.

Принцип работы спутниковых систем навигации основан на измерении расстояния от излучателя на объекте (координаты которого необходимо получить) до приемника спутников, положение которых известно с большой точностью. В памяти приёмника сохраняется специальная таблица положений всех спутников – альманах. Альманах записан во всех спутниковых приёмниках, и приёмник мгновенно его использует до начала измерения, если альманах не устарел со времени последнего выключения приемника. Каждый спутник передаёт в своём сигнале весь альманах. Таким образом, зная расстояния до нескольких спутников системы, с помощью обычных геометрических построений, на основе альманаха, можно вычислить положение объекта в пространстве.

Метод измерения расстояния спутника до антенны приёмника основан на определённости скорости распространения радиоволн. Для осуществления возможности измерения времени распространяемого радиосигнала каждый спутник навигационной системы излучает сигналы точного времени, в составе своего сигнала используя точно синхронизированные с системным временем атомные часы.

При работе спутникового приёмника его часы синхронизируются с системным временем и при дальнейшем приёме сигналов вычисляется задержка между временем излучения, содержащимся в самом сигнале, и временем приёма сигнала. Располагая этой информацией, навигационный приёмник вычисляет координаты антенны. Дополнительно накапливая и обрабатывая эти данные за определённый промежуток времени, становится возможным вычислить такие параметры движения, как скорость (текущую, максимальную, среднюю), пройденный путь и т. д. [31].

Основные элементы спутниковой системы навигации включают:

- космический сегмент, состоящий из созвездия спутников, которые находятся на орбите, включая эксплуатационные, резервные и неоперативные модули (спутники), излучающих специальные радиосигналы;

 – наземную систему управления и контроля, включающую блоки измерения текущего положения спутников и обмена информацией для корректировки их положения;

– **приёмное клиентское оборудование**, используемое для определения координат и других параметров движущегося объекта.

В настоящее время спутниковых система навигации, которые позволяют в любом месте Земли (не включая приполярные области), почти при любой по-

годе, а также в космическом пространстве вблизи планеты, определить местоположение и скорость объектов – всего три: **GPS**, ГЛОНАСС и **Galileo**.

GPS (Global Positioning System) – глобальная система позиционирования США. Эта система также известна под более ранним названием NAVSTAR. Сегодня это единственная, работающая в полном составе, спутниковая навигационная система.

Период вращения спутников (орбитальный период) составляет приблизительно 12 часов, благодаря чему каждые сутки через 23 ч 55 мин 56,6 с спутник оказывается дважды над одной и той же точкой земной поверхности (ежедневно на 4 мин 3,4 с раньше).

Основой системы GPS являются навигационные спутники, движущиеся вокруг Земли по 6 круговым орбитальным траекториям (по 4 спутника в каждой), на высоте примерно 20180 км. Орбиты имеют наклонение к экватору 55° и равномерно разнесены по долготе через 60°.

24 спутника обеспечивают 100% работоспособность системы в любой точке земного шара, но не всегда могут обеспечить уверенный приём и хороший расчёт позиции. Поэтому, для увеличения точности позиционирования и резерва на случай сбоев, общее число спутников на орбите поддерживается в большем количестве (с марта 2010 года 31 аппарат).

Типичная точность современных GPS-приёмников в горизонтальной плоскости составляет примерно 10 - 12 метров при хорошей видимости спутников. На территории США и Канады имеются станции WAAS, передающие поправки для дифференциального режима (система DGPS), что позволяет снизить погрешность до 1 - 2 метров на территории этих стран. При использовании более сложных дифференциальных режимов, точность определения координат можно довести до 10 см и меньше.

Европейская DGPS-сеть была разработана в основном финскими и шведскими морскими администрациями в целях повышения безопасности на архипелаге между двумя странами.

К сожалению, точность любой спутниковой навигационной системы сильно зависит от открытости спутников и условий прохождения сигналов.

ГЛОНАСС (*ГЛО*бальная <u>НА</u>вигационная <u>С</u>путниковая <u>С</u>истема) – Россия.

Развитие спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС имеет практически 40-летнюю историю и окончательное ее развертывание подходит к завершению.

ГЛОНАСС включает в себя также три сегмента: *космический*, *управления и аппаратуры потребителей*.

Полная орбитальная группировка ГЛОНАСС должна содержать 24 штатных навигационных аппарата (НКА) на круговых орбитах с наклонением $64,8^{\circ}$ в трех орбитальных плоскостях по восемь НКА в каждой. Долготы восходящих узлов трех орбитальных плоскостей различаются номинально на 120°. Номинальный период обращения НКА равен T = 11 ч 15 мин 44 с, и, соответственно, номинальная высота круговой орбиты составляет 19100 км над поверхностью Земли. В каждой орбитальной плоскости восемь НКА разнесены по аргументу широты номинально через 45°, и аргументы широты восьми НКА в трех орбитальных плоскостях сдвинуты на ±15°.

Точность местоопределения системы в открытом коде составляет \pm (10...20) м при доверительном интервале 0,95, а в дифференциальном режиме до \pm (2...5)м.

Завершаются работы по *европейскому* проекту глобальной навигационной спутниковой системы (Global Navigation Satellite System - GNSS), получившей название **Galileo**. GNSS находится под гражданским контролем и обеспечивает гарантированный сервис в любой точке планеты. Galileo совместима с GPS и ГЛОНАСС. Предоставляя позиционирующий сигнал на двух частотах, как стандарт, GNSS обеспечивает высокую автономную точность позиционирования (вплоть до метровой).

Космический сегмент должен состоять из 30 средневысотных навигационных спутников Земли (НСЗ), расположенных на трех орбитах. Из них 27 НСЗ должны входить в состав орбитальной группировки под названием Walker 27/3, что означает количество симметрично расположенных в пространстве 27 НСЗ, по 9 аппаратов на каждой из трех орбит. Чтобы обеспечивать необходимую избыточность на орбите и позволить быстрое восстановление в случае отказа спутников, предполагаются 3 активных резервных спутника, расположенных в промежутках между орбитами.

Особенностью указанной группировки НСЗ является лучшая их геометрия наблюдения. При высоте орбит относительно поверхности Земли около 23616 км и угла наклона к экватору 56° их процесс наблюдения повторяется каждые 24 часа, а траектория каждого в отдельности НСЗ относительно Земли через трое суток.

Полное развертывание системы ожидается к 2020 году.

Некоторые частоты всех трех СНС (GPS, ГЛОНАСС, Galileo) расположены во взаимно-перекрывающихся участках, что дает возможность принимать их одним приемным устройством. Такой приемник, способный принимать сигналы всех трех СНС, может использовать для определения места судна более 30 НСЗ одновременно, что повысит точность определения места с одновременным повышением надежности навигации.

Подобное увеличение количества спутников принесет пользу не только при работе в автономном режиме, но и улучшит качество определения координат и способность GPS аппаратуры разрешать неоднозначность по фазе несущей частоты для отслеживаемого спутникового сигнала.

Продолжаются работы по развертыванию локальных СНС – индийская спутниковая группировка IRNSS; японская навигационная система QZSS; ктайская система BEIDOU продвигается к цели по реализации глобального обслуживания.

5. 2. Принцип определения курса в спутниковом компасе

С помощью средне орбитальных навигационных спутниковых систем можно получить информацию не только о координатах и составляющих путевой скорости судна, но также и о его курсе. С этой целью используются двух

или трех антенные системы. В принципе для получения курса необходимо только две антенны. Третья антенна позволяет вместе с курсом определить углы килевой, бортовой качки и улучшить точность измерения курса, уменьшив негативное влияние на нее качки и рыскания.

Схематический вид (сверху) трех антенной системы низкопрофильного открытого типа представлен на рис. 5.1, *а*. Диаметр окружности, проходящей через антенны A_1 , A_2 , A_3 , приблизительно равен одному метру. Расстояние между антеннами *b* составляет порядка 85 см. Две антенны спутниковой системы GPS A_1 (нос) и A_2 (корма) расположены в диаметральной плоскости судна.

Передача сигналов навигационными искусственными спутниками Земли в системе GPS для судов коммерческого флота производится на частоте F_1 =1575,42 МГц. Навигационные сигналы представляют собой общедоступный *С/А*-код (coarse and acquisition code), которым модулируется частота F_1 . Длина волны этой несущей частоты составляет приблизительно 19 см.

При определениях положения, в системе GPS всегда могут быть рассчитаны горизонтные координаты спутников, находящихся над горизонтом: высота h_s и азимут A_s . На рис. 5.1, δ эти координаты показаны для одного из спутников [32].

Расстояния, которые проходит сигнал с определенного спутника до антенн A_1 и A_2 , отличаются на величину ΔD . Эта разность, указывающая направление движения фронта волны несущего сигнала, находится по формуле:

 $\Delta D = \Delta \lambda + n\lambda,$

где λ – длина волны несущего сигнала; *n* – целое число циклов; $\Delta\lambda$ – дробная часть цикла.

Значение *n* рассчитывается в процессорном блоке автоматически на стадии инициализации при приеме спутника, а дробная часть $\Delta \lambda$ определяется по дополнительным данным.

Из геометрических построений рис. 5.1, δ видно, что плоскость CFA_1 принадлежащая фронту волны несущего сигнала, перемещается перпендикулярно направлению h_s и дает след FA_1 от пересечения с плоскостью горизонта. Треугольники A_2CF и A_2FA_1 являются прямоугольными.

Зная ΔD и высоту спутника h_s над истинным горизонтом, можно найти курсовой угол q_s спутника и истинный курс судна *К*:

$$A_2F = \frac{\Delta D}{\cos h_s};$$
 $q_s = \arccos \frac{A_2F}{b};$ $K = A_s + q_s.$

Значение курса определяется по всем спутникам, находящимся над горизонтом, и усредняется.



Рис. 5.1. К принципу действия спутникового компаса: *a*) – прием сигналов трехантенной системой; *б*) – определение курса судна

Для вычисления координат объекта по навигационным сигналам спутников GPS в трехмерном пространстве необходимо измерить дистанции не менее чем до 4-х, а при двухмерной навигации – не менее чем до трех спутников. На практике, для снижения влияния бортовой и килевой качки и рыскания судна используется третья антенна и обрабатываются пять спутников, чтобы получить трехмерные данные о координатах и истинном курсе объекта.

Если сигнал GPS блокируется высокими зданиями, или мостами, под которыми проходит судно, то в спутниковом компасе используется твердотельный свободный гироскоп. По параметрам углового положения его оси в данных условиях обеспечивается непрерывность показаний направления. Кроме того, названный гироскоп применяется для уменьшения влияния качки и рыскания на точность показаний курса.

5. 3. Некоторые модели спутниковых компасов

Спутниковый компас FURUNO SC-50.

В состав спутникового компаса SC-50 входят:

- трех антенная система;

- основной модуль;

- устройство управления и отображения [33].

Антенный блок реализован в виде низкопрофильной антенны закрытого типа SC-303 или в виде антенны открытого типа SC603. Антенны устанавливают на жесткой платформе и с высокой точностью ориентируют их вдоль ДП судна.

В основном модуле SC-501 располагаются приемник GPS, процессор, свободный гироскоп.

Устройство управления и отображения SC-502 предоставляет информацию о координатах судна, курсе, путевом угле, путевой скорости, углах бортовой и килевой качки и др.

Устройство управления и отображения спутникового компаса, лицевая панель которого показана на рис. 5.2, может отображать данные путем выбора ряда режимов дисплея.

• Дисплей направления движения – указывает направление движения судна, курс и скорость относительно грунта, дату, время, статус и состояние местоопределения;

• Дисплей навигационных данных – указывает позицию по широте и долготе, курс и скорость относительно грунта, дату, время, статус местоопределения;

• Дисплей управления – указывает направление движения в цифровой и аналоговой формах, курс и скорость относительно грунта, время, статус место-определения;

• Дисплей компаса – указывает направление в виде компаса, углы бортовой и килевой качки. Изображение картушки вращается согласно направлению движения (показано на рис. 5.2);

Дисплей угловой скорости – указывает угловую скорость в цифровом и аналоговом видах;

Дисплей скорости (в двух видах) – указывает скорость относительно грунта и относительно воды, направление и скорость течения, поперечную скорость, пройденное расстояние. Дисплей данных о течении требует подключения доплеровского лага.

Кроме того, устройство управления и отображения позволяет выполнить: установки сигнализации GPS, выходных данных; проверку состояния спутников, системные установки; установку DGPS/WAAS, диагностические проверки оборудования.

Спутниковый компас может передавать информацию о курсе судна в такие устройства, как РЛС, САРП, авторулевой, транспондер АИС, ECDIS и в другую аппаратуру.

Основные характеристики:

٠	Средн. квадр. погрешность (СКП) показаний курса	±1,0° (95%);
٠	СКП показаний угла бортовой (килевой) качки	±1,0° (95%);
٠	Разрешение по углу	0,1°;
•	Сопровождение при скорости поворота	до 45°/с;
•	Время готовности к работе после включения	3 мин;
•	Погрешность определения места по GPS	±10 м (95%);
•	Погрешность определения места по DGPS	±5 м (95%);
٠	Дисплей монохромный ЖКИ	4,5", 120 х 64 точек;
•	Потребляемое питание – 12 – 24 В постоянного тока 1	2 - 0.5 A



Рис. 5.2. Устройство управления и отображения и антенна открытого типа

Спутниковый компас FURUNO SC-130.

Новая модель спутникового компаса, позволяющая с высокой точностью определить курс судна -0.25° [34].

SC-130 применяется для вычисления различных данных, например местоположения по **GPS**, скорости относительно грунта (SOG), курса относительно грунта (COG), скорости поворота (ROT) и скорости движения относительно 3 осей (носа, кормы и продольной составляющей). Все эти данные помогают судну выполнять самые сложные маневры, например при швартовке. SC-130 передает сигналы о курсе на приборы, используя самые последние технологии ГНСС. Для обеспечения максимальной точности сигнал дополнительно базируется на данных систем Galileo и ГЛОНАСС.



Рис. 5.3. Спутниковый компас FURUNO SC-130

Основные особенности:

• Не требует технического обслуживания

• Точность определения курса 0,25°. Идеально подходит для установки на средних по размеру и крупных судах для навигации в переполненных судами портах

• Использование ГНСС Galileo и ГЛОНАСС для получения максимальной точности. За счет приема сигналов от спутников различного типа исключается проблема отсутствия сигнала из-за недостаточного количества спутников

- Сверхмалое время инициализации 90 секунд
- Удобное подключение к существующей судовой сети через Enternet

• Высокая скорость слежения 40°/с (в два раза больше, чем требуется ІМО для высокоскоростных судов)

• Высокоточные данные о бортовой/килевой качке в аналоговом и цифровом форматах для стабилизаторов качки, гидролокаторов, и др.

• Контроль скорости перемещения носа и кормы судна для безопасной швартовки.

• Простая модификация с помощью существующего антенного кабеля для моделей SC-50/55/60/110/120 (требуется дополнительный набор LAN_CNV)

Основные характеристики:

• Частота приема: 1575,42 МГц (GPS/Galileo), 1602,5625 МГц (ГЛО-НАСС)

• Код захвата: C/A code (GPS), E1B (Galileo), 1OF (ГЛОНАСС)

• Точность определения скорости судна (SOG): 0,02 уз. среднеквадр. (отслеживание не менее 5 спутников)

• Точность определения скорости судна (VBW, SOG): 0,2% от скорости судна или 0,02 узла (отслеживание не менее 5 спутников)

- Точность определения курса: **SC-130** 0,25° среднеквадр.
- Скорость сопровождения: 40°/с
- Время определения местоположения: 90 с

• Точность определения углового положения: бортовая, килевая качка: 0,4° среднеквадр.

• Разрешение по угловому положению: стандартное значение 0,1°, 0,01°, 0,001° (выбирается в меню)

• Скорость поворота: стандартное значение 0,1°, 0,01°, 0,001°/мин (выбирается в меню)

• Источник питания: 12–24 В пост. тока: 2,1 – 1,1 А (включая антенный блок и блок дисплея)

• Температура окружающей среды: Антенный блок от -25 до +55 °C (хранение: до +70 °C) Блок дисплея/распределительная коробка от -15 до +55 °C

6. МАГНИТНЫЕ КОМПАСЫ

6.1. Магнитные поля Земли и судна

6.1.1 Основные понятия о магнетизме

Длительное время считалось, что источником магнетизма – свойства некоторых руд притягивать к себе частицы железа – являются особого рода "магнитные заряды" или "магнитные массы". И только в начале XX-го века было установлено, что магнитные свойства веществ имеют электрическое происхождение.

Между намагниченными телами (магнитами) существуют силы взаимодействия. Эти силы возникают вследствие того, что каждое магнитное тело создает в окружающем его пространстве магнитное поле.

Особая форма материи, создаваемая в пространстве электрическими токами, называется магнитным полем. Силы взаимодействия действуют только между движущимися электрическими зарядами, включая ток в проводниках и магнитах, в которых микроциркуляции токов упорядочены, чем и обусловлены их магнитные свойства. На неподвижные заряды магнитное поле не действует и вокруг таких зарядов оно не возникает.



Рис. 6.1. К определению понятия о магнитной индукции: *а*) – линии магнитной индукции прямолинейного магнита; *б*) – линии магнитной индукции проводника с током; *в*) – действие магнитного поля на проводник с током

Основной характеристикой магнитного поля является вектор *магнитной* индукции В. Для графического изображения магнитных полей и определения направления магнитной индукции служат линии магнитной индукции (их еще называют магнитными силовыми линиями). Линии представляют собой кривые, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением магнитной индукции B в этих точках поля. На примере это показано на рис. 6.1, *а* для прямолинейного магнита и на рис. 6.1, *б* для проводника с током [4].

Линии магнитной индукции всегда замкнуты и нигде не пересекаются, а точки, в которых они сходятся, называются полюсами магнита. Если поместить миниатюрные магнитные стрелки в магнитное поле прямоугольного магнита (рис 6.1, *a*), то они будут ориентированы к одному полюсу своими северными концами, а к другому – южными. За направление линий магнитной индукции принимают направление северного конца магнитной стрелки, свободно установившейся в магнитном поле.

Принято обозначать: северный полюс – N(+), а южный – S(-). Северный (положительный) магнетизм всегда выступает в паре с равным ему южным (отрицательным) магнетизмом.

Магнитная индукция является силовой характеристикой магнитного поля. Она численно равна силе F, действующей со стороны магнитного поля на единицу длины l проводника, расположенного перпендикулярно направлению магнитного поля, по которому течет электрический ток I единичной силы:

$$B = \frac{F}{Il}$$
, размерность: Ньютон (Тесла).

Направления векторов \overline{B} , \overline{I} и \overline{F} показаны на рис 6.1, ϵ .

Наряду с магнитной индукцией *В* используется другая векторная величина – напряженность магнитного поля *H*, которая пропорциональна магнитной индукции *B*:

$$H = \frac{B}{\mu \mu_o}$$
, размерность: Амперметр

где *µ* – магнитная проницаемость среды (вещества);

 μ_o – магнитная проницаемость вакуума.

Магнитная проницаемость среды – безразмерная величина, показывающая, во сколько раз магнитная индукция в данной среде больше (или меньше), чем магнитная индукция в вакууме.

Все вещества по величине их магнитной проницаемости μ подразделяются на три группы: диамагнитные, у которых $\mu < 1$, парамагнитные – $\mu > 1$ и ферромагнитные – $\mu >> 1$.

Ферромагнитные вещества (железо, никель, кобальт, сталь, сплавы) отличаются от всех других большой величиной магнитной проницаемости, т.е. сильно выраженной способностью намагничиваться, что можно объяснить следующим образом.

В каждом веществе атомные и молекулярные замкнутые токи образуют "элементарные магнитики", которые вообще ориентированы хаотически и образец вещества в целом не намагничен. В ферромагнетиках имеются области размером до 0,01 мм, называемые доменами, в которых миллионы молекулярных магнитов самопроизвольно повернуты преимущественно в одну сторону, чем и обусловлена самонамагниченность каждой такой домены. Пока ориентация магнитных осей доменов хаотична ферромагнетик не проявляет магнитных свойств. Под влиянием внешнего магнитного поля домены переориентируются вдоль его силовых линий – ферромагнетик намагничивается.

Степень намагниченности вещества характеризуется величиной, получившей название намагниченности J, и выражается в тех же единицах, что и напряженность магнитного поля H (A/м).

Зависимость намагниченности *J* от напряженности внешнего магнитного поля *H* носит в общем случае сложный нелинейный характер и определяется кривой намагничивания, получаемой опытным путем. На рис. 6.2 приведена типичная кривая намагничивания и петля магнитного гистерезиса бруска из железоникелевого сплава.

В начальный момент H = 0 и брусок не намагничен (J = 0). По мере увеличения H брусок намагничивается (кривая 0a), достигая в точке a магнитного насыщения J_s При уменьшении H намагниченность бруска уменьшается, но при достижении H = 0 в нем сохраняется остаточная намагниченность J_r (точка b).



Рис. 6.2. Кривая намагниченности и магнитный гистерезис

Для полного размагничивания бруска надо создать магнитное поле противоположного знака напряженностью –*H_c* (точка *c*), которую называют коэрцитивной (удерживающей) силой.

Полное перемагничивание бруска наступит при его магнитном насыщении $-J_s$ (точка d), а при снижении Hдо нуля в бруске будет остаточная намагниченность $-J_r$ (точка e). И, на конец, полное его размагничивание наступит при напряженности магнитного поля H_c (точка f).

Коэрцитивная сила *H_c* характеризует степень жесткости материала в магнитном отношении и в зависимости от ее величины ферромагнетики делятся на магнитно-твердые и магнитно-мягкие.

К твердым в магнитном отношении материалам условно относят такие ферромагнитные материалы, у которых коэрцитивная сила более 1600 А/м. Они обладают сильно выраженной способностью удерживать остаточную намагниченность (углеродистые и хромистые стали, стали с большим содержанием кобальта, сплав магнико, сплав викаллой и др.).

Мягкие в магнитном отношении ферромагнитные материалы имеют весьма малую коэрцитивную силу, т.е. почти не обладают способностью удерживать в себе остаточную намагниченность. К ним условно относят материалы, у которых коэрцитивная сила не превышает 160 А/м (железо армко, сплав пермаллой и др.).

В компасах находят применение как магнитотвердые, так и магнитомягкие материалы. Из магнитотвердых материалов изготовляют магнитную систему картушки компаса и магниты-уничтожители для девиационного прибора. При правильном их использовании и хранении намагниченность их изменяется незначительно – 0,1÷0,2% в год. Магнитно-мягкие материалы применяют при изготовлении брусков, шаров и пластин, помещаемых у магнитного компаса для компенсации его девиации.

6.1.2. Магнитное поле Земли

В пространстве вокруг земного шара, на поверхности Земли, в ее недрах и под водой обнаруживается действие магнитных сил. В первом приближении магнитное поле Земли можно представить как поле однородно намагниченного шара или диполя с магнитной осью и полюсами (рис. 6.3).



Рис. 6.3. Магнитное поле Земли

Ось этого диполя имеет наклон к оси вращения Земли P_nP_s около 12° и пересекает земную поверхность в точках P_m и P'_m , которые называются геомагнитными полюсами [35, 36].

Магнитный полюс, расположенный вблизи северного географического полюса Земли, имеет магнетизм южного наименования, так как магнитная стрелка своим северным концом (с положительным магнетизмом) всегда обращена в сторону этого полюса.

Однако этот полюс назван северным, а противоположный – южным, соответственно с наименованием географических полюсов. Поэтому принято считать, что магнитные силовые линии Земли выходят из южного полюса и сходятся в северном.

Согласно Всемирной магнитной модели (World Magnetic Model, WMM) на 2015г. северный магнитный полюс находился в точке 86° N, 159° W (Северная Канада), а южный – 64° S, 137° Е (французская полярная станция Дюмон-Дюрвиль в Антарктиде).

Чтобы иметь представление о магнитном поле Земли, надо знать напряженность в любой точке этого поля. Напряженность магнитного поля Земли называют полной силой земного магнетизма и обозначают буквой T. Вектор T в каждой точке поля направлен по касательной к магнитной силовой линии 1(рис. 6.3, и 6.4). Если в точке A поместить свободно подвешенную магнитную стрелку, то она совместится своей магнитной осью с вектором T.



Рис. 6.4 Вектор полной силы земного магнетизма

Рис.6.5. Элементы земного магнетизма

Разложим вектор T в точке наблюдателя A на две составляющие: горизонтальную H параллельно плоскости горизонта 2 и вертикальную Z по отвесной линии (рис. 6.4) и изобразим их в горизонтной системой координат ONEn, как показано на рис. 6.5. Кратко охарактеризуем эти составляющие, которые называют элементами земного магнетизма [4, 35, 36].

Вектор *T* составляет с горизонтальной плоскостью некоторый угол *I*, который называют магнитным наклонением. На магнитных полюсах вектор *T* направлен вертикально, причем на северном магнитном полюсе – вниз, а на южном – вверх. Следовательно, магнитное наклонение *I* изменяется в пределах $+90 \div -90^{\circ}$. При удалении от магнитных полюсов наклонение уменьшается. Линия, соединяющая точки с нулевым наклонением, называется магнитным экватором. Магнитное наклонение отождествляется с понятием "магнитной широты", которая также обозначается буквой *I*.

Горизонтальная составляющая напряженности H является проекцией вектора T на плоскость горизонта. Направление вектора H определяет направление магнитного меридиана N_m , а его модуль – силу, которая позволяет использовать магнитную стрелку в качестве указателя направлений. На магнитных полюсах H становится равным нулю и магнитный компас не действует. В общем случае магнитный меридиан не совпадает с истинным меридианом.

Угол, составленный истинным и магнитным меридианами, называется склонением (d). Если северный конец магнитной стрелки отклонен от истинного меридиана к востоку, то склонение считается восточным, положительным (+), если же к западу – то западным, отрицательным (–).

В различных точках земной поверхности склонение неодинаково и может принимать значения от 0 до $\pm 180^{\circ}$.

Вертикальная составляющая Z является проекцией напряженности магнитного поля Земли T на отвесную линию. На магнитных полюсах составляющая Z равна полной силе T и равна нулю на магнитном экваторе. Вектор Z, направленный к надиру, имеет знак (+), а направленный к зениту – знак (–).

Величины Т, Н, Z, I и d называются элементами земного магнетизма.

Распределение значений элементов земного магнетизма на поверхности Земли отображают на специальных (магнитных) картах с соответствующими изолиниями. Изолинии склонения *d* называются изогонами, наклонения *I* – изоклинами, изолинии сил *T*, *H* и *Z* – изодинамами.

Магнитное поле Земли не остается постоянным. Изменения среднегодовых значений элементов земного магнетизма называются вековыми вариациями. Изменение значений за промежуток в один год называется вековым ходом. Вековой ход склонения *d* указывается на навигационных картах.

6.1.3. Магнитное поле судна

Во время постройки судна, судовое железо, находясь все время в одном и том же направлении по отношению к земному магнитному полю и подвергаясь ударам, влиянию мощных электромагнитных полей (выполнение сварочных работ), достигает достаточно большого временного и постоянного намагничивания. В плавании на судно постоянно воздействует магнитное поле Земли, намагничивая (или размагничивая) корпус судна, его надстройки и механизмы. В результате судовое железо образует магнитное поле судна, которое искажает поле Земли. Поэтому картушка компаса, установленного на судне, указывает не магнитный меридиан, а компасный меридиан.

Угол, составленный компасным и магнитным меридианами, называется девиацией *б* магнитного компаса.

Для выявления девиации магнитного компаса необходимо проанализировать структуру магнитного поля судна, вызвавшего эту девиацию. При этом примем следующие допущения: судно как материальный объект представляем в виде совокупности однородно намагниченных прямоугольных удлиненных брусков, расположенных продольно, поперечно и вертикально; прямоугольные бруски представляют собой раздельно твердое и мягкое в магнитном отношении судовое железо (в дальнейшем – просто твердое и мягкое железо). Кроме того, считаем, что магнитное поле Земли в объеме, занимаемом судном, и магнитное поле судна вблизи картушки компаса являются однородными полями.

Рассмотрим воздействие на компас магнитных полей Земли и судна, связав создаваемые ими напряженности с положительным направлением судовых осей: x – вдоль диаметральной плоскости (ДП) в нос судна, y – перпендикулярно ДП в правый борт и z – вертикально вниз. Судно на ровном киле и лежит на магнитном курсе K.

Определим проекции X, Y, Z вектора напряженности T магнитного поля Земли на соответствующие оси судна x, y, z (рис. 6.6): $X = H \cos K = T \cos I \cos K;$ $Y = -H \sin K = -T \cos I \sin K;$ $Z = T \sin I.$



Рис. 6.6. Проекции вектора напряженности *Т* магнитного поля Земли на координатные оси судна

Из полученных уравнений следует, что продольная X и поперечная Y составляющие напряженности магнитного поля Земли зависят как от курса, так и от магнитной широты, а вертикальная составляющая Z – только от магнитной широты.

Проанализируем напряженности магнитного поля, создаваемого *мягким* судовым железом, и определим их проекции в принятой системе координат [4].

При действии на судно составляющей X происходит намагничивание всех продольных брусков и вокруг судна создается магнитное поле. Условимся считать, что магнитный курс судна совпадает с направлением составляющей X, действующей от кормы к носу судна. В этом случае все судно представляет собой магнит, северный полюс которого располагается в носу судна, а южный – в корме (рис. 6.7, a). В любой точке пространства, окружающего судно, вектор напряженности созданного магнитного поля направлен по касательной к силовым линиям и он может быть разложен по судовым осям на три составляющие: продольную aX, вертикальную gX и поперечную dX.

Значения и знак коэффициентов a, g и d зависят от места установки компаса на судне. Продольная составляющая aX (в пределах проекции судна) всегда отрицательна, вертикальная составляющая gX может иметь положительный знак при установке компаса в кормовой части, поперечная составляющая dX – положительный знак при установке компаса по правому борту в носовой части и по левому борту в кормовой части судна. В районе миделя (точка O) составляющие dX и gX практически равны нулю.

Теперь будем считать, что судно лежит на магнитном курсе, при котором составляющая *Y* действует в левый борт. Составляющей *Y* земного магнетизма намагничиваются все поперечные бруски мягкого судового железа. Тогда северный магнитный полюс судна будет расположен по правому борту, а южный – по левому. В результате образуется вторичное магнитное поле, силовые ли-

нии которого показаны на рис. 6.7, δ . Вектор напряженности поля также может быть разложен по судовым осям на три составляющие: продольную bY, поперечную eY и вертикальную hY.



Из рис. 6.7, δ следует, что составляющая eY везде (в пределах проекции судна) отрицательна. Максимальное значение она имеет в точке, находящейся в ДП. Знак составляющих bY и hY переменный, они сравнительно невелики и в ДП равны нулю.

Вертикальные бруски судового железа намагничиваются составляющей Z земного магнетизма. Если судно находится в северной магнитной широте, то составляющая Z действует вниз. Следовательно, северный магнитный полюс судна располагается в районе киля, а южный – в районе палубы. Силовые линии образовавшегося вторичного магнитного поля показаны на рис. 6.7, *в*. Как и в двух рассмотренных выше случаях, вектор напряженности магнитного поля, создаваемого вертикальными брусками мягкого железа, может быть разложен по судовым осям на три составляющие: продольную cZ, поперечную kZ и вертикальную fZ.

Указанные составляющие имеют переменные знаки. Наибольшее значение имеет вертикальная составляющая kZ, наименьшее -fZ, которая в ДП равна нулю.

Таким образом, намагниченное мягкое судовое железо создает поле, состоящее из продольных, поперечных и вертикальных составляющих, соответственно действующих по судовым осям: x - aX, bY, cZ; y - dX, eY, fZ; z - gX, hY, kZ. Их значения и знаки зависят от места установки компаса на судне.

Постоянное магнитное поле судна, создаваемое твердым судовым железом, не зависит от курса и магнитной широты. Вектор напряженности этого поля при анализе представляется в виде трех обобщенных составляющих по координатным осям: продольной P, поперечной Q и вертикальной R. Величины сил P, Q и R могут быть сравнительно большими в зависимости от величины остаточного магнетизма твердого железа. Они изменяются в случае перемещения железных масс на судне относительно компаса или перестановки самого компаса на другое место.

6.2. Девиация магнитного компаса

6.2.1. Уравнения Пуассона

В предыдущем параграфе было установлено, что на магнитный компас действуют магнитное поле Земли, переменное магнитное поле, создаваемое мягким судовым железом и постоянное поле, создаваемое твердым железом. Анализ этого действия дал возможность определить составляющие напряженностей указанных магнитных полей по судовым осям.

Для определения суммарного магнитного поля необходимо алгебраически сложить все рассмотренные проекции напряженностей по соответствующим осям судна. В результате имеем [2 – 5, 35, 36]:

$$X' = X + aX + bY + cZ + P;$$

$$Y' = Y + dX + eY + fZ + Q;$$

$$Z' = Z + gX + hY + kZ + R.$$
(6.1)

Выражения (6.1) получили название уравнений Пуассона, так как впервые они были выведены им на основании гипотезы об однородном намагничивании тел. Входящие в уравнения величины *a*, *b*, *c*, ..., *k* носят название параметров Пуассона.

В теории девиации слагаемые, из которых состоят уравнения Пуассона, принято называть не напряженностями, а силами; в дальнейшем мы также будем придерживаться этого наименования.

Если в точке *О* находится центр картушки компаса, установленного на судне, то на картушку будут действовать следующие магнитные силы:

X, *Y* и *Z* – силы земного магнетизма;

aX, *bY*,..., *kZ* – силы от мягкого судового железа;

P, *Q* и *R* – силы от твердого судового железа.

Силы *X*, *Y* и *Z* от места установки компаса не зависят. Силы же aX, bY,..., kZ, *P*, *Q* и *R*, происходящие от судового магнетизма, зависят от места установки компаса на судне и, следовательно, у разных компасов имеют разные величины.

На рис. 6.8, *а* графически изображены все силы, входящие в уравнения Пуассона. Силы X' и Y' могут быть заменены равнодействующей, которую принято обозначать через H'. Равнодействующая H' определяет направление компасного меридиана N_{κ} . По ее направлению устанавливается линия NS картушки компаса, находящегося на судне. Угол δ между равнодействующей H' (N_{κ}) и горизонтальной составляющей земного магнетизма H (N_m) и есть девиация магнитного компаса. В рассматриваемом случае судно не имеет ни крена, ни дифферента, поэтому вертикальная составляющая Z' девиации не вызывает.

В процессе плавания судна девиация изменяется, так как изменяются вызывающие ее силы. При изменении судном курса изменяются оставляющие X и Y земного магнетизма, поэтому изменяются и силы aX, bY, dX, и eY. Силы cZ, fZ, P и Q остаются при этом постоянными. При изменении магнитной широты плавания изменяется полная сила земного магнетизма T и наклонение I. Значит, могут изменяться все составляющие X, Y и Z земного магнетизма, что приводит к изменению сил aX, bY, dX, eY, cZ, и fZ. На величинах P и Q, как уже отмечалось, изменение магнитной широты практически не сказывается.



По величине и знакам параметров Пуассона можно судить об относительной величине и знаках сил, в выражении которых соответствующие параметры входят в качестве сомножителей. Для их оценки можно воспользоваться мнемосхемой, приведенной на рис. 6.8, б. Анализ показывает, что параметры b, d, f u h, a следовательно и силы bY, dX, fZ u hY, находящиеся в вершинах своеобразного ромба, для компаса, установленного в диаметральной плоскости, близки к нулю. Наибольшие по величине параметры a, e, k располагаются по диагонали. Параметры a u e, как правило, отрицательны и велики, причем, величина параметра e больше, чем a: |e| > |a|. Параметры k, c u g могут быть значительными по величине, a по знаку – как положительными, так и отрицательными.

6.2.2. Судовые магнитные силы

Чтобы установить связь между девиацией и порождающим ее судовым магнитным полем, нужно преобразовать уравнения Пуассона так, чтобы в одной части уравнений была девиация, а в другой – элементы, характеризующие это поле. Преобразованию подвергаются только первые два уравнения (6.1), характеризующие горизонтальные силы. Эту задачу применительно к теории девиационных работ решил английский ученый Арчибальд Смит [35].

Было установлено, что девиация магнитного компаса определяется действием ряда сил (напряженностей магнитных полей), имеющих вполне определенную величину и направление.

Таких сил выявлено всего шесть: λ*H*, *A'*λ*H*, *B'*λ*H*, *C'*λ*H*, *D'*λ*H* и *E'*λ*H*. Их называют судовыми магнитными силами.

Параметры A', B', C', D' и E' называются точными коэффициентами девиации, они характеризуют величины магнитных сил и связаны с параметрами Пуассона следующими соотношениями:

$$A' = \frac{d-b}{2\lambda}; \quad B' = \frac{cZ+P}{\lambda H}; \quad C' = \frac{fZ+Q}{\lambda H}; \quad D' = \frac{a-e}{2\lambda}; \quad E' = \frac{a+b}{2\lambda}.$$
(6.2)

Коэффициент $\lambda = 1 + (a + e)/2$ характеризует уменьшение горизонтальной составляющей *H* земного магнетизма под влиянием мягкого судового железа. Так как параметры *a* и *e* всегда отрицательны, то коэффициент λ на судах всегда меньше единицы. На верхнем мостике он равен 0,8 – 0,9, в рулевой рубке – 0,6 – 0,8.

Силы *А'*λ*H*, *D'*λ*H* и *E'*λ*H* вызваны действием мягкого железа и изменяются по значению в зависимости от изменения горизонтальной составляющей напряженности *H* магнитного поля Земли.

Силы $B'\lambda H$, и $C'\lambda H$ вызваны действием главным образом твердого железа и лишь частично – мягкого. Их изменение происходит в зависимости от изменения вертикальной составляющей магнитного поля Земли Z.

Определим, по каким направлениям действует каждая из судовых магнитных сил.

Сила λH . Сила λH является направляющей, стремящейся установить картушку компаса по магнитному меридиану всегда в сторону N_m, и непосредственно девиацию не создает. Компас стремятся установить на судне там, где коэффициент λ максимален, т.е. чтобы направляющее действие силы λH было возможно большим по величине.

Сила $A'\lambda H$. Эта сила всегда направлена перпендикулярно магнитному меридиану, т.е. силе λH . Если A' > 0, то сила $A'\lambda H$ направлена к востоку от магнитного меридиана и ей приписывают знак «плюс». Если же A' < 0, то сила действует к западу и ей приписывают знак «минус».

Обе силы λH и $A'\lambda H$ сохраняют постоянные направления не зависящие от курса судна. Однако сила $A'\lambda H$ отклоняет стрелки компаса от магнитного меридиана, т.е. непосредственно сама вызывает девиацию.

Сила $B'\lambda H$. Равнодействующая силы $B'\lambda H$ действует относительно магнитного меридиана под углом, равным магнитному курсу K судна, т.е. направлена по диаметральной плоскости судна. При положительном значении B' сила $B'\lambda H$ направлена в нос судна, при отрицательном – в корму. Находясь в зависимости от курса судна, эта сила на разных курсах будет принимать различные направления относительно магнитного меридиана и отклонять стрелку компаса, вызывая различную по величине девиацию.

Сила С' λH . Сила С' λH всегда перпендикулярна диаметральной плоскости судна (силе $B'\lambda H$) и составляет с магнитным меридианом угол, равный (K + 90°) – сила действует в правый борт. Если C' < 0, то ее направление относительно магнитного меридиана определяется углом ($K - 90^\circ$) – сила действует в левый борт. Девиация, возникающая под действием силы $C'\lambda H$, также зависит от курса судна.

Сила *D'* λ *H*. Равнодействующая силы *D'* λ *H* с магнитным меридианом образует угол 2*K*, равный удвоенному магнитному курсу судна. В случае отрицательного значения силы *D'* λ *H* (*D'* < 0) ее направление относительно магнитного меридиана определяется углом (2*K* + 180°). Сила *D'* λ *H* отличается от рассмотренных выше сил тем, что ее направление с изменением курса изменяется одновременно как относительно магнитного меридиана, так и относительно диаметральной плоскости судна.

Сила $E'\lambda H$. Сила $E'\lambda H$ сдвинута относительно силы $D'\lambda H$ на 90°. При положительном значении сила $E'\lambda H$ направлена к магнитному меридиану под углом, равным ($2K + 90^{\circ}$). Если же сила отрицательна, то ее направление относительно магнитного меридиана определяется углом ($2K - 90^{\circ}$). Изменяя свое направление на различных курсах, эта сила вызывает девиацию того же характера, что и при действии силы $D'\lambda H$.

Итак, влияние на компас суммарного магнитного поля, создаваемого земным магнетизмом и полем судового железа, сведено к воздействию направляющей силы λH , действующей по магнитному меридиану, и пяти перечисленных выше сил, которые при их положительных значениях направлены: $A'\lambda H$ – перпендикулярно магнитному меридиану; $B'\lambda H$ – под углом к магнитному меридиану, равным K; $C'\lambda H$ – под углом к магнитному меридиану, равным (K + 90°); $D'\lambda H$ – под углом к магнитному меридиану, равным 2K; $E'\lambda H$ – под углом к магнитному меридиану, равным (2K + 90°).

Графически эти силы могут быть представлены в виде расходящегося пучка прямых (веера сил), каждая из которых имеет свое направление в соответствии с курсом судна (рис. 6.9).

Если воспользоваться правилами геометрического сложения отрезков, то можно построить многоугольник судовых магнитных сил для данного курса (рис. 6.10). Замыкающей этого многоугольника является равнодействующая H', которая определяет направление компасного меридиана $N_{\rm k}$ и наглядно показывает образование девиации δ .

Компасный курс K' всегда считается от компасного меридиана по часовой стрелке, поэтому ему припишем знак «плюс». Девиацию δ принято отсчитывать от магнитного меридиана к востоку или западу. На рис. 6.10 девиация восточная, положительная. Относительно компасного меридиана она западная, отрицательная.



Рис. 6.9. Направление судовых магнитных сил

Рис. 6.10. Многоугольник судовых магнитных сил

6.2.3. Основная формула девиации. Характер девиаций

Преобразование уравнений Пуассона дает возможность получить точную формулу тангенса девиации или формулу Арчибальда Смита [35] в зависимости от точных значений коэффициентов девиации (6.2) и магнитных курсов. Однако применение ее на практике нецелесообразно, так как уничтожение девиации производится регулярно и оценивают остаточную девиацию, величина которой незначительна. Поэтому при выполнении девиационных работ пользуются приближенной формулой. При значении девиации до 6° с достаточной для практики точностью формула девиации после упрощений имеет вид:

$$\delta = A + B \sin K' + C \cos K' + D \sin 2K' + E \cos 2K'.$$
(6.3)

Упрощения достигнуты в результате учета того, что магнитные и компасные курсы связаны равенством $K' = K - \delta$ и допущений: синус и тангенс малого угла численно равны самому углу.

В результате точные коэффициенты девиации *A'*, *B'*, *C'*, *D'* и *E'* заменены значениями *A*, *B*, *C*, *D* и *E*, именуемыми приближенными коэффициентами девиации, которые можно определить по наблюдениям при оценке остаточной девиации. Полученная формула получила название *основной формулы девиации* в функции от компасного курса.

Изучим характер девиации от каждой из сил в отдельности, опираясь на формулы (6.2) и (6.3).

Постоянная девиация. Девиация, возникшая под воздействием силы $A'\lambda H$, определяется постоянным по величине коэффициентом A, не зависящим от курса судна и магнитной широты. Отсюда коэффициент A носит название коэффициента постоянной девиации. График постоянной девиации показан на рис. 6.11, *а*. Если коэффициент A > 0, то девиация положительная. Из всех сил, вызывающих девиацию, самой малой является $A'\lambda H$ (влияние только мягкого железа) и создаваемая ею постоянная девиация не превышает, как правило, 1°. По этой причине ее отдельно не компенсируют, а уничтожают совместно с другими видами девиаций.

Полукруговая девиация. При изменении курса судна от 0 до 360° сила В' λH , как радиус-вектор, меняя направление вместе с судном, описывает окружность, соответственно и величина девиации будет изменяться. График изменения девиации (при B > 0) в зависимости от изменения компасного курса показан на рис. 6.11, δ , где видно, что девиация дважды меняет свой знак, переходя два раза через нуль. На одной половине окружности девиация имеет один знак, а на другой половине – другой. Поэтому она получила название полукруговой девиации, а коэффициент B – коэффициента полукруговой девиации, происходящей от силы $B'\lambda H$.

Если коэффициент *B* мал, то график полукруговой девиации представляет собой кривую линию, близкую по очертанию к синусоиде и девиацию можно представить в виде: $\delta_B = B \sin K'$. В соответствии с этим δ_B имеет максимальное значение на компасных курсах 90 или 270°.



Рис. 6.11. Графики остаточных девиаций: *a*) – постоянной; *б*) – полукруговой; *в*) – четвертной; *г*) – результирующей

Сама по себе полукруговая девиация, вызванная силой $B'\lambda H$, может быть весьма значительной по величине. Она определяется действием в основном твердого судового железа – силой P. Поэтому ее уничтожают с помощью магнитов-уничтожителей, а остаточную девиацию δ_B определяют, вычисляя коэф-фициент B.

Сила $C'\lambda H$, действуя по поперечной судовой оси, неизменно связана с судном, как и сила $B'\lambda H$. Поэтому девиация от силы $C'\lambda H$ по своему характеру такая же, как и девиация от силы $B'\lambda H$, т.е. полукруговая.

Если коэффициент полукруговой девиации *C* мал, то график ее изменения в зависимости от компасного курса близок по очертанию к косинусоиде и девиацию можно представить в виде: $\delta_C = C \cos K'$ (рис. 6.11, δ). Изменение δ_C при циркуляции судна происходит со сдвигом на 90° по отношению к девиации от действия силы $B'\lambda H$. Тогда максимальная девиация то силы $C'\lambda H$ наблюдается на компасных курсах 0 и 180°.

Полукруговая девиация, вызванная силой $C'\lambda H$, может быть также значительной по величине, так как она определяется действием в основном твердого железа (сила Q). Ее уничтожают с помощью магнитов-уничтожителей, а остаточную девиацию δ_C определяют путем вычисления коэффициента C. Четвертная девиация. Девиация, вызываемая силой $D'\lambda H$ при изменении курса на 360°, четыре раза меняет свой знак, переходя через нулевые значения, и сохраняет его неизменным только в пределах четверти окружности. Поэтому она получила название четвертной девиации, а D – коэффициента четвертной девиации, происходящей от силы $D'\lambda H$.

Чем меньше величина *D*, тем кривая девиации ближе к синусоиде двойного угла и ее можно представить в виде: $\delta_D = D \sin 2K'$, как показано на рис. 6.11, *в*, где D > 0. В соответствии с этим четвертная девиация на курсах 45, 135, 225 и 315° имеет максимальное значение, равное коэффициенту *D*, а на главных румбах – 0, 90, 180 и 270° – она равна нулю.

Четвертная девиация возникает под влиянием только мягкого (продольного и поперечного) судового железа, тем не менее, может достигать относительно большой величины, так как коэффициент D' определяется параметрами Пуассона *a* и *e*, имеющих максимальное значение. Поэтому силу $D'\lambda H$ доводят до минимальных значений с помощью компенсаторов четвертной девиации, а затем определяют коэффициент остаточной девиации *D*.

Силы $E'\lambda H$ и $D'\lambda H$ на всех курсах судна взаимно перпендикулярны. Поэтому сила $E'\lambda H$, так же как и $D'\lambda H$, вызывает четвертную девиацию – при изменении курса судна от 0 до 360° девиация от силы $E'\lambda H$ четыре раза изменяет свой знак, переходя через нулевые значения. При малых значениях коэффициента E четвертной девиации кривая девиации близка к косинусоиде двойного угла: $\delta_E = E \cos 2K' - \text{рис.6.11}$, ϵ для случая E > 0. Максимальная девиация от силы $E'\lambda H$ наблюдается на главных румбах и равна нулю на четвертных.

Девиация от силы $E'\lambda H$ не велика по своему значению (возникает только от мягкого железа) и ее отдельно не уничтожают, а компенсируют совместно с другими девиациями, определяя затем коэффициент остаточной девиации E.

Таким образом, изменение девиации δ в зависимости от компасного курса определяется алгебраической суммой постоянной, полукруговой и четвертной девиаций в виде результирующей, типичный график которой показан на рис. 6.11, *г*. Этот график строится с использованием основной формулы девиации (6.3) и характеризует остаточную девиацию компаса после выполнения девиационных работ.

6.3. Уничтожение девиации магнитного компаса

6.3.1. Определение девиации

Знание точных величин девиации на каждый компасный (и магнитный) курс необходимо штурману для уверенного пользования компасом и ведения навигационной прокладки.

Девиация является переменной величиной, значение которой зависит как от курса судна, так и от магнитной широты. Она также зависит от места установки компаса на судне. Наконец, существенное влияние оказывает характер перевозимого груза в его магнитном отношении. Совокупность этих факторов может создать значительную результирующую напряженность магнитного поля суда в месте установки компаса и девиация может достигать нескольких десятков градусов. В этих условиях действие магнитного компаса становится ненадежным и пользоваться им затруднительно. Неизбежно становится вопрос об уничтожении девиации и составлении новой таблицы остаточной девиации.

Девиационные работы выполняются, как правило, не реже одного раза в год. Остаточная девиация у главного магнитного компаса не должна превышать 3°, а у путевого – 5° [11]. Капитан может продлить действие таблицы девиации, если значения девиации при контрольных определениях отличаются от табличных не более чем на 2°. Так или иначе, определение девиации магнитного компаса является составной частью текущей работы судоводителя и общего комплекса девиационных работ.

На практике девиацию определяют одним из следующих основных способов: по сличению курсов с показаниями гирокомпаса; по створу; по вееру створов; по отдаленному ориентиру; по небесным светилам; для путевого компаса – по сличению курсов с показаниями главного магнитного компаса.

1. Определяют девиацию по показаниям гирокомпаса следующим образом: на каждом курсе синхронно замечают отсчет курса по магнитному компасу (КК) и по гирокомпасу (ГКК). Серию из трех – пяти показаний обоих компасов на каждом курсе усредняют. Зная поправку гирокомпаса $\Delta \Gamma K$ и магнитное склонение *d*, находят девиацию магнитного компаса δ на данном курсе, используя известные соотношения, легко определяемые из рис. 6.12.

 $UK = \Gamma KK + \Delta \Gamma K; \quad MK = UK - d;$

$$\delta = MK - KK$$
или $\delta = \Gamma KK - KK + (\Delta \Gamma K - d).$



Точность определения девиации этим способом зависит от стабильности поправки гирокомпаса. Как известно, при маневрировании судна, особенно в высоких широтах на большой скорости, у гирокомпаса появляется инерционная погрешность, переменная по величине, медленно уменьшающаяся (в течение нескольких часов после окончания маневрирования). Чтобы свести эти изменения поправки гирокомпаса к минимуму, необходимо при девиационных работах маневрировать на малых ходах и избегать поворотов судна на большое число градусов.

Рис. 6.12. Определение девиациипо показаниям гирокомпаса

2. При определении девиации по створу следует снять с карты истинный пеленг ИП створа, а также магнитное склонение и вычислить обратный магнитный пеленг по формуле: $OM\Pi = U\Pi - d \pm 180^{\circ}$. Затем следует лечь по компасу на требуемый компасный курс *КК* и в момент пересечения створной линии взять обратный компасный пеленг (*OKII*) створа. Девиация определяется как разность известного магнитного и измеренного компасного обратных пеленгов створа: $\delta = OM\Pi - OK\Pi$.

Если требуется определить девиацию для другого курса, то нужно лечь по компасу на этот новый курс и, вновь взяв пеленг в момент пересечения створа, вычислить девиацию.

3. В некоторых портах для облегчения девиационных работ, повышения их точности и сокращения времени на их выполнение оборудованы системы створных знаков, называемые веером створов (рис. 6.13).

Суть состоит в том, что на каждом курсе в течение короткого промежутка времени наблюдатель может взять пеленги нескольких створов.

Определение девиации по вееру створов производят в следующем порядке. Выбрав требуемый курс и, следуя малым ходом, при пересечении каждой створной линии фиксируют $OK\Pi$ и соответствующие обратные истинные пеленги ($OU\Pi$) створов; переводят $OU\Pi$ в $OM\Pi$ путем вычитания склонения d для данного района и вычисляют девиацию для каждого отдельного наблюдения по выше приведенной формуле. За точное значение девиации принимают среднее арифметическое девиаций, наблюденных на данном курсе. Так же определяют девиацию и на других курсах.



Рис. 6.13. Определение девиации по вееру створов

4. Если в районе, где определяют девиацию, нет нанесенных на карту створов, то девиацию можно определить по пеленгам одного удаленного ориентира.

С этой целью следует взять обратные компасные пеленги выбранного ориентира на восьми главных и четвертных компасных курсах, а затем вычислить среднее арифметическое, которое равняется приближенному значению обратного магнитного пеленга ориентира: $(OK\Pi_N + OK\Pi_{NE} + ... + OK\Pi_{NW})/8 \approx OM\Pi$. Девиация определится также как и при ее определении по створу: $\delta = OM\Pi - OK\Pi$.

Для получения удовлетворительных результатов ориентир считают достаточно удаленным, если расстояние до него составляет не менее 10 миль.

5. В открытом море девиацию магнитного компаса можно определить *по* азимуту светила. На момент взятия $OK\Pi$ рассчитывают истинный пеленг на светило (астрономическими методами) и значение δ находят из соотношения

$$\delta = OM\Pi - OK\Pi = H\Pi - d - OK\Pi \pm 180^{\circ}.$$

6. На практике девиацию путевого компаса чаще выявляют *путем сличения с показаниями главного магнитного компаса*. При одновременной фиксации курсов по показаниям обоих компасов справедливы следующие зависимости:

$$MK = KK_{\Gamma\Pi} + \delta_{\Gamma\Pi}; \quad MK = KK_{\Pi} + \delta_{\Pi},$$

где *КК*_{гл} и *КК*_п – компасные курсы, отсчитываемые по главному и путевому компасам соответственно;

 $\delta_{\Gamma \pi}$ и δ_{Π} – девиации главного и путевого компасов. Следовательно,

$$\delta_{\Pi} = KK_{\Gamma\Pi} - KK_{\Pi} + \delta_{\Gamma\Pi}.$$

6.3.2. Уничтожение полукруговой девиации

Для уничтожения полукруговой девиации применяют способ Эри, названный по имени английского астронома Д. Б. Эри (1801 – 1892). Способ является наиболее распространенным и точным, выполняется без каких-либо вспомогательных приборов и позволяет одновременно уничтожить полукруговую девиацию на всех компасах, установленных на судне.

Методика выполнения способа требует последовательной ориентации судна на главных магнитных курсах N_m, E_m, S_m и W_m. Приведение судна на нужный магнитный курс может быть выполнено, например, по курсовому углу отдаленного ориентира или створа с использованием пеленгатора. Если же использовать только гирокомпас, то судно стабилизируют на таком курсе по гирокомпасу, который соответствует заданному магнитному. Величину *ГКК* вычисляют по формуле $\Gamma KK = MK + d - \Delta \Gamma K$, где магнитный курс *МК* принимает

фиксированные значения 0, 90, 180 и 270°.

Полукруговая девиация, создаваемая силами $B'\lambda H$ и $C'\lambda H$, определяется преобладающим действием постоянных составляющих P и Q от твердого судового железа. Поэтому уничтожение полукруговой девиации осуществляется постоянными магнитами-уничтожителями, устанавливаемыми в девиационном приборе под котелком компаса. Для компенсации силы $B'\lambda H$ используют пару магнитов-уничтожителей, расположенных продольно (вдоль ДП судна), а для компенсации силы $C'\lambda H$ – пару магнитов, расположенных поперечно.

Рассмотрим суть способа Эри, начиная с уничтожения полукруговой девиации, создаваемой силой $C'\lambda H$. Для удобства выпишем отдельно направления судовых магнитных сил по отношению к магнитному меридиану N_m, считая, что коэффициенты девиации имеют положительное значение:



 $\lambda H - N_m; A'\lambda H - 90^\circ; B'\lambda H - K; C'\lambda H - (K + 90^\circ); D'\lambda H - 2K; E'\lambda H - (2K + 90^\circ).$

Рис. 6. 14. Уничтожение полукруговой девиации от поперечной силы $C\lambda H$ *a*) – судно следует курсом N_m; δ) – судно следует курсом S_m

Судно ложится на N_m. Построим многоугольник сил на этом курсе (рис. 6.14, *a*). Силы λH , $B'\lambda H$ и $D'\lambda H$ действуют по направлению магнитного меридиана, а силы $A'\lambda H$, $E'\lambda H$ и $C'\lambda H$ перпендикулярно ему (на рис. 6.14 точные коэффициенты девиации A', B', C', D' и E' заменены приближенными значениями A, B, C, D и E, которые можно будет определить по наблюдениям при дальнейшей оценке остаточной девиации). Результирующий вектор H' даст направление компасного меридиана N_к, определяя суммарную девиацию δ_N , которая наблюдается по картушке компаса. Однако, по показаниям компаса нельзя определить, какая часть девиации создается силой С'λН и подлежит компенсации.

Тогда поступают следующим образом. С помощью рукоятки в девиационном приборе механически разворачивают пару поперечных магнитовуничтожителей так, чтобы девиация δ_N была доведена до нуля. Это значит, что магниты-уничтожители создали поперечную противоположно направленную силу $F = -(A'\lambda H + E'\lambda H + C'\lambda H)$.

Следует отметить, что устройство девиационного прибора в зависимости от типа магнитного компаса может быть разным. Например, в качестве магнитов-уничтожителей могут применяться несколько отдельных стержневых магнитов, которые в данном случае необходимо будет установить поперечно по назначению.

После этого судно ложится на магнитный курс S_m (рис. 6.14, δ). Здесь направления сил $C'\lambda H$ и F, а также сила $B'\lambda H$ относительно меридиана изменяются на 180°. Представим, что сила F равна сумме двух сил: $F = f_1 + f_2$. Причем, сила $f_1 = |A'\lambda H + E'\lambda H|$, а сила $f_2 = |C'\lambda H|$. Тогда сила f_2 будет полностью компенсировать силу $C'\lambda H$ и девиация на данном курсе будет определяться суммой сил: $\delta_s = f_1 + (A'\lambda H + E'\lambda H)$. Так как эти силы равны, то перемещением тех же поперечных магнитов девиацию уменьшают наполовину. Обычно девиация от суммы сил $(A'\lambda H + E'\lambda H)$ мала, а значит, мала и от силы f_1 . Поэтому погрешность от замены биссектрисы медианой в треугольнике сил будет незначительной. В итоге, магниты будут действовать на компас только разностью сил $(F - f_1)$, компенсирующей силу $C'\lambda H$ на всех курсах.





Компенсация продольной силы $B'\lambda H$ осуществляется подобным же образом. На магнитном курсе E_m (рис. 6.15, *a*) девиация δ_E создается результирующим действием сил ($A'\lambda H - E'\lambda H$) и силой $B'\lambda H$. Здесь считаем, что $A'\lambda H > E'\lambda H$. Результирующая сила ($A'\lambda H - E'\lambda H + B'\lambda H$) компенсируется силой *F* путем доведения продольными магнитами-уничтожителями девиации δ_E до нуля.

На магнитном курсе W_m (рис. 6.15, δ) из многоугольника сил видно, что сила *F* перекомпенсировала силу $B'\lambda H$ на величину $f_1 = (A'\lambda H - E'\lambda H)$.

Поэтому, перемещая те же продольные магниты, доводят измеренную девиацию δ_W до ее половинного значения. Тогда магниты будут действовать на компас только разностью сил $(F - f_1)$, компенсирующей силу $B'\lambda H$ на всех курсах.

6.3.3. Уничтожение четвертной девиации

Четвертная девиация создается силами $D'\lambda H$ и $E'\lambda H$ и определяется действием только мягкого судового железа. Значит и компенсация этих сил должна обеспечиваться уничтожителями, изготовленными из мягкого ферромагнитного материала. Условие компенсации можно выразить через соответствующие коэффициенты четвертной девиации D', E' мягкого судового железа и $D_{\rm K}$, $E_{\rm K}$ от мягкого железа компенсатора: $D' = -D_{\rm K}$ и $E' = -E_{\rm K}$.

Коэффициент четвертной девиации $D' = (a - e)/2\lambda$. Параметры Пуассона *a* и *e*, как это было отмечено в параграфе 6.2.1, как правило, отрицательны, причем |e| > |a|, поэтому D' > 0. Следовательно, коэффициент четвертной девиации от компенсатора должен быть отрицательным ($D_{\rm K} < 0$); он будет отрицательным, если разность ($a_{\rm K} - e_{\rm K}$) – отрицательное число.

Рассмотрим взаимодействие магнитного поля судна и компенсаторов судовой силы $D'\lambda H$ в зоне картушки магнитного компаса (рис. 6.16 *a*) [5]. Горизонтальная составляющая магнитного поля Земли *H* действует на судне в свою очередь в виде подольной *X* и поперечной *Y* составляющих, намагничивающих соответственно по осям судна все мягкое железо. Магнитное поле судна показано на рис. 6.16.*а* внешним контуром магнитных силовых линий, как это уже было рассмотрено в параграфе 6.1.3. Из рисунка видно, что судовые параметры *aX* и *eY* в зоне магнитной системы компаса отрицательны, поэтому

$$D' = \frac{(-a) - (-e)}{2\lambda} > 0$$
, поскольку $|e| > |a|$.

В качестве компенсаторов используют продольные бруски круглого или прямоугольного сечения либо шары, устанавливаемые в верхней части нактоуза, снаружи, симметрично на уровне картушки компаса. Пара таких компенсаторов намагничивается продольной X и поперечной Y составляющими магнитного поля Земли (рис. 6.16, *a*) и создает в центре компаса силы $-a_{\kappa}X$ и $+e_{\kappa}Y$.



Следовательно, коэффициент

$$D_{\kappa} = \frac{(-a_{\kappa}) - (+e_{\kappa})}{2\lambda} < 0.$$

Анализируя знаки судовых параметров aX и eY и параметров компенсаторов $a_{\kappa}X$ и $e_{\kappa}Y$ на различных магнитных курсах судна, отмечаем, что получаемый коэффициент D_{κ} будет всегда противоположен по знаку коэффициенту D'.

Таким образом, уничтожение девиации от силы $D'\lambda H$ сводится к получению соответствующего коэффициента $D_{\rm k}$ путем подбора длины продольных брусков прямоугольного сечения и/или стержней круглого сечения. Такие компенсаторы установлены попарно симметрично относительно магнитного чувствительного элемента (котелка) в компасе известной модели КМО-Т. На компасах иностранных марок в качестве компенсаторов часто используются шары, изготовленные из мягкого железа определенной массы. Шары закрепляют симметрично на определенном расстоянии от котелка компаса (см. рис. 6.20), которое определяется при проведении девиационных работ.

Современные магнитные компасы снабжаются безындукционными [5] компенсаторами четвертной девиации в виде комплекта из 16 пластин, которые устанавливаются в двух пеналах по 8 пластин с каждой стороны котелка компаса (рис 6.16, δ) Каждая пластина создает коэффициент $D_{\rm k}$ величиной 0,5°. При установке всех 16 пластин суммарный компенсационный коэффициент $D_{\rm k}$ достигает значения 8°. С помощью такого набора можно обеспечить уничтожение четвертной девиации с остаточным коэффициентом D не более 0,25°.

В большинстве случаев уничтожение четвертной девиации ограничивается компенсацией силы $D'\lambda H$, так как сила $E'\lambda H$ очень мала.

6.3.4. Креновая девиация и ее уничтожение

Полукруговая и четвертная девиация магнитного компаса рассматривались применительно к судну на ровном киле. Между тем, иногда на судах наблюдается постоянный крен, дифферент или суда подвергаются качке, т.е. переменному поперечному или продольному крену. В этом случае характер воздействия на компас магнитных сил меняется. Наряду с продольной X' и поперечной Y' составляющими на картушку начинает оказывать влияние и вертикальная составляющая Z' суммарного магнитного поля. В результате картушка выходит из компасного меридиана, определяемого вектором H', на угол $\delta_{\rm кр}$, называемый креновой девиацией.

Сущность креновой девиации рассмотрим на примере бортовой качки. Пусть судно накренилось на левый борт на угол θ , как показано на рис. 6.17, *а*. Ранее было установлено, что вертикальная составляющая Z магнитного поля Земли намагничивает все вертикальные бруски судового железа и судно можно представить в виде вертикального магнита (см. рис. 6.17, *в*), северный полюс которого располагается в районе киля, а южный – в районе палубы. Результирующую силу такого магнита можно определить в виде вектора $F_{\rm B}$. Тогда, при крене судна, в горизонтальной плоскости картушки появляется поперечная составляющая $F'_{\rm B} = F_{\rm B} \sin\theta$, что и вызывает девиацию.

Отклонение картушки особенно заметно проявляется на компасных курсах N и S, так как в этих случаях поперечная составляющая действует перпендикулярно ДП судна (рис. 6.17, δ) подобно действию поперечной силы $C\lambda H$. На двух же других главных румбах – Е и W – поперечная составляющая совпадает с магнитной осью картушки (рис. 6.17, ϵ) и поэтому отклоняющего действия на стрелки компаса не оказывает. Становится ясным, что $\delta_{\rm kp}$ носит полукруговой характер, достигая максимального значения на курсах 0 и 180° и нуля – на курсах 90 и 270°.



Рис. 6.17. Возникновение креновой девиации: *a*) – появление поперечной силы при крене судна; δ) – креновая девиация на курсе N_k; *в*) – креновая девиация на курсе E_k

Если судно подвергается качке, попеременно переваливаясь с одного борта на другой, то под действием составляющей $F'_{\rm B}$ картушка компаса начинает «ходить» вправо и влево так, что становится затруднительным снятие отсчета курса. Чтобы устранить это явление, нужно создать у компаса такие магнитные условия, при которых поперечная составляющая Y' при крене судна не изменялась бы. Это означает, что если будет скомпенсирована сила $F_{\rm B}$, то и периодически появляющаяся дополнительная поперечная составляющая $F'_{\rm B}$, будет отсутствовать. Тогда для этой цели можно использовать вертикальный компенсационный магнит.

Обратимся к уравнениям Пуассона (6.1), характеризующим действие магнитных сил по судовым осям у и *z*:

$$Y' = Y + dX + eY + fZ + Q; \quad Z' = Z + gX + hY + kZ + R.$$

Напишем эти уравнения для магнитных курсов Е или W, когда сила $C\lambda H$ уничтожена, т.е. fZ + Q = 0. Учтем при этом, что на данных курсах Y = H, X = 0, поэтому dX = gX = 0, а hY = 0, поскольку параметр h обычно мал. Тогда уравнения примут вид:

$$Y'_{\rm E,W} = (1 + e) H; \quad Z'_{\rm E,W} = (1 + k) Z + R.$$

Вертикальный (креновой) магнит необходимо установить так, чтобы его сила компенсировала вертикальную составляющую R, создаваемую твердым судовым железом, т.е. для уничтожения креновой девиации требуется выполнить условие: R = 0. Приняв это условие и допущение k = e, получим:

$$Y'_{\rm E,W} = (1 + e) H; \quad Z'_{\rm E,W} = (1 + e) Z.$$
Образуем отношения: $\frac{Z'_{\rm E,W}}{Y'_{\rm E,W}} = \frac{Z}{H}$, из которых следует, что отношение

 $Z'_{E,W}/Y'_{E,W}$ равно тангенсу магнитного наклонения $I'_{E,W}$, измеренного в центре котелка компаса на курсах Е или W, а величина Z/H равна тангенсу магнитного наклонения в районе нахождения судна, т.е.:

tg
$$I'_{E,W}$$
 = tg I или $I'_{E,W} = I$.

Это означает, что креновая девиация будет уничтожена, если магнитные наклонения на судне и на Земле равны.

Практически креновую девиацию уничтожают с помощью специального прибора – судового инклинатора [35, 36], представляющего собой высокочувствительную магнитную систему. Для этого необходимо (при уничтоженной силе $C'\lambda H$): лечь на магнитный курс Е или W; вынуть котелок из компаса и на его место установить инклинатор; измерить судовое магнитное наклонение $I'_{\rm E,W}$ и сравнить его с магнитным наклонением Земли I, которое можно взять с магнитной карты. Далее, перемещением вертикального кренового магнита вверх или вниз довести значение $I'_{\rm E,W}$ до значения величины I – креновая девиация будет уничтожена.

6.3.5. Составление таблицы девиации

Как правило, во время плавания изменяется полукруговая девиация, поэтому периодически возникает необходимость в ее уничтожении и составлении новой таблицы девиации. Порядок выполнения такого рода девиационных работ состоит из нескольких этапов.

1. Принятие решения о необходимости уничтожения полукруговой девиации. Как уже отмечалось выше, в соответствии с требованиями РШСУ – 90 [11], наблюдаемая девиация не должна отличаться от табличных значений более чем на 2°. Девиация же главного магнитного компаса не должна превышать 3°, а путевого – 5°. Определяют девиацию одним из способов, рассмотренных в п. 6.3.3.

2.Уничтожение полукруговой девиации (способ Эри). Девиация уничтожается на главных магнитных курсах. Здесь особое внимание должно быть уделено контролю за положением судна на этих курсах.

3. Определение остаточной девиации на главных и четвертных компасных курсах. Результатом измерений являются значения остаточной девиации $\delta_{\rm N}$, $\delta_{\rm NE}$, $\delta_{\rm E}$, $\delta_{\rm SE}$, $\delta_{\rm S}$, $\delta_{\rm SW}$, $\delta_{\rm W}$ и $\delta_{\rm NW}$.

4. Расчет приближенных коэффициентов остаточной девиации А, В, С, D и Е по формулам:

$$\begin{split} A &= \frac{1}{8} \left(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 + \delta_5 + \delta_6 + \delta_7 + \delta_8 \right); \\ B &= \frac{1}{4} \left(\delta_3 - \delta_7 + 0.71 (\delta_2 + \delta_4 - \delta_6 - \delta_8) \right); \\ C &= \frac{1}{4} \left(\delta_1 - \delta_5 + 0.71 (\delta_2 - \delta_4 - \delta_6 + \delta_8) \right); \\ D &= \frac{1}{4} \left(\delta_2 - \delta_4 + \delta_6 - \delta_8 \right); \\ E &= \frac{1}{4} \left(\delta_1 - \delta_3 + \delta_5 - \delta_7 \right), \end{split}$$

где δ_1 , δ_2 ,..., δ_8 – значения остаточной девиации соответственно для курсов N, NE,..., NW.

5. Вычисление девиации. По полученным приближенным коэффициентам девиации *A*, *B*, *C*, *D* и *E*, используя общую формулу девиации (6.3), вычисляют девиацию, подставляя в формулу значения коэффициентов и компасного курса:

 $\delta = A + B \sin K' + C \cos K' + D \sin 2K' + E \cos 2K'.$

Таблицу девиации составляют для 24 равноотстоящих (через каждые 15°) или 36 (через каждые 10°) компасных курсов.

При тщательно выполненных девиационных работах остаточная девиация не превышает обычно 1 – 2°.

Таблица остаточной девиации является официальным документом, который составляется на бланке и подписывается девиатором или капитаном судна. При перевозке ферромагнитных грузов допускается использование временной таблицы девиации.

Во время плавания следят за изменением девиации и при необходимости можно в действующую таблицу девиации внести корректировки. Так как в наибольшей степени изменяется полукруговая девиация, то, наблюдая девиацию на четырех главных магнитных курсах, рассчитывают новые значения полукруговых коэффициентов по формулам:

$$B = \frac{(\delta_{\rm E} - \delta_{\rm W})}{2}; \quad C = \frac{(\delta_{\rm N} - \delta_{\rm S})}{2}$$

По новым значениям коэффициентов *В* и *С* и прежним значениям коэффициентов *A*, *D* и *E* составляют более точную новую таблицу девиации.

6.3.6. Повышение точности магнитного компаса

Чтобы силы полукруговой девиации $B'\lambda H = cZ + P$ и $C'\lambda H = fZ + Q$ сохраняли свою стабильность при переходе судна из одного района в другой необходимо компенсацию каждой силы выполнять не одним компенсатором, а двумя:

силы cZ и fZ вертикальными брусками мягкого железа, а силы P и Q – продольными и поперечными магнитами.

Изменение сил cZ и fZ происходит в зависимости от изменения вертикальной составляющей магнитного поля Земли Z (рис. 6.18). На магнитном экваторе она практически отсутствует, однако увеличивается с увеличением широты (в северных/южных районах значительна).

Вертикальный брусок из ферромагнитного материала, предназначенный для компенсации переменной части полукруговой девиации, называется широтным компенсатором (ШК) или **флиндерсбаром** (М.Флиндерс – английский мореплаватель и исследователь; бар – стержень, брусок).

Широтный компенсатор 2 уравновешивающий судовую силу c_0Z , устанавливают в продольной плоскости компаса, как это показано на рис. 6.18. Судовая продольная сила c_0Z компенсируется силой c_1Z , создаваемой при помощи ШК, который крепят вертикально к нактоузу. Внутри нактоуза размещают магниты-уничтожители 1 для компенсации судовой силы P_0 [5].



Рис. 6.18. Широтный компенсатор

Так как судовая сила f_0Z обычно невелика, ШК в поперечной плоскости компаса не устанавливают. Параметры ШК подбирают опытным путем, проводя соответствующие измерения на судне в двух различных точках Земли.

Широтный компенсатор, как и всякий близко помещенный к компасу элемент из мягкого железа, создает четвертную девиацию от индукции. В настоящее время разработаны конструкции сдвоенного ШК, установка которого не вызывает девиации от индукции.

Сдвоенный безиндукционный компенсатор состоит из двух одинаковых вертикальных стержней, установленных во взаимно перпендикулярных плоско-

стях. Для компенсации продольной судовой силы *c*Z необходимо иметь два вертикальных стержня, которые устанавливают на нактоузе симметрично: вправо и влево от диаметральной плоскости под углом 45°.

6.4. Примеры моделей магнитных компасов

6.4.1. Судовые магнитные компасы



Магнитный компас КМ-145. Магнитный компас КМ-145 (Россия) предназначен для измерения, отображения и трансляции текущего магнитного и определения значения истинного курса, а также определения магнитных пеленгов и курсовых углов. Компас пришел на смену известным моделям КМО-Т и имеет восемь модификаций. Наиболее полная из них КМ-145-8 включает в себя: основной прибор (рис. 6.19), в нактоузе которого установлены магнитный чувствительный элемент, девиационный прибор и элементы дистанционной оптической передачи курса; центральный прибор с элементами электромеханической схемы компаса; приборы питания; оптический репитер [7].

В девиационном приборе имеется три пары поворотных магнитов (продольные, поперечные и вертикальные) для точной компенсации полукруговой и креновой девиаций.

Рис. 6. 19. Магнитный компас КМ-145

С наружной стороны нактоуза в его верхней части крепятся безиндукционные компенсаторы четвертной девиации в виде комплекта пластин – по 8 пластин с каждой стороны в районе котелка. Для компенсации широтной девиации снаружи вертикально установлена пара стержней из мягкого железа (флиндерсбар) под углом 45° к ДП судна.

Оптическая передача показаний компаса осуществляется по волоконнооптическому жгуту. Для дистанционной электрической передачи курса используется ферромагнитный зонд, который закреплен в нижней части котелка. Это позволяет включить магнитный компас в судовую интегрированную навигационную информационную систему. **Магнитный компас Reflecta-1.** Широкое распростанение на судах мирового флота получили магнитные компасы немецкой фирмы **C.Plath**, в частности, серии Reflecta [37].

Магнитный компас Reflecta (выпускаемый в ряде модификаций) одобрен всеми ведущими морскими властями в качестве компаса класса А для использования во всем мире. Общий вид компаса показан на рис. 6.20.

Отличительные особенности. В девиационном приборе имеются две панели с вертикально расположенными десятью отверстиями, в которые могут выборочно вставляться продольно стержневые магниты для компенсации продольного влияния полукруговой девиации (в соответствии с методикой проведения девиационных работ). Такая же панель с десятью поперечно расположенными отверстиями служит для компенсации поперечного влияния полукруговой девиации.



Для компенсации четвертной девиации используются шары из мягкого в магнитном отношении железа. Для уточнения показаний компаса применяется широтный компенсатор – флиндерсбар, часто в виде одного стержня из мягкого железа. Имеется также компенсатор креновой девиации.

В некоторых модификациях, если предъявляются более жесткие требования к точности показаний магнитного компаса, применяются две пары шаров компенсации четвертной девиации соосно и симметрично расположенных под углом 45° по отношению к магнитной системе котелка компаса. Кроме того, используют двухстержневой флиндерсбар (как показано на рис. 6.19).

Рис. 6. 20. Магнитный компас Reflecta -1.

Передача показаний курса может осуществляться как с помощью оптической перископической системы, так и электрически дистанционно, используя ферромагнитный зонд, для предоставления данных общесудовой информационной системе.

К основным техническим характеристикам о	тносятся
Магнитный момент	$4 \text{ A} \cdot \text{m}^2$
Диаметр пеленгаторной системы	180 мм
Девиация качки	<2,0°
Девиация застоя	<0,5 °
Статическая погрешность	<0,5 °
Свобода наклона картушки в «котелке» компаса	$\pm 10^{\circ}$
Допуск наклона «котелка» в карданном подвесе	$\pm 180^{\circ}$

Встроенные корректоры Корректоры как опция Диапазон поворота зеркала оптической системы В + С, К, D Е, Флиндерсбар 360°

Фирма C.Plath выпускает также магнитный компас "Jupiter" ("Юпитер"), который дополнительно снабжен датчиком, закрепленным сверху на стекле котелка, благодаря которому компас подключается к системе сигнализации "Naviwarn" об отклонении судна от заданного курса. Компас подключен также к системе "Navipilot" для обеспечения автоматического управления рулем и удерживания судна на заданном курсе и к системе "Navitrans" – включение в репитерную систему курсоуказания. Для компенсации четвертной девиации применены шары.

Магнитный компас на судне считается резервным прибором, который дополняет работу гирокомпаса, а в случае его отказа может заменить его, обеспечивая курсоуказание в аварийной ситуации.

6.4.2. Флюксгейт компасы

Феррозондовые компасы типа «flux gate» (FG-магнетометры) нашли широкое применение в зарубежных моделях автономных измерительных судовых систем [32, 38]. Принцип действия такого компаса основан на измерении двух ортогональных горизонтальных компонентов напряженности H_X и H_Y локального геомагнитного поля H_M :

$$H_{\rm X} = k_m H_{\rm M} \cos\beta;$$
$$H_{\rm Y} = k_m H_{\rm M} \sin\beta,$$

где $H_{\rm M}$ – напряженность локального геомагнитного поля; β – угол между направлением на север и приборной системой координат; k_m – масштабный ко-эффициент.

Если на судне с достаточной точностью получить продольную H_x и поперечную H_y (относительно ДП судна) компоненты напряженности геомагнитного поля, то по их значениям можно найти магнитный курс судна (рис. 6.21):

$$MK = \arctan H_{\rm Y}/H_{\rm X} \tag{6.4}$$

Чувствительным элементом феррозондового (магнитометрического) компаса является тороидальный сердечник из магнито-проницаемого материала, на котором имеются три обмотки: одна возбуждения и две диаметрально расположенные сигнальные обмотки (рис. 6.22). Сердечник тороида изготавливается из легконамагничиваемого материала (ферромагнетика), чаще всего из пермаллоя. Пермаллой представляет собой сплав железа (19%) и никеля (81%).



Рис. 6.21. Определение магнитного курса

Рис. 6.22. ХҮ – флюксгейт магнетометр

Сигнал возбуждения, подаваемый на обмотку в виде напряжения переменного тока $\sim U_{\rm B}$, создает переменное магнитное поле сердечника. Во время одного полупериода этого сигнала возникающее поле ориентировано по окружности тороида в направлении по часовой стрелке, а в другой – против. При этом в течение каждого из периодов сердечник дважды возбуждается до насыщения. Возникает магнитный поток Φ , значения Φ_A , Φ_B которого в районах A и B сердечника равны и противоположно направлены. Таким образом, когда внешнее магнитное поле отсутствует, суммарный магнитный поток, проходящий через сигнальную обмотку, равен нулю, и напряжения в ней нет. Аналогичный процесс протекает и в диаметрально расположенной обмотке.

На рис. 6.22 символами H_{XA} , H_{XB} обозначены векторы напряженности возбуждаемого в сердечнике магнитного поля в районах A и B.

Когда перпендикулярно плоскости сигнальной обмотки действует постоянная составляющая H_M внешнего магнитного поля, то в полупериод изменения тока *i* (как показано на рис. 6.22) она сложится с H_{XA} и вычтется из H_{XB} . Во второй полупериод тока направления векторов H_{XA} , H_{XB} поменяются на обратные, а направление H_M останется тем же. В результате суммарный магнитный поток, проходящий через сигнальную обмотку, не будет нулевым и это вызовет появление сигнального напряжения:

$$U_C = -\frac{d\Phi_C}{dt} = -kH_M \frac{d\mu}{dt},$$

где Φ_c – поток магнитной индукции (поток полезного сигнала), зависящий от вектора напряженности магнитного поля Земли $H_{\rm M}$; k – конструктивный параметр ферромагнитного зонда; μ – магнитная проницаемость материала сердечника.

Сигнальное напряжение U_C может возникнуть только при наличии некоторого процесса изменения магнитной проницаемости сердечника μ . Непрерывное (цикличное) изменение магнитной проницаемости сердечника μ обеспечивается за счет питания обмотки возбуждения зонда переменным током *i* (обычно частотой 400 Гц).

Полезный сигнал U_C имеет вид переменного, несколько искаженного напряжения, частота которого в два раза больше частоты $\sim U_B$:

 $U_C = kH_{\rm M}\sin 2\omega t.$

Амплитуда сигнального напряжения *U*_C пропорциональна напряженности внешнего магнитного поля *H*_M.

То есть, индуцируемый в обмотке AB сигнал оказывается пропорциональным компоненту H_x локального геомагнитного поля, направление которого перпендикулярно расположению этой обмотки. Равным образом в диаметральной обмотке на второй гармонике частоты возбуждения возникает сигнал, характеризующий другой ортогональный компонент H_y магнитного поля Земли.

Таким образом, если на судне этот датчик установить для проведения измерений в горизонтальной плоскости, одну внешнюю обмотку расположить вдоль ДП, а другую – перпендикулярно к ней, то в первой обмотке возникнет напряжение, пропорциональное поперечной составляющей геомагнитного поля, а во второй обмотке – пропорциональное продольной компоненте.

Амплитуда принимаемых сигналов измеряется и преобразуется в цифровой эквивалент двух горизонтальных компонентов напряженности H_X и H_Y локального геомагнитного поля и по формуле (6.4) определяется магнитный курс судна *МК*.

В большинстве электронных магнитных компасов (ЭМК) расчет девиации с последующим ее учетом выполняются автоматически. Для нахождения таблицы девиации достаточно перейти в предусмотренный в ЭМК для этой цели режим и выполнить циркуляцию (поворот на 360).

Для компенсации магнитного склонения в ЭМК используются компенсационные таблицы, представляющие карты изогон земной поверхности, либо математическая модель геомагнитного поля, обеспечивающая расчет склонения на текущее время в любой точке Земли. Такая международная модель уточняется через каждые пять лет.

Магнитное склонение находится по координатам места судна. С этой целью к ЭМК подключается приемоиндикатор GPS.

FG-магнетометры могут быть разных видов. Примером может служить **флюксгейт компас «Azimuth 1000»** (рис. 6.23) фирмы KVH Industries.

Этот компас в одном компактном водозащитном модуле содержит цифровые флюксгейт датчики и LCD-дисплей. «Azimuth 1000» имеет цифровой выход значений курса, соответствующий стандарту обмена данными, что позволяет использовать его информацию в авторулевом и в других судовых системах. Вес компаса составляет 340 г.



Все электронные магнитные компасы имеют небольшие габариты, массу и потребляют мало энергии. Они обеспечивают устойчивые показания курса с точностью 0,5÷2,0 и разрешение 0,1.

Рис. 6.23. Флюксгейт компас «Azimuth 1000»

Широкое распространение получили **МR-магнетометры, основанные** на магниторезисторном эффекте и магнетометры, основанные на эффекте Холла

Магниторезистивные устройства изготовлены из тонких полос пермаллоя (магнитная пленка NiFe), электрическое сопротивление которых изменяется с изменением магнитного поля. Четыре полосы (сопротивления) включаются по мостовой схеме, имеют четко определенную ось чувствительности, могут быть изготовлены в трехмерных версиях и могут быть серийно изготовлены в виде интегральной схемы. В компасах точность показаний находится в пределах 1° с разрешением 0,1°.

Фирмой Honeywell выпускается серия гибридных магниторезисторных микросхем, предназначенных для использования в навигационной аппаратуре. Датчики размещаются в пластмассовых корпусах с габаритами от 5х4х1,8 до 7,8х21,1х4,3 мм.

Магнетометры, основанные на твердотельном эффекте Холла, используют явление возникновения поперечного электрического поля и разности потенциалов в металле или полупроводнике, по которым проходит электрический ток, при помещении их в магнитное поле, перпендикулярном к направлению тока.

Элемент Холла представляет собой пластину как правило из полупроводникового материала (например, арсенид галлия (GaAs), толщиной *d*, по четырем сторонам которой расположены контакты. Одна диаметральная пара контактов пластины называются *токовой*, а другая – *выходной* или *измерительной*. Уровень измерительного сигнала элемента Холла достигает максимума при нормальном направлении индукции воздействующего магнитного поля к плоскости пластины.

Конструктивно преобразователи Холла могут быть выполнены как в виде дискретных элементов, так и в виде полупроводниковых структур, расположенных в кристалле полупроводникового материала, в том числе и вместе с электронной схемой усиления и обработки получаемого сигнала.

Высокоточный трехосевой электронный компас HCR705B.

HCR705В – это высокоточный трехосевой электронный компас, использующий запатентованную в США технологию компенсации постоянных магнитных полей и металлических предметов в условиях влияния магнитных полей. Компас (рис. 6. 24) производится фирмой «Rion Technology» [39].

HCR705В содержит трехосевой чувствительный элемент (flux-gate), выполняет обработку данных в реальном времени. Для компенсации влияния наклона датчика на показания азимута используется трехосевой акселерометр. Датчик включает высокоточный микропроцессор, имеет стандартный интерфейс RS232/RS485/TTL.

По месту установки компаса с помощью программного обеспечения RION 3D выполняется его первичная калибровка: рекомендуется использовать 24 точки положения датчика по трем осям согласно приводимой методики, при этом не нужно знать истинное направление на север.

HCR705В имеет малые размеры, низкое энергопотребление, может применяться для контроля направления антенн, транспортных средств, комплексирования систем, а также в других сферах.

Компас обладает высокой стойкостью к ударам и надежностью даже в жестких условиях применения, соответствует требованиям миниатюризации.

Технические характеристики HCR705B:

1 1		
- диапазон измерений в азимуте:	0°360°;	
 погрешность по азимуту: 	0,3°0,5°;	
- диапазон измерений по крену:	±180°;	
- разрешение по углу наклона:	0,1°;	
- погрешность по углу наклона:	0,2°;	
- компенсация наклона, магнитных полей и металлических предметов;		
- температура эксплуатации:	-40°C+85°C.	
- размеры:	Д94× Ш31×В24 мм;	
- BeC:	80 г.;	
- питание:	пост. ток +5В, (или 936В);	

- ток потребления:

На рис. 6. 25 показан внешний вид высокоточного 3D цифрового компаса DCR260B. Эта модель компаса также позволяет выполнять измерения по азимуту, крену и дифференту и имеет технические характеристики близкие к модели HCR705B.



Рис. 6.24. 3D компас HCR705B



20 мА (макс.)

Рис.6.25. 3D компас DCR260B

7. ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

7.1. Распространение акустических волн в водной среде

7.1.1. Основные характеристики и свойства акустического поля

Действие гидроакустических навигационных приборов основано на излучении акустической энергии в водную среду, приеме и обработке эхо-сигналов, возникающих в результате отражения или рассеяния от водных объектов. Наиболее полное представление о распространении звука в жидкости дает волновая гидроакустика. Для большого круга задач практической гидроакустики применяют приближенный метод расчетов – метод геометрической (лучевой) гидроакустики [2 - 5].

Физическая природа звука. Звук как физический процесс представляет собой частный случай механического колебательного движения материальной упругой среды. Источником звука может быть, например, механическая колебательная система, помещенная в жидкость. Колеблющаяся поверхность источника звука периодически вызывает сжатие и растяжение прилегающего слоя частиц водной среды. Частицы среды представляют собой миниатюрные колебательные системы, связанные между собой упругими силами.



Рис. 7.1. Распространение звука

Если одну из них в начальный момент t_0 (частица I, показанная на рис 7.1) вывести из положения равновесия, то в силу своей инерционности в t_1 она достигнет своего максимального отклонения, а затем, действующие силы молекулярных связей со стороны соседних частиц, заставят ее вновь вернуться к устойчивому положению в t_2 . Далее под влиянием тех же сил инерции частица будет совершать движение в противоположном направлении достигая своего максимального отклонения в t_3 и возвратится в исходное положение в t_4 . Таким образом, частица будет совершать колебания около своего положения равновесия.

Смещение первой частицы из положения равновесия вызовет смещение соседних частиц, которые в свою очередь передадут возмущение другим прилегающим частицам. То есть каждое возмущение, возникнув в определенном участке среды, будет постепенно распространяться, захватывая частицы, все дальше и дальше отстоящие от места начального возмущения. Так как каждая последующая частица начинает смещаться из положения равновесия позднее, чем предыдущая, то в водной среде образуются области сгущений и разряжений, которые последовательно удаляются от источника колебаний. На рис.7.1 затененными полосами показаны области сгущения частиц, они чередуются с областями разрежения.

В реальных условиях внутри среды действуют не только упругие силы, но и силы внутреннего трения, поэтому после исчезновения возмущения колебания частиц быстро затухают.

Этот волновой процесс называют распространением звука. Пространство, в котором проявляются акустические процессы, называют *звуковым полем*.

Звуковые волны подразделяются по виду, форме и частоте. Различают волны трех видов: *продольные, поперечные* и *сложные*. В жидкости распространяются только продольные волны. Форма звуковой волны определяется видом фронта волны. *Фронтом волны* называют некоторую воображаемую поверхность, все точки которой колеблются с одинаковой фазой. Линии нормальные к фронту волны, совпадающие с направлением ее распространения, называются *звуковыми лучами*. Звуковые волны в реальных условиях имеют сложную форму. К волнам простейших форм относятся плоские, сферические и цилиндрические в зависимости от формы поверхности источника колебаний. В зависимости от частоты колебаний волны подразделяют на инфразвуковые (менее 16 Гц), звуковые (16 – 20000 Гц) и ультразвуковые (более 20 кГц).

В продольных волнах колебания частиц совпадают с направлением распространения волн. При этом *частицы жидкости не увлекаются акустической волной, а только передают возмущение соседним частицам.* Среда, участвующая в колебательном процессе, в целом остается неподвижной; частицы жидкости совершают около своего положения равновесия колебательные движения, характеризующиеся амплитудой смещения *и* и колебательной скоростью *v*. *Скорость передачи возмущения от частицы к частице называют скоростью звука с.* Скорость звука зависит только от свойств среды, причем c >> v.

Если действие возмущений, порождающих звуковые волны, носит периодический гармонический характер и выражается равенством $U = U_m \sin \omega t$, где U_m – амплитуда колебаний частицы, а ω – частота колебаний, то закон движения других *i* - ых частиц может быть представлен также в виде гармонического закона

 $U = U_{mi} \sin (\omega t - \psi_i),$

где *U_{mi}* – амплитуда колебаний *i* – ой частицы;

*ψ*_{*i*} – фазовый сдвиг этих колебаний.

По мере удаления от источника возбуждения (частицы 1 на рис 7.1) значения амплитуд колебаний U_{mi} из-за рассеяния энергии будут убывать, а фазовые сдвиги ψ_i в силу ограниченности скорости распространения возбуждения – увеличиваться.

Гармоническая звуковая волна характеризуется длиной волны λ – расстоянием между двумя максимумами или минимумами возмущения и периодом T

– временем, за которое совершается один цикл колебаний. Они связаны соотношением $\lambda/c = T$.

Вместо периода *T* часто пользуются частотой *f*, равной числу периодов в единицу времени: f = 1/T, тогда $f \lambda = c$.

При определенных условиях геометрическая акустика позволяет пренебречь волновой природой звука и вместо волны рассматривать перемещение ее фронта или элементарного участка последнего вдоль звукового луча. Основные положения этого метода разработал голландский физик Х. Гюйгенс (1629 – 1695), сформулировав его в известном принципе: в любой момент времени частицы, составляющие фронт волны, являются источниками элементарных сферических волн; огибающая этих волн определяет новое положение фронта волны.

Основные параметры звукового поля. Возникновение сгущений и разрежений при распространении звуковой волны связано с местным изменением давления в среде. При отсутствии звуковых волн в данной точке звукового поля существует статическое давление p_0 , а в момент прохождения звуковой волны давление становится равным p_1 . Избыточное давление p (в H/м²) равное разности p_0 и p_1 называют звуковым или *акустическим давлением*. Оно изменяется во времени и по мере удаления от источника излучения, т.е. является функцией координат и времени:

$$p = f_1(x, y, z, t).$$

Акустическое давление измеряется в паскалях (Па). Уровень данного звукового давления по отношению к пороговому значению акустического давления $p_0 = 2 \ 10^{-5}$ Па оценивают в логарифмических единицах – децибелах (дБ). Число децибел определяется по формуле:

 $N = 20 \lg(p/p_{\rm o}).$

Возникновение звукового давления тесно связано с наличием колебательного движения частиц упругой среды, которое характеризуется *смещением частиц и* (в м) от начального положения равновесия и *скоростью их колебательного движения v* (в м/с), которые также являются функциями координат и времени:

$$u = f_2(x, y, z, t); \quad v = f_3(x, y, z, t).$$

Энергия акустического поля складывается из суммы кинетической энергии колеблющихся частиц и потенциальной энергии упругой деформации. Основной энергетической характеристикой звукового поля является *интенсивность звука I* – среднее по времени количество энергии, которое переносит звуковая волна через единичную площадку, перпендикулярную направлению распространения волны, за единицу времени. Интенсивность звука измеряется в ваттах на квадратный метр и оценивается также уровнем интенсивности по шкале децибел:

 $N = 10 \, \lg(I/I_{\rm o}),$

где I – интенсивность данного звука; $I_0 - 10^{-12} \text{ Bt/m}^2$.

7.1.2. Особенности распространения звука в море

Скорость звука в море. Скорость распространения акустических волн в море играет большую роль при решении такой важной задачи гидроакустики, как определение дистанции до цели при эхопеленговании. Даже небольшие изменения скорости распространения акустических волн (доли процента) при дальнем распространении могут привести к последствиям: концентрации акустической энергии или уходу ее из определенных слоев воды.

В идеальной среде скорость распространения акустических волн, как известно, определяется только ее физическими свойствами. Скорость распространения акустической волны можно выразить через модуль объемной упругости [40, 41]:

$$c = \sqrt{\frac{k}{\rho}}$$

где k – модуль объемной упругости;

,

 ρ – плотность воды.

Величины *к* и *ρ* зависят от температуры, солености воды и гидростатического давления (глубины), поэтому и скорость звука является функцией перечисленных факторов. Дисперсия акустических волн почти незаметна.

При глубине h до 1000 м, солености S от 30 до 42‰ и температуре T от 2 до 24,5°С для определения скорости распространения акустических волн может быть использована формула [23]:

 $c = 1492,9 + 3(T-10) - 0,006 (T-10)^2 - 0,04 (T-18)^2 + 1,2 (S-35) - 0,01 (T-18) (S-35) + 0,0164h,$

Скорость распространения акустических волн возрастает с увеличением температуры, солености и глубины. Причем наибольшее влияние на нее оказывает изменение температуры воды. С увеличением температуры увеличивается модуль объемной упругости, плотность же изменяется незначительно, и, следовательно, увеличивается скорость распространения акустических волн. Изменение скорости акустических волн с изменением температуры нелинейно. При увеличении температуры на 1°С скорость акустических волн увеличивается на ~4 м/с в холодной воде (до 10°С) и на 2,5 м/с в теплой (25 – 30°С).

Увеличение глубины на каждый метр в верхнем слое (0 – 100 м) приводит к возрастанию скорости акустических волн на 0,0164 м/с, а около дна (~5000 м) – на 0,0183 м/с.

Изменение солености незначительно влияет па скорость акустических волн, так как оно само по себе невелико. Так, при увеличении солености на 1‰ (промилле) скорость акустических волн увеличивается на 1 м/с.

При увеличении глубины на 10 м статическое давление увеличивается приблизительно на 10⁵ Па.

В среднем в море скорость звука может изменяться в пределах 1440 – 1580 м/с.

Количественная оценка изменения скорости акустических волн производится с помощью понятия градиента, характеризующего изменение какоголибо параметра на единицу расстояния (глубины h).

Практическое значение имеет вертикальный градиент скорости звука в воде g_c , который измеряется в с⁻¹. Градиент температуры измеряется в град/м, градиент солености в промилле/м, градиент давления в Па/м. Градиент может быть и положительным и отрицательным.

Экспериментально установлено, что характер изменения скорости акустических волн с глубиной (вертикальное распределение) в мелких водоемах или в поверхностных слоях глубоких морей приблизительно совпадает с характером сезонных изменений температуры воды.

Можно указать следующие типичные случаи вертикального распределения скорости акустических волн в море:

-скорость акустических волн постоянна: $g_c = 0$;

-скорость акустических волн возрастает с глубиной: $g_c > 0$;

-скорость акустических волн уменьшается с глубиной: $g_c < 0$;

-скорость акустических волн резко уменьшается с глубиной в поверхностном слое и медленно на большей глубине;

-скорость акустических волн уменьшается с глубиной в поверхностном слое и увеличивается с глубиной в глубинных слоях.

Для решения ряда практических задач требуется знать с высокой точностью скорость распространения звука *с* в морской воде на различных глубинах *h*. Этой цели наилучшим образом удовлетворяют Мореходные таблицы расчета скорости звука в морской воде с ограничением по глубине до 6000 м [42].

Скорость звука рассчитывают по формуле Вильсона:

 $c = c_0 + \Delta c + \Delta c_h,$

где $c_0 = 1449,14$ м/сек называется опорной скоростью звука, вычисленной для температуры t = 0 °C, солености S = 35 ‰ и давления 1,033 кг/см² (одна атмосфера);

 $\Delta c = \Delta c_t + \Delta c_s + \Delta c_{hst}$ – сумма поправок соответственно за температуру, соленость и взаимодействие глубины (давления), солености и температуры, табулированная по диапазонам глубин;

 Δc_h – поправка за глубину h.

Отражение и преломление акустических волн. Важнейшей акустической характеристикой среды является ее *акустическое сопротивление* (или жесткость), равное произведению плотности среды ρ на скорость звука *с* в ней.



Рис. 7.2. Отражение и преломление звуковой волны

При падении звуковой волны на границу раздела двух сред, имеющих различные акустические сопротивления (например, $\rho_1 c_1$ и $\rho_2 c_2$), часть звуковой энергии отражается, а остальная, преломляясь, проникает в смежную среду (рис. 7.2).

Геометрия звуковых лучей в гидроакустике, как и в оптике, определяется известным законом отражения $\alpha = \beta$ и законом преломления

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{c_1}{c_2} = n,$$

где α, β, γ – соответственно углы падения, отражения и преломления;

*с*₁ и *с*₂ – скорости звука соответственно впервой и второй среде;

n – коэффициент преломления.

Если выполняется неравенство $c_2 > c_1$, то при некоторых значениях угла падения α угол преломления γ может стать равным 90° и звуковая волна не будет проходить во вторую среду. Дальнейшее увеличение угла α приведет к обратному отражению в первую среду и наступит явление полного внутреннего отражения. Угол, начиная с которого отражение становится полным, называется критическим и определяется зависимостью sin $\alpha_{\rm kp} = c_1/c_2$.

Например: $\sin \alpha_{\rm kp} = \frac{332 \,{\rm M/c\,(воздуx)}}{1500 \,{\rm M/c\,(вода)}} = 0,22; \quad \alpha_{\rm kp} = 12^{\circ},7.$

В общем случае можно сделать выводы: когда акустические сопротивления сред различаются незначительно, то одна часть звуковой энергии отражается, а другая переходит во вторую среду; если $\rho_1 c_1 >> \rho_2 c_2$ или $\rho_2 c_2 >> \rho_1 c_1$, то вся падающая энергия отражается в первую среду; при равенстве акустических сопротивлений ($\rho_1 c_1 = \rho_2 c_2$) звуковая энергия полностью переходит из первой среды во вторую.

Дифракция звуковых волн. Звуковые волны в процессе распространения обладают способностью огибать встречающиеся на пути препятствия. Это явление называется дифракцией звука. Все частицы среды, лежащие на уровне преграды, могут быть представлены на основании принципа Гюйгенса как точечные излучатели. Сферические волны от этих частиц образуют результирующую волну, проникающую за преграду. На каком-то расстоянии от преграды общий фронт волны восстанавливается.

Степень дифракции зависит от соотношения размеров препятствия d и длины волны λ (рис. 7.3):



Рис. 7.3. Дифракция акустических волн

 $d >> \lambda$ – падающая акустическая волна полностью (частично) отражается от границы раздела двух сред, за преградой образуется зона "акустической тени", дифракция отсутствует (незначительна);

 $d \approx \lambda$ – зона "акустической тени" исчезает, дифракция проявляется достаточно сильно;

 $d \ll \lambda$ – акустическое поле практически не нарушается.

При пеленговании подводных объектов с помощью гидролокатора обычно применяют акустические колебания высокой частоты. Так, например, если применять рабочую частоту гидролокатора f = 35 кГц, то длина волны со-

ставит приблизительно 4,3 см, и обнаружение предмета, диаметр которого, положим, составляет 1 м, будет возможным.

Рефракция звуковых лучей. Толщу морской воды можно представить состоящей из отдельных горизонтальных слоев бесконечно малой толщины, в каждом из которых плотность воды и скорость звука постоянны. Звуковой луч, распространяясь в такой слоистой среде, переходя от слоя к слою, будет испытывать отражение и преломление, что приводит к его искривлению и рассеиванию части звуковой энергии. Явление искривления звуковых лучей вследствие неоднородности морской воды называется *рефракцией звука*. Рефракция звука может оказать большое влияние на результаты измерений расстояний и углов с помощью гидроакустических приборов.

Наглядное представление о рефракции дают так называемые лучевые картины, изображающие траекторию звукового луча в вертикальной плоскости. Они могут быть построены при решении практических задач гидроакустики по результатам непосредственных измерений скорости звука в море.

При отрицательном градиенте скорости звука ($g_c < 0$ – скорость звука c уменьшается с глубиной h) акустические лучи, вышедшие из источника U, искривляются в сторону дна (рис. 7.4, a, δ), при положительном ($g_c > 0$) – в сторону водной поверхности (рис. 7.4, e, c). В последнем случае распространение акустической энергии сопровождается многократным отражением от водной поверхности и потери энергии незначительны.

Своеобразные условия для распространения звуковых волн возникают в глубоком море, где глубины превышают 1000 м. При смене отрицательного градиента скорости звука на положительный в определенном слое воды образуются условия, при которых скорость звука достигает своего минимального значения. Этот слой называют осью *подводного звукового канала* [4, 5].



Рис. 7.4. Лучевые картины при рефракции звуковых лучей: *a*) - уменьшение скорости звука с глубиной; *б*) - отрицательная рефракция; *в*) - увеличение скорости звука с глубиной; *г*) - положительная рефракция

Если источник A и приемник B акустических волн поместить на оси звукового канала, где градиент g_c имеет минимальное значение, то вследствие полного внутреннего отражения от верхних и нижних водных слоев звуковая энергия не выйдет за пределы канала и распространится на значительные расстояния при минимальных потерях (рис.7.5). Звук может распространяться на тысячи километров. Такое сверхдальнее распространение звука используется для сигнализации об авариях и определения координат судов и самолетов, терпящих бедствие.



Рис.7.5. Глубоководный звуковой канал

Интерференция звуковых волн. Если в среде распространяется не один, а несколько волновых процессов, то каждая частица среды, находящаяся в таком акустическом поле, совершает результирующее колебательное движение. Результирующее смещение частиц среды в любой момент времени является геометрической суммой смещений, вызванных каждым из складывающихся колебательных процессов в отдельности.

В результате сложения нескольких волновых процессов в некоторых точках акустического поля может произойти усиление, а в других – ослабление колебаний. Этот процесс называется интерференцией звуковых колебаний.

Условия интерференции: а) одинаковая или кратная частота; б) одинаковые направления смещения частиц; в) постоянство разности фаз. Источники колебаний, удовлетворяющие этим условиям, называются когерентными.

Особый интерес представляет случай, когда складываются колебания, образованные одним и тем же источником звука, но пришедшие в данную точку звукового поля различными путями, т.е. колебания у которых амплитуды и частоты одинаковы, а фазы различны. В результате интерференции падающей и отраженной волн, если отражающая поверхность расположена нормально к направлению распространению звука, образуются *стоячие волны* [40].

В стоячей волне, в зависимости от расстояния до отражающей поверхности, в некоторых точках амплитуды результирующих колебаний максимальны, а в некоторых равны нулю. Первые называются *пучностяями*, а вторые – *узлами*. Пучности и узлы смещены относительно один другого на расстояние $\lambda/4$. В пучностях акустическое давление равно нулю, а в узлах оно максимально.

При образовании стоячей волны в идеальной жидкости из-за наличия сдвига фазы между давлением и колебательной скоростью частиц, равного $\pi/2$, переноса энергии не происходит: результирующий поток энергии равен разности падающего и отраженного потоков, равных в данном случае по значению.

Реверберация. На пути распространения звуковой волны в морской воде встречается бесчисленное множество рассеивателей звука: воздушные пузырьки, взвешенные твердые частицы, различные микроорганизмы, флуктуации плотности воды и т.д. Результирующая интерференционная картина многочисленных очень слабых отражений от малых тел и неоднородностей воспринимается как колеблющийся отзвук после окончания посылки сигнала. Вначале этот отзвук может быть довольно интенсивным, а затем быстро ослабевает. Это явление, представляющее собой определенный вид помех, называется *реверберацией*. Различают поверхностную, объемную и донную реверберации: *поверхностная* обусловлена рассеиванием звука прежде всего газовыми пузырьками в поверхностном слое моря; *объемная* вызвана неоднородностями воды; *донная* возникает из-за рассеяния звука неровностями дна.

Реверберация существенно влияет на работу средств активной гидролокации. Полезный сигнал может быть принят и выделен, если к моменту его прихода уровень реверберации окажется ниже уровня эхо-сигнала. Время, прошедшее с момента посылки звуковой волны до момента окончания звучания реверберации, называется *временем реверберации*. В первом приближении это время можно рассматривать как фактор, определяющий разрешающую способность гидроакустических устройств.

Затухание акустических волн. Интенсивность акустических волн убывает по мере увеличения расстояния от источника. Прежде всего, это связано с расширением площади волновой поверхности с ростом расстояния – все больше частиц участвуют в процессе, что приводит к уменьшению амплитуды их колебаний.

Немаловажную роль в затухании звуковой волны играют неоднородности морской воды, главным образом газовые пузырьки, особенно высокая концентрация которых наблюдается в приповерхностном слое воды.

Распространение звука в воде сопровождается объемными деформациями – внутримолекулярное равновесие нарушается и затрачивается энергия на его релаксацию (восстановление). Наличие внутреннего трения (вязкости) и тепло-проводности в воде вызывает необратимый переход звуковой энергии в тепло.

В морской воде, представляющей собой сложный раствор многих солей, имеется еще и специфический молекулярный процесс, приводящий к затуханию – непрерывная диссоциация молекул сернокислого магния MgSO₄.

Все сказанное свидетельствует о том, что при энергетическом анализе звукового поля жидкость нельзя считать сплошной средой.

При затухании звуковой волны, обусловленным рассеянием и поглощением, для определения интенсивности звука на расстоянии *x* от источника используют формулу

$$I = I_0 e^{-\beta x},\tag{7.1}$$

где *I*_о – интенсивность звука на поверхности источника колебаний;

 β – коэффициент затухания (в дБ/км).

Степень затухания звуковых волн в море, т.е. крутизна экспоненты в формуле (7.1), в значительной мере зависит от коэффициента затухания β , на который влияют многие факторы. Учесть их теоретически не всегда представляется возможным. Экспериментальные исследования показывают, что пространственное затухание звуковых волн в море близко к квадратической зависимости от частоты *f* звуковой волны, т.е. чем выше частота звукового сигнала, тем в большей степени он поглощается средой, как это для примера показано на рис.7.6. Этот фактор является ограничивающим в работе гидроакустических приборов.



Рис. 7.6. Затухание акустических волн

Для определения коэффициента затухания используют эмпирические формулы. Например, для оценочных расчетов, не требующих большой точности, в интервале частот f от 5 до 60 кГц можно пользоваться формулой [4]:

$$\beta = 0,036 f^{3/2}.$$

При частотах выше 60 кГц применяют формулу

$$\beta = 0,214 f + 0,00016 f^2$$
.

Формула (7.1) может быть использована для вычисления дальности действия источника звука. Для этого следует задаться минимальным значением I_{min} интенсивности звука, необходимой для обнаружения звуковых колебаний в приемнике (рис.7.6.). Тогда максимальная дальность x_{max} распространения звука будет

$$x_{\max} = -\frac{1}{\beta} \ln \frac{I_{\min}}{I_o}.$$

7.2. Гидроакустические антенны

Излучение и прием акустических колебаний в гидроакустических приборах производится акустическими антеннами. Основным элементом антенн являются электроакустические преобразователи (вибраторы), обладающие способностью преобразовывать электрическую энергию в механическую и наоборот. В антенне-излучателе электрические импульсы от специального генератора преобразуются в колебательное движение ее излучающей поверхности, которое передается водной среде. В антенне-приемнике принимающая поверхность под воздействием отраженной акустической волны совершает механические колебания, которые преобразуются в электрический сигнал.

В гидроакустических приборах применяют, главным образом, два типа электромеханических преобразователей: магнитострикционные и пьезоэлектрические. Оба упомянутых типа вибраторов являются обратимыми и с одинаковым успехом могут работать как в режиме излучателя, так и режиме приемника [2, 5, 41].

7.2.1. Магнитострикционные преобразователи

Изменение линейных размеров ферромагнитного образца при помещении его в магнитное поле называется *прямым магнитострикционным эффектом* (эффект Джоуля). Характер и степень деформации зависят от материала образца, способа его обработки, предварительного намагничивания и температуры. Эффект Джоуля обратим, т.е. всякий магнитострикционный материал, будучи намагничен, изменяет свое магнитное поле под действием механического напряжения. Это явление называется *обратным магнитострикционным* эффектом (эффект Виллари).

В качестве материала для гидроакустических преобразователей обычно используют никель, который обладает наиболее выраженной магнитострикцией. Пакеты вибраторов набирают из прямоугольных или кольцевых тонких пластин (0,1 мм) отожженного никеля. Пластины имеют вырезы (отверстия) и при наборе их в пакет образуются каналы, в которые укладывают обмотки – подмагничивающую и сигнальную. Через подмагничивающую обмотку пропускают постоянный ток для создания предварительного намагничивания всего пакета. Корпус вибратора устанавливают в прорези днища так, чтобы нижняя торцовая часть пакета располагалась заподлицо с обшивкой корпуса судна и соприкасалась с забортной водой.

Для получения прямого магнитострикционного эффекта через сигнальную обмотку вибратора-излучателя пропускают мощный импульс (пачку импульсов) переменного тока. Под действием переменного магнитного поля пакет никелевых пластин начинает совершать механические колебания с частотой переменного тока, протекающего по обмотке. Механические колебания вибратора передаются воде, что и приводит к образованию акустических волн.

Отраженная звуковая волна воздействует на рабочую поверхность вибратора в виде оказываемого ею переменного звукового давления. Вследствие обратного магнитострикционного эффекта возникает переменное магнитное поле, которое будет индуцировать в сигнальной обмотке переменную э.д.с. Частота принятого сигнала будет равна частоте звуковой волны.

Достоинства магнитострикционных преобразователей: простота изготовления, высокая механическая прочность, антикоррозийные свойства.

Недостатки: ограниченный верхний частотный предел ($f_{np} = 60 \ \kappa \Gamma \mu$), сравнительно малый акустико-электрический коэффициент полезного действия (30 – 50%), большие масса и размеры, сравнительно малая чувствительность принимающего вибратора. Сегодня гидроакустические антенны, построенные на основе магнитострикционных преобразователей, используют лишь в отдельных случаях.

7.2.2. Пьезоэлектрические преобразователи

Пьезоэлектрические вещества (пьезоэлектрики), в частности пьезокерамика, имеет то свойство, что при деформации под действием внешнего механического давления на их поверхности возникают электрические заряды. Этот эффект называется *прямым пьезоэлектрическим эффектом* и был открыт в 1880 г. братьями Пьером и Жаком Кюри.

Наблюдаемое явление заключалось в том, что если оказывать механическое давление на кристалл турмалина (природный минерал) в определенном направлении, то на противоположных сторонах кристалла возникают электрические заряды пропорциональные давлению и противоположной полярности. Позже был обнаружен подобный эффект у кварца и других кристаллов.

Вскоре после этого (в том же 1881 г.) был подтвержден и *обратный пьезоэффект*, а именно, что такое вещество, расположенное между двумя электродами, реагирует на приложенное к нему электрическое напряжение изменением своей формы. Первый эффект в настоящее время используется для измерений, а второй – для возбуждения механических давлений, деформаций и колебаний.

Многочисленные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что все эти процессы происходят по линейным законам:

прямой пьезоэффект $P_i = d\sigma;$

обратный пьезоэффект $\Delta = dE$,

где P_i – поляризация, индуцированная механическим напряжением σ ;

d – пьезоэлектрическая константа (пьезомодуль);

 Δ – деформация;

Е – напряженность электрического поля.

Основными природными пьезоматериалами являются кварц и турмалин. Для получения наибольшего пьезомодуля кварцевая шайба, пластинка или диск вырезаются из монокристалла таким образом, чтобы наибольшая плоскость была перпендикулярна кристаллографической оси X (рис. 7.7). Ось X называют электрической (или пьезоэлектрической) осью. Обычно, у вырезанной прямоугольной пластинки ребро h параллельно оси X; ребро b – оптической оси Z, а ребро l – третьей координатной оси Y, называемой механической осью.



Рис.7.7. Ориентация выреза кварцевой пластины

Приложим к граням, нормальным к оси X, внешнее давление p_x . В результате на гранях появляются электрические заряды, что соответствует *прямому продольному пьезоэффекту*, так как направление давления совпадает с электрической осью.

Если оказывать давление на пластинку в направлении оси Y, то на поверхности грани bl также появляются электрические заряды, знак которых противоположен по сравнению с продольным пьезоэффектом. Это так называемый *прямой поперечный пьезоэффект* (направление внешнего усилия перпендикулярно к оси X).

Для наблюдения *обратного пьезоэффекта* следует поместить ту же пластинку в электрическое поле так, чтобы ось *X* совпадала с его направлением. Под воздействием электрического поля пластинка деформируется по направлениям X и Y. Относительная деформация пластинки в направлении оси X, соответствующая *обратному продольному пьезоэффекту*, зависит от напряженности электрического поля E_x .

Относительная деформация в *поперечном* направлении (по оси Y) так же пропорциональна напряженности электрического поля E_x .

Как показывает анализ этого явления, степень деформации по оси *Y* при *обратном поперечном пьезоэффекте* находится в прямой зависимости от отношения длины пластинки к ее толщине: *l/h*.

Это позволяет путем соответствующего выбора отношения изменить чувствительность преобразователя, предел которой ограничивается механической прочностью пластинки.

Наибольшую практическую ценность имеют кристаллы титаната бария BaTiO₃ и пьезоэлектрические структуры на его основе.

Процесс изготовления пьезокерамики разделяется на несколько этапов. При осуществлении синтеза заданного сегнетоэлектрического соединения исходное сырье (окислы или соли, например, двуокись титана и окись бария) измельчается и смешивается в количествах, соответствующих схемометрическому составу соединения, а затем подвергается термической обработке при температурах 1350 – 1450 °C, в процессе которой происходит химический синтез.

Из порошкообразного синтезированного материала прессованием (а также литьём под давлением) получаются заготовки необходимой конфигурации и размеров для будущих пьезоэлементов, которые затем подвергаются обжигу по строго определенному температурному режиму, в большой степени определяющему свойства пьезокерамики. Механическая обработка детали после обжига обеспечивает ей точно заданную форму и размеры.

Полученная структура представляет собой *кристаллит пьезокерамики* – это зерна со случайной ориентацией кристаллографических осей. Средние размеры зерен составляют от единиц до нескольких десятков микрон. Их называют *доменами* [43, 44]. В отсутствие внешнего электрического поля суммарная электрическая поляризация керамического образца равна нулю, как вследствие доменной структуры кристаллитов, так и вследствие произвольной ориентации кристаллитов относительно друг друга.

Чтобы придать керамике пьезоэлектрические свойства ее поляризуют – прикладывают к образцу, на который нанесены электроды (обычно путем вжигания серебра) сильное электрическое поле и выдерживают образец в течение некоторого времени. Режимы поляризации различаются напряженностью электрического поля, температурой и длительностью поляризации. В процессе поляризации домены кристаллитов приобретают выраженную направленность. Суммарную поляризацию получает и весь образец, так как векторы поляризации каждого кристаллита ориентируются вокруг направления напряженности внешнего поля в пределах некоторого угла. После снятия поля эта преимущественная ориентация сохраняется. Для поляризации керамики к электродам подводится электрическое напряжение (напряжённость поля *E* составляет от 0,5 до 3 кВ/мм в зависимости от химического состава и метода поляризации).

Современные средства проектирования позволяют рассчитать (промоде-

лировать) отдельно пьезоэлемент или пьезоэлектрический преобразователь целиком с учетом заданных свойств. Связь между приложенной силой и результирующим ответом пьезоэлемента зависит от: пьезоэлектрических свойств пьезокерамики, размера и форм образца, направления электрического и механического возбуждения.



Рис. 7.8. Вид образца пьезокерамики

На рисунке 7.8 показан один из видов колебаний: растяжениесжатие по длине соответствует длинному тонкому бруску с электродами на его концах и поляризованному по длине.

Пьезоэлектрические преобразователи имеют малые размеры и массу, обладают высокой чувствительностью и возможностью работы на высоких частотах. Коэффициент полезного действия пьезоэлектрических преобразователей выше, чем магнитострикционных, а стоимость ниже. Поэтому они получили большое распростране-

ние.

Колебательная система вибраторов-излучателей ультразвуковой энергии набирается из множества одинаковых пьезоэлектрических призм, закрепленных одним концом к стальной мембране. На поверхности призм нанесены (распылением) серебряные электроды, которые подсоединяются к источнику переменного тока. Благодаря обратному пьезоэффекту переменный ток вызывает продольные колебания призм. Они передаются мембране и через изолятор, соприкасающийся с ней, воде. Момент прихода отраженной звуковой волны фиксируется как возникновение электрического сигнала, поступившего с вибратора – прямой пьезоэффект.

В зависимости от цели применяют самые различные конструкции преобразователей. Геометрические размеры пьезоэлемента определяются частотой колебаний, применяемых в исследовании. В настоящее время широко используются преобразователи на частоты 25 кГц – 5 МГц.

7.2.3. Направленное действие гидроакустических антенн

Гидроакустические излучатели и приемники обладают свойством направленности действия. Это свойство проявляется в том, что излучатель концентрирует энергию в некотором телесном угле, а выходной сигнал приемника зависит от направления на источник. В результате этого повышается интенсивность излучения, появляется возможность определения направления на объект [2, 3, 45]. Рассмотрим физическую сущность направленного действия вибратораизлучателя.

На излучающей линии плоского излучателя выберем две точки A и B, расположенные симметрично относительно центра O на расстоянии l/2 (рис. 7.9, a). Эти точки колеблются синфазно и синхронно и в соответствии с принципом Гюйгенса являются самостоятельными источниками сферических волн, как и всякие другие точки излучающей поверхности. То есть в нашем случае каждая точка вибратора посылает колебания в окружающее пространство по всем направлениям.



Рис.7.9. Направленность действия гидроакустических антенн: *a*) – интерференция акустических волн излучателя; *б*) – полярная диаграмма направленности излучателя; *в*) – основной максимум диаграммы направленности антенны

Однако, два одинаковых синфазных излучателя A и B с базой между ними l большей, чем длина волны λ , создают вследствие интерференции излучение, в котором амплитуда колебаний (скоростей, давлений, мощности) будет зависеть от направления α к нормали nO. Действительно, путь звукового луча от источника A в удаленную точку M будет длиннее пути луча из центра базы O на величину Ab, а для луча из точки B – короче на величину Oc. То есть, лучи в точку M придут разными путями, которые по сравнению с лучом из центра базы O длиннее или короче на величину $\pm \frac{l}{2}\sin\alpha$.

Следовательно, задержка и опережение по времени этих лучей будет определяться равенством

$$\Delta t = \pm \frac{l}{2c} \sin \alpha,$$

а общие задержка или опережение будут равны $\Delta t = l/c \cdot \sin \alpha$, где c – скорость звука в морской воде.

В этом случае с учетом того, что $c = \lambda/T$ и $\omega = 2\pi/T$, общий сдвиг колебаний по фазе

$$\psi = \omega \Delta t = \frac{2\pi l}{\lambda} \sin \alpha , \qquad (7.2)$$

где *w* – круговая частота колебаний;

Т-период колебаний.

Если исследуемую точку звукового поля M разместить на нормали nO, то звуковые лучи придут в нее с одинаковой фазой, т.е. сдвиг по фазе равен нулю. Результирующая амплитуда звукового давления будет максимальна. Следовательно, в точках, лежащих на оси излучателя ($\alpha = 0$) существует максимум звукового давления. Это направление получило название основного максимума.

По мере дальнейшего отклонения от нормали разность хода лучей увеличивается, а амплитуда звукового давления уменьшается. Как только колебания будут в противофазе ($\psi = \pi$, что соответствует разности хода лучей равной 0,5 λ), результирующая амплитуда обращается в нуль.

Из формулы (7.2) можно найти углы α_{max} и α_{min} , соответствующие максимальной амплитуде звукового давления при условии $\psi = 0$ (четное число $2k\pi$) и минимальной амплитуде звукового давления при условии $\psi = \pi$ – нечетное число ло $(2k + 1)\pi$. Здесь *k* принимает значения 0, 1, 2, … Тогда соответственно получим:

$$\frac{2\pi l}{\lambda} \sin \alpha_{\max} = 2k\pi; \quad \sin \alpha_{\max} = k\frac{\lambda}{l};$$
$$\frac{2\pi l}{\lambda} \sin \alpha_{\min} = (2k+1)\pi; \quad \sin \alpha_{\min} = \left(\frac{2k+1}{2}\right)\frac{\lambda}{l}.$$
(7.3)

Из полученных выражений видно, что кроме основного максимума (k = 0, $\alpha_{\max 0} = 0$) возможно существование еще нескольких боковых максимумов излучения, когда разность хода лучей достигает целого значения λ . Аналогично после первого минимума (k = 0, $\sin \alpha_{\min} = \lambda/2l$) последующие минимумы возможны при разности хода лучей кратной $\lambda/2$ – это направления нулевой интенсивности.

Таким образом, энергия ультразвуковой волны в основном распределяется в пределах угла направленности 2α , соответствующих углам минимальной амплитуды звукового давления $\sin \alpha_{min1}$. Распределение акустической энергии в пределах угла 2α определяет характеристику направленности излучателя, которая графически изображается в виде диаграммы в полярной системе координат (рис. 7.9, δ).

Направленность действия вибратора зависит от соотношения между длиной излучаемой волны λ и линейными размерами вибратора *l*, рабочая поверхность которого представляет собой плоскость. Подбирая эти параметры с использованием формул (7.3), можно сконцентрировать звуковую энергию в пределах желаемого телесного угла. Число боковых максимумов и минимумов также определяется соотношением между длиной волны λ и размерами вибратора *l*.

Направленность действия вибраторов-приемников проявляется в том, что они обладают различной чувствительностью к акустическим колебаниям, приходящих из разных точек, не лежащих на нормали к центру принимающей поверхности вибратора. Характеристика направленности вибратора приемника имеет такой же вид, как и характеристика вибратора-излучателя.

Приведем пример направленного действия условной прямоугольной гидроакустической антенны (рис. 7.9, в).

Исходные данные: $c = 1500 \text{ м} \cdot \text{c}^{-1}$; f = 50000 Гц. Размеры площади излучающей поверхности антенны: $l_1 = 0,05 \text{ м}$; $l_2 = 0,15 \text{ м}$.

Рассчитаем длину волны: $\lambda = c/f = 0.03$ м.

Угол, по котрому наблюдается минимум звуковой энергии в направлении l_1 : sin $\alpha_{\min 1} = \lambda/2l_1 = 0.03/0.1 = 0.3$; $\alpha_{\min 1} = 17.5^\circ$. Тогда $2\alpha_{\min 1} = 2\alpha_1 = 35^\circ$.

В направлении l_2 получим: sin α_{min1} = 0,03/0,3 = 0,1; 2 α_2 = 10,4°.

7.2.4. Излучение и прием звука

Характеристика направленности антенны. Угловое распределение звукового давления в дальнем поле дается пространственной характеристикой направленности антенны. Направление максимального излучения антенны определяет положение в пространстве главного (основного) максимума или лепестка и является *акустической осью* антенны. Ширина (острота) главного максимума *а* измеряется в градусах на уровне 0,707 (-3 дБ) максимального значения по давлению (или на уровне 0,5 максимального значения по мощности). Уровень дополнительных максимумов (лепестков) измеряют в процентах или децибелах по отношению к уровню основного лепестка. Острота направленного



Рис. 7.10. Характеристика направленности антенны

действия антенны определяется углом θ , охватывающим основной максимум диаграммы направленности (рис. 7.10) [5, 41].

Сопротивление излучению. Колебания антенны вызывают со стороны жидкости реакцию, которую можно назвать сопротивлением излучению. Это сопротивление носит различный характер в зависимости от формы излучающей поверхности. В случае плоских акустических волн

$$R = \rho c S$$
,

где *рс* – среднее удельное акустическое сопротивление среды;

S – площадь излучателя.

Формула указывает на то, что один и тот же излучатель в различных средах возбуждает звуковые волны неодинаковой интенсивности. Таким образом, величина R как бы характеризует способность среды воспринимать энергию излучателя. В данном случае R обусловливает переход части механической энергии излучателя в механическую энергию частиц среды, т.е. в звуковую энергию.

Коэффициент угловой концентрации. Важной характеристикой мощности направленного излучателя является коэффициент угловой концентрации ξ . В режиме излучателя эта величина характеризует способность антенны концентрировать излучаемую энергию в нужном направлении. Коэффициент ξ определяется как отношение мощностей, излучаемых ненаправленной N_0 и направленной антеннами N:

 $\xi = N_0 / N.$

В случае принимающих антенн ξ характеризует способность приемника выделять полезный сигнал на фоне помех. Чем значение величины ξ больше, тем лучше.

Если размеры излучающей (принимающей) поверхности антенны велики по сравнению с длиной волны, то коэффициент ξ можно определить с помощью следующей формулы:

 $\xi = 4\pi S f^{2}/c^{2},$

где *S* – площадь излучающей (приемной) поверхности антенны;

f – частота звукового сигнала.

Кавитация. При значительной интенсивности ультразвуковых волн возникает своеобразное явление, называемое кавитацией. Если, например, на частоте 50 кГц амплитуда колебаний излучателя боле $2 \cdot 10^{-5}$ см, то звуковое давление в воде превышает статическое давление. Это означает, что в момент наименьшей фазы давление станет отрицательным. Морская вода не может противостоять даже небольшим растягивающим усилиям, поэтому в областях, где давление стало отрицательным, возникают разрывы и образуются полости (кавитации).

Растворенный в воде воздух немедленно проникает внутрь этих полостей. Одновременно туда попадает и некоторое количество водяного пара. В период наибольшего сжатия, когда давление становится снова положительным, полость начинает «захлопываться». Процесс продолжается до тех пор, пока давление газа в полости не станет равным гидростатическому давлению. В результате образуются газовые пузырьки, на которых может рассеиваться значительное количество звуковой энергии. Захлопывание кавитации сопровождается выделением энергии, вследствие чего давление повышается во много раз. Это обстоятельство ставит под угрозу целостность рабочей поверхности излучателя. В морской воде кавитация может возникнуть при давлении $p > 10^5$ Па, что соответствует интенсивности $I \approx 0.3$ Вт/см². Следовательно, кавитация ограничивает удельную мощность излучения. Однако, используя короткие импульсы продолжительностью, меньшей 0,01 с, можно добиться излучения примерно 10 Вт/см и более. Это объясняется тем, что в такой малый промежуток времени кавитации просто не успевают развиться.

Прием звуковых колебаний. Гидроакустические антенны обладают свойством обратимости. Пришедший эхо-сигнал оказывает звуковое давление на принимающую поверхность антенны, которое преобразуется в суммарное электрическое напряжение. Отношение напряжений на сумматоре антенны при падении на нее плоской волны, источник которой находится в произвольном направлении по отношению к волне фиксированного направления (обычно на акустической оси) на одном и том же расстоянии, определяет характеристику направленности антенны.

В ультразвуковом диапазоне, когда размеры рабочей поверхности приемника превышают длину волны, приемник обладает направленностью действия. Фактор направленности можно определить на основании тех же рассуждений, что и в случае направленного излучателя.

Чувствительность приемника. Это важная характеристика любого приемника. Чувствительностью называют отношение электрической мощности сигнала на выходе преобразователя $N_{\rm BEK}$ к интенсивности звуковой волны $I_{\rm BX}$, возбуждающей этот сигнал:

$$\mu = N_{\text{Bbin}}/(SI_{\text{Bx}}).$$

Зная чувствительность приемника, можно рассчитать то минимальное значение интенсивности I_{\min} , при котором приемник еще работает. Чувствительность является функцией θ и f, так как $I = f(\theta \, u \, f)$. Часто пользуются понятием *относительной чувствительности*, которую определяют как отношение чувствительности μ_{θ} на направлении θ к чувствительности μ_{0} на оси главного максимума ($\theta = 0$), т.е.

 $\mu_{\text{отн}} = \mu_{\theta} / \mu_{\text{O}}.$

На оси главного максимума $\mu_{\text{отн}} = 1 = \text{max}.$

Современная техника позволяет создавать приемники большой чувствительности. Однако реализовать эти возможности чаще всего не удается из-за высокого уровня шумов. Существуют три основных источника шума: море, судно, и сам прибор. В море шумы порождаются волнами, турбулентным слоем воды, обтекающим судно, живыми организмами и т.д. Судно создаст широкий спектр помех вследствие вибрации корпуса, работающей энергетической установки и винта и т.д. Поле шумов имеет настолько высокую интенсивность, что выделить полезный сигнал очень трудно. Поэтому создание приемников очень высокой чувствительности для судовых гидроакустических приборов нецелесообразно.

Полоса пропускания приемника. Для того чтобы надежно выделить полезный сигнал на фоне шумов, гидроакустические приемники имеют обычно узкую полосу Δf пропускания частот. Значение Δf выбирают исходя из следующего. Во-первых, Δf должна охватывать ту часть Δf_1 спектра сигнала, в которой сосредоточена наибольшая доля его энергии. Значение Δf_1 в основном зависит от формы сигнала (импульса) и может быть найдено аналитически. Вовторых, при выборт Δf необходимо учитывать доплеровский сдвиг Δf_2 частоты, обусловленный движением судна. Анализ показывает, что при расчете Δf приемника эхолота Δf_2 можно не учитывать.

Уровень шума, воспринимаемый приемником. Исследования показывают, что, чем больше коэффициент концентрации ξ , чем выше частота f_0 излучаемого сигнала, тем меньше интенсивность шума, принимаемого направленной антенной. Уровень шума зависит также от ширины Δf полосы пропускания приемного тракта. С уменьшением Δf уменьшается интенсивность $I_{\theta \, m}$ шума:

 $I_{\theta \text{ III}} = \Delta f / (\xi f_0^2).$

7.2.5. Фазированные антенные решетки

Совершенствование элементной базы в построении гидроакустических антенн привело к созданию фазированных антенных решеток (ФАР) – антенн, состоящих из группы излучателей, фазой сигнала в которых можно управлять независимо, формируя эффективное излучение антенны в целом на одном, желаемом направлении, отличном от направления эффективного излучения отдельного элемента.

Всестороннее рассмотрение всех аспектов построения ФАР и анализа их работы дано в одном из основных научных трудов Р.С. Хансена [46].

Основу системы "фазированная антенная решетка" – ФАР – составляет специальный ультразвуковой преобразователь с некоторым количеством отдельных пьезоэлементов (обычно от 16 до 256). Система ФАР посылает и получает импульсы от многочисленных элементов решетки. Элементы возбуждаются в определенном порядке таким образом, что компоненты луча формируют единый фронт волны, распространяющейся в заданном направлении. Аналогичным образом приемник объединяет полученные от элементов сигналы в единое представление. Поскольку технология фазированных решеток позволяет электронное формирование луча и управление им, достаточно всего одного преобразователя для создания большого количества различных профилей луча.

В начальный период своего развития пьезоэлектрические преобразователи (ПЭП) изготавливались из монолитных кварцевых или пьезоэлектрических керамических дисков. Позднее, альтернативу им составили преобразователи из композитных материалов. Несмотря на то, что затраты на их производство несколько выше, преимущество их использования в том, что они значительно увеличивают чувствительность (на 10 – 30 дБ) по сравнению с обычными пьезоэлементами. Эти преобразователи характеризуются широкой полосой пропускания и быстрым возвратом импульса.

Композитные преобразователи изготавливаются путем нарезки стандартной пьезоэлектрической пластины в виде сетки. Пространство между оставшимися кристаллами заполняется эпоксидным составом, а основа стачивается, чтобы открыть доступ к матрице пьезоэлементов с обеих сторон. Затем обе стороны покрываются электропроводящим покрытием. Заготовка нарезается на квадраты соответствующего размера, треугольники или круги, в зависимости от собираемого преобразователя.

Сегментное металлическое покрытие обеспечивает электрическое разделение элементов с целью их возбуждения независимо друг от друга. Этот сегментированный элемент встраивается в преобразователь с защитным слоем. В конструкцию преобразователя также входит демпфирующий материал, соединители, кабели и корпус.

Создаваемую преобразователем волну можно математически смоделировать как сумму волн от множества точечных источников. Этот метод, известный как принцип Гюйгенса – Френеля, (упоминался выше) основывается на том, что каждая точка фронта волны является источником новых сферических волн, а результирующее волновое поле является суммой этих отдельных сферических волн.

В подтверждение этому на рис. 7.11 показан принцип формирования ультразвукового луча с заданными характеристиками: слева – амплитуда звукового давления будет максимальна в точке M – точке фокусировки; справа – диаграмма направленности звуковой энергии будет ориентирована под определенным углом к нормали излучателя [47, 48].



Рис. 7.11. Формирование фронта волны излучателя

Таким образом, фазированная антенная решетка – антенна, состоящая из группы излучателей, формирующая эффективное излучение с заданными параметрами. То есть появилась возможность эффективно управлять лучом антенны электронным способом.

Следует разделять два основных вида систем на фазированных антенных решетках — пассивные антенные решетки и активные. Основное различие таково: в пассивных антенных решетках имеется один мощный приемопередатчик, чей сигнал делится на все каналы, условно содержащий только элемент поворота фазы.

В активных фазированных решетках (АФАР) канал каждого элемента решетки имеет свой собственный приемопередатчик. Они имеют огромный запас по надежности – выход из строя одного приемопередатчика не приводит к поломке всей системы, но при этом значительно возрастают сложность управления и стоимость устройства в целом. Однако развитие современной базы электронных компонентов, миниатюризация и вывод их в массовое производство позволяют вытеснять пассивные решетки с уже давно занятых позиций и широко использовать АФАР на морском и рыбопромысловом флоте, в гидрографии и при исследовании Мирового океана.

Основными элементами ФАР являются *приемопередающий модуль*, аттенюатор и фазовращатель.

Аттенюатор — элемент, общий для трактов приемника и передатчика. Предназначен для задания дополнительной вариативности сигналов не только по фазе, но и по амплитуде — позволяет уменьшить влияние боковых лепест-ков диаграммы, устранить неидентичность коэффициента передачи отдельных приемопередатчиков. Как правило, используется цифровой аттенюатор.

Фазовращатель – основной элемент приемопередатчика ФАР. От него по большей части и будет зависеть качество работы всей системы. Применяются, как правило, цифровые фазовращатели как более стабильные и помехозащищенные. Дискрета фазы в 5° обычно достаточна для решения существующих задач, диапазон перестройки фазы может доходить до 360°.

Рассмотренные выше преобразователи обладают следующими основными рабочими характеристиками:

- *тип* – идентификация преобразователя исходя из поставленной задачи исследования;

- *диаметр* – диаметр активного элемента преобразователя. Сам элемент находится внутри корпуса гидроакустической антенны соответствующего размера.

- частота – количество колебаний волны в секунду, выражается в килогерцах (кГц) или мегагерцах (МГц). В гидроакустических приборах этот диапазон частот лежит в пределах 25 кГц – 5 МГц. Проникающая способность улучшается с понижением частоты. С повышением частоты улучшаются разрешение и фокальная резкость.

- *полоса пропускания* – диапазон частот в указанных пределах амплитуды. В этой связи следует уточнить, что стандартные преобразователи ультразвуковых колебаний генерируют звуковые волны не на одной конкретной частоте, а в пределах конкретного диапазона, отцентрированного по заданной номинальной частоте. Принято устанавливать полосу пропускания на уровне -6 дБ (или половине значения амплитуды).

- длительность импульса – количество колебаний волны, генерируемых преобразователем с каждым импульсом. Преобразователь с узкой полосой пропускания генерирует большее количество колебаний волны, чем преобразователь с широкой полосой. На длительность импульса влияет диаметр активного элемента, демпфирующий материал, электрическая настройка и способ возбуждения преобразователя.

- чувствительность – отношение между амплитудами возбуждающего импульса и эхо-сигнала от отражателя. Чувствительность преобразователя повышается за счет того, что отдельные пьезоэлектрические блоки способны более активно расширяться и сжиматься по сравнению с конкретной точкой в монолитном диске или пластине. К тому же, присутствие эпоксидного состава понижает акустический импеданс преобразователя, способствуя более эффективной передаче звука.

Фазированные преобразователи имеют следующие основные конструктивные параметры.

Количество элементов. Как правило, ФАР-преобразователи имеют от 16 до 256 элементов, но может быть и больше – это зависит от практических целей исследований. Чем больше элементов в решетке, тем лучше характеристики фокусировки и управления лучом и тем больше охват сканирования, увеличения чувствительности системы. В то же время использование больших решеток подразумевает высокую стоимость и сложность системы.

Каждый элемент возбуждается отдельно, но их импульсы формируют один фронт волны. Таким образом, размеры данных элементов рассматриваются как активное или управляемое направление.

Размер элементов. Чем меньше размер элемента, тем лучше способность управления лучом. Однако, в случае охвата большей площади потребуется большее количество элементов, что скажется на цене преобразователя. Минимальный размер элемента серийных промышленных преобразователей составляет примерно 0,2 мм. Если размер элемента меньше длины волны, могут возникнуть сильные нежелательные боковые лепестки.

Шаг и апертура. Шаг представляет собой расстояние между отдельными элементами, апертура – эффективный размер импульсного элемента, состоящего из группы отдельных, одновременно возбуждаемых элементов (виртуальная апертура). Для оптимизации диапазона отклонения шаг стремятся уменьшать насколько это возможно. С другой стороны для оптимизации чувствительности, минимального нежелательного рассеяния пучка и точной фокусировки шаг стремятся увеличивать. Так как практический предел при производстве ФАРпреобразователей ограничивает минимальную ширину элемента до 0,2 мм, активная апертура для 16-элементного преобразователя с элементами 0,2 мм должна быть 3,2 мм. Для создания апертуры 6,4 мм требуется 32 элемента. Преобразователи с указанными апертурами позволят управлять отклонением луча в более широких пределах, тогда как апертуры с меньшим числом элементов будут ограничивать зону покрытия, чувствительность и способность фокусировки. Современное оборудование на фазированных решетках обычно поддерживает законы фокусировки с апертурами до 16-элементов. Более совершенные системы поддерживают апертуры с 32 или даже 64 элементами.

Ключевой принцип луча ФАР можно резюмировать следующим образом: группа элементов возбуждается с помощью программируемого закона фокусировки. Это позволяет получить нужную апертуру ПЭП и желаемые характеристики луча.

Ниже, в качестве примера, приведен вид (рис. 7.12) гидроакустического преобразователя – фазированной антенной решетки, разработанной в ОАО «Элпа» [49].



Рис. 7.12. Гидроакустическая антенна ОАО «Элпа»

Гидроакустический преобразователь предназначен для электроакустического преобразования принимаемых и излучаемых сигналов и формирования заданных пространственных приемоизлучающих характеристик направленности ультразвуковых лучей для обнаружения и локализации подводных объектов, измерения расстояния и скорости. Режим работы преобразователя импульсный. Может использоваться как активный элемент эхолота и доплеровского лага.

Ширина характеристики направленности отдельного луча в режиме излучения по уровню 0,7 составляет всего $3^{\circ} \pm 0,3$, причем с возможностью сканирования в пределах $\pm 30^{\circ}$.

С другой стороны, общее количество активных элементов антенны равно 960 (это видно на рис. 7.12), а количество элементов в каждом канале равно 240. То есть, имеется возможность организовать независимое управление работой *четырех* каналов в пределах одной антенны. Каждый канал состоит из ряда апертур, фазировано управляемых по заданной программе с целью создания результирующего луча в данном случае с шириной характеристики направленности $\Delta \theta = 3^{\circ}$. Таким образом, открываются возможности самого широкого плана по созданию гидроакустических антенн способных по заданной программе непрерывно формировать и анализировать акустическое пространство в заданных пределах и пропорциях углового сканирования.

7.3. Эхолоты

7.3.1. Принцип действия эхолота

Гидроакустические приборы, предназначенные для определения вертикального расстояния до какого-либо подводного объекта, называют эхолотами (ЭЛ). Принцип действия ЭЛ основан на измерении времени задержки между моментами излучения в сторону дна зондирующего импульса акустической энергии и приходом в приемный тракт эхосигнала [5, 7, 50].

По своему назначению ЭЛ делятся на следующие основные разновидности:

• Навигационные ЭЛ, предназначенные для обеспечения безопасности судовождения;

• Промерные, используемые для проведения гидрографических работ с высокой точностью;

- Для картографирования морского дна (например, многолучевые);
- Рыбопоисковые;
- Специальные (на тралах, подводных аппаратах и др.).

На рисунке 7.13, *а* показана структурная схема эхолота, принцип действия которого состоит в использовании эхо-метода с применением двух гидроакустических антенн – вибратора-излучателя и вибратора-приемника, как это реализовано, например, в эхолоте НЭЛ-5 (разработка 1955 г.), бывшем в эксплуатации на судах вплоть до 80-х годов прошлого века.

В составе эхолота имеется самописец $C\Pi$ для автоматической записи измеряемых глубин на электротермической бумаге (получения эхограммы) и указатель глубин $U\Gamma$ для визуального отсчета глубин. В определенный момент времени с $U\Gamma$ или с $C\Pi$ поступают команды на схему посылки импульсов $C\Pi U$, которая формирует мощный электрический разряд, протекающий через обмотку вибратора-излучателя BU (в данном случае *магнитострикционного* типа). При этом образуется колебательный контур, в котором возникают мощные высокочастотные электромагнитные затухающие колебания, преобразуемые вибратором в механические колебания его рабочей поверхности. В воду посылается ультразвуковой импульс большой интенсивности.

Зондирующий импульс в пределах основного максимума диаграммы направленности доходит до дна, отражается и принимается вибраторомприемником $B\Pi$. Здесь происходит преобразование звукового давления, оказанного на рабочую поверхность $B\Pi$, в электрический сигнал. Усиленный в усилителе У сигнал поступает на индикатор $И\Gamma$ или на самописец $C\Pi$ для отоб-
ражения измеренной глубины.

Таким образом, основная задача определения глубины с помощью эхолота практически сводится к измерению весьма малого промежутка времени между моментами излучения и приема сигнала, отраженного от грунта.



Рис. 7.13. Принцип действия навигационных эхолотов: *a*) - с двумя гидроакустическими антеннами; *б*) - с одной гидроакустической антенной

Зная общее время *t* прохождения сигнала в прямом и обратном направлениях и скорость звука *c* в воде, легко определить глубину *h* под килем судна.

Расстояние *АВ* между излучателем и приемником, называемое базой антенны, обозначим *L*. Тогда искомая глубина *h* находится из выражения:

$$h^{2} = (OK)^{2} = (OA)^{2} - (L/2)^{2}; \qquad h = \sqrt{\left(\frac{ct}{2}\right)^{2} - \left(\frac{L}{2}\right)^{2}}.$$
 (7.4)

За расчетную скорость звука в воде принимают $c_0 = 1500 \text{ м} \cdot \text{c}^{-1}$. База антенны *L* обычно в пределах 2 м. Поэтому на больших глубинах, практически при h > 10 м, вместо выражения (7.4) можно применить

$$h = (c_0 t)/2.$$
 (7.5)

На малых глубинах (h < 10 м) в измерения следует вносить поправку за базу. Также следует иметь в виду, что показываемая эхолотом глубина h измеряется от уровня установки антенны. Если требуется знать глубину от поверхности моря, то необходимо учесть осадку судна в месте установки антенны.

Дальнейшее развитие приборостроения выразилось в создании и принятии в эксплуатацию более совершенных эхолотов серии НЭЛ-М (1979 г.), имеющих одну приемно-передающую антенну – *пьезоэлектрический* преобразователь (рис.7.13, *б*).

Обычно такие эхолоты (например, НЭЛ М-3Б) [7] имеют в своем составе самописец $C\Pi$, цифровой указатель глубин $\mu V\Gamma$ с электронным индикатором глубины и прибор сигнализации заданной глубины $\Pi C\Gamma$. В зависимости от режима работы, в одном из указанных приборов с определенной периодичностью, формируется запускающий импульс. Этот импульс является стартовым для дальнейшего формирования в приемно-передающем устройстве $\Pi\Pi V$ короткой серии (пачки) импульсов от задающего высокочастотного генератора. Усиленные в усилителе V импульсы поступают на приемо-передающую антенну $\Pi\Pi A$ – происходит посылка зондирующего импульса.

Отраженный от грунта эхо-сигнал преобразуется в ППА в электрический сигнал. После усиления и фильтрации от помех в У и ППУ сигнал поступает для индикации глубины на соответствующие приборы.

В рассмотренном эхолоте для определения глубины реализована формула (7.5). Погрешность, обусловленная базой антенн, отсутствует.

Функциональная схема *современных* эхолотов осталась прежней – определение глубины под килем судна с максимальной точностью с учетом реальной обстановки: текущих условий плавания и донной поверхности моря.

Гидроакустическая антенна представляет собой *пьезоэлектрическую систему* с фиксированной или управляемой настройкой, иногда совмещенную с гидроакустической антенной измерителей скорости судна.

Отраженный эхо-сигнал также анализируется в приемно-передающем устройстве и поступает в виде не только цифрового отсчета текущей глубины, но и представлен на цветных индикаторах отображения рельефа дна в данный момент и за некоторый предшествующий интервал времени.

Хранение информации о прохождении судном глубин на бумажных носителях сегодня практически не используется – вся текущая информация непосредственно в цифровом виде заносится в оперативную память эхолота и архивируется с целью ее дальнейшего извлечения и анализа.

7.3.2. Основные параметры эхолотов

Согласно Международным правилам оснащения судов эхолотами и эксплуатационным требованиям к этим приборам, согласно правилу 19, эхолоты должны устанавливаться на всех пассажирских судах и на грузовых судах валовой вместимостью 300 рег. т. и более.

Эхолоты, установленные 01 января 2000 г. и после этой даты, должны отвечать требованиям, которые изложены в приложении 4 к резолюции MSC.74 (69), принятой 12 мая 1998 г.

Эхолоты, установленные ранее этой даты, должны отвечать, по меньшей мере, требованиям резолюции ИМО А.224 (VII), принятой в 1971 г.

Эксплуатационные требования к эхолотам.

В соответствии с резолюцией MSC.74 (69), эхолот должен обеспечивать измерение глубин под излучателем от 2 до 200 м при скорости судна до 30 уз. В эхолоте обязательно наличие двух диапазонов измерения: от 0 до 20 м и от 0 до 200 м.

Точность измерения глубин при бортовой качке ±10° и килевой качке судна:

- ±0,5 м на 20-метровой шкале, или

- ±5,0 м на 200-метровой шкале, или

- ±2,5% от измеряемой глубины (что больше).

Основной метод представления измеряемых глубин – графический. Запись глубин должна быть видна в течение 15 минут. Графическое отображение информации об измеряемой глубине должно сопровождаться отметками времени (с интервалом не более 5 минут). Должна быть предусмотрена возможность хранения записи об измеренной глубине и соответствующем времени в течение 12 часов.

Необходимо, чтобы эхолот был оснащен индикаторами аварийнопредупредительной сигнализации, которые начинают функционировать в следующих случаях:

- когда глубина под килем судна менее установленной;

- отказ электропитания эхолота или такое падение напряжения питания, которое может повлиять на работу прибора.

Эхолот должен иметь выводы (типа цифрового последовательного порта), которые передают информацию о глубинах:

- в прибор регистрации данных о рейсе;

- в систему управления движением судна по заданному пути;

- на отдельные цифровые дисплеи.

Максимальная дальность действия.

Основным эксплуатационным параметром эхолота является его максимальная дальность действия, под которой понимается то максимальное расстояние по глубине или по горизонту, при котором интенсивность I_{min} и давление р_{min} акустической волны в точке приема являются наименьшими, при которых возможно выделение сигнала на фоне акустических помех. Различают энергетическую дальность действия при вертикальном зондировании толщи воды и геометрическую – при горизонтальном.

Энергетическая дальность определяется гидрологическими свойствами среды, техническими параметрами эхолота и характеристикой отражающего

объекта. Звуковые лучи, падая на неровную поверхность морского дна под углом θ , отражаются от него в соответствии с законом отражения. При этом большое значение имеют размеры σ неровностей по сравнению с длиной λ звуковой волны.

Если σ << λ, то звуковые лучи отражаются от морского дна без изменения фазы, как и в случае зеркального отражения.

Если $\sigma \leq \lambda$, то падающая звуковая волна равномерно рассеивается во все стороны, т. е. наблюдается диффузное отражение.

При σ > λ, ввиду произвольной ориентации отдельных отражателей, выполняющих роль вторичных излучателей, отраженные звуковые лучи имеют многолепестковый характер с соответствующими максимумами звуковой энергии.

В результате, диаграмма направленности звуковой энергии, отраженной от участка морского дна, имеет сложную многолепестковую форму, т. е. в реальных условиях всегда имеется обратное отражение от морского дна.

Таким образом, звуковое поле отраженной волны определяется тремя основными факторами: коэффициентом отражения, (соотношением акустических сопротивлений воды и грунта), структурой грунта и рельефом дна.

Так, например, отражательная способность каменистого дна составляет 60 – 70 %, а илистого всего 5 – 10 %. Это говорит о том что, при одной и той же глубине и интенсивности зондирующего сигнала отраженный сигнал может быть зафиксирован, а в другом случае будет поглощен и окажется ниже порога чувствительности приемника.

Геометрическая дальность действия эхолота (гидролокатора) при горизонтальном или наклонном распространении акустической волны определяется затуханием звуковой волны из-за расширения площади звуковой поверхности с ростом расстояния, факторов поглощения звуковой энергии, рассмотренных в п. 1.2, и рефракции (положительной или отрицательной) звуковых волн. Рефракция приводит к искривлению звукового луча (рис. 7.4). Последнее обстоятельство является основным в ограничении возможностей гидроакустической аппаратуры независимо от ее энергетической дальности.

Параметры зондирующего импульса.

В пьезоэлектрических преобразователях для их возбуждения применяют электрические импульсы в виде 30 – 40 колебаний рабочей частоты, огибающая которых имеет прямоугольную форму определенной длительности и с определенной частотой следования.

Форма импульса в значительной мере влияет на ширину полосы Δf пропускания приемного тракта. Длительность импульса τ выбирается с учетом условий: чем длительнее импульс, тем меньший уровень шума воспринимает приемник; с увеличением τ возрастает дальность распространения звукового сигнала; уменьшение τ приводит к увеличению разрешающей способности по глубине.

Эти противоречивые условия (и еще ряд других) определили, что значение т у современных эхолотов колеблется в пределах от 0,5 до 100 мс.

Частота следования импульсов.

Частота посылок f_{π} зависит от запроектированной максимальной глубины h_{max} , диапазона значений расчетной скорости c_0 звука и определяет скорость получения информации об отражающих объектах, т.е. количество эхо-сигналов в единицу времени. Иными словами, каждый посланный сигнал должен однозначно идентифицироваться в виде отраженного и не накладываться на другие.

Частота следования зондирующих импульсов (в имп./мин) определится:

 $f_{\rm II} = 60 \ c_{\rm o}/2 \ h_{\rm max}.$

Рабочая частота.

Это одна из основных технических характеристик эхолота.

В общем случае оптимальная частота (в кГц) навигационного эхолота, при которой может быть достигнута требуемая дальность действия при наименьшей излучаемой мощности с учетом пространственного затухания, если взять во внимание формулу (7.1), может быть рассчитана по формуле [5]

$$f_{\rm OITT} = 39 / h_{\rm max}^{2/3}$$
.

Для надежного измерения минимальных и максимальных глубин используют две рабочие частоты: высокую – для измерения малых глубин и низкую – для измерения больших глубин. В технических характеристиках современных навигационных эхолотов часто указываются две частоты, например, 200 кГц и 50кГц.

Ширина характеристики направленности антенны.

Этот параметр навигационного эхолота рассчитывают так, чтобы в условиях качки заданной интенсивности обеспечивался надежный прием эхосигналов. Она измеряется в градусах на уровне 0,7 максимального значения по давлению (рис. 7.10) и составляет обычно 25 – 35° для измерений малых глубинно и 7 – 15° для измерений больших глубин. Узкие характеристики направленности антенн обеспечивают концентрацию энергии в пределах небольшого телесного угла, что позволяет увеличить дальность действия при меньшей излучаемой мощности, увеличивают разрешающую способность по направлению, уменьшают влияние реверберации.

Разрешающая способность по глубине (дальности).

Минимальное расстояние между объектами, находящимися один за другим на линии звукового луча, которое еще способен различить эхолот и зафиксировать его на регистрирующем устройстве, называется разрешающей способностью по глубине. При расстояниях близких к излучателю разрешающая способность δ_h существенно зависит от реверберации. Вне области действия реверберации δ_h будет зависеть от длительности зондирующего импульса τ и в реальных условиях составит примерно $(0,7 - 1,2)c \cdot \tau$.

Разрешающая способность по направлению.

Она определяется тем минимальным углом между объектами, находящимися на одинаковом расстоянии от антенны эхолота, при котором эти объекты могут быть зафиксированы на регистрирующем устройстве раздельно. Зависит от ширины характеристики направленности антенны и разрешающей способности экрана индикатора.

Точность эхолота.

Точность измерения навигационным эхолотом запроектированной глубины определяется погрешностями: инструментальной, обусловленной отклонением действительной скорости звука от расчетной, обусловленной наклоном дна, вызванной качкой, гидроакустическими помехами и др.

При расчете эхолота скорость распространения звука в воде принимается постоянной $c_0 = 1500$ м/с. Однако в реальных условиях скорость звука неодинакова в различных районах Мирового океана и составляет с в пределах 1440 – 1580 м/с. Отсюда поправка Δh к измеренной глубине $h_{изм}$ определится формулой

$$\Delta h = h_{\text{M3M}}(c/c_o - 1).$$

Максимальное отклонение скорости звука от расчетной практически не превышает 5%, поэтому погрешность измерений в предельном случае также не превысит 5% и в навигационных эхолотах может не учитываться.

При наклоне морского дна эхолот зарегистрирует не глубину строго под килем, а ту меньшую, которая определится из геометрических соотношений угла наклона морского дна є и угла ширины диаграммы направленности излучения θ .

Практика показывает, что данная погрешность начинает влиять на точность измерений при $\varepsilon > 15^{\circ}$. Даже при больших углах ε эхолот измеряет минимальное расстояние до грунта, поэтому в навигационных эхолотах эту поправку во внимание можно не принимать.

7.3.3. Технические характеристики некоторых зарубежных эхолотов

Эхолот FURUNO FE-700 [51]. Приведем общие технические характеристики эхолота Furuno FE-700 одного из наиболее распространенных эхолотов на судах торгового флота.

Основные блоки эхолота: дисплей, распределительная коробка, коммутатор и антенный преобразователь. Цветной дисплей 6.5" LCD имеет высокую разрешающую способность и яркость индикации значений глубины в различных режимах представления информации, которые обеспечивают требуемые данные для безопасности мореплавания.

На рис. 7.14. показан вид экрана и панели управления эхолота, а на рис. 7.15 – их функциональное назначение.

При включении эхолота устанавливается режим NAV, который является основным в соответствии с требованиями IMO: измеряемая глубина в метрах от антенны, эхограмма морского дна (желтая), маркер тревожной сигнализации на 20 м от антенны и диапазон глубин (автоматически) в зависимости от глубины моря.



Рис. 7.14. Внешний вид дисплея эхолота Furuno FE-700

Диапазон глубины устанавливается автоматически, но имеется ручное управление для выбора требуемой шкалы. Дисплей отображает запись глубин на всех диапазонах за последние 15 минут и дополнительно индицирует мгновенное значение глубины большими цифрами. Глубины, соответствующие моментам судового времени и координатам судна за последние 24 часа, сохраняются в блоке памяти и воспроизводятся в любое время.

Предусмотрена визуальная и звуковая аварийная сигнализация в случае уменьшения глубины по отношению к безопасной, установленной оператором. Когда отметка грунта пропадает из-за пониженного усиления или меньшего диапазона, также срабатывает тревожная сигнализация.

Антенна излучает акустические сигналы на частоте 200 кГц или 50 кГц. Режим излучения 200 кГц используется при штормовой погоде и при плавании на мелководных фарватерах с интенсивным движением, когда поверхностный слой насыщен пузырьками воздуха (аэрация) от кильватерных следов других судов. Эта частота рекомендуется при плавании на мелководье континентального шельфа. Частота 50 кГц рекомендована для больших глубин, где аэрация не проявляется в заметной степени.

Экран дисплея разделен по вертикали, где показаны эхограммы на двух частотах с различной палитрой цветов; в коричневый цвет окрашены эхосигналы, отраженные от грунта и наиболее плотных косяков рыбы (частота 50 кГц). Эхограмма на частоте 200 кГц свободна от эхо-сигналов поверхностного слоя моря или заднего хода.

Данные глубин выводятся в формате IEC 61162 на радар, ECDIS, VDR и другое навигационное и радиокоммуникационное оборудование.



Рис.7.15. Экран: 2 – вид экрана; 3 – текущая глубина; 4 – режим дисплея; 5 – установка усиления; 6 – установка диапазона; 7 – автоматический режим; 8 – установка сигнализации; 9 – шкала диапазона. Панель управления: 1 – вид панели управления; 10 – регулировка осадки; 11 – установка тревог или отключение звуковых сигнализаций; 12 – регулировка подсветки панели; 13 – регулировка яркости и тона дисплея; 14 – усиление, диапазон и подавление помех регулируются автоматически; 15 – выбор цвета представления; 16 – выбор пункта в меню; 17 – увеличение или уменьшение установок в меню; 18 – выбор диапазона дисплея; 19 – регулировка усиления; 20 – выбор режима дисплея; 21 – включение/выключение питания.

Режим OS DATA Mode. В этом режиме на дисплее представлены в цифровой форме: координаты судна по GPS, курс и скорость, время и глубина места. Оператор может вызвать наиболее интересующие его параметры в увеличенном формате. Экран непрерывно показывает данные рельефа дна и глубины на заднем плане изображения. Часть этой информации просматривается с правой стороны окна основных данных режима.

Все подводные объекты, включая дно, косяки рыбы, слои температурного скачка имеют цвет в зависимости от интенсивности отраженного эхо-сигнала (силы цели). Самый сильный сигнал окрашен в коричневый цвет, затем – красный, оранжевый, желтый, зеленый, голубой, синий – всего с оттенками 8 цветов.

Режим HISTORI Mode. В данном режиме обеспечивается одновременный показ рельефа дна и цветная градация слоёв в зависимости от интенсивности эхо-сигнала. Контурное изображение рельефа дна может быть просмотрено за

предыдущие 24 часа. Разноцветное изображение слоёв показано за последние 5 минут.

Режим LOGBOOR Mode. Этот режим представляет журнал записи глубин в соответствии с координатами судна и временем. С помощью опций меню выбирается время записи данных о глубинах через 5 сек., 1 или 2 мин. Журнал регистрации содержит 60 страниц, которые могут быть пролистаны вверх или вниз клавишами [+] или [-]. Данные в журнал поступают каждые 5 сек. в течение 24 часов.

Режим DBS Mode. Режим Глубина от уровня моря дает возможность контроля глубины на морской навигационной карте. Осадка судна устанавливается опцией [DRAFT] в Меню выбора. Если возникают затруднения с установкой значения осадки, то надо использовать режим NAV, где находится значение глубины под килем судна.

Ниже в таблице 1 приведены технические характеристики эхолота Furuno FE-700.

Дисплей	графический, жидкокристаллический LCD 6.5', 8-ми цветный или 8 оттенков одноцветный, разрешение экрана 320 x 234 pixels. Окно показа 15 минут на всех диапазонах глубин. Глубина, координаты места и время заносятся в блок памяти каждые 5 сек. в течение 24 часов и могут быть воспроизведены с интервалом 5 сек., 1 или 2 мин.	
Режимы информации на дисплее	NAV, History, DBS, Logbook, OS Data и др.	
Частота	50 или 200 кГц	
Выходная мощность	600 W	
Диапазоны шкал	5, 10, 20, 40, 100, 200, 400, 800 м (или футы, сажени)	
Точность	±2% от Н диапазона	
Минимальный Диапазон	1.2 м (200 кГц), 2.0 м (50 кГц)	
Различение	5.8 мм на метр глубины (диапазон 20 м), 0.58 мм на диа- пазоне 200 м	
Длительность импульса (в мс)	от 0.25 до 3.60 в зависимости от диапазона	
Частота следования им- пульсов (число/мин.)	от 750 до 42 в зависимости от диапазона	
Временной масштаб дисплея (в мин.)	от 1.8 до 30 в зависимости от диапазона	
Интерфейс (IEC 6162-1)	Вход: RMA, RMC, GLL, VTG, ZDA, GGA Выход: SDDPT, SDDBT	
Сигнал тревоги (визу- альный и звуковой)	опасная глубина, потеря дна, потеря напряжения	
Антенный преобразова- тель	Тип 50B-6B ДН 28°, Тип 200B-8B ДН 5.4°	
Напряжение питания	24 VDC, 20W; 115/230 VAC, 20 VA	
Параметры среды	Температура: -15° - +55°(метод теста IEC 60945)	
Влагозащищённость	Дисплей: IPX5(IEC 60529) и CFR46(USCG)	

Табл. 1. Технические характеристики эхолота Furuno FE-700.

Эхолот SAMYUNG SES-5000 [52] (рис. 7.16). Судовой навигационный эхолот SES – 5000 предназначен для измерения, отображения и регистрации информации о глубине под килем судна. Он состоит из основного блока управления и индикации с 10.4" LCD дисплеем и встроенным приемопередатчиком на частоты 50 кГц и 200 кГц.



Рис. 7.16. Внешний вид дисплея эхолота SES-5000

Дисплей с разрешением 600 х 800 пикселей имеет: диапазон цветности до 64 цветов; скорость смены изображений 4, 2, 1, ¹/₂, ¹/₄, ¹/₈, стоп; выбор фона из 5 цветов.

Эхолот Samyung SES-5000 имеет достаточно простое пользовательское меню, с помощью которого можно просмотреть данные об измерении, отображении и регистрации данных о глубине. Широкий спектр настроек создает максимум удобств пользователю. Меню имеет следующие основные разделы:

1. Эхолот [Sonar], 2. Дисплей [Display], 3. Цвет [Color], 4. Просмотр [View], 5. Сигнализация [Alarm], 6. NMEU [NMEA], 7. Принтер [Printer], 8. Прочие [ETC]. Память эхолота сохраняет данные в течении 24 часов, с интервалами в 30 секунд. Звуковое сопровождение позволяет пользователю быть осведомленным в достижении назначенной глубины или в неисправностях работы эхолота.

Эхолот снабжен термическим принтером с регулируемой скоростью печати. Предусмотрены выбор языка меню и режим имитации (Simulation) – Demo 1; Demo 2.

На экран устройства Samyung SES-5000 может выводиться информация о положении (широта, долгота), направлении, скорости движения судна и температуре забортной воды.

Модель эхолота Samyung SES-5000 поставляется в нескольких модификациях: с вибраторами 50 кГц или 200 кГц разной мощности (1 или 1,5 кВт) или одним вибратором 50/200 кГц мощностью 1,5 кВт. Навигационный эхолот SES- 5000 полностью соответствует требованиям, предъявляемым к оборудованию такого класса и отвечает требованиям стандарта IMO.

Технические характеристики:

· · ·	
Частота	50 – 200 кГц
Мощность передачи	1 кВт
Частота следования импульсов	20 ~ 705
Настройка частоты	5~10% для каждой передающей частоты
Усилитель	имеет расширенный динамический диапазон
Боковая качка	+/- 10°
Килевая качка	+/- 5°
Скорость судна	0 ~ 30 узлов
Питание дисплея	24 B
Рабочая температура	$-15^{\circ}C \sim +55^{\circ}C$
Диапазон	5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 800, 1000 м
Шумоподавление	низкое / среднее / высокое

7.4. Гидролокаторы

7.4.1. Общая характеристика гидролокаторов

В комплексе технических средств, применяемых при исследовании и освоении ресурсов Мирового океана, существенное значение имеют гидроакустические системы различного назначения, в частности, панорамные гидролокаторы. Ныне разрабатываются и промышленно выпускаются десятки разных типов гидролокаторов для профессиональных и технических исследований. Они применяются, например:

- для поиска затонувших кораблей, самолетов, обломков ракет-носителей и других конструкций как на дне, так и в толще воды, что значительно сокращает время, материальные затраты и человеческие ресурсы и становится особенно важным при проведении аварийно-спасательных операций, в случае стихийных бедствий и других чрезвычайных ситуаций;

- для наблюдений за состоянием подводных сооружений, газо- и нефтетрубопроводов, конструкций ГЭС, опор мостов и т.п.;

- для быстрого составления точных батиметрических карт дна и фарватеров, часто меняющихся в результате естественных процессов;

- для исследований шельфа морского и океанического дна перед строительством там портов, перед проведением буровых работ, перед прокладкой кабелей связи, трубопроводов и т.п.

Наиболее эффективными в выполнении перечисленных выше работ являются гидролокаторы бокового обзора (ГБО). Они обладают высокой производительностью и разрешающей способностью, позволяющей получить гидролокационное изображение дна с различной степенью детальности, увидеть и оценить особенности рельефа различной пространственной протяженности.

Совмещение синхронно полученных эхограмм ГБО и гидроакустического профилографа позволяет судить о распределении форм рельефа на обследуе-

мой площади, выявить геологические причины их возникновения. Эти данные используются при поиске нефти и газа, а также твердых полезных ископаемых.

Существующая аналогия между оптическим и гидролокационным изображением позволяет использовать зрительный аппарат оператора для расшифровки изображения с целью распознавания объектов, а также изменения форм рельефа и типа грунта.

В зависимости от назначения и полосы обзора гидролокаторы бокового обзора можно условно подразделить на три класса [53]:

- низкочастотные гидролокаторы большой дальности действия для исследования рельефа дна в океане на глубинах до 6000 м, рабочая частота примерно 6,5 кГц, полоса обзора на каждый борт до 22000 - 25000 м,

- для геологических исследований континентального шельфа (для исследований рельефа дна на глубинах до 500 м), рабочая частота 30-50 кГц, полоса обзора на каждый борт до 2000 - 3000 м,

- для поисковых и спасательных работ и получения детального изображения дна с высокой разрешающей способностью на глубинах до 100 м под акустическими антеннами, рабочая частота 100-200 кГц, полоса обзора 400-800 м на каждый борт,

- гидролокаторы с очень высокой разрешающей способностью, рабочая частота 500-700 кГц, полоса обзора 50-100 м.

По способу обзора акватории гидролокаторы делятся на три группы: шагового, секторно-шагового, одновременного кругового обзора.

Гидролокатор шагового обзора осуществляет обзор акватории дискретным (шаговым) перемещением одной относительно узкой диаграммы направленности (ДН) в горизонтальной плоскости при помощи электромеханического разворота акустической системы (АС) в заданном секторе.

При секторно-шаговом обзоре гидролокатор одновременно обследует акваторию в определенном секторе с помощью быстросканирующей узкой ДН в приеме или излучении, управляемой электронным способом при неподвижной AC, а также дополнительно производит обследование более крупного заданного сектора в пределах углов ±180° путем электромеханического разворота AC.

Одновременный круговой обзор обеспечивает обследование всей акватории в пределах 360°. Сканирование осуществляется цилиндрическими или сферическими АС, как в горизонтальной так и в вертикальной плоскостях, путем электронного управления веером излучающих и принимающих ДН ультразвуковых сигналов.

В состав гидролокатора входят приемоизлучающие антенны, генераторные и приемоусилительные устройства, а также устройства обработки, отображения и документирования информации. Гидроакустические антенны гидролокатора могут устанавливаться на забортных устройствах или непосредственно в борт судна, быть буксируемыми. При этом появляется возможность производить буксировку антенн на определенном отстоянии от дна, при котором достигается оптимальное соотношение разрешающей способности и полосы обзора в зависимости от решаемой задачи.

7.4.2. Принцип действия гидролокатора

Принцип действия гидролокатора поясняется рисунком 7.17 [54].

Акустическая антенна 1, герметически защищенная оболочкой 2, сделанной из прозрачного для звука материала, находится в воде. Через кабель она соединена с коммутатором 3, который поочередно подключает к ней генератор 4или приемник-усилитель акустических сигналов 5. Последний соединен с селектором сигналов 6, выход которого подключен к микропроцессору 7. Выходы микропроцессора подключены к индикатору 8 и к интерфейсному блоку 9.

Работой гидролокатора автоматически управляет микропроцессор 7. Он подает на генератор 4 сигнал о начале зондирования водного пространства и команды о параметрах этого зондирования (частота ультразвука, продолжительность, структура и мощность УЗ импульсов, периодичность их повторения и т.п.). Затем микропроцессор 7 подает сигнал на коммутатор 3, который пропускает электрические колебания от генератора 4 к антенне 1. Там они с помощью пьезоэлектрического осциллятора превращаются в мощные акустические колебания и излучаются антенной в окружающее водное пространство.



Рис. 7.17. Функциональная схема гидролокатора

В одних вариантах работы ультразвуковая волна излучается равномерно во всех направлениях нижележащего водного полупространства. В других вариантах УЗ волна излучается в виде направленного конусообразного пучка волн. Распространяясь в воде, волны облучают имеющиеся в ней объекты, отражаются и рассеиваются ими. Часть отраженных и рассеянных УЗ волн в значительно ослабленном виде возвращаются назад к акустической антенне 1.

Независимо от углового распределения излучения угловая диаграмма направленности этой антенны на прием всегда достаточно узкая, что обеспечивает прием акустических сигналов лишь с того направления, куда "смотрит" антенна. Сразу же после посылки мощного акустического зондирующего сигнала микропроцессор 7 переключает коммутатор 3 на прием. При этом акустические сигналы, которые возвратились к антенне 1 от имеющихся в воде объектов, поступают на приемник 5, усиливаются и передаются в селектор 6. Селектор выделяет из них лишь информационно полезные составляющие, которые и передает на микропроцессор 7. Последний обрабатывает собранную информацию и формирует на индикаторе для пользователя картину, которая воссоздает окружающую обстановку в водной среде.

Через интерфейсный блок 9 микропроцессор 7 может передавать некоторую важную информацию другим приборам и получать дополнительную информацию от них, также отображая ее на индикаторе (например, данные о температуре воды, атмосферном давлении, о направлении и силе ветра и т.п.).

Во многих гидролокаторах, особенно предназначенных для пассажирских, промышленных и военных кораблей, акустическая антенна 1 является подвижной. Чтобы "видеть" большой сектор окружающего водного пространства, она может вращаться вокруг горизонтальной и/или вертикальной оси. Вращение по азимуту обычно возможно на все 360°. Тогда для привода антенны в составе гидролокатора имеется еще и сервоусилитель 10, управляемый тоже от микропроцессора 7.

Антенна 1 закрыта стальным обтекателем 2. Энергия акустических волн источника, прежде чем попасть в водную среду, должна пройти через эту стальную перегородку. С другой стороны, приходящая энергия акустических волн, прежде чем попасть к приемнику, должна также пройти через стальную перегородку обтекателя в обратном направлении. Поэтому еще при установке гидролокатора на судне пространство между антенной 1 и обтекателем 2 заполняют маслом (например, касторовым).

Схематично, один из режимов работы гидролокатора (горизонтальное круговое сканирование) показан на рис.7.18 и на рис.7.19.



Рис. 7.18. Выбор угла наклона луча

Рис. 7.19. Круговое движение луча

Корпус гидроакустической антенны (трансдьюсер) размещен в поворотно-выдвижном донном устройстве и в активном рабочем режиме выступает за пределы днища судна. Здесь выбираются центральное направление луча с установленными интервалами, относительно которого выбирается градуированный сектор сканирования (от 0° до 360°), и устанавливаются угол наклона луча к горизонту и его сектор обзора.

7.4.3. Примеры промышленных гидролокаторов

Гидролокатор Furuno CH-250 [55]. На рис. 7.20 показан базовый блок гидролокатора Furuno CH-250, который выпускается для применения на рыбопромысловом флоте. Его размеры 300 х 290 х 144 мм. Масса с акустической антенной 55 кг. Дальность обзора – до 1600 м. Максимальная глубина – до 600 м. Энергопотребление – 90 Вт.



Рис. 7.20. Вид базового блока гидролокатора Furuno CH-250

Акустическая антенна кругового и вертикального сканирования устанавливается на подводной части корпуса судна.

Гидролокатор может работать в восьми режимах:

- отображение эхо-профиля пройденного маршрута;

- точное определение координат объектов.

- секторное или круговое сканирование водного пространства по азимуту;

- вертикальное сканирование;

- комбинация секторного и вертикального сканирования для оценки распределения косяка рыбы одновременно в горизонтальной и вертикальной плоскостях;

- прокладка маршрута с внимательным обследованием всех возможных подводных препятствий;

- обеспечение гидролокационного "захвата" указанного оператором объекта (косяка рыбы, подводного препятствия) и автоматическое слежение за ним пучком УЗ волн.

В зависимости от режима и условий сканирования рабочая частота составляет 60 кГц, 88 кГц или 150 кГц. С изменением диапазона дальности автоматически меняется продолжительность и периодичность импульсов. В случае выявления косяка рыбы или возникновения угрозы столкновения с подводным препятствием (рифом, скалой и т.п.) может подаваться звуковой сигнал.

Гидролокатор Furuno CH-300 [56]. Первый в мире двухчастотный гидролокатор узконаправленного действия CH-300 разработанный для широкого круга как коммерческих, так и рыболовных судов. Рабочие частоты могут быть установлены 60/153 или 85/215 кГц, излучатели объединены в одном устройстве. Высокая частота 153 и 215 кГц дает детальное изображение вблизи и вокруг судна. Низкие частоты 60 и 85 кГц применяются при дальнем сканировании более чем 500 м. Использование обоих частот дает возможность в модели CH-300 отобразить на большом дисплее независимо эхосигналы различных вариантов сканирования и составить более полное представление о состоянии дна.

Имеются различные режимы индикации: горизонтальное и вертикальное сканирование, эхолот и комбинированный режим, отображающий горизонтальное и вертикальное сканирование/история событий/индикация в режиме плоттера.

Рассмотрим подробнее некоторые функции указанных выше режимов.

Горизонтальное сканирование помогает обнаружить косяки рыбы в любом месте вокруг судна при любом угле наклона луча (рис. 7.21, слева). В двухчастотном режиме отображения могут выводиться любые две эхограммы низкочастотного и высокочастотного сканирования, а также эхограмма комбинированного режима (рис. 7.21, справа). Усиление для каждого режима настраивается по отдельности.



Рис. 7.21. Горизонтальное сканирование: слева – практический вид двухчастотного режима; справа – вид экрана

Вертикальное сканирование позволяет изобразить профиль дна в заданной пользователем вертикальной плоскости в любом направлении. В двухчастотном режиме отображения выводятся результаты вертикального сканирования на низкой и высокой частотах, а также комбинированное изображение, как показано на рисунке 7.22.



Индикатор курсора указывает наклонную дальность и наклон антенны гидролокатора. При нажатии кнопки CUSTOM MODE можно исследовать вертикальную плоскость в любом направлении. Это удобно для оценки плотности и определения местоположения косяка рыбы.

Рис. 7.22. Комбинированное двухчастотное изображение профиля дна.

Комбинация горизонтального и вертикального сканирования помогает оценить распределение рыбных стай одновременно в горизонтальной и вертикальной плоскости. Уникальный смешанный режим CH-300 строится на следующей частотной характеристике: высокочастотные лучи отражаются от небольших рыб с большей силой, чем низкочастотные лучи. Сравнивая интенсивность отраженного сигнала на обеих частотах, режим выделяет эхо, отраженное от маленьких рыб, и демонстрирует его особым цветом. Прочие эхосигналы отображаются менее насыщенными цветами (рис.7.23). Данная функция помогает отличить маленькую рыбу-приманку от остального улова. CH-300 имеет два режима захвата цели, которые позволяют отслеживать и эхосигнал, отраженный от рыб, и неподвижные объекты, такие, как рифы и места обитания рыб.



Рис. 7.23. Комбинированное сканирование

Фиксация цели автоматически сопровождает выбранное скопление рыбы (рис. 7.24). В месте сопровождения, луч фиксируется в определенной позиции с координатами отмеченным маркером цели.

В режиме захвата подвижной цели автоматически отслеживается заданная стая рыб. В режиме отслеживания неподвижной цели луч направляется на объект в соответствии с координатами местоположения, заданными с помощью указателя цели.



Рис. 7.24. Режим фиксации и сопровождения цели

"Впередсмотрящий" гидролокатор Color Twinscope [57]. Для повышения безопасности движения судов, особенно пассажирских, на них устанавливают гидролокаторы наблюдения в направлении движения судна. Одним из таких является гидролокатор Interphase Twinscope Color (США).

Эхолот Color Twinscope использует два набора 8-и элементных фазированных излучателей. Один набор обеспечивает сканирование в вертикальной плоскости от "прямо по курсу" до "вертикально вниз под килем". Второй набор установлен для сканирования в горизонтальной плоскости перед судном с одного борта на другой. Сектор сканирования осуществляется в пределах угла 90° пучком УЗ волн частотой 200 кГц с расхождением 12°. Одновременно работает и направленный вертикально вниз УЗ пучок шириной 12° для непрерывного измерения глубины под килем. Дистанция наблюдения – до 360 м, контролируемая глубина – до 240 м. Базовый блок (рис. 7.25) оснащен цветным экраном 234 х 480 пикселей.

В обоих режимах вертикального и горизонтального сканирования имеется возможность раздела экрана эхолота на два окна, так что в левом окне будет виден вертикальный разрез водной толщи от днища судна до дна с цифровым указанием текущей глубины, а в правом – текущий профиль дна с указанием дальности сканирования. Кроме того, имеется функция увеличения любой четверти имеющегося на экране диапазона глубин.

В режиме горизонтального сканирования на экране отображается в пределах заданного сектора радиальная разметка шкалы дальности в виде дуг подобно радиолокатору. Цифры около дуг показывают расстояние перед судном. Эхолот имеет способность показывать глубину и дальность от судна любого объекта под водой, видимого на экране при фиксации цели с помощью курсора. Азимут и глубина объекта вычисляются относительно оси зондирующего луча, имеющего диаграмму направленности 12°.



Рис.7.25. Базовый блок эхолота Interphase Twinscope Color

Плоскость горизонтального сканирования наклонена в направлении движения судна ниже поверхности воды примерно на 10° для уменьшения влияния волнения.

На рисунке 7.25 показан режим горизонтального сканирования при подходе судна к каналу с отметкой расстояния до его бровки. В левой части экрана показана шкала текущей глубины и история профиля дна.

В эхолоте автоматически измеряются и выводятся на экран данные о скорости судна и температуре воды, выдается звуковая сигнализация о приближении мелководья, подводных препятствий, об опасности захода в запрещенную зону, если она заведомо определена. На экране могут выделяться отдельные окна для вывода навигационных и других данных. В базовом блоке имеется энергонезависимая память для сохранения всех необходимых протокольных данных.

7.5. Многолучевые эхолоты

7.5.1. Общая характеристика и принцип действия многолучевых эхолотов

В настоящее время для съемки рельефа дна используются современные судовые гидроакустические средства: однолучевые и многолучевые эхолоты, фазовые гидролокаторы бокового обзора. Наиболее массовым средством в силу

своей универсальности и дешевизны являются однолучевые промерные эхолоты.

Менее массовым, но более эффективным средством являются многолучевые эхолоты, которые дают возможность получать информацию о глубине сразу в некоторой полосе обзора, формируя веер узких акустических лучей в поперечной плоскости судна, измерять глубину в пределах пучка узконаправленных лучей, и, следовательно, получать топографический вид морского дна, строить цифровую модель рельефа дна или же его псевдообъёмное изображение.

Многолучевые эхолоты выполняют измерения глубины в поперечном направлении в обе стороны от акустической антенны. По мере того, как судно движется, поперечный профиль зарегистрированных значений глубин образует полосу измерений на дне, формируя в результате движения сплошную полосу акустического покрытия дна, состоящую из множества акустических лучей [58].

Ширина полосы покрытия может задаваться либо фиксируемым углом обзора (угол между крайними лучами), либо физической шириной, которая является переменной величиной, и изменяется с глубиной. Выбором междугалсового расстояния можно добиться совмещения или даже перекрытия смежных полос и таким образом обеспечить так называемую «площадную» съёмку дна.

В отличие от однолучевого эхолота, многолучевой эхолот измеряет не глубины, а наклонные дальности от дна до приёмной антенны и угловое отклонение оси каждого луча от вертикали. На основе этих данных и вычисляется глубина по каждому лучу. Современные многолучевые эхолоты способны измерять ещё и интенсивность отражённого сигнала по каждому лучу и на основе этой информации создавать геометрически правильное акустическое изображение участка дна в виде гидролокационного снимка. Этот снимок является координатно-привязанным непрерывным растровым изображением дна, аналогом гидролокационной «мозаики».

Передающая и приемная антенные решетки многолучевого эхолота, предназначенные для созданиях двух вееров лучей, имеют конфигурации в виде латинской буквы «L» или «T» — так называемый «крест Миллса» (рис 7.26).

Каждая антенная решетка состоит из множества одинаковых преобразователей, расположенных на одинаковых расстояниях друг от друга по одной линии и создает сложный основной лепесток диаграммы направленности, узкий в направлении продольной оси антенной решетки. Пересечение лепестков диаграмм направленности передающей и приемной антенных решеток создает узкий «луч». Испускаемый луч имеет большую угловую ширину поперек направления движения и малую вдоль направления движения, и наоборот, многочисленные лучи, формируемые во время приема, являются широкими вдоль направления движения и узкими в поперечном направлении. Фактически, освещаемые лучами области морского дна, имеют вытянутую в пределах угла обзора *овальную* форму. Пересечение этих лучей на дне представляют собой акустически освещенные области, называемые «пятна акустического контакта» к центрам которых и проецируются вычисляемые глубины. Многолучевые системы съемки обычно создаются с таким расчетом, чтобы между соседними лучами оставались промежутки от 0,5° до 3°.



Рис.7.26. Схема излучения и приема акустических импульсов системой многолучевого эхолота

Качество данных многолучевого эхолота зависит от рабочей частоты, ширины диаграмм излучаемых и принимаемых лучей, а также алгоритма, используемого для детектирования дна. Аналогично однолучевому эхолоту, чем меньше угол луча, тем лучше система способна определить истинную глубину и получить высокое разрешение объектов на дне [59, 60].

Многолучевые эхолоты, работающие в среднем глубинном диапазоне, до 1500 м, выполняют измерения на частотах в пределах 50 - 200 кГц. В глубоководных многолучевых эхолотах, выполняющих измерения на глубинах до нескольких километров, используется частотный диапазон от 12 до 50 кГц. Эхолот Kongsberg Simrad EM122, с частотой 12 кГц способен производить измерения в диапазоне полных океанических глубин до 11000 м.

Многолучевые эхолоты, имеющие рабочую частоту от 200 до 455 кГц, являются наиболее мелководными устройствами, обладающими сравнительно невысокой мощностью, но имеют наибольшую разрешающую способность и точность измерений. Такие системы являются готовыми инструментами не только для точного картографирования рельефа дна, но и позволяют выполнять инспекцию подводных объектов, как с борта судна, так и с установкой на подводных телеуправляемых аппаратах. Универсальным прибором как для выполнения детальных работ на мелководных акваториях, так и значительных глубинах, наиболее рациональным является использование эхолотов с высокой частотой и большой шириной полосы захвата, например **SeaBat 8125**. Его точность соответствует специальным требованиям МГО [61].

Эхолот «освещает» 120-ти градусный сектор морского дна перпендикулярно курсу судна. Приёмник формирует 240 индивидуальных, динамически сфокусированных лучей и передаёт в процессор данные измерений с разрешением в 6 мм. Отображение интенсивности возвратного рассеивания и измеренных глубин происходит в реальном времени для постоянного контроля качества.

Еще одним примером можно назвать эхолот **Kongsberg EM2040** (год начала производства – 2009), имеющий возможность работать одновременно на двух частотах из 200, 300, 400 кГц. Максимальный угол обзора составляет 140°, а максимальное количество лучей в одной посылке – 800. Ширина луча составляет 1,0° х 0,5°, разрешение по глубине – 0,2 см. Кроме того, эхолот имеет стабилизацию по бортовой и килевой качках.

В таблице 7.2 приведены сравнительные характеристики некоторых многолучевых эхолотов, наиболее подходящих для задач диагностики подводных объектов.

Пример получаемых данных многолучевыми эхолотами приведен на рис. 7.27.

	Reson Seabat 8125	Kongsberg 3002	R2Sonik 2024	Kongsberg EM2040
Год начала производства	1999	2003	2009	2009
Рабочая частота	455 кГц	300 кГц	200 - 400 кГц	200, 300, 400 кГц
Возможность одновременной работы на двух частотах	-	-	Нет	Да
Максимальная частота посылок	40 Гц	40 Гц	60 Гц	50 Гц
Максимальный угол обзора	120°	130°	160°	140°
Максимальное количество лу- чей в одной посылке	512	254	256	800
Максимальная наклонная даль- ность излучения	120 м	120 м	120 м	120 м
Максимальная ширина луча	1,0° x 0,5°	1,5° x 1,5°	1,0° x 0,5°	1,0° x 0,5°
Разрешение по глубине	0,6 см	0,6 см	<1 см	0,2 см
Стабилизация бортовой качки	Нет	Да	Да	Дa
Стабилизация килевой качки	Нет	Да	Нет	Дa
Вес антенны в воздухе	40 кг	25 кг	16 кг	35 кг

$\Gamma_{0} \sigma_{mm} = 7.2$	Toyunuo yor			MUODOD		VOTOTOD
аолица <i>1.2</i> .	телнические лар	лактеристики	высокочастотных	многол	учсвыл з	элолотов.



Рис. 7.27. Пример полученных данных

7.5.2. Интерферометры

Работы по применению интерферометра для измерения глубин в мире начались существенно раньше, чем по многолучевому эхолоту. И даже были сделаны серийные образцы, принятые на вооружение, в частности во Франции. Однако из-за большого объема информации в интерферометре требовались вычислители с очень большим быстродействием. Ввиду этого обработка занимала много времени и эти системы на тот момент не смогли конкурировать с многолучевыми эхолотами [62].

Способ измерения глубины в интерферометре принципиально отличается от способа измерения глубины в многолучевом эхолоте. Акустический сигнал излучается передающей антенной. Передающая антенна, так же как и в многолучевом эхолоте, расположена вдоль линии движения судна и имеет также ножевую диаграмму направленности, ось которой направлена поперек линии движения судна – точно так же как в многолучевом эхолоте.

Отраженный от элемента дна эхосигнал принимается на несколько приемных антенн (в данном случае – их три), расположенных в одной плоскости с передающей антенной так же вдоль корпуса судна. Диаграмма направленности приемных антенн имеет форму ножа, а оси диаграмм направленности этих антенн также направлены поперек линии движения судна. В результате такой компоновки приемо-передающих антенн интерферометра на дне высвечивается узкая полоска, причем она непрерывна в отличие от полоски в многолучевом эхолоте, состоящей из отдельных структур овальной формы.

Далее производится *измерение разности фаз эхосигналов*, приходящих от каждого элемента дна, на выходах разнесенных в пространстве приемных антенн, причем в этом случае число отсчетов разности фаз достигает нескольких

тысяч на одну строку. Так, например, у интерферометра при разрешении 4 см и дальности, положим 100 м, число отсчетов составит 2500. Это означает, что в принципе получено 2500 отсчетов глубины в пределах одной строки. Избыточное число отсчетов можно использовать, что и выполняется, для повышения точности измерения глубины без каких-либо существенных потерь для построения рельефа, поскольку рельеф, как правило, представляет собой довольно гладкую поверхность, а данных для построения более чем достаточно. Далее, эта совокупность значений разности фаз от элементов поверхности дна привязывается к определенным точно глубинам, в результате чего проводится построение рельефа дна.

В отличие от обычных гидролокаторов бокового обзора, интерферометры производят одновременно не только измерение наклонного расстояния, но и направления на точку отражения акустического сигнала, что позволяет, как и в многолучевом эхолоте, вычислить положение точки относительно антенны.

Процесс получения данных о глубине в интерферометре не так прозрачен и понятен, как в многолучевом эхолоте, тем не менее, именно фазовые системы применяются, например, в радиолокации для того, чтобы более точно определить местоположение объекта в пространстве.

В процессе съемки для контроля качества данных в интерферометре выводятся интерференционные линии, хотя в настоящее время уже есть возможность вывода самого рельефа дна при прохождении по галсу.

В процессе вторичной обработки здесь также используются данные о местоположении судна-носителя, данные о курсе, крене-дифференте и данные о скорости звука, поскольку знание этих данных вытекает из самой задачи построения рельефа и необходимых точностей.

Интерферометрический метод измерений может обеспечивать большое количество измерения наклонных дальностей, имеет высокое разрешающую способность и обладает очевидными преимуществами, которые не могут быть достигнуты другими известными методами:

- угол обзора может достигать 240°, а ширина покрытия - до 12 значений глубины;

- одновременное получение батиметрических данных и гидролокационной мозаики;

- стабильное и устойчивое определение направления внешних лучей;

- простое управление лучами при компенсации угловых перемещений антенны;

- малый вес и компактные размеры антенны.

К основным недостаткам интерферометрической системы относятся нестабильная работа на сложном и расчлененном рельефе, связанная с фазометрическими схемными решениями и низкое качество данных непосредственно под гидроакустической антенной. Несмотря на это, батиметрические гидролокаторы продолжают активно развиваться и уже составляют достойную конкуренцию многолучевым системам, как в области гидрографии, так и в области диагностики подводных переходов трубопроводов.

8. СУДОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ СКОРОСТИ

Информация о скорости судна используется для решения задачи выработки текущих координат места во всех навигационных комплексах и системах.

Круг потребителей информации о скорости судна весьма широк, это – гирокомпасы, радиолокаторы, системы обеспечения швартовки, системы предупреждения столкновения судов, системы позиционирования судов, специальные задачи.

Требования к точности выработки скорости движения судна автономными средствами – лагами – определяются решаемыми задачами. Так, в открытом море, вдали от навигационных опасностей, не требуется высокоточного знания текущей скорости. При проводке же судов каналами и фарватерами необходимо точное знание скорости, а при швартовках крупнотоннажных судов требуется постоянное получение точного значения скорости судна не только в целом как материальной точки, а и отдельных его частей (носа, кормы).

Лаги подразделяются на:

а) абсолютные – измеряющие скорость судна относительно грунта;

б) относительные – измеряющие скорость судна относительно водной среды или подстилающей поверхности.

По физическому принципу, положенному в основу измерения скорости, лаги подразделяются на: гидродинамические; индукционные; гидроакустические доплеровские, радиодоплеровские; гидроакустические корреляционные; геоэлектромагнитные; вертушечные и др.

По количеству измеряемых параметров лаги подразделяются на:

а) однокомпонентные (одноосевые) — измеряющие скорость в направлении диаметральной плоскости (ДП) судна (V_x);

б) двухкомпонентные (двухосевые) – измеряющие скорость в направлении ДП и в направлении ей перпендикулярном (V_x , V_y).

Современные транспортные суда в своем большинстве оснащены индукционными или электромагнитными относительными лагами, гидроакустическими доплеровскими и корреляциоными лагами, работающими как в абсолютном, так и в относительном режимах.

8.1. Индукционные лаги

8.1.1. Принцип действия

Принцип действия относительного индукционного лага основан на законе электромагнитной индукции, сформулированном М.Фарадеем в 1831 г. Согласно этому закону э.д.с. индукции E в контуре пропорциональна скорости изменения магнитного потока Φ через поверхность S, ограниченную этим контуром [5]:

$$E = -\frac{d\Phi}{dt}.$$
(8.1)

Знак "минус" показывает, что индукционный ток направлен таким образом, что его магнитное поле препятствует изменению того магнитного поля, которое вызвало появление индукционного тока (правило Э. Ленца).

Магнитный поток или поток вектора магнитной индукции *B* через какуюлибо малую площадку *dS* выражается произведением проекции вектора *B* на нормаль к этой площадке, т.е. при *B* перпендикулярном *dS* изменение магнитного потока $d\Phi = d(BS)$.

В общем случае выражение (6.1) можно записать в виде

$$E = -\frac{d(BS)}{dt} = -\left(S\frac{dB}{dt} + B\frac{dS}{dt}\right).$$
(8.2)

Напомним, как уже отмечалось в п. 6.1.1, что магнитная индукция *В* характеризует величину и направление магнитного поля и численно равна силе, с которой действует магнитное поле на единицу длины проводника, расположенного перпендикулярно к направлению поля и если по проводнику протекает ток силой в одну единицу.

Сам же ток в проводнике (если ток предварительно не пропускать) может возникнуть в двух случаях: в постоянном магнитном поле, когда проводник пересекает линии магнитной индукции; в переменном магнитном поле – за счет вихревого электрического поля, которое порождается в пространстве при изменении магнитного поля во времени.

Явление электромагнитной индукции возникает также и в морской воде при ее перемещении относительно магнитного поля. Используя это явление, можно построить индукционный датчик электрического сигнала, пропорционального скорости судна.

В современных индукционных лагах используется датчик (индукционный преобразователь ИП), схема которого изображена на рис 8.1. В герметичном цилиндрическом корпусе 1 имеется электромагнит 2, обмотка которого питается переменным током с частотой 50 Гц ($\sim U$). В нижней торцевой части датчика установлены электроды *m* и *n*, выступающие вместе сдатчиком за днище судна и соприкасающиеся с водой. Датчик закреплен так, что линия, соединяющая электроды, перпендикулярна ДП судна.

Электромагнит создает переменное магнитное поле, движущееся вместе с судном относительно воды. Морскую воду можно представить в виде множества параллельных проводников, образующих плоскость, движущуюся между электродами. То есть при движении судна со скоростью V_c с точками *m* и *n* будут соприкасаться все новые и новые проводники, образованные морской водой. Таким образом, создается эффект движения проводника в переменном магнитном поле – возникает э.д.с., наведенная в морской воде между электродами. Измерив эту э.д.с., зависящую от скорости движения потока воды под днищем судна, получим значение V_c относительно воды. Обращаясь к формуле (8.2), найдем величины *S* и *B*. Так как электромагнит индукционного датчика создает переменное магнитное поле, то его магнитная индукция определяется выражением

 $B = B_{\rm m} \sin \omega t$,

где $\omega = 2\pi f$; *f* – частота питающего напряжения (50 Гц).



Рис. 8.1. Индукционный преобразователь

Элементарная площадка dS, составленная из множества проводников (из морской воды), которая пройдет за время dt при скорости движения судна V_c между электродами m и n с расстоянием между ними l, очевидно, определится произведением $dS = lV_c dt$. Тогда формула (8.2) примет вид

$$E = -SB_{\rm m}\omega\cos\omega t - B_{\rm m}lV_{\rm c}\sin\omega t. \tag{8.3}$$

Равенство (8.3) показывает что сигнал индукционного преобразователя состоит из двух частей и поступает на измерительную схему прибора в виде напряжения

$$\sim U_{\text{ИП}} = U_{\text{K}} + U_{\text{C}},$$

где $\sim U_{\text{K}} = k_1 \ \omega \cos \omega t$ – помеха, которая называется квадратурной, так как она
сдвинута по фазе на $\pi/2$ по отношению к полезному
сигналу;

 $\sim U_{c} = k_2 V_{c} \sin \omega t$ – полезный сигнал, зависящий от скорости судна.

Коэффициенты $k_1 = SB_m$ и $k_2 = B_m l$ являются конструктивными параметрами индукционного преобразователя.

В измерительной части лага квадратурная помеха отделяется от полезного сигнала и исключается. Переменный полезный сигнал U_c преобразуется затем в постоянный сигнал, а он, в свою очередь, преобразуется в импульсы, длительность τ_c которых пропорциональна скорости судна. Далее эти импульсы заполняются импульсами генератора опорной частоты и их количество, подсчитанное электронным счетчиком, естественно, зависит от длительности τ_c , т.е. от скорости судна. Информация о скорости в виде число-импульсного кода дешифрируется и выдается в цифровой форме на индикаторы.

Информация о пройденном расстоянии представляется в виде последовательности счетных импульсов, частота следования которых определяется число-импульсным кодом скорости судна в данный момент. Счетные импульсы поступают на шаговый двигатель, который непрерывно (по шагам) проворачивает, связанный с ним, механический счетчик пройденного расстояния. У современных индукционных лагов, оснащенных микропроцессором, механический счетчик отсутствует и подсчет пройденного расстояния осуществляется электронным путем.

С помощью индукционного лага можно измерять не только продольную, но и поперечную составляющую скорости судна, т.е. определять дрейф судна. Для этого ИП лага снабжают дополнительной парой измерительных электродов и по полученным двум компонентам скорости вычисляют вектор полной скорости судна и его дрейф.

8.1.2. Погрешности измерений скорости

Точность показаний лага в большой степени зависит от места установки индукционного преобразователя. Это объясняется прежде всего возникновением вблизи поверхности корпуса движущегося судна турбулентного слоя воды, имеющего неодинаковую толщину и случайное поле скоростей частиц жидкости. Кроме того, распределение магнитной индукции *B* в объеме воды неодинаково по длине судна и носит весьма сложный, не поддающийся аналитическому исследованию характер.

Эти и другие случайные факторы приводят к тому, что измеренная лагом скорость не соответствует истинной скорости судна, причем связь между этими скоростями имеет нелинейный характер. Таким образом, индукционный лаг имеет погрешность, которая должна быть компенсирована поправкой ΔV .

В общем случае поправка лага является некоторой функцией скорости судна $\Delta V = f(V_c)$, которую можно представить в виде суммы трех составляющих (рис. 8.2) [5, 6]:

 $\Delta V = a + bV + c(V),$

где a – постоянная, bV – линейная, c(V) – нелинейная составляющие поправки.



Рис. 8.2. Составляющие погрешностей индукционного лага

Постоянная составляющая поправки лага вводится во время регулировки прибора в порту или в море при нулевой скорости и штилевой погоде. После выполнения такой регулировки поправка лага имеет линейную и нелинейную составляющие.

Определение и ввод линейной составляющей поправки лага выполняют по результатам испытания лага на мерной линии. Как известно, в индукционном лаге отсчет скорости судна пропорционален полезному сигналу индукционного преобразователя

$$V_{\pi} = mV_{\rm c}$$
.

Исходя из того, что эта функция линейна, погрешность лага, имеющая линейный характер, может компенсироваться посредством изменения коэффициента пропорциональности с m на m_1 . Задача состоит в том, чтобы получить новый отсчет, соответствующий истинному значению скорости, при прежнем значении сигнала U_c :

$$V_{\rm M} = V_{\rm JI} + \Delta V = m_1 V_{\rm c},$$

где ΔV – поправка лага, которая определяется на мерной линии (на полном ходу судна).

Таким образом, ввод линейной составляющей поправки лага связан с изменением крутизны характеристики лага *bV*.

В индукционных лагах ИЭЛ-2М регулировка значения коэффициента *m*₁ выполняется посредством изменения коэффициента усиления предварительного усилителя и опорного напряжения.

После выполнения этой регулировки в показаниях лага останется только нелинейная составляющая погрешности c(V), зависимость которой от скорости показана на рис. 8.2. Нелинейная составляющая поправки лага вводится с помощью корректора. Данные для установки корректора определяют также при испытании лага на мерной линии.

Сущность этой операции заключается в том, что кривая апроксимируется прямыми линиями. При этом весь диапазон скоростей разбивается на три линейных участка. Далее корректору задают такую программу работы, при которой на каждом участке определяется свое значение коэффициента $m_{(1)}$, $m_{(2)}$ $m_{(3)}$ крутизны характеристики лага. При такой работе корректора погрешность лага во всем диапазоне скоростей снижается до минимума.

Описанную регулировку лага необходимо проводить ежегодно, так как вследствие обрастания корпуса судна изменение поправки лага в течение года может доходить до 2,5%.

Индукционные лаги, применяемые на транспортных судах, позволяют измерять относительную скорость судна с погрешностью до 0,2 уз.

8.1.3. Некоторые образцы индукционных лагов

Индукционный лаг ИЭЛ-3 (Россия). Лаг ИЭЛ-3 является развитием известного, хорошо зарекомендовавшего себя прибора ИЭЛ-2М и построен на современной микропроцессорной базе с интерфейсами в международном коде NMEA 0183 обеспечивающими подключение их в регистрационные системы и интегрированные навигационные комплексы. В состав лага ИЭЛ-3 входят [7]:

Датчик скорости – индукционный датчик от лага ИЭЛ-2М.

Измерительный преобразователь скорости – микропроцессорный блок, обеспечивающий процесс измерений, обработки и передачи измерительной информации в центральный прибор (рис. 8.3, слева).



Рис. 8.3. Центральный прибор и репитер лага ИЄЛ-3

Центральный прибор построен на основе специализированного микропроцессорного вычислителя, решающего задачи определения скорости, исчисления и хранения пройденного пути, выдачу измерительной информации репитером и другим системам, обеспечения сервисных функций.

Репитеры – универсальные микропроцессорные индикаторы (рис. 8.13, справа), подключаются по последовательному интерфейсу к центральному блоку и индицируют скорость, либо скорость и пройденный путь.

Лаг ИЭЛ-3 имеет:

Электромагнитный лаг NAVIKNOT 350 Е. Компания Northrop Grumman Sperry Marine (США) выпускает серию лагов NAVIKNOT: 350 E / 450 D / 600 S / 600 SE / 600 SE.

Буквенные индексы обозначают: Е – электромагнитный одноосевой лаг измерения скорости относительно воды; D – доплеровский одноосевой лаг измерения скорости относительно воды; S – спутниковый двухосевой лаг измерения скорости относительно грунта.

На рис. 8.4 показаны главный дисплей электромагнитного лага Naviknot 350 Е и его репитеры.

Принцип действия NAVIKNOT 350 Е не отличается от других индукционных лагов. Он имеет электромагнитный датчик, с электродов которого снимается сигнал пропорциональный скорости судна. Сигнал поступает на предусилитель, где он конвертируется в цифровой формат и передается на электронный блок. С блоком связаны главный дисплей и репитеры, отображающие текущую информацию об относительной скорости судна и пройденном расстоянии.

Модель NAVIKNOT 600 SE отличается тем, что лаг измеряет не только продольную составляющую скорости судна от электромагнитного датчика, а он имеет спутниковую антенну, что дает возможность получить измерения скорости судна относительно грунта по двум осям.



Рис. 8.4. Главный дисплей лага Naviknot 350 Е и репитеры – цифровой и аналоговый

В зависимости от типа электромагнитного датчика диапазон измеряемых скоростей : от -20 уз (на заднем ходу) до +60 уз переднего хода; погрешность измерений – 0,1 уз или 1% от скорости. При наличии спутниковой антенны диапазон измерения скоростей относительно грунта у модели 600SE от -99 уз до +99 уз.

Электромагнитный лаг Yokogawa EML-500 (Япония). Серия EML-500 имеет такое же высокое качество и изготовлена по последним технологиям. Она идеально подходит для всех типов судов - от крупнотоннажных до небольших, а также для высокоскоростных судов.

Используется двухосевой датчик, что позволяет выполнять измерения относительной скорости не только вдоль диаметральной плоскости судна, но и по траверзу (поперечная скорость).

Датчик невыступающего типа (диаметром 48 или 70 мм). В него встроен предусилитель, что позволяет уменьшить уровень шума для оптимальной передачи сигнала скорости на большое расстояние от датчика до главного прибора.

EML-500 может принимать сигнал от GPS в формате NMEA 0183.

Диапазон измерений:

· · ·	
Скорость:	-13 - 65 узлов
Расстояние:	0 - 9999.99 миль
Направление:	0 - 359 град. (для двухосевого)
Точность измерений:	
Скорость:	±0.2 узла или ±1%
Расстояние:	±0.05 миль/час или ±1%
Направление:	±2.5° (для двухосевого)
-	

8.2. Гидроакустические доплеровские лаги

8.2.1. Основы теории

Принцип действия гидроакустического абсолютного доплеровского лага основан на эффекте Доплера, который заключается в следующем: *если источник или приемник звука перемещаются относительно друг друга, то частота принимаемого сигнала отличается от частоты сигнала излучаемого.* Эту зависимость изменения частоты колебаний или длины волны, воспринимаемой наблюдателем, от скорости источника колебаний и наблюдателя при их движении относительно друг друга, теоретически обосновал в 1842 г. австрийский физик и астроном К. Доплер.

Эффект Доплера для звуковых волн наблюдается в повышении тона звука, когда источник звука и наблюдатель сближаются, и соответственно в понижении тона звука, когда они удаляются. Длина волны зависит от скорости и направления движения источника (рис. 8.5). Если источник движется со скоростью *v* по направлению к приемнику, то есть догоняет испускаемую им волну частотой f_0 , то длина волны $\lambda_1 = (c - v)/f_0$ уменьшается; *c* – скорость распространения волн в среде. Если источник удаляется, то длина волны $\lambda_2 = (c + v)/f_0$ увеличивается.



Рис. 8.5. К пояснению эффекта Доплера

В доплеровском гидроакустическом лаге и излучатель, и приемник колебаний находятся на судне. Рассмотрим процесс формирования доплеровского сдвига частоты, который происходит в этом случае [5, 63, 64].

Пусть судно движется со скоростью, продольная составляющая которой равна V_x . (рис. 8.6). Гидроакустической антенной A излучаются в направлении морского дна ультразвуковые волны частотой f_0 в виде узкого луча под углом α_1 к плоскости горизонта. Считаем для простоты, что угол дифферента судна равен нулю и вертикальных перемещений судно не имеет. Длина волны исходного из-

лучения $\lambda_0 = c/f_0$, где c – скорость звука в морской воде.

Так как источник излучения движется, то скорость удаления излученной волны от судна определяется скоростью звука *c* и проекцией вектора скорости V_x на направление излучения: $c_1 = c - V_x \cos \alpha_1$.

Тогда длина волны, принятой в условном приемнике – неподвижной точке O_1 на морском дне,

$$\lambda_1 = (c - V_x \cos \alpha_1) / f_0. \tag{8.4}$$

Переходя к частоте $f_1 = c/\lambda_1$, которая будет принята в точке O_1 , можно записать

$$f_1 = f_0 \left(\frac{c}{c - V_x \cos \alpha_1} \right)$$

что и поясняет эффект Доплера: в данном случае частота принятого сигнала больше частоты посланного.

Для высокочастотного излучения, используемого в доплеровских лагах, поверхность морского дна представляет собой совокупность большого числа элементарных отражателей, рассеивающих падающую энергию по всем направлениям, в том числе и к установленному на судне приемнику. То есть точка *O*₁ представляет собой неподвижный излучатель ультразвуковых колебаний, длина волны которых равна λ₁.



Рис. 8.6. Принцип действия гидроакустического доплеровского лага

За время распространения излучения от грунта и обратно судно сместится (показано штриховой линией) от положения, в котором происходило излучение сигнала, и прием рассеянного излучения будет производиться под углом α_2 .

Скорость приближения отраженного сигнала к движущемуся приемнику определится скоростью звука *c* и проекцией вектора скорости V_x на направление отраженного луча: $c_2 = c + V_x \cos \alpha_2$.

Если предположить, что скорость судна мала и $\alpha_1 \approx \alpha_2 = \alpha$, то в результате частота принятых колебаний с учетом (8.4.) может быть представлена в виде

$$f_2 = \frac{c_2}{\lambda_1} = f_0 \left(\frac{c + V_x \cos \alpha}{c - V_x \cos \alpha} \right),$$

или

$$f_2 = f_0 \left(\frac{1 + \frac{V_x \cos \alpha}{c}}{1 - \frac{V_x \cos \alpha}{c}} \right) = f_0 \left(1 + \frac{V_x \cos \alpha}{c} \right) \left(1 - \frac{V_x \cos \alpha}{c} \right)^{-1}.$$
 (8.5)

Так как $(V_x \cos \alpha)/c \ll 1$, то последний сомножитель выражения (8.5) можно разложить в степенной ряд: $[(1 - x)^{-1} = 1 + x + x^2 + x^3 + ...]$. Тогда выражение (8.5) принимает вид

$$f_2 = f_0 \left(1 + \frac{2V_x \cos \alpha}{c} \right) \left(+ \frac{2V_x^2 \cos^2 \alpha}{c^2} + \dots \right),$$

из чего видно, что зависимость частоты принятого сигнала от скорости судна носит, в принципе, нелинейный характер. Пренебрегая квадратичными (так как $c >> V_x$) и последующими членами разложения, получим

$$f_2 = f_0 \left(1 + \frac{2V_x \cos \alpha}{c} \right).$$

Определим разность частот эхо-сигнала, пришедшего на антенну от грунта, и излученного сигнала (доплеровский сдвиг частот):

$$f_{\rm A} = f_2 - f_0 = \frac{2f_0 V_x \cos \alpha}{c}.$$
 (8.6)

Из равенства (8.6) находим продольную составляющую скорости судна

$$V_{\chi} = \frac{f_{\pi}}{2f_{\rm o}} c \sec \alpha.$$

Использование упрощенной линейной зависимости приводит к возникновению погрешностей в показаниях лага: в действительности имеет место нелинейная зависимость f_{α} от продольной составляющей скорости судна V_x ; изменение угла α при крене, дифференте и на качке; влияние вертикальной составляющей скорости судна на измеряемый сигнал. По этой причине однолучевая схема лага применения не нашла.

На практике используют двухлучевые доплеровские системы, в которых ультразвуковая волна излучается вдоль диаметральной плоскости судна в сторону носа и кормы под тем же углом α (рис. 8.7). Они получили название – система «Янус».



Рис.8.7. Двухлучевая доплеровская система

Частота работы излучателей в обоих каналах одинакова и строго фиксирована. Приемники акустической системы принимают сигналы следующих частот:

$$f_{\rm H} = f_{\rm O} \left(1 + \frac{2V_x \cos \alpha}{c} \right); \quad f_{\rm K} = f_{\rm O} \left(1 - \frac{2V_x \cos \alpha}{c} \right),$$

где $f_{\rm H}$ и $f_{\rm K}$ – частоты принятых сигналов со стороны носа и кормы судна соответственно.

Доплеровский сдвиг частот между эхо-сигналами от носового и кормового излучений в этом случае

$$f_{\rm A} = f_{\rm H} - f_{\rm K} = \frac{4f_{\rm o}V_{\chi}\cos\alpha}{c}.$$
 (8.7)

Тогда из формулы (6.4) вытекает уравнение двухлучевого доплеровского лага:

$$V_{\chi} = \frac{f_{\pi}}{4f_{\rm o}} c \sec \alpha \,.$$

Двухлучевая доплеровская система позволяет в значительной мере снизить погрешности, присущие однолучевому доплеровскому лагу, однако определяется при этом только продольная составляющая скорости судна. Для определения не только продольной, но и поперечной составляющей скорости судна применяют трех- и четырехлучевые антенны. При этом наибольшее распространение получили системы с диаметрально-траверзным и Х-образным расположением лучей (рис. 8.8).

При диаметрально-траверзном расположении (рис. 8.4, слева) с помощью пары лучей нос – корма определяется продольная составляющая скорости V_x , а с помощью лучей правый борт – левый борт поперечная составляющая скорости V_y . Обозначим лучи: 1 – нос; 3 – корма; 2 – левый борт; 4 – правый борт. Тогда

$$V_x = \frac{f_{\pi 13}}{4f_0} \frac{c}{\cos\alpha}; \qquad \qquad V_y = \frac{f_{\pi 42}}{4f_0} \frac{c}{\cos\alpha},$$

где $f_{д13} = f_1 - f_3$; $f_{д42} = f_4 - f_2$; f_1, f_2, f_3, f_4 – частоты сигналов, принятых по *1*, *2*, *3*, *4*-му лучам соответственно.

Путевая скорость и угол сноса могут быть найдены из выражений:

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = \frac{f_{\pi 13}}{4f_0} \frac{c}{\cos\alpha \cos\beta}; \qquad \beta = \operatorname{arctg} \frac{V_y}{V_x} = \operatorname{arctg} \frac{f_{\pi 42}}{f_{\pi 13}}.$$
Диаметрально-траверзная ориентация лучей обладает тем недостатком, что в случае выхода из строя одной из пар невозможно определить вектор абсолютной скорости судна. Для устранения этого недостатка применяют *X*образное расположение лучей.



Рис. 8.8. Четырехлучевые доплеровские системы с диаметрально-траверзным (слева) и с X-образным расположением лучей (справа)

При *Х*-образном расположении лучей, исходя из геометрических построений, показанных на рис. 8.4, справа, можно найти:

$$V_{x} = \frac{c}{8f_{o}} \frac{f_{A13} + f_{A42}}{\cos\alpha \, \cos\varphi}; \qquad V_{y} = \frac{c}{8f_{o}} \frac{f_{A42} - f_{A13}}{\cos\alpha \, \cos\varphi};$$

Путевая скорость и угол сноса вычисляются по формулам:

$$V = \frac{c}{8f_{\rm o}} \frac{f_{\rm A13} + f_{\rm A42}}{\cos\alpha \, \cos\varphi \, \cos\beta} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2};$$



$$\beta = \arctan\left[\left(\frac{f_{\mathrm{A}42} - f_{\mathrm{A}13}}{f_{\mathrm{A}13} + f_{\mathrm{A}42}}\right) \operatorname{ctg} \varphi\right].$$

Кроме рассмотренных выше четырехлучевых систем ориентации лучей, применяют также *Y*образную или трехлучевую системы (рис. 8.9), которые также дают возможность получить составляющие скоростей, путевую скорость и угол сноса.

Рис. 8.9. Ү-образная и трехлучевая системы ориентации лучей

Если необходимо иметь информацию о движении оконечностей судна, то используют шести-, и восьмилучевые доплеровские системы.

На рисунке 8.10 приведена схема шестилучевой доплеровской системы с диаметрально-траверзной ориентацией лучей (применяют также Х-образную схему лучей и др.). В носовой части судна расположен приемно-передающий антенный блок $A_{\rm H}$. С помощью пары лучей 1 и 3 определяется продольная составляющая скорости судна V_x , а с помощью пары лучей 2 и 4 – поперечная составляющая скорости V_y . В вычислительном устройстве лага вычисляются путевая скорость судна V_c и угол сноса β . Пара лучей 5 и 6 кормового антенного блока $A_{\rm K}$ дает информацию о поперечной составляющей скорости кормовой части судна. Описанная система устанавливается на крупнотоннажных судах и предназначена не только для навигационных целей, но и для измерения небольших по значению поперечных составляющих скорости носовой и кормовой оконечностей судна, что важно при выполнении швартовных операций.

В существующих конструкциях доплеровских лагов используются акустические антенны с диаграммой направленности в пределах $\Delta \alpha = 3 - 6^{\circ}$. Углы наклона акустических лучей выбирают чаще всего равными 60°. Рабочая частота излучаемого сигнала обычно бывает в пределах 100 – 300 кГц, но известны конструкции лагов с рабочей частотой до 2 – 4 МГц [63]. По характеру излучения сигнала лаги бывают с непрерывным, импульсным и комбинированным излучением (непрерывное – на малых глубинах, импульсное – на больших).



Рис. 8.10. Шестилучевая доплеровская система

Рабочие глубины абсолютных доплеровских лагов находятся в пределах 200 – 300 м. При плавании на бо́льших глубинах лаги переводят вручную или автоматически на работу в относительном режиме. В этом случае лаг будет функционировать на основе сигналов, отраженных от слоев воды, лежащих на

глубинах 20 – 60 м [63], как показано на рис 6.6. Эти слои в большей степени характеризуются наличием различных вкраплений в морской воде – микрочастицы, биоорганизмы, пузырьки воздуха.

Большинство конструкций доплеровских лагов имеют корректирующие устройства, компенсирующие погрешности, вызванные изменением скорости звука в морской воде по двум параметрам: температуре воды в районе антенны и ее солености.

Доплеровские лаги обладают высокой чувствительностью, позволяющей измерять малые скорости перемещения. Точность их показаний в абсолютном режиме довольно высока и при углах крена, дифферента, качки, не превышающих $2 - 3^{\circ}$, суммарная погрешность составляет от 0,1 до 3%. Разрешающая способность при этом некоторых высокочастотных лагов может составлять 0,01 – 0,02 уз.

8.2.2. Устройство лага

На рис. 8.11 показана структурная схема гидроакустического 6-лучевого доплеровского лага на примере лага **ЛА-53** [7], которая позволяет пояснить его работу.



Рис. 8.11. Структурная схема 6-лучевого лага

Генератор формирует импульсные электрические колебания с частотой f_0 , которые через усилители мощности подаются на три приемопередающие антенны. Там они преобразуются в акустические колебания, распространяющиеся в сторону морского дна по шести лучам.

Каждая из трех антенн формирует пару лучей, расположенных симметрично относительно нормали к рабочей поверхности (схема Янус) под углом 60° к горизонту.

Антенны 1 и 2 расположены в носовой, а антенна 3 - в кормовой части судна. Лучи антенны 1 ориентированы вдоль ДП судна (ось X), а лучи антенн 2 и 3 - в плоскости, перпендикулярной ДП (ось Y). Таким расположением антенн обеспечено измерение продольной составляющей вектора скорости судна и поперечных составляющих векторов скорости носовой и кормовой оконечностей судна.

В лаге применен одночастотный импульсный режим излучения одновременно по всем шести лучам. Длительность излучаемых импульсов и частота их следования регулируются автоматически, в зависимости от наклонного расстояния до дна. Эхо-сигналы, отраженные от морского дна (или от глубинных слоев воды), возвращаются к антеннам, где преобразуются в электрические сигналы.

После разделения по направлениям, предварительного усиления и преобразования сигналы поступают на измерители частоты, где происходит измерение частоты, принятой по каждому лучу.

Результаты измерений поступают в центральное вычислительное устройство, где рассчитываются составляющие вектора скорости и пройденного расстояния, а также следующие информационные параметры:

– модуль вектора скорости ($V_{\rm T}$) и направление ($K_{\rm T}$) течения по найденным продольным и поперечным составляющим абсолютной и относительной скоростей судна;

– глубина (H_i) в точке падения на дно *i*-го (i = 1,...,6) луча и горизонтального отстояния этой точки (R_i) от центра соответствующей антенны;

– угол крена (ψ_{κ}) и дифферента (θ) на ходу судна.

Полученная в центральном вычислительном устройстве информация поступает на собственные индикаторы лага и к внешним потребителям.

В центральном вычислительном устройстве вырабатываются также сигналы управления и контроля за работой лага, в том числе: сигналы управления автоматической регулировкой мощности (APM), автоматической регулировкой усиления (APУ) и временные диаграммы работы лага.

Гидроакустические антенны. Гидроакустические антенны формируют акустические лучи заданной ширины, направленные под заданным углом к горизонту. В качестве электроакустических преобразователей, как правило, используются пьезокерамические элементы из титано-бариевых или свинцовоцинково-титановых материалов (см.п. 7.2.2). По принципу построения гидроакустических антенн широкое распространение получили фазированные антенные решетки, которые были подробно рассмотрены в п. 7.2.5.

Один из примеров практической реализации можно привести антенну фазированной антенной решетки, разработанной в ОАО «Элпа» (рис. 7.12), состоящей из множества линейно расположенных на равных расстояниях друг от друга отдельных излучающих элементов. В данном случае все элементы объединены по четырем группам – по числу лучей в доплеровском лаге. Все соседние элементы каждой из групп питаются напряжением, сдвинутым по фазе на постоянный угол. Главные максимумы диаграммы направленности каждого элемента формируются в направлениях, для которых обеспечивается синфазное сложение колебаний всех элементов данной группы. В результате все элементы участвуют в формировании узконаправленного концентрированного луча с заданными параметрами (для доплер-лага оптимально выбрано: ширина луча $\Delta \alpha$ = 3 – 6° под углом к горизонту $\alpha = 60^{\circ}$).

Другим примером, подчеркивающим разнообразие применяемых конструкций гидроакустических антенн, может служить доплеровский измеритель профиля скорости течений (доплеровский лаг) FlowQuest 150 с использованием 4-х лучевой антенной решетки с уже установленным углом наклона лучей 22° (68° к горизонту). На рис. 8.12. показаны внешний вид его гидроакустической антенны и возможная схема построения одного из излучателей. Каждый излучатель состоит из множества отдельных элементов, создающих единый узконаправленный луч.



Рис. 8.12. Вид 4-х лучевой гидроакустической антенны и одна из излучающих поверхностей

Приемопередающее устройство. Типовое приемопередающее устройство импульсного лага содержит передающий и приемный тракты, а также антенные коммутаторы.

Передающий тракт включает в себя, как правило, стабилизированный по частоте генератор, делители частоты, модулятор и излучатель мощности. Фор-

мирование импульса излучения осуществляется по импульсам синхронизатора.

Приемный тракт состоит из предварительного и основного усилителей. Предварительный усилитель предназначен для усиления принятых сигналов до уровня, обеспечивающему их передачу по длинному помехозащищенному кабелю, например, оптическому. Основной усилитель, как правило, снабжен схемой автоматической регулировки усиления и усиливает эхо-сигналы до величины, необходимой для нормальной работы последующих блоков лага.

Измерительное устройство. Сигнал на входе измерительного устройства характеризуется доплеровским сдвигом частот на фоне шумов в сравнительно узком спектре. Информация о скорости содержится в разности частот излучения и средней выделенной (отфильтрованной) частоты отраженного сигнала. Особенностью процесса измерения частоты в гидроакустических доплеровских лагах является использование статистических методов оценки частот, т.е. нахождение наиболее вероятного значения доплеровского сдвига частоты. Таким образом, для определения скорости судна необходимо с заданной точностью измерить среднюю доплеровскую частоту.

Вычислительное устройство. Вычислительное устройство реализует зависимости, связывающие измеренные значения доплеровских частот с искомыми составляющими вектора скорости; производит усреднение информации, учет необходимых поправок и определение пройденного расстояния.

В некоторых лага по данным по продольной и поперечной составляющих вектора скорости вычисляется угол сноса судна (или дрейф по сигналам объемной реверберации), индицируется глубина под килем, получаемая по наклонной дальности до дна.

Большинство гидроакустических доплеровских лагов при превышении глубины под килем судна некоторого критического значения или по запросу оператора автоматически переходят в режим измерения относительной скорости по сигналам объемной реверберации, т.е. по сигналам от рассеянных частиц в водной среде. В этих лагах по приведенным выше формулам одновременно определяется скорость судна относительно грунта и относительно фиксированного слоя воды.

Функцию вычислительного устройства в современных лагах выполняет микропроцессор под управлением которого, кроме того, осуществляется весь контроль за работой лага и идентификация неисправностей.

Устройства коррекции. Устройства коррекции предназначены для уменьшения погрешностей в показаниях лага, обусловленных постоянно действующими и изменяющимися в процессе эксплуатации факторами.

Практически во всех лагах предусмотрена коррекция систематических погрешностей, связанных с изменением скорости звука и компенсации влияния качки с помощью антенной системы типа Янус.

Учет изменений скорости звука выполняется в большинстве случаев косвенным путем – измерением температуры морской воды в горизонтном слое антенны. Подробнее этот вопрос будет рассмотрен ниже.

Существенным дестабилизирующим фактором, влияющим на работу лага, является качка судна, что вызывает необходимость в стабилизации характеристики направленности антенн лага. Обеспечение постоянной ориентации акустических лучей требует усложнения аппаратуры, что может быть оправдано в лагах специального назначения.

8.2.3. Погрешности измерений скорости

Ниже рассматриваются основные составляющие погрешности гидроакустического доплеровского лага.

Погрешность измерения средней частоты доплеровского спектра. Принятый антенной сигнал, формируемый как суперпозиция сигналов от отдельных рассеивателей, имеет шумоподобный характер и обладает некоторым ограниченным спектром частот. Считается, что ни один из элементарных сигналов не превосходит по уровню суммы всех остальных. Это обусловливает распределение мгновенных значений результирующего сигнала, близкое к распределению по нормальному закону. Исходя из этого, средняя квадратическая погрешность (СКП) единичного измерения равна половине ширины доплеровского спектра (по уровню половины мощности): $\sigma = \Delta f_{\rm A}/2$ [63 - 65].

Если производится усреднение результатов измерений за время T, то СКП измерений уменьшается в \sqrt{N} раз:

$$\sigma_{f_{\pi}} = \frac{\Delta f_{\pi}}{2\sqrt{N}},$$

где *N* – число статистически независимых измерений за время *T*.

Суммарная погрешность измерения средней доплеровской частоты при правильном выборе схемы и параметров лага может быть достаточно малой и находится в пределах 0,1 – 0,3%.

В открытом море величина T осреднения измерений может составлять 150 – 300 с и тогда точность измерения скорости будет высокой и погрешность составит (при обычно применяемых частотах $f_0 = 200 - 300$ кГц) 0,005 – 0,1%. При плавании в стесненных условиях значение T, превышающее 15 с, будет уже чрезмерным и, наконец, при швартовке T должно быть не более 1,5 с [5].

Для получения высокой точности при малом значении T (как это требуется при швартовке) необходимо использовать более высокие частоты f_0 , порядка 1 - 2 МГц.

Изменение углов наклона лучей антенной системы. В реальных условиях плавания углы наклона лучей к горизонту могут изменяться под воздействием качки, статических кренов и дифферентов, что приводит к дополнительным погрешностям в измерении скорости. Если лучи лежат симметрично по разные стороны вертикали, то при изменении угла наклона лучей к горизонту, например вследствие дифферента, доплеровский сдвиг по одному лучу уменьшается, по другому – увеличивается, суммарный же сдвиг изменяется незначительно.

Как при дифференте, так и при крене возникающие погрешности составляют 0,015% при изменении положения лучей на 1° и 0,14% при отклонении на 3°. Как правило, нормальная работа лага обеспечивается при наклонах судна до $3-5^{\circ}$.

При значительных углах качки, особенно бортовой, и работе лага на больших глубинах под килем может нарушаться гидроакустический контакт с грунтом (у большинства серийных лагов характеристика направленности антенн довольно узкая – $3 - 6^{\circ}$). Потеря акустического контакта может иметь место и в процессе выполнения судном циркуляции, когда ее угловая скорость превысит некоторую допустимую величину.

У крупных судов, оснащенных обычными доплеровскими гидроакустическими лагами, функционирующими в качестве абсолютных до глубины 300 – 400 м, не произойдет потери акустического контакта с дном в процессе выполнения циркуляции. Для глубоководных лагов и для небольших судов такая вероятность становится вполне реальной.

Радикальным способом снижения влияния, как статических углов отклонения судна, так и качки на точность показаний доплеровского лага является «электронная стабилизация» характеристики направленности антенны по отношению к плоскости истинного горизонта.

Изменение скорости звука в морской воде. При расчете большинства гидроакустических систем скорость звука в морской воде принимается равной 1500 м/с. Фактическое значение скорости звука в реальных условиях изменяется в зависимости от температуры воды, ее солености и плотности, достигая наибольшего отклонения до $\pm 4 - 5\%$. Следовательно, и погрешность измерения скорости судна может доходить до 4 - 5%, как это вытекает из уравнения двухлучевого доплеровского лага. Такая недопустимо большая погрешность требует принятия определенных мер для ее снижения.

Исследования этого вопроса показывают, что на точность доплеровского лага влияют изменения скорости звука в слое воды на горизонте антенны. Физическая сущность этого факта состоит в том, что все изменения, имеющие место на трассе, взаимокомпенсируются при прямом и обратном ходе звукового луча.

Компенсация этой погрешности производится с помощью специальных корректирующих устройств, использующих тот или иной способ в зависимости от требований к точности показаний лага. Широко распространен косвенный способ определения скорости звука *с* на основе эмпирических формул, например, формулы Вильсона [5]:

 $c = 1449, 2 + 4,623T - 0,0546T^2 + 1,391(S - 35),$

где T – температура води, ^оC, вблизи антенны лага, измеренная полупроводниковым датчиком температуры – термистером;

S – соленость воды, ‰, учитывается с помощью введения поправки вручную.

Данный способ считается относительно простым и позволяет уменьшить погрешность в определении скорости звука до 0,1%.

Наиболее передовой способ – применение частотно-независимых антенн. Суть состоит в том, что при изменении *с* автоматически изменяется угол α , под которым происходит излучение сигнала [5]. Это приводит к изменению значения $f_{\rm d}$, т.е. в показания лага вводится некоторая поправка, компенсирующая погрешность, возникшую вследствие изменения скорости звука.

8.2.4. Примеры моделей зарубежных доплеровских лагов

Доплеровский лаг Furuno DS-60 (Япония) – точный трехлучевой доплеровский гидроакустический лаг [66]. Устройство соответствует IMO MSC.36(63), MSC.96(72), A.694(17) и A.824(19) и предназначен для использования на судах валовой вместимости 50000 и более рег. т. таких как контейнеровозы, крупномасштабные перевозчики сырьевых материалов, танкеры и другие суда.

На рис.8.13 показаны дисплей лага и отображаемая навигационная информация основного режима.



Рис.8.13. Дисплей лага DS-60 и вид отображения навигационной информации

Лаг Furuno DS-60 обеспечивает точными данными о скорости судна в широком диапазоне. Скорость измеряется относительно грунта или воды и в продольном и в поперечном направлениях. Возможность измерения скорости на самом малом ходу очень важна при швартовке больших танкеров для погрузки или разгрузки, а также для обеспечения безопасности навигации в узких каналах или проливах. Измерение высоких скоростей, в свою очередь, позволит повысить экономичность плавания в открытом море. В данной модели доплеровского гидроакустического лага Furuno DS-60 сохранена точность измерений предыдущей модели (Furuno DS-30), а размеры трансдьюсера (датчика) при этом значительно уменьшены.

На большом цветном 8,4-дюймовом ЖК-дисплее в буквенно-цифровом и графическом виде отображаются все необходимые данные. Лаг Furuno DS-60 поддерживает три режима отображения данных. Возможна установка водоне-проницаемого дисплея на крыле мостика.

На экране показаны: координаты судна и текущее время; слева – путевой угол; скорость относительно грунта, курс относительно грунта; течение – скорость и направление; ветер – скорость и направление; справа – угловая скорость поворота; показания GPS – скорость относительно грунта, курс относительно грунта; глубина под трансдьюсером, угол сноса, пройденное расстояние, общее пройденное расстояние.

В центральной части экрана показаны: поперечная скорость в опорной точке, продольная скорость, поперечная скорость кормы, режим измерения; индикаторы направлений течения, ветра и сноса судна.

Характеристики доплеровского лага FURUNO DS-60:		
Измерительная система	3-осевая;	
Диапазон измерения скорости судна:	продольный: -10,0 до 40,0 уз; поперечный: -9,9 до 9,9 уз;	
Глубины измерения:	 1 – 200 м ниже корпуса (скорость относительно земли); 0,5 – 25 м ниже корпуса (скорость относительно воды); 	
Точность:	при скорости менее 1 уз: $\pm 0,01$ м/с; при скорости более 1 уз: $\pm 1,0\%$ или $\pm 0,1$ уз;	
Погрешность относительно воды	$\pm 1,0\%$ или $\pm 0,1$ уз;	
Разрешение и тип дисплея	640 х 480, ЖК-дисплей;	
Напряжение питания	100-240 В переменного тока.	

SAM 4682 (Германия) – это навигационный 2-х осевой доплеровский лаг с большим графическим ЖК-дисплеем высокого разрешения [67]. На дисплее постоянно отображается полная навигационная информация. На мелководье имеется функция эхолота. Лаг соответствует всем требованиям ИМО. Интерфейсы по входам и выходам совместимы с NMEA 0183.

Гидроакустическая антенна SAM 4682 состоит из 5 излучателей: 4-х работающих на частоте 540 кГц, реализующих функцию 2-х осевого лага, и одного элемента на частоте 270 кГц для вспомогательной функции эхолота. Преобразователь подключен к трансиверу (шкаф электроники), расположенном на расстоянии до 40 м от датчика. Подключение трансивера к блоку оператора через последовательный порт RS-422 позволяет передавать данные на расстояние до 300 метров.

Блок оператора содержит графический матричный цветной ТFT ЖК-дисплей и клавиатуру с функциональными фиксированными клавишами (рис. 8.14). Функции клавиш зависят от активного окна экрана. Пользователь может адаптировать для типичных рабочих ситуаций отображение информации на ЖК-экране.



Рис. 8.14. Вид дисплея и основного активного окна экрана лага SAM 4682

Блок оператора содержит графический матричный цветной ТFT ЖК-дисплей и клавиатуру с функциональными фиксированными клавишами (рис. 8.14). Функции клавиш зависят от активного окна экрана. Пользователь может адаптировать для типичных рабочих ситуаций отображение информации на ЖК-экране.

Цифрами на окне экрана обозначены: 1 – поперечная скорость относительно грунта; 2 – поперечная скорость относительно воды; 3 – продольная скорость относительно грунта; 4 – продольная скорость относительно воды; 5 – угол сноса относительно грунта; 6 – угол сноса относительно воды; 7 – эхолот; 8 – указатель угловой скорости поворота; 9 – счетчик пройденного расстояния; 10 – суммарное пройденное расстояние.

Технические характеристики		
Электропитание	АС: 110 / 220 В, 50/60 Гц; DС: 20 – 40 В;	
Потребляемая мощность	max 100 W;	
Дисплей	150 x 200 mm (10,4), цветной LCD;	
Память	для восстановления эксплуатационных установок;	
Скорость	±40 уз. по обеим осям;	
Глубины измерения:		
при скорости относительно земли $1 - 75$ m $(1 - 150 \text{ m})^{**}$,		
при скорости относительно воды	менее 3 m от трансдьюсера;	
Частота	540кГц, 4 луча шириной 5,5 ⁰ (270 кГц)**;	
Точность	1% от скорости или 0,1 уз.	
Эхолот:		
глубина	max 100 m;	
частота	270 кГц/ширина луча 8 ⁰ .	

8.3. Гидроакустические корреляционные лаги

8.3.1. Принцип действия

Принцип действия гидроакустического корреляционного лага основан на измерении временного сдвига между идентичными акустическими сигналами, принятыми двумя судовыми антеннами, разнесенными на определенное расстояние, получившими с движущегося судна отраженный от грунта сигнал.

В современных корреляционных лагах используется импульсный режим излучения. В качестве антенн применяют пьезокерамические вибраторы направленного действия. Вибраторы устанавливаются в одном антенном блоке, и создают вертикальное излучение. Они работают как в режиме излучения, так и в режиме приема. Количество вибраторов в антенном блоке определяется тем конкретным кругом задач, которые должен решать прибор.



Рис.8.15. Фазовые центры антенн

Для измерения только продольной составляющей скорости достаточно иметь в антенном блоке два вибратора, ориентированных вдоль диаметральной плоскости. Такая приемопередающая система показана на рис. 8.15 [68]. В режиме передачи сигнала оба вибратора 1 и 2 работают синфазно, образуя излучение, фазовый центр которого расположен ровно посредине между центрами вибраторов. Оно эквивалентно излучению, которое создавалось бы некоторой условной передающей антенной 3, расположенной между антеннами 1 и 2. То есть можно считать, что в момент излучения работает антенна 3, расположенная на равном расстоянии L от антенн 1 и 2. Характеристи-

ки диаграмм направленности $\Delta \theta$ всех трех антенн идентичны и довольно широкие, они взаимно перекрываются и их оси ориентированы вертикально вниз.

Поясним указанный принцип действия для случая измерения одной – продольной – составляющей скорости судна.

В днище судна вдоль его диаметральной плоскости (рис. 8.16) условно установлена, как указывалось выше, одна излучающая 3 и две приемные 1 и 2 гидроакустические антенны. Приемные антенны отстоят от излучающей на строго одинаковом базовом расстоянии *L*, измеряемом единицами сантиметров. Ширина характеристик диаграмм направленности антенн составляет 20 – 30° (показаны пунктирными линиями).

Для определенных частот поверхность морского дна можно рассматривать как совокупность большого числа случайно распределенных элементарных отражателей. Акустический сигнал в точке приема представляет собой сумму независимых элементарных сигналов со случайными начальными фазами и амплитудами, отраженных от отдельных отражателей. При движении судна суммарный сигнал подвержен флюктуациям вследствие перераспределения разности фаз между отдельными элементарными сигналами, смены отражателей (часть отражателей вновь входит в зону облучения, часть выходит из нее) и т. д. При этом величина сигнала непосредственно зависит от положения приемной антенны относительно морского дна. Установленные на судне разнесенные антенны (в отсутствие сноса) движутся одна за другой по одной и той же траектории.



Рис.8.16. Принцип действия корреляционного лага

В момент начала измерений первая (носовая) приемная антенна 1 воспринимает результирующий эхо-сигнал от элементарных рассеивающих площадок дна, ограниченных областью перекрытия диаграммы излучающей и приемной антенн (участок AB) в том числе и от элементарного отражателя O_1 . Вторая (кормовая) приемная антенна 2 воспринимает сигналы от участка A_1B_1 [65].

Амплитуда и фаза сигнала от отражателя O_1 , принятого антенной 1 в момент $t = t_1$, определится геометрией лучей r_3 и r_1 (угол α). Продолжая свое движение, судно пройдет расстояние L, что будет соответствовать какому-то времени $t = t_1 + \tau_T$, т.е. судно окажется в таком положении, что излучающая антенна 3 займет то место, которое в момент времени t_1 занимала антенна 1. Очевидно, что геометрия лучей r_3 и r_2 аналогична геометрии лучей r_3 и r_1 (тот же угол α) за исключением направления распространения акустической волны. Однако изменение направления распространения сигнала не приводит к изменению его амплитуды и фазы.

Это значит, что сигнал, принятый кормовой антенной 2 от элементарного отражателя O_1 в момент времени $t = t_1 + \tau_T$, будет таким же как и в предыдущий момент времени t_1 , принятый носовой антенной 1.

Приведенное рассуждение справедливо для любого элементарного отражателя O_n , находящегося в пределах озвученного на морском дне участке. Таким образом, суммарный сигнал $U_2(t)$, поступивший от кормовой антенны в момент времени $t = t_1 + \tau_T$, формируется той же совокупностью элементарных сигналов, что и суммарный сигнал $U_1(t)$ от носовой антенны, поступивший в момент времени t_1 . Поэтому сигнал кормовой антенны повторяет форму сигнала носовой антенны, но отстает от него во времени на некоторый интервал τ_T , называемый транспортным сдвигом или транспортным запаздыванием (рис. 8.17, *a*).

Это запаздывание равно времени, необходимому судну, имеющему скорость V_x , для прохождения половины расстояния между приемными антеннами: $\tau_T = L/V_x$. Тогда задача определения скорости судна V_x сводится к определению временного сдвига τ_T между сигналами, принятыми разнесенными антеннами при известном расстоянии L, т.е.

$$V_{\chi} = \frac{L}{\tau_{\rm T}}.$$
(8.8)

Развернутая во времени вследствие движения судна общая картина выглядит как непрерывное формирование сдвинутых по времени двух одинаковых функций $U_1(t)$ и $U_2(t)$, которые носят стационарный случайный характер. По этой причине задача решается на основе анализа степени корреляционной связи между двумя указанными функциями. Степень такой связи характеризуется взаимокорреляционной функцией $R_{1,2}(\tau)$, которая принимает максимальное значение, если временной сдвиг между функциями $U_1(t)$ и $U_2(t)$ отсутствует или, условно говоря, когда функции $U_1(t)$ и $U_2(t)$ будут совмещены. Условием этого является равенство $U_2(t) = U_1(t - \tau_T)$.

Практически поиск искомого временного сдвига $\tau_{\rm T}$ состоит в следующем [5, 63 - 65]. Анализ сигналов от принимающих антенн 1 и 2 производится непрерывно и циклически. В течение каждого измерительного цикла, называемого временем интегрирования, фиксируются множества мгновенных значений идентичных, но сдвинутых по времени электрических сигналов $U_1(t)$ и $U_2(t)$. В результате обработки сигналов получают их огибающие. В канал измерения и обработки сигнала носовой антенны 1 вводится регулируемая временная задержка τ_3 и сигнал приобретает вид $U_1(t - \tau_3)$.



Рис. 8.17. Форма сигналов, принятых разнесенными антеннами (*a*), и кривая коэффициента взаимной корреляции (б).

Имея две функции $U_2(t)$ и $U_1(t - \tau_3)$, находят их взаимокорреляционную функцию $R_{1,2}(\tau)$, максимальное значение которой оценивается коэффициентом взаимной корреляции $\rho_{1,2}(\tau)$; коэффициент может принимать значения от 0 до 1, кривая его имеет вид, представленный на рис. 8.17, *б*.

При очередном измерительном цикле величину временной задержки τ_3 изменяют на $\Delta \tau$ и вычисляют коэффициент взаимной корреляции $\rho_{1,2}(\tau)$, сравнивая его текущее значение с предыдущим. Так, значения $\rho_{1,2}(\tau)$, соответствующие точкам 1, 2 и 3 на кривой $\rho_{1,2}(\tau)$ были получены при увеличении временной задержки τ_3 при каждом цикле вычисления. Если снова увеличить τ_3 на $\Delta \tau$, то будет получена точка 4, что приводит к уменьшению $\rho_{1,2}(\tau)$, вычисленному в предыдущем цикле. Следовательно, значение коэффициента взаимной корреляции $\rho_{1,2}(\tau)$ в точке 3 является максимальным, а это значит, что введенная величина временной задержки τ_3 равна по величине транспортному запаздыванию $\tau_{\rm T}$, т.е.: $\Delta \tau = \tau_3 - \tau_{\rm T} = 0$ или $\tau_3 = \tau_{\rm T} = L/V_x$.

Таким образом, регулируя величину временной задержки τ_3 и непрерывно поддерживая максимальное значение коэффициента взаимной корреляции $\rho_{1,2}(\tau)$, можно определить мгновенное значение продольной составляющей скорости судна V_x (8.8).

Для определения полного вектора скорости судна V и угла сноса β необходимо установить, как минимум, три принимающих устройства [5]. Один из вариантов их установки показан на рис. 8.18, где 4 – излучающая антенна, а 1, 2, 3 – принимающие.



При известных расстояниях между приемными антеннами $2X_0$ и $2Y_0$ и измеренных величинах временных задержек $\tau_{31,2}$ и $\tau_{31,3}$ между сигналами, принятыми соответствующими антеннами, определение угла сноса и путевой скорости сводится к вычислению по следующим формулам:

$$\beta = \frac{X_0}{Y_0} \frac{\tau_{31,3}}{\tau_{31,3}}, \quad V = \frac{X_0 \cos\beta}{\tau_{31,2}}$$

Рис. 8.18. Вариант расположения антенн

8.3.2. Функциональная схема

Функциональная схема гидроакустического корреляционного лага приведена на рисунке 8.19 [5, 63 - 65].

Гидроакустическая антенна ГА и приемопередающее устройство ППУ обеспечивают излучение и прием акустических колебаний. Отраженные от грунта акустические колебания с помощью разнесенных в ДП судна акустических преобразователей антенн преобразуются в идентичные, но сдвинутые во времени электрические сигналы $U_1(t)$ и $U_2(t)$. В результате обработки сигналов в ППУ получаются их огибающие и определяются центрированные значения $U_1(t)$ и $U_2(t)$, что достигается путем образования разностей между мгновенными значениями случайных функций U_{1,2}(t) и их математическими ожиданиями $M[U_{1,2}(t)]$. Указанные сигналы раздельно поступают на входы автоматического корреляционного устройства, состоящего из блоков: БРЗ – блок регулируемой задержки, MY – множительное устройство, M – интегратор. Сигнал $U_1(t)$ поступает в *БРЗ*, на выходе которого он приобретает вид $U_1^o(t-\tau_3)$ и затем поступает на *MV*, куда также по отдельному входу поступает сигнал $U_2(t)$. С вы- $[U_1^{o}(t-\tau_3) \times U_2^{o}(t)]$ следует на блок инхода множительного устройства сигнал тегратора *И*, в котором образуется искомая функция $R_{1,2}(\tau)$.



Рис. 8.19. Функциональная схема корреляционного лага.

Экстремальная следящая система *CC*, подключенная к выходу коррелятора, регулирует введенную временную задержку τ_3 , поддерживая максимальное значение корреляционной функции, и находит величину τ_3 равную τ_{T} . После этого в вычислительном устройстве *BV* по $\tau_3 = \tau_T$ определяется мгновенное значение скорости V_x и, путем интегрирования по времени, пройденное расстояние *S*.

8.3.3 Показатели точности

Корреляционному методу измерения свойственна флюктуационная погрешность, природа которой такая же, как и в доплеровском лаге, и было показано, что эффективной мерой снижения ее величины является усреднение результатов измерений за время T [5]. Погрешность уменьшается с увеличением ширины луча и уменьшением длины волны излучения.

Наличие сноса, отклонения плоскости антенной системы от горизонтальной плоскости приводят к тому, что максимум корреляции наблюдается при смещении судна не на расчетное расстояние L, а на величину L' проекции этого расстояния на линию пути.

В случае качки, рысканья значения β , ψ , θ не остаются постоянными. Транспортное запаздывание при этом также имеет переменный характер, что приводит к дополнительным динамическим погрешностям в работе системы слежения.

В общем случае несовпадение траекторий движения преобразователей, изменение их взаимного углового положения за время прохождения базового

расстояния *L* приводят к тому, что сигнал, принятый задним приемником, формируется участком грунта, не полностью совпадающим с отражающим участком грунта для переднего приемника.

Однако вследствие малого расстояния между преобразователями и их широкой диаграммы направленности работоспособность корреляционного лага обеспечивается в условиях значительной качки, хотя и снижаются энергетические характеристики лага.

Гидроакустический корреляционный лаг является абсолютным лагом, но его используют и как относительный (по принципу, рассмотренному в гидроакустическом доплеровском лаге). Так как ось диаграммы направленности излучающей антенны направлена вертикально вниз, то одновременно с измерением абсолютной скорости измеряется и глубина моря под килем судна.

Обычно ширина диаграммы направленности излучающей антенны составляет 30° , расстояние между акустическими антеннами 3 - 5 см., а рабочая частота излучения – 150 кГц. Погрешность измерения скорости составляет $\pm 0,1$ уз, пройденного расстояния – до $\pm 0,2\%$, глубины под килем – $\pm 1\%$.

Точность измерения скорости судна не зависит от скорости звука в морской воде и показания лага не подвержены влиянию качки.

Следует отметить, что принципиально в корреляционном лаге может использоваться как непрерывное, так и импульсное излучение. Однако режим непрерывного излучения имеет существенные ограничения по глубине под килем вследствие явления объемной реверберации, маскирующего сигналы, отраженные от грунта.

В импульсном режиме значительно снижаются реверберационные помехи, достигается хорошая развязка приемного и передающего трактов, появляется возможность одновременного измерения скорости и глубины под килем. К недостаткам импульсного режима можно отнести неполное использование общего времени усреднения при вычислении корреляционной функции и усложнение аппаратуры для обработки сигналов, вызванное периодическим характером поступления входной информации.

8.3.4. Технические характеристики некоторых зарубежных корреляционных лагов

Достаточно широкое применение на морских судах находят гидроакустические корреляционные лаги SAL-R1, SAL-R1a, SAL-T1, SAL-T2, SAL-T3 и SAL-840, SAL-860, разработанные шведской фирмой "Consilium Marine" [69].

Корреляционный лаг SAL-R1a. SAL-R1a – акустический лаг четвертого поколения серии SAL для измерения относительной скорости. Лаг высоконадежен, сконструирован согласно требованиям классификационных обществ и судовладельцев. Представляемые данные превышают различные спецификации ИМО.

На рис. 8.20. показана базовая комплектация приборов лага SAL-R1a: слева направо – клинкет с клапаном забортной воды или без него, трансдьюсер

(Ø32 мм), аналоговый индикатор скорости, цифровой универсальный индикатор скорости и пройденного расстояния, электронный блок.



Рис.8.20. Минимальная комплектация приборов лага SAL-R1a

Техническая спецификация:	
частота излучения	3,8 и 4.2 МГц;
диапазон измерений	±50 узлов;
точность скорости	0,1 узла или <1%;
точность пути	<1% от пройденного пути;
мин. глубина	3 метра под килем.
вывод данных скорости	подключается до 10 индикаторов SD;
выходы	1 аналоговый, 2 импульсных;
питание	230/115 В 50-60 Гц;
потребляемая мощность	30 ВА номинально;
трасдьюсер	TRU R1, Ø32 мм ×160 мм (длина), вес 3,7 кг.

Корреляционный лаг SAL-T3 – Consilium, Швеция. [70]. Лаг SAL T3 является докинговым лагом, включающим функции как лага, так и эхолота – измерение относительной скорости, продольной и поперечной абсолютной скорости и глубины до 200 метров. SAL T3 является первым комбинированным лагом, использующим один трансдьюсер для всех измерений и получившим типовое одобрение. Комплектация приборов и схема их соединений показаны на рис. 8.21.

Обрабатывающий блок (LPU) устанавливается на мостике и получает информацию в стандарте NMEA от электронного блока ELC. Блок LPU имеет разные возможности для обработки информации и вычислений, а также различные варианты входов и выходов для приема и выдачи информации. Семейство индикаторов SD1/SD2 является универсальным решением для индикации продольной и поперечной скорости, пути и глубины. Дисплей эхолота ESD обеспечивает графический вывод всех необходимых данных.

Комбинированный трансдьюсер (TRU) устанавливается в клинкете, предназначенном для монтажа на одинарном и двойном дне. И скорость, и глубина измеряются с помощью одного трансдьюсера, содержащего элементы для абсолютных (5 шт.) и относительных (2 шт.) измерений.

На рис 8.22 показаны трансдьюсер Ø 32 мм относительного лага SAL R1a и комбинированный трансдьюсер лага SAL T3, а также универсальный индикатор SD2.



Рис 8.21. Комплектация приборов и схема их соединений лага SAL T3



Рис 8.22. Трансдьюсеры лагов и индикатор SD2

Техническая спецификация лага SAL T3:

Относительная скорость:

диапазон измерений точность скорости точность пути мин. глубина Абсолютная скорость: диапазон измерений диапазон глубин точность точность пути

Глубины по эхолоту: диапазон измерений точность

Электронный блок – ELC: напряжение потребление Трансдьюсер – TRU: акустические элементы: относительная скорость абс. скорость длина кабеля Индикаторы - SD1 / SD2: питание разрядность

память

Дисплей эхолота: монитор питание

Представление данных:

±55 узлов; 0,1 узла или 0,5%; <±0,5% от пройденного пути; 2 метра под килем.

±40 узлов в любом направлении; 2 - 250 метров ниже трансдьюсера; 0,1 узла или 0,5%; 2 - 10 м.миль - ±0.2%, 10 - 50 м.миль - ±0.1%, > 50 м.миль - ±0.05%.

2 - 250 метров; ±0,5 метров на малых глубинах или ±2,5% показанной глубины.

115B - 230 B, 46 - 66 Гц; < 300 BA.

2 элемента, частота 4 мГц; 5 элементов, частота 150 кГц; 30 метров стандарт.

10-30 В пост тока, прибл 300 мА; SD1 : 3 цифры + 6 цифр + 8 LED; SD2: 3 цифр +3 цифр+3 цифр +8 LED; энергонезависимая память для конфигурации и счетчика пути.

12,1" SVGA, совмещенный с компьютером; 24 В пост. тока.

в дополнение к данным от эхолота, лага и гироскопа, докинговый лаг показывает поперечную скорость в носовой и кормовой частях судна с точностью 0,1 узла при условии, что уход нуля гироскопа меньше, чем 0,3°/мин.

Корреляционный лаг "SAL-860" (Docking Log)

Компания "Consilium Marine" разработала швартовный вариант лага (Docking Log) — на основе лага "SAL-860" (Speed Log) [6]. В итоге корреляционный лаг "SAL-860" получил новые качества, особенно полезные при швартовке судна. Он выполняет одновременное измерение следующих величин:

- продольной (V_x) и поперечной (V_y) составляющих абсолютной скорости судна;

- продольной составляющей (*V*_x) относительной скорости;

- глубины моря.

В комплект лага "SAL-860" (Docking Log) входят следующие приборы:

- гидроакустический преобразователь (Transducer), устанавливаемый в клинкете (Sea valve);

- электронный блок (Electronics unit);

- вычислительное устройство (Processing unit);

- гиротахометр-указатель угловой скорости (Turn rate gyro);

- цифровые индикаторы SD1 и SD2;

- многофункциональный дисплей (Multifunction display).

Лаг действует на основе принципа акустической корреляции эхосигналов. В лаге применен патентованный гидроакустический преобразователь, показанный схематично на рис. 8.23.



Рис.8.23. Гидроакустический преобразователь (Transducer) корреляционного лага "SAL-860"

В преобразователе расположены: одна пара пьезоэлементов, ориентированных параллельно продольной оси судна для измерения составляющей V_x относительной скорости (высокочастотные излучатели 6 и 7), и пять пьезоэлементов, сгруппированных запатентованным образом, для измерения составляющих абсолютной скорости. Все элементы работают и на излучение (элементы 1, 2, 3) и на прием (принимают одновременно все пять). Звуковая энергия излучается вертикально к грунту, перпендикулярно днищу судна. Для измерения относительной скорости (Water tracking) используется частота 4 МГц (импульсный режим). Отражение звуковых колебаний в этом случае происходит от частиц в воде с небольшого постоянного расстояния от трансдьюсера. Для измерения абсолютной скорости (Bottom tracking) используется частота 150 кГц, отражение звука происходит от грунта. Эта же частота используется и для измерения глубины.

Многоэлементный гидроакустический преобразователь позволяет измерять векторы абсолютной скорости по 12 направлениям — через 30° по всему горизонту, что обеспечивает высокоточное вычисление составляющих V_x и V_y скорости судна. Кроме того, одновременное измерение абсолютной и относительной скорости судна дает возможность рассчитывать скорость течения. Это реализовано в лаге "SAL-860" (Docking Log).

На рис. 8.24 представлен экран многофункционального дисплея, на котором присутствует вся информация в цифровой и аналоговой форме с использованием диаграмм. Экран имеет три зоны: левую, правую верхнюю и правую нижнюю.



Рис.8.24. Многофункциональный дисплей корреляционного лага "SAL-860" (Docking Log)

В левой части (Speed display area) расположены четыре диаграммы с соответствующей цифровой индикацией для четырех величин скорости:

- поперечной абсолютной скорости носа и кормы;

- продольной абсолютной скорости;

- продольной относительной скорости.

В правой верхней части экрана(Rate of turn area) приведена круговая диаграмма с цифровой индикацией угловой скорости поворота судна, причем цвет индикации при повороте влево красный, а при повороте вправо — зеленый.

В правой нижней зоне (Depth display area) расположены индикатор глубины и аналоговая диаграмма, характеризующая глубину за последние 20 мин. Предусмотрено автоматическое масштабирование.

В лаге "SAL-860" (Docking Log) используются две частоты: 4 МГц — для измерения относительной скорости (режим WT) и 150 кГц — для измерения

абсолютной скорости (режим ВТ) и определения глубины. На основе данных об абсолютной и относительной скоростях можно рассчитывать скорость течения.

Техническая спецификация:

Относительный режим:	
диапазон измерений	от 0 до +30 уз;
точность скорости	0,1 уз. при скорости ≤ 10 уз.,
	1% при скорости > 10 уз.;
точность пути	1% от пройденного расстояния.
Абсолютный режим:	
диапазон измерений	от -8 до +30 уз;
диапазон глубин	3 - 300 м;
точность измерения глубин	5%;
точность пути	$0 - 55^{\circ} C$

Корреляционные лаги шведской фирмой "Consilium Marine" получили широкое распространение. Ими уже оборудовано более 1000 судов. Наряду с указанной фирмой корреляционные лаги производят и такие известные компании как "Magnavox", "Echo Pilot", "Marine Acoustic Ltd." и ряд других. Следует отметить, что фирмой "Marine Acoustic Ltd." разработан, пожалуй, наиболее точный корреляционный лаг "Covelia", который предназначен для использования на подводных, преимущественно исследовательских судах. Имея незначительные размеры, он позволяет измерять направление вектора скорости судна с погрешность до 1 градуса по 20 направлениям, а значения составляющих скорости с погрешностью, не превышающей 0,005 узла в диапазоне скоростей от 0 до 10 узлов. Разрешающая способность лага, соответствующая минимальному значению его погрешности, составляет 0,001 узла. Погрешность измерения глубины под килем судна не превышает 0,1 метра.

* * *

В результате сравнения по основным показателям доплеровских и корреляционных лагов можно сделать следующие выводы.

Доплеровские лаги обеспечивают: высокоточное получение вектора путевой скорости судна, а также его угла сноса в открытом море; наличие точной информации об абсолютной скорости судна при постановке на якорь и контроль скорости движения судна при швартовных операциях; снабжение высокоточной информацией о скорости судна в общесудовую информационную систему.

К достоинствам корреляционного лага можно отнести: точность измерений линейной скорости не зависит от изменений величины скорости звука в воде, поэтому нет необходимости в использовании устройств, компенсирующих этот фактор; использование более широкой диаграммы направленности практически исключает вероятность потери отраженного сигнала вследствие качки, а также дает возможность одновременного измерения глубины.

В итоге: при решении навигационных задач корреляционный лаг предпочтительнее доплеровского; при маневрировании, постановке на якорь и особенно при швартовке суда лучше использовать доплеровский лаг.

9. АВТОРУЛЕВЫЕ

9.1. Принципы построения авторулевых

Одно из направлений развития навигационной техники связано с созданием систем автоматического управления (САУ) движением судна. Управление движением судна заключается в таком воздействии на его рулевое устройство и движитель, при котором обеспечивается безопасное перемещение судна между заданными пунктами в заданное время. Процесс по существу состоит в регулировании курса и скорости судна.

Одно из направлений автоматизации управления движением судна ограничивается решением сравнительно простой задачи — стабилизация судна на заданном курсе. Соответствующие системы управления получили название авторулевых и широко применяются на флоте.



Рис. 9.1. Отклонение судна от заданного курса

Другим направлением является создание авторулевых не только для стабилизации судна на постоянном курсе, но и для автоматического управления судном при маневрировании. В таких САУ решается общая задача – управление движением по заданной линии пути. Это может быть отрезок локсодромии, ось фарватера, линия рекомендованного пути, выбираемого с учетом навигационных опасностей и гидрометеорологических факторов.

Стабилизация курса заключается в поддержании постоянного значения курса путем компенсации рулем отклонений от него, вызванных случайными внешними воздействиями *f*

(рис. 9.1). Здесь используется принцип управления по отклонению на угол ψ текущего курса *K* от заданного для стабилизации курса K_3 . Результатом является формирование величины β перекладки руля для удержания судна на курсе в зависимости от отклонения текущего курса от заданного [3, 71].



Рис. 9.2. Обобщенная схема системы автоматического управления

Как и любая система управления, САУ курсом судна включает в себя три основных элемента (рис. 9.2): объект управления OY (судно), внешнюю обратную связь OC и регулятор P. Судно как объект управления испытывает возмущающие и управляющие воздействия. Возмущающие воздействия f (ветер, волнение, течение) носят случайный характер и приводят к отклонению судна от заданного курса. Курс K судна контролируется с помощью курсоуказателя либо другого средства, дающего аналогичную информацию, которая образует внешнюю обратную связь в системе управления. На входе системы происходит сравнение заданного значения K_3 и фактического Kкурсов и их разность ψ поступает на вход регулятора.

Назначением регулятора является преобразование по определенному закону отклонения ψ судна от заданного курса в отклонение β руля. При ручном управлении функции регулятора выполняет рулевой. Отклонение руля вызовет управляющее воздействие на судно, которое направлено на компенсацию возмущающего воздействия.

Таким образом, САУ курсом представляет собой следящую систему, работающую по отклонению судна от заданного курса вод действием внешних возмущений или задающих воздействий.

Качество регулирования определяется законом $\beta = f(\psi)$, по которому осуществляется перекладка руля в зависимости от текущего значения и характера изменения отклонения ψ судна от заданного курса. В регуляторах авторулевых реализован пропорционально-дифференциально-интегральный закон, по которому формируется сигнал, определяющий требуемую перекладку руля. Такой регулятор называют ПИД-регулятором.

9.2. Устойчивость САУ

В работе любой САУ различают два режима: переходный и установившийся. При каждом изменении входного воздействия изменяется и регулируемая величина. При этом система или возвращается в прежнее состояние, или переходит из одного установившегося состояния в другое. Этот процесс называется переходным процессом. По окончании переходного процесса наступает установившийся режим. Однако устойчивость – необходимое и обязательное, но недостаточное условие практической пригодности САУ к использованию. Система должна обладать определенным качеством управления.

Качество переходного процесса определяется следующими динамическими характеристиками (рис. 9.3.):

а) длительностью переходного процесса (время затухания);

б) величиной перерегулирования Δ_{A} (динамическая погрешность);

в) статической погрешностью Δ_{ct} ;

г) формой процесса.

В последнем случае процесс может быть апериодическим (кривая *1*), колебательным (кривая *2*), монотонным (кривая *3*).

Как правило, при исследовании системы оценка качества производится по ее реакции на единичную функцию входного сигнала (единичное ступенчатое воздействие). Единичная функция характеризует воздействие, которое мгновенно возрастает от нуля до единицы и далее остается неизменным.



Рис. 9.3. Переходные процессы устойчивой САУ

Реакция системы на это возмущение называется переходной функцией y(t). Значение переходной функции y(t) при $t \to \infty$ характеризует установившуюся реакцию системы.

Окончанием переходного процесса считается момент времени, когда любое изменение переходной функции не превышает 5 % от установившегося значения. Количество перерегулирований зависит от времени затухания и величины периода колебаний. Обычно приемлемым числом колебаний в САУ считается 2-3. Однако существуют системы, в которых колебательность вообще не допускается. В таких системах переходный процесс является, как правило, апериодическим.

9.3. Пропорциональный закон управления

Для задачи стабилизации курса возможно использование упрощенного, линейного уравнения движения судна, считая, что в процессе стабилизации скорость судна является постоянной, а отклонения текущего курса от заданного значения управляющего воздействия малы.

Уравнение линейной модели рыскания судна под действием постоянного возмущения f_0 = const имеет вид

$$T_{\rm c}\ddot{\psi} + \dot{\psi} = k_{\rm c}\beta + f_{\rm o},\tag{9.1}$$

где *T*_c – постоянная времени судна;

*k*_c – коэффициент передачи судна по управляющему воздействию.

Значения параметров модели судна (7.1) для современных судов при скоростях хода 10÷17 узлов лежат в пределах: $T_c = 10\div70$ с.; $k_c = 0.03\div0.15$ с⁻¹ [71].

Уравнение (9.1) содержит две переменные (ψ и β), поэтому его решение может быть найдено лишь при наличии дополнительного уравнения, связывающего угол β кладки руля с углом рыскания ψ . Уравнение, описывающее эту связь, называется законом управления, или регулирования.

При пропорциональном законе управления перекладка руля осуществляется по закону

$$\beta = -k_1 \psi, \tag{9.2}$$

где *k*₁ – коэффициент передачи по углу рыскания, определяющий отношение угла отклонения руля к углу отклонения судна от заданного курса.

Знак "минус" в правой части обозначает, что сигнал управления всегда направлен в сторону уменьшения величины ψ . Тогда уравнение (79.1) с учетом (9.2) примет вид

$$T_{\rm c}\ddot{\psi} + \dot{\psi} + k_{\rm c}k_{\rm l}\psi = f_{\rm o}.$$
(9.3)

Отсюда следует, что в установившемся режиме работы ($\ddot{\psi} = 0$; $\dot{\psi} = 0$; $\psi = \psi_{cT}$) системе стабилизации курса будет присуща статическая погрешность

$$\psi_{\rm CT} = \frac{1}{k_{\rm C}k_1}f_{\rm O},$$

то есть после завершения переходного процесса при пропорциональном законе управления (используется П-регулятор) судно не выходит на заданный курс как это показано на рис. 9.4. Статическая погрешность тем больше, чем меньше параметр регулирования k_1 .

При использовании только пропорционального (П) закона управления отклонение судна от заданного курса (появление угла ψ) вызывает в блоке регулятора *P* выработку электрического управляющего сигнала, соответствующего углу кладки пера руля, определяемым заданным значением курса K_3 .



Рис. 9.4. Переходный процесс П-регулятора 279

Качество регулирования характеризуется величиной перерегулирования Δ_{d} и временем переходного процесса t_{p} . Решая и анализируя уравнение (9.3) и опираясь на рисунок 9.3, можно сделать следующие выводы.

При пропорциональном законе управления:

- возникает статическая погрешность ψ_{ct} , с течением времени (при постоянных внешних возмущениях) будет накапливаться односторонний снос судна с линии заданного пути;

- переходный процесс неустойчив, перерегулирование $\Delta_{\rm d}$ значительно, может возникнуть "раскачка" судна – это связано со сложностью подбора параметра регулирования k_1 ;

- увеличивается время переходного процесса *t*_p, что объясняется большой инерционностью судна.

Таким образом, П-регулятор не может считаться удовлетворительным для автоматической стабилизации курса морских судов.

9.4. Пропорционально-дифференциальный закон управления

Для улучшения динамических характеристик системы регулирования в закон регулирования вводят производную от регулируемой величины, т.е. используют пропорционально-дифференциальный (ПД) закон управления, при котором перекладка руля осуществляется по углу и угловой скорости рыскания

$$\beta = -\left(k_1\psi + k_2\dot{\psi}\right),\tag{9.4}$$

где k_2 – коэффициент передачи по угловой скорости рыскания, определяющий отношение угла перекладки руля к угловой скорости рыскания.

Производная $\dot{\psi}$ может быть получена либо дифференцированием угла рыскания, снятого с гирокомпаса, либо непосредственно измерением угловой скорости рыскания с помощью гиротахомерта.

Подставляя уравнение (9.4) в исходное уравнение движения судна (9.1), получим

$$T_{\rm c}\ddot{\psi} + \dot{\psi} + k_{\rm c}k_1\psi + k_{\rm c}k_2\dot{\psi} = f_{\rm o}\,,\tag{9.5}$$

из чего следует, что в установившемся режиме работы ($\ddot{\psi} = 0$; $\dot{\psi} = 0$; $\psi = \psi_{cT}$) системе стабилизации курса будет присуща такая же статическая погрешность как и при пропорциональном законе управления

$$\psi_{\rm CT} = \frac{1}{k_{\rm C}k_1} f_{\rm O},$$

Однако, решение и анализ уравнения (9.5) показывают, что характер переходного процесса будет другим и качество регулирования в этом случае значительно улучшается.

Поясним смысл введения в закон управления производной по углу рыскания. Допустим, что угол ψ изменяется во времени так, как показано на рис. 9.5. Там же показано изменение угловой скорости $\dot{\psi}$.

В промежутке времени $0 - t_1$ угол ψ и угловая скорость $\dot{\psi}$ имеют одинаковые знаки. Это значит, что сигнал управления в этом промежутке за счет введения производной будет увеличен. Следовательно, руль будет заложен на бо́льшую величину, чем при управлении только по углу ψ . Благодаря форсированному действию руля судно отклоняется от линии курса на значительно меньший угол.

В момент t_1 , когда судно начнет возвращаться на заданный курс, знак производной ψ меняется на противоположный, а знак угла ψ остается тем же. Таким образом, в промежутке $t_1 - t_2$ управляющий сигнал будет уменьшен в сравнении с управлением только по углу рыскания.



Рис. 9.5. Пояснение принципа использования производной по углу рыскания

Следовательно, в этом промежутке времени руль будет быстрее возвращаться в исходное положение, т.е. ввод производной затормозит возвращение судна на курс. Именно это и необходимо для погашения инерционности судна.

В некоторый момент времени t_2 руль установится в ДП судна, так как уровни сигналов по углам ψ и $\dot{\psi}$ будут равны, а их знаки противоположны. Начиная с момента t_2 , отрицательный сигнал по производной превысит положительный сигнал по углу. Руль при этом перейдет нейтральное

положение и отклонится в сторону противоположного борта, хотя судно еще и не вернулось на заданный курс. Таким путем производится автоматическое одерживание судна на курсе.

В момент t_3 судно перейдет линию курса, но это произойдет с уже заложенным в противоположную сторону рулем, благодаря чему отклонение судна от курса будет меньше, чем при управлении только по углу рыскания. В дальнейшем весь процесс повторяется.

Сравнивая работу ПД-регулятора с П-регулятором, можно отметить:

- при пропорционально-дифференциальном законе управления выполняется функция *автоматического одерживания* судна на курсе;

- переходный процесс регулирования становится устойчивым, уменьшаются перерегулирование и время регулирования;

- имеется возможность, выбирая параметр регулирования *k*₂, обеспечитьудовлетворение требований к качеству регулирования в зависимости от условий плавания судна;

- при внешнем воздействии статическая погрешность при ПД-законе управления остается такой же, что и при пропорциональном законе.

Таким образом, управление по производной улучшает качество регулирования. Авторулевые с ПД-законом управления нашли практическое применение и выпускаются промышленностью.

9.5. ПИД-закон управления

Одной из действенных мер по компенсации статической погрешности, имеющих место при П- и ПД- законах управления, является ввод в закон регулирования сигнала по интегралу от угла курса. В этом случае перекладка руля осуществляется по пропорционально-дифференциально-интегральному (ПИД) закону управления

$$\beta = -(k_1\psi + k_2\dot{\psi} + k_3\int_0^t \psi \,dt), \qquad (9.6)$$

где k_3 – коэффициент передачи по интегралу от угла рыскания, определяющий отношение угла перекладки руля к среднему значению рыскания за время t.

Уравнение (9.1) с учетом выражения (9.6) примет вид

$$T_{c}\ddot{\psi} + \dot{\psi} + k_{c}k_{1}\psi + k_{c}k_{2}\dot{\psi} + k_{c}k_{3}\int_{0}^{t}\psi dt = f_{0}.$$
(9.7)

Продифференцируем уравнение (9.7). Учитывая, что при $f_0 = \text{const}$ $\frac{df_0}{dt} = 0$, получим

$$T_{c}\ddot{\psi} + (1 + k_{c}k_{2})\ddot{\psi} + k_{c}k_{1}\dot{\psi} + k_{c}k_{3}\psi = 0.$$
(9.8)

Отсюда следует, что статическая погрешность (при $\ddot{\psi} = \ddot{\psi} = \dot{\psi} = 0$) будет равна нулю ($\psi = \psi_{ct} = 0$). Такая система управления называется астатической.

Физическая сущность управления по интегралу от угла курса состоит в следующем.

Допустим, гармоническое внешнее воздействие оказывается несимметричным: например, волна бьет в левый борт (рис. 9.6). Момент от удара волны смещает судно с линии заданного курса (K_3) вправо на некоторый угол ψ . Отрабатывая этот сигнал, авторулевой возвращает судно на прежний курс (линия 1). Однако следующий удар волны приводит опять к отклонению вправо уже от этой линии. Судно снова возвращается на прежний курс, но на линию 2, и т. д. Следовательно, линия пути не соответствует заданному курсу. Таким образом, возникает необходимость добиться, чтобы рысканье стало симметричным. Эту задачу решает *интегрирующее* звено, которое имеется в составе регулятора *P* авторулевого.



Рис. 9.6. Несимметричное рыскание судна

Интегрирующее устройство измеряет величину асимметричного рыскания $\alpha_{\rm u}$. С точки зрения физического смысла интеграл – это сумма бесконечно малых приращений. Знакопеременная часть сигнала при суммировании взаимокомпенсируется. Постоянная часть $\alpha_{\rm u}$ накапливается и в качестве дополнительного сигнала поступает на вход следящей системы. Благодаря этому руль оказывается постоянно переложенным на некоторый угол, в данном случае влево.

То есть, у руля появляется некоторое, постоянное для данных условий, смещение нейтрального положения относительно диаметральной плоскости судна. Величина и знак этого смещения таковы, что возникающие от него гидродинамические воздействия на судно полностью компенсируют внешнее возмущение.

Интегральный сигнал накапливается медленно и в начальный период переходного процесса не сказывается на управлении судном. В дальнейшем переходный процесс происходит в соответствии с решением уравнения (9.8), которое на порядок выше, чем при отсутствии интегрального закона.

При работе авторулевого в следящем режиме (управление с помощью штурвала) система плохо реагирует на медленные изменения заданного значения курса. Поэтому в данном режиме работы интегрирующее звено устройства у современных авторулевых автоматически отключается.

При проектировании авторулевых параметры k_1 , k_2 , k_3 выбирают такими, чтобы была обеспечена устойчивость системы управления и чтобы переходный процесс имел заданные характеристики. Так, коэффициент k_1 устанавливают в зависимости от загрузки судна, k_2 практически выбирается в пределах 0÷50 сек. (на пульте авторулевого имеется регулятор "Производная"), k_3 лежит в пределах 0÷0,01 с⁻¹.

9.6. Функциональная схема авторулевого

Современные авторулевые имеют широкие функциональные возможности [3, 71], основными из которых являются: удержание судна на линии заданного курса – режим стабилизации; изменение курса на заданную величину – следящий режим. Рассмотрим более подробно в функциональном отношении работу системы автоматического управления курсом в режиме стабилизации. Типичная блок-схема САУ курсом представлена на рис. 9.7.



Рис. 9.7. Блок-схема САУ курсом судна

Независимо от конструктивных особенностей регулятор САУ курсом можно разделить на две части: блок $\mathcal{F}\Phi 3V$ формирования закона управления и следящую систему *CCVP* управления рулем. Регулятор и объект управления (судно), охваченные обратной связью, с помощью которой информация о состоянии объекта управления передается на вход регулятора, образуют замкнутую систему управления.

В авторулевых, реализующих ПИД-закон управления, *БФЗУ* представлен в виде трех звеньев: *П* – пропорционального; *Д* – дифференциального; *И* – интегрального.

В следящую систему *ССУР* входят: *УУ* – усилительное устройство; *ИД* – исполнительный двигатель; *РМ* – рулевая машина; *ОС*₁ – внутренняя жесткая отрицательная обратная связь от рулевого датчика; *ОС*₂ – внутренняя гибкая отрицательная обратная связь от исполнительного двигателя.

При автоматическом виде управления схема авторулевого имеет связь с гирокомпасом, текущие показания которого, как внешняя отрицательная обратная связь OC_3 , подаются на вход системы управления. Отклонение ψ курса K судна от заданного K_3 подается на вход $E\Phi 3V$, формирующего три сигнала: U_1 , U_2 и U_3 .

Сигнал $U_1 = k_1 \psi$ вырабатывается пропорциональным звеном $\mathcal{F} \Phi 3 \mathcal{Y}$ и является основным управляющим сигналом, пропорциональным углу отклонения

судна от курса.

Сигнал $U_2 = k_2 \dot{\psi}$ создается путем дифференцирования сигнала U_1 . Сигнал U_2 улучшает условия стабилизации судна на заданном курсе, обеспечивая погашение колебаний судна относительно линии заданного курса. Уровень воздействия сигнала U_2 можно устанавливать в зависимости от состояния моря.

Сигнал $U_3 = k_3 \int_{0}^{t} \psi \, dt$ создается путем интегрирования сигнала U_1 . Наличие

сигнала U_3 позволяет исключить несимметричное рыскание судна, обусловленное различными внешними воздействиями. Этот сигнал обеспечивает дополнительную перекладку руля на некоторый постоянный угол, чем компенсируется влияние внешнего несимметричного возмущения.

Перечисленные сигналы суммируются и поступают на вход усилительного устройства в виде суммарного управляющего напряжения $U_{\Sigma} = U_1 + U_2 + U_3$, изменение которого во времени и определяет задаваемый закон кладки руля – угол β_3 . Усиленный сигнал поступает на исполнительный двигатель UД, приводящий в действие рулевую машину *PM* судна, а, следовательно, и руль.

Одновременно с начавшейся перекладкой руля на вход следящей системы по каналу обратной связи OC_1 поступает сигнал $U_4 = k_4\beta$, пропорциональный величине угла перекладки руля. Этот сигнал формируется в рулевом датчике, механически связанном с рулем. Сигнал U_4 находится всегда в противофазе с сигналом U_1 . Он создает жесткую отрицательную обратную связь.

Перекладка руля происходит до тех пор, пока сигнал обратной связи U_4 не уравняется с управляющим сигналом $U_{\Sigma}(\beta_3)$. Отклонение руля приводит к возвращению судна на заданный курс. При этом происходит уменьшение управляющего сигнала $U_{\Sigma}(\beta_3)$ по отношению к сигналу U_4 . В результате сигнал на входе следящей системы меняет знак, что приводит к возвращению руля в исходное положение. Соответственно уменьшается сигнал обратной связи U_4 . Перекладка руля прекратится, когда оба сигнала вновь уравняются.

Сигнал U_4 оказывает ограничивающее действие на угол перекладки руля. С усилением волнения моря уровень сигнала U_4 увеличивают (с помощью регулятора). При этом ухудшается точность авторулевого (увеличивается рыскание судна), зато снижается число перекладок руля и уменьшается нагрузка на рулевую машину.

Величина входного сигнала, подаваемого на рулевую машину, определяет скорость перекладки руля $\dot{\beta}$. Для обеспечения устойчивости системы исполнительный механизм — руль и погашения автоколебаний пера руля вводится сигнал гибкой отрицательной обратной связи OC_2 , пропорциональный скорости перекладки руля: $U_5 = k_5 \dot{\beta}$. Сигнал U_5 подается на вход следящей системы, где он суммируется с другими сигналами, причем он также как и сигнал U_4 находится в противофазе по отношению к сигналу U_1 . Его действие проявляется в ограничении основного сигнала U_1 при больших углах перекладки руля.

Среднее значение рыскания в автоматическом режиме (при оптимальных положениях регуляторов "Производная" – сигнал U₂ и "Коэффициент обратной

связи" (КОС) – сигнал U_4) равно примерно 1° при волнении моря до 3 баллов и не превышает 3° при волнении моря до 5 баллов. Когда волнение моря свыше 5 баллов, авторулевой обеспечивает надежное удержание судна на курсе, но рыскание при этом будет более 3°.

* * *

В настоящее время широко используются авторулевые, позволяющие не только стабилизировать судно на постоянном курсе, но и осуществлять автоматическое управление движением судна по заданной траектории, выполнять повороты с заданным радиусом либо с заданной угловой скоростью. При этом они имеют сопряжение с навигационными приборами и комплексами, вырабатывающими необходимую информацию для управления судном, в том числе и информацию от систем позиционирования – GPS и DGPS.

Все большее применение находят авторулевые, которые могут адаптироваться к внешним воздействиям среды и к динамике судна. В режиме стабилизации курса адаптивные авторулевые являются самонастраивающимися и используют ПИД-закон управления, как и авторулевые с ручной настройкой.

В самонастраивающихся авторулевых условно можно выделить системы с пассивной, активной и комбинированной адаптацией [71].

При пассивной адаптации коэффициенты закона регулирования находятся по определенной программе в зависимости от результатов контроля внешних возмущений.

Активная адаптация обеспечивает экстремальное значение критериев качества управления (экономический критерий, критерий безопасности). В этих системах запрограммирована методика поиска значений параметров регулятора и предусмотрена возможность оперативной оценки качества работы.

Авторулевые с комбинированной адаптацией используют для получения оптимального режима работы как активную, так и пассивную адаптацию к изменяющимся условиям.

В качестве примера приведем функциональные возможности адаптивного авторулевого «Корракс», Россия [6].

Авторулевой обеспечивает четыре режима управления – "Автомат", "Следящий", "Простой-дистанционный" и "Ручной".

В автоматическом режиме имеются пять вариантов:

• "Точный" – в этом случае выполняется автоматическое удержание судна на заданном курсе с максимальной точностью;

• "Адаптивный" – осуществляет удержание судна на заданном курсе с обеспечением адаптации к изменяющимся внешним условиям плавания;

• "Экономичный" – судно удерживается на заданном курсе, но при этом производится минимальное число перекладок руля;

• "Циркуляция влево/вправо" – автоматически выполняется циркуляция суда влево/вправо по заданному радиусу циркуляции;

В вариантах управления "Точный", "Адаптивный" и "Экономичный" мо-

гут быть выбраны следующие режимы движения судна:

- "Заданный курс" – автоматическое удержание судна на заданном курсе;

- "Заданная траектория" – осуществляет удержание судна на заданном курсе с учетом дрейфа, если имеется информация о параметрах движения судна в географической системе координат;

- "Маневрирование" – выполняется автоматический выход судна на новый курс по заданной программе;

- "Расхождение" – обеспечивается автоматическое расхождение со встречными судами.

В *режиме* "*Следящий*" – курсоуказатель отключается от схемы авторулевого и судном управляет оператор (рулевой матрос) посредством штурвала. При этом обеспечивается индикация прогнозирования значения курса, на который выйдет судно, если в данный момент времени начать перекладку руля для одерживания судна.

В *режиме* "Простой-дистанционный" перекладка руля осуществляется при нажатии кнопок включения электрогидравлического прибора рулевой машины;

Режим управления "Ручной" является аварийным. Управление рулем в этом случае производится вручную с использованием рукоятки, находящейся непосредственно на электрогидравлическом приборе.

В режиме функционирования "Работа" авторулевой управляет судном с использованием всех режимов и вариантов управления.

Средняя величина рыскания в автоматическом режиме управления (при скорости хода судна не менее 5 уз) не превышает 1°, если волнение моря не более 3 баллов и 2° в случае волнения моря до 5 баллов.

Имеются сведения об авторулевых, обеспечивающих в автоматическом режиме удержание судна на заданном курсе с точностью до 0,1°.

Рассмотренные выше законы управления рулем реализованы в любом авторулевом. Современные авторулевые обеспечивают не только автоматическое удержание заданного курса судна, но и имеют ряд дополнительных функций существенно влияющих на качество управления судном в целом. К таким авторулевым можно отнести систему управления движением JP4000, в составе которой имеется авторулевой AP4000 (компания "NAVIS Ingineering", Норвегия). Данная система является лучшим решением задач, связанными с динамическим позиционированием судов.

При движении судна вперед на высокой скорости система JP4000 функционирует как авторулевой, управляя только курсом судна с помощью рулевого устройства или траекторией судна, используя стороннюю электроннокартографическую и навигационную систему. В режиме авторулевого главная судовая силовая установка и подруливающие устройства не задействованы, но при этом авторулевой AP4000 является составной частью системы JP4000.

В режиме маневрирования, швартовки и удержания позиции система управления JP4000 позволяет капитану управлять судном свободно в любом
направлении, вручную задав необходимое продольное и поперечное перемещение, скорость движения и вращение судна с помощью одного 3-х осевого *джойстика*.

Панель управления с функциональным дисплеем и джойстиком показана на рис 9.8.



Рис. 9.8. Панель управления авторулевого АР4000

Система автоматически вычисляет требуемое количество тяги, которое будет выделено от каждого движителя, заменяя собой обычные способы управления каждым движителем вручную. При этом в данных режимах управления системой JP4000 задается направление и сила тяги с использованием всех движительных установок и подруливающих устройств.

Система JP4000 также способна обеспечивать автоматическое удержание заданного курса судна при маневрировании. Это означает, что система автоматически удерживает заданный курс, когда оператор свободно управляет движением судна в поперечном и продольном направлении; в данном случае нет необходимости в компенсации возможного вращения судна, которое может возникнуть в результате ошибочных действий со стороны оператора.

Модульная концепция панели управления AP4000 позволяет интегрировать авторулевой в любую навигационную консоль без ущерба для общего стиля, в котором выполнен мостик.

На цветном антибликовом LCD экране высокого разрешения с диагональю 6,5 дюймов максимально подробно представлена вся необходимая оператору функциональная информация: список сообщений тревожной сигнализации, заданный и текущий курс, заданные и текущие углы перекладки рулей, угловая скорость поворота, текущая скорость судна и иные данные в разных режимах работы авторулевого AP4000.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Нечаев П.А., Кудревич Н.Б. Электронавигационные приборы. Изд. 3-е. Изд-во «Транспорт», 1974. 400 с.
- 2. Электронавигационные приборы: Учебник для судовод. спец. высш. инж. мор. уч-щ / И.А. Блинов, А.В. Жерлаков, В.К. Перфильев и др. 4-е изд., перераб и доп. М.: Транспорт, 1980. 447 с.
- Смирнов Е.Л., Яловенко А.В., Якушенков А.А. Технические средства судовождения: Теория: Учебник для вузов / Под. ред. Е.Л. Смирнова. М.: Транспорт, 1988. – 376 с.
- Технические средства судовождения: Учеб. для вузов / В.И. Дмитриев, В.Ф. Евменов, О.Г. Каратаев, В.Д. Ракитин. Под ред. О.Г.Каратаева. – М.: Транспорт, 1990. – 320 с.
- 5. Смирнов Е.Л., Яловенко А.В., Воронов В.В. Технические средства судовождения. Теория: Учебник для вузов. СПб.: "Элмор", 1996. 544 с.
- Воронов В.В., Перфильев В.К., Яловенко А.В., Технические средства судовождения: Конструкция и эксплуатация: Учебник для вузов/ Под ред. Е.Л. Смирнова. – М.: Транспорт, 1988. – 335 с.
- Смирнов Е.Л., Яловенко А.В., Перфильев В.К., Воронов В.В., Сизов В.В., Технические средства судовождения. Том 2. Конструкция и эксплуатация: Учебник для вузов. – СПб.: "Элмор", 2000. – 656 с.
- Кондрашихин В.Т. Определение места судна. М: Транспорт, 1981. 206 с.
- 9. Груздев Н.М. Оценка точности морского судовождения. М: Транспорт, 1989. 191 с.
- 10.Кожухов В.П., Григорьев В.В., Лукин С.М. Математические основы судовождения: Учебник для вузов мор. трансп. 2-изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1987. – 208 с.
- 11. Рекомендации по организации штурманской службы на морских судах Украины (РШСУ – 98) – Одесса, 1998. – 111 с.
- 12. 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.: изд-во ГМА им. адм С.О. Макарова. 2009. 84 с.
- 13. Морская навигационная техника. Справочник. Под общ. ред. Е.Л. Смирнова. СПб.: "Элмор", 2002. 224 с.
- 14.Installation and Service manual Gyro Compass STD 20/22. Hamburg, Germany.
- 15.NAVIGAT X MK2. Operation, Installation and Service Manual. Northrope Grumman Sperry Marine B.V. Hamburg, Germany.
- 16.Воронов В.В., Яловенко А.В. Гирокомпас «Вега»: Учеб пособие. М.: В\О «Мортехинформреклама», 1988. – 40 с.
- 17.В.А. Матвеев, В.П. Подчезерцев, В.В. Фатеев. Гироскопические стабилизаторы на динамически настраиваемых гироскопах. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005. – 103 с.

- 18.Шереметьев А.Г. Волоконно-оптический гироскоп. М.: Радио и связь, 1987. 152 с.
- 19. Филатов Ф.В. Оптические гироскопы. Санкт-Петербург: ГНЦРФ ЦНИИ «Электроприбор», 2005 139с.
- 20.Волоконно-оптические датчики. Вводный курс для инженеров и научных работников. Под ред. Э. Удда. Москва: Техносфера, 2008. 520 с.
- 21.Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения безпилотных маневренных летательных аппаратов. / Под ред. М.Н.Красильщикова, Г.Г.Себрякова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 556 с.
- 22.Кузнецов А.Г., Молчанов А.В., Чиркин М.В., Измайлов Е.А. Прецизионный лазерный гироскоп для автономной инерциальной навигации // Квантовая электроника. – 2015. – Т. 45. № 1. – С. 78-88.
- 23. Ус Н.А., Задорожний С.П. Кольцевой моноблочный гироскоп с полупроводниковым лазерным диодом: особенности конструктивнотехнологического решения. – Радиотехника и связь. – с. 65 – 70. «Военновоздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж.
- 24.Болотников С.А., Вереникина Н.М., Алексейченко А.А. Лазерные информационно-измерительные системы. Часть 3: Учебное пособие – М: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006 – 96 с.
- 25. Листвин В.Н., Логозинский В.Н. Волоконно-оптический датчик вращения (инженерное руководство). 2005.
- 26.Миниатрные волоконно-оптические датчики вращения. Электроника, 8/2006: http://www.fizoptika.com.
- 27.Волоконно-оптические датчики угловой скорости компании «Оптолинк». Москва, МИЭТ, завод «Протон», ООО «Оптолинк».
- 28.NAVIGAT 3000. Operation, Installation and Service Manual. Northrope Grumman Sperry Marine B.V. Hamburg, Germany.
- 29.2013, №3 (25), Судостроение и флот, Электроника и оптика. Новые технологии для точной инерциальной навигации.
- 30.IXSEA OCEANO SAS- 01/01/2008.
- 31.Основы спутниковой навигации. GPS-X-02007. 132 с.
- 32.Вагущенко Л.Л. Интегрированные системы ходового мостика. Одесса: Латстар, 2003. 169 с.
- 33.Спутниковый компас «Furuno», модель SC-50 / Руководство оператора. 2004. 79 с. www.furuno.com.ru.
- 34. Furuno Electric Co., Ltd. Operator's manual. Satellite compass SC-70/SC130
- 35.Кожухов В.П., Воронов В.В., Григорьев В.В. Магнитные компасы: Учебник для вузов морск. трансп. М.: Транспорт, 1981. 212 с.
- 36.Нечаев П.А., Григорьев В.В. Магнитно-компасное дело: Учебник для мореходных училищ. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1983. 239 с.
- 37.Magnetic Reflector Compass Binnacle REFLECTA/3. Operation Installation. Cassens & Plath GmbH. Germany.
- 38.Бараночников М.Л. Микромагнитоэлектроника. Т. 1. М: ДМК Пресс, 2001. 544 с. ил. Электронная версия 373 с.

- 39. Rion Technology. HCR705В Высокоточный гирокомпас.
- 40. Румынская И. А. Основы гидроакустики [Текст]: Учебник для судостроит. техникумов. – Л: Судостроение, 1979. – 213 с.: ил.; 21 см.
- 41.Клещев А.А., Клюкин И.И. Основы гидроакустики: Учебник. Л.: Судостроение, 1987. – 224 с., ил.
- 42. Мореходные таблицы (МТ-75). ГУНИО.
- 43.Пьезоэлектрический эффект. Свойства пьезокерамики: http://engineering-solutions.ru/ultrasound/piezomaterials/
- 44.Карлик Я.С., Марапулец Ю.В. Рыбопромысловая гидроакустика. Учебнометодическе пособие. – Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2004. – 260 с.
- 45.Смарышев М.Д., Добровольский Ю. Ю. Гидроакустические антенны. Справочник по расчету направленных свойств гидроакустических антенн. – Л., Судостроение, 1984. – 304 с., ил.
- 46.Р.С. Хансен. Фазированные антенные решетки. Второе издание. Москва: Техносфера, 2012. – 560 с.
- 47.Вендик О.Г. Фазированная антенная решетка глаза радиотехнической системы. Соросовский образовательный журнал, №2, 1997, с. 115 120.
- 48.Павлов С., Филиппов А. Фазированные антенные решетки. Обзор компонентной базы для реализации приемопередающих модулей. Компоненты и технологии, №7, 2014, с. 57 – 62.
- 49. Гидроукустический преобрпзователь. Фазированная антенная решётка. ОАО "НИИ "Элпа":

www.elpapiezo.ru/Catalogs/Catalog_of_piezoelectric_devices.pdf

- 50.Принципы работы сонаров и подводная акустика: как, зачем и почему: https://habr.com/post/191594/
- 51. Furuno Electric Co., Ltd. Руководство оператора. Навигационный эхолот. Модель FE-700.
- 52. Samyung Enc. Руководство оператора. Навигационный эхолот. Модель SES-5000.
- 53.Гончар А.И., Шлычек Л.И., Голод О.С., Гидролокаторы бокового обзора. Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану), №1, 2004, с. 22 – 27.
- 54. НОУ ИНТУИТ. Лекция 6: Гидролокаторы..
- 55.Сонар FURUNO CH-250: http://www.nav-tech.ru/.
- 56.Furuno Electric Co., Ltd. Operator's manual. Dual frequensy Searchlight sonar. Model CH-300.
- 57.Впередсмотрящий гидролокатор: aquamarket.spb.ru/pdf-docs/twin_Rus.pdf.
- 58.Диагностика подводных переходов. Многолучевые эхолоты: www.ptfsurgut.ru/download.php?file=1332392728.pdf
- 59.Голод О.С., Гончар А.И., Донченко С.И. Многолучевые эхолоты. Гідроакустичний журнал (Проблеми, методи та засоби досліджень Світового океану), №2, 2005, с. 34 – 49.
- 60. Гринь Г.А. Современные технологии диагностики подводных переходов трубопроводов приборным комплексом на основе многолучевого эхоло-

та: http://www.gisa.ru/51326.html/.

- 61.Эхолот SeaBat 8125: m-geo.ru/files/files/Ru_SeaBat%208125-H_брошюра.pdf
- 62. Гринь Г.А., Мурзинцев П.П. О применении современных технических средств для высокоточной съемки рельефа дна и подводных объектов. ООО ПТФ «Возрождение», Сургут; СГГА, Новосибирск, 2011.
- 63. Абсолютные и относительные лаги / К.А. Виноградов, В.Н. Кошкарев, Б.А. Осюхин, А.А. Хребтов: Справочник. Л.: Судостроение, 1990, 264 с.: ил.
- 64. Судовые измерители скорости / А.А. Хребтов, В.Н. Кошкарев, Б.А. Осюхин и др.: Справочник. – Л.: Судостроение, 1978, - 286 с.: ил.
- 65.Судовые измерители скорости / Б.Г. Абрамович: Методические указания. МГУ им. Г.И. Невельского, Владивосток, 2005, 44 с.
- 66. Доплер лаг DS-60: Furuno Electric Co., Ltd. Руководство оператора.
- 67.Доплеровский лаг SAM 4682: http://www.everthronmarine.com.ar/assets/4682.pdf
- 68. Студеникин А.И. Технические средства судовождения/ Конспект лекций/ МГА им. Ф.Ф. Ушакова/ Новороссийск. – 2008.
- 69.https://www.consilium.se/sites/default/files/sal_b700301a2_1301_1.pdf.
- 70.Комбинированный докинговый лаг и эхолот SAL-T3: http://www.getltd.ru/i.pl?category=61&item=75.
- 71.Вагущенко Л.Л., Цымбал Н.Н. Системы автоматического управления движением судна. 3-е изд., перераб. и доп.- Одесса: Фенікс, 2007. 328 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ГИРОСКОП И ЕГО СВОЙСТВА	5
1.1. Определение понятия "гироскоп"	5
1.2. Подвесы, применяемые в гироскопах	7
1.3. Общий обзор свойств гироскопа	10
1.4. Характеристики вращательного движения гироскопа	12
1.5. Свойства гироскопа, их подтверждение	13
2. ГИРОКОМПАСЫ С АВТОНОМНЫМЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ Элементом	18
2.1. Использование гироскопа в качестве курсоуказателя	18
2.1.1. Горизонтная система координат и ее вращение	18
2.1.2. Видимое движение свободного гироскопа	19
2.1.3. Способ превращения гироскопа в гирокомпас	21
2.2. Незатухающие колебания чувствительного элемента гирокомпаса .	23
2.2.1. Процесс образования незатухающих колебаний	23
2.2.2. Анализ незатухающих колебаний	27
2.3. Затухающие колебания чувствительного элемента гирокомпаса	30
2.3.1. Масляный успокойтель	30
2.3.2. Процесс образования затухающих колеоаний	32
2.4. Левиании гирокомпаса и их учет	38
2.4.1. Скоростная девиация гирокомпаса	38
2.4.2. Девиации гирокомпаса на маневрирующем судне	42
2.4.3. Суммарная инерционная девиация	50
2.4.4. Применение математических моделей для компенсации_инерционных	56
девиации	50
2.5. Основные молели гирокомпасов с автономным чувствительным	
элементом	63
2.5.1. Гирокомпасы типа "Курс"	64
2.5.2. Гирокомпасы класса "Standard"	70
2.5.3. Гирокомпасы класса «Sperry»	76
3. ГИРОКОМПАСЫ С КОРРЕКТИРУЕМЫМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ	
ЭЛЕМЕНТОМ (ГК с КЧЭ)	83
3.1. Способ реализации и анализ работы (базовая модель)	83

3.1.1. Принцип действия	
3.1.2. Анализ работы гирокомпаса	
3.1.3. Девиации гирокомпаса и способы их уменьшения	
3.1.4. Технические данные некоторых ГК с КЧЭ	95
3.2. Новое поколение гирокомпасов с корректируемым чувствитель	ным
элементом	102
3.2.1. Динамически настраиваемый гироскоп	102
3.2.2. Базовая модель ГК с КЧЭ, использующая ДНГ	105
3.2.3. Некоторые модели I К с КЧЭ, построенные на ДНГ	110
4. БЕСПЛАТФОРМЕННЫЕ ГИРОГОРИЗОНТКОМПАСЫ	116
4.1. Эффект Саньяка	116
4.2. Принцип действия лазерных источника света	119
4.3. Кольцевой лазерный гироскоп	123
4.4. Волоконно-оптический гироскоп (ВОГ)	129
4.5. Особенности конструкции ВОГ	134
4.6. Волоконно-оптический компас	138
4.7. Понятие об инерциальных навигационных системах	140
5. СПУТНИКОВЫЕ КОМПАСЫ	146
5.1. Краткий обзор спутниковых навигационных систем	146
5.2. Принцип определения курса в спутниковом компасе	148
5.3. Некоторые модели спутниковых компасов	151
6. МАГНИТНЫЕ КОМПАСЫ	155
6.1. Магнитина поля Земли и сулиа	155
6.1.1. Основные понятия о магнетизме	155
6.1.2. Магнитное поле Земли	158
6.2. Девиация магнитного компаса	163
6.2.1. Уравнения Пуассона	163
6.2.2. Судовые магнитные силы	165
6.2.3. Основная формула девиации. Характер девиаций	168
6.3. Уничтожение девиации магнитного компаса	170
6.3.1. Определение девиации	170
6.3.2. Уничтожение полукруговой девиации	173
0.5.5. у ничтожение четвертной девиации	1/0
6.3.5. Составление таблицы дериации	178 180
6.3.6. Повышение точности магнитного компаса	180

6.4. Примеры моделей магнитных компасов	183 183
6.4.2. Флюксгейт компасы	185
7. ГИДРОАКУСТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ	190
7.1. Распространение акустических волн в водной среде	190 190
7.1.2. Особенности распространения звука в море	193
 7.2.1 Идроакустические антенны 7.2.1. Магнитострикционные преобразователи 7.2.2. Пьезоэлектрические преобразователи 7.2.3. Направленное действие гидроакустических антенн 	200 200 201 201
7.2.4. Излучение и прием звука7.2.5. Фазированные антенные решетки	207
 7.3. Эхолоты	215 215 217 221
 7.4. Гидролокаторы 7.4.1. Общая характеристика гидролокаторов 7.4.2. Принцип действия гидролокатора 7.4.3. Примеры промышленных гидролокаторов 	226 226 228 230
7.5. Многолучевые эхолоты 7.5.1. Общая характеристика и принцип действия_многолучевых эхолотов 7.5.2. Интерферометры	234 234 238
8. СУДОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛИ СКОРОСТИ	240
 8.1. Индукционные лаги. 8.1.1. Принцип действия	240 240 243 243 245
8.2. Гидроакустические доплеровские лаги	247
 8.2.1. Основы теории	247 254 258 260
8.3. Гидроакустические корреляционные лаги	263
8.3.1. Принцип действия8.3.2. Функциональная схема8.3.3 Показатели точности	263 267 268

8.3.4. Технические характеристики некоторых зарубежных	
корреляционных лагов	. 269
9. АВТОРУЛЕВЫЕ	. 276
9.1. Принципы построения авторулевых	. 276
9.2. Устойчивость САУ	. 277
9.3. Пропорциональный закон управления	. 278
9.4. Пропорционально-дифференциальный закон управления	. 280
9.5. ПИД-закон управления	. 282
9.6. Функциональная схема авторулевого	. 284
ЛИТЕРАТУРА	. 289

Навчальне видання

ЧАПЧАЙ Петро Олексійович

Технічні засоби судноводіння

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Рос. мовою

Підписано до друку 04.02.2019. Формат 60х84/16. Папір офсетний. Обл. вид. арк. 16,74. Тираж 300 прим. Замовлення № И19-03-08

> НУ «ОМА» Свідоцтво ДК № 1292 від 20.03.2003 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 8 тел./факс: (0482) 34-14-12 publish@ma.odessa.ua

Чапчай П.О.

Технічні засоби судноводіння: навчальний посібник / П.О. Чапчай – Одеса: НУ «ОМА», 2019 – 298 с. Рос. мовою.

Розглянуто принципи та теорія роботи маятникових, корегованих та безплатформених гірокомпасів, супутникових вказівників курсу судна, а також магнітних компасів. Дано огляд принципу дії та будови гідроакустичних приладів: навігаційних ехолотів, гідролокаторів, багатопроміневих ехолотів, гідроакустичних вимірювачів швидкості судна, а також індукційних лагів. Розглянуто основи роботи авторульових.

У якості довідникового матеріалу наведені приклади реальних сучасних приладів, їх вид, комплектація, особливості конструкції та основні технічні характеристики.

Призначений для здобувачів вищої освіти, які навчаються за спеціальністю "Річковий та морський транспорт" спеціалізації "Судноводіння".

УДК 629.5.052(075.8)

Ч 19