

## СТРЕЛОЧНЫЕ МАГНИТНЫЕ КОМПАСЫ

402634

402634.  
629.12.053 Дестерев А.В.  
Д-26 Стрелочное  
магнитное компас  
соз. 1984г.




1984

24

**Ключевые слова:** классификация магнитных компасов, чувствительный элемент стрелочный магнитный, качка, вибрация, температура, оценка погрешностей, реакции динамические, стандартизация, надежность компасов

Обзор посвящен вопросам создания и анализа особенностей эксплуатации стрелочных магнитных компасов. В нем приводится классификация компасов, формулируются принципы расчета в целях получения допустимого значения погрешности при различных видах возмущений, в том числе при случайном воздействии дестабилизирующих факторов. Оцениваются диапазоны динамических реакций и приводится структура основных функциональных элементов. Анализируются причины появления первичных погрешностей, каналы их прохождения, распределение их плотностей вероятностей, приводятся вероятностные оценки суммарных погрешностей. Значительное место уделено статистическому исследованию надежности компасов. Дается описание конструкций современных магнитных компасов, разработанных в соответствии со стандартами ИСО.

В обзоре использованы литературные источники с 1959 по 1984 г.

Обзор предназначен для научных и инженерно-технических работников, занимающихся проектированием и эксплуатацией магнитных компасов

Автор Н. Д. ДЕГТЕРЕВ

## ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Правилами по конвенционному оборудованию морских судов все суда оснащаются магнитными компасами независимо от наличия на них других навигационных средств, причем на малых и средних судах магнитный компас является единственным измерителем курса. Широкое распространение магнитный компас получил также в авиации, геодезии, в подводных аппаратах различного назначения, он является незаменимым спортивно-туристским прибором.

В связи с тенденцией последних лет к повышению рациональности конструирования судов, с увеличением их тоннажа и мощности двигательных установок [32] значительно возросли уровни механических возмущений в местах расположения магнитных компасов, что привело к увеличению их погрешностей. Поэтому возникла необходимость поиска путей снижения погрешностей за счет выбора конструктивных параметров компасов и защиты их от воздействия возмущающих факторов. Появился ряд работ [12, 15, 17, 22, 23, 37], рассматривающих эти вопросы. Однако систематизированных сведений об оценке погрешностей и о конструкторских приемах их снижения в литературе нет.

В настоящем обзоре сделана попытка восполнить этот пробел. В основном освещаются проблемы, играющие важную роль при проектировании и эксплуатации стрелочных магнитных компасов, но не нашедшие в литературе должного отражения или имеющие в различных источниках разное толкование.

В обзоре рассматриваются современные вопросы теории и расчета стрелочного магнитного чувствительного элемента, особенности возникновения погрешностей компасов при вибрации и качке основания, исследуются динамические реакции в опорном устройстве, оцениваются схемы температурной компенсации, приводятся рекомендации по снижению погрешностей, способы защиты основных функциональных узлов от перегрузок, обосновываются методы лабораторных испытаний, имитирующих наиболее неблагоприятные эксплуатационные режимы. Кроме того, уделяется внимание вопросам терминологии,

надежности и стандартизации магнитных компасов, а также описываются конструкции современных унифицированных магнитных компасов, созданных под руководством автора обзора (компасы КМ69 и КМ100), Л. А. Кардашинского и В. Ф. Уланова (компас КМ145).

Вопросы отклонения магнитного чувствительного элемента при пространственных колебаниях основания решены автором совместно с С. А. Понырком, вопросы стандартизации и терминологии — с Н. Е. Чернышевой, а материалы по статистической надежности компасов обрабатывались и систематизировались совместно с Л. Ш. Окунем и О. М. Карпенко. Автор благодарит коллег по совместным исследованиям.

В обзоре не отражено современное состояние развития индукционных магнитных компасов, а также устройств и методов, используемых при компенсации магнитной девиации, в связи со специфичностью этих вопросов и целесообразностью их изложения в отдельных работах.

## 1. ВОПРОСЫ ТЕРМИНОЛОГИИ И КЛАССИФИКАЦИИ МАГНИТНЫХ КОМПАСОВ

### 1.1. Обоснование основных терминов

Несмотря на то что магнитный компас является древнейшим навигационным прибором [23] со сложившейся областью применения, в справочной и научно-технической литературе до сих пор нет единой магнитно-компасной терминологии. Это прежде всего относится к понятию «компас». Данное родовое понятие выражается терминами «компас», «курсоуказатель», «указатель курса» [16].

Наиболее удачным следует признать термин «компас», поскольку он удовлетворяет следующим требованиям:

- соответствие выражаемому понятию (*compasso* — измеряю);
- удобство для образования видовых терминов (магнитный компас, главный компас и др.);
- краткость;
- использование термина в качестве международного.

Наиболее существенным видовым признаком различных классов компасов является принцип действия их чувствительных элементов, положенный в основу классификации в нормативном документе [14]. По этому признаку магнитный компас — это компас с магнитным чувствительным элементом (МЧЭ). Однако, несмотря на наличие в этом определении видового признака «магнитный», данный термин не полностью выражает наиболее существенную особенность, состоящую в связи измеренного магнитным компасом курса с характеристиками магнитного поля Земли (МПЗ). Эта особенность учтена в приведенном в стандарте ИСО\* [26] определении: «Магнитный компас — это компас, чувствительные свойства которого зависят от магнетизма Земли». Но это определение не связывается с соподчиненными видовыми признаками [14]. Принятой в работах [14] и [26] классификации компасов удовлетворяет, на наш взгляд, следующее обобщающее определение: *магнитный компас — это компас, магнитный чувствительный элемент которого основан на использовании свойств горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли.*

Однако для научно-технической документации это определение носит слишком общий характер. Из него, как родового, по признаку «назначение» могут быть выделены соподчиненные видовые понятия и даны их определения.

\* ИСО — Международная организация по стандартизации

Так, для визуальных магнитных компасов при характеристике назначения должна быть отмечена их существенная особенность, состоящая в измерении курса относительно плоскости магнитного меридиана. Поскольку этот курс называется магнитным, компас в этом случае может быть определен как компас для измерения магнитного курса.

Бытующее определение, по которому магнитный компас предназначен\* для указания (или измерения) компасного курса, неточно. Во-первых, компас измеряет, а затем указывает курс, при этом операция «измерение» в общем случае включает в себя операцию «указание». Во-вторых, компасный курс — это магнитный курс минус погрешность от девиации, которая является систематической погрешностью компаса. Ясно, что компас не может предназначаться для измерения курса с погрешностью, т. е. компасного курса. Более того, погрешность от девиации устраняется компенсаторами девиации, входящими в состав компаса, а ее остаточное значение учитывается в таблице остаточной девиации. Использование термина «компасный курс» правомерно тогда, когда речь идет о показаниях магнитного компаса.

Определение по признаку «назначение» не охватывает ряд дистанционных магнитных компасов, снабженных устройствами для ввода значения склонения вектора индукции МПЗ. В них одна часть отсчетных устройств показывает компасный курс, другая (это, как правило, репитер), в которую введена систематическая поправка, учитывающая значения склонения и остаточной девиации, — истинный курс. Такие магнитные компасы могут быть определены как компасы, предназначенные для измерения магнитного курса и выработки истинного курса объекта.

Необходимо также определение таких важных понятий, как магнитный чувствительный элемент и первичный измерительный преобразователь магнитного компаса.

Магнитный чувствительный элемент (МЧЭ) магнитного компаса — это элемент его структурной схемы, находящийся под непосредственным воздействием горизонтальной составляющей индукции МПЗ и вырабатывающий сигнал в форме, удобной для дальнейшего преобразования. В стрелочном магнитном компасе — это постоянный магнит или система постоянных магнитов, в индукционном магнитном компасе — это элемент из магнитомягкого железа, намагничивающийся пропорционально действующей на него индукции МПЗ.

Первичный измерительный преобразователь, или датчик [13] магнитного компаса — это техническое устройство, служащее для выработки сигнала измерительной информации о магнитном курсе в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразо-

вания, обработки, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем. Первичным преобразователем стрелочного компаса является МЧЭ на опорном устройстве, имеющий возможность вращаться под действием МПЗ. В качестве первичного измерительного преобразователя индукционного магнитного компаса чаще всего используется феррозонд.

## 1.2. Классификация магнитных компасов

Все магнитные компасы (МК) могут быть классифицированы по следующим признакам [43]:

- по принципу действия первичного измерительного преобразователя;

- по наличию и виду дистанционной передачи;

- по назначению.

Классификация по принципу действия первичного измерительного преобразователя является основной [18].

В качестве первичных измерительных преобразователей могут быть использованы:

- механические преобразователи, использующие взаимодействие магнита или элемента тока с исследуемым магнитным полем, например магнитная стрелка на острие;

- индукционные преобразователи, основанные на явлении электромагнитной индукции, — пассивные и активные индукционные преобразователи, в частности к последним относятся различные типы измерительных генераторов, вибро- и феррозонды;

- гальваномангнитные преобразователи, в которых используются физические явления, возникающие при воздействии магнитного поля на движущийся заряд. К ним относятся преобразователи Холла, преобразователи, основанные на изменении электрического сопротивления (магниторезисторы, магнитодиоды, магнитотранзисторы), электронные трубки и др.;

- квантовые преобразователи, основанные на использовании явления магнитного резонанса, заключающемся в избирательном поглощении или излучении электромагнитных волн веществами, помещенные в магнитное поле.

Особенности принципов действия первичных измерительных преобразователей могут быть выражены видовыми терминами, которые должны располагаться перед родовым термином, например стрелочный, индукционный, холловский, квантово-оптический МК.

По наличию дистанционной передачи МК подразделяются на визуальные и дистанционные. Стрелочный и электронный (на электронной трубке) МК могут быть как визуальными, так и дистанционными, остальные — только дистанционными. Если стрелочный МК является дистанционным, то при его определении вводится дополнительный видовой признак, отражающий особенность съема сигнала с измерительного преобразователя

\* Выделено автором.

(электролитический, фотоэлектрический, оптический, холловский, индукционный, емкостный и др.). В свою очередь, оптические стрелочные МК могут подразделяться на перископические, волоконно-оптические и др.

В МК иногда используются гироскопические преобразователи для фильтрации погрешностей, вызванных в основном качкой. Наличие гироскопических преобразователей в таких МК — есть общий видовой признак МК, следовательно, возможно использование терминов «гиромагнитный компас», «стрелочный гиромагнитный компас», «индукционный гиромагнитный компас» и т. п.

По назначению [45] МК бывают морские, авиационные, ручные и т. п. Морские МК подразделяются на судовые, катерные и шлюпочные, судовые и катерные, в свою очередь, — на главные и путевые.

Магнитные компасы унифицируются по типоразмерам (в дальнейшем — типам). Типы стрелочных МК устанавливаются в зависимости от диаметров их картушек, поскольку диаметр картушки является наиболее общим параметром компаса, определяющим его основные статические и динамические характеристики. Так, компасы типов КМ69, КМ100 и КМ145 имеют диаметры картушек соответственно 69, 100 и 145 мм. Каждый тип МК предназначен для эксплуатации на определенных объектах: компас КМ69 — на малых катерах, шлюпках и аквaplанах; компас КМ100 — на судах ограниченного района плавания, катерах, яхтах и спасательных шлюпках; компас КМ145 — на судах неограниченного района плавания.

Магнитные компасы каждого типа имеют ряд модификаций, отличающихся друг от друга назначением и составом функциональных устройств. Номера модификаций обозначаются арабскими цифрами через дефис после обозначения типа компаса; например, компас КМ100-2 — вторая модификация компаса КМ100.

### 1.3. Функциональная схема стрелочного магнитного компаса

В морском флоте наибольшее распространение получили стрелочные МК. Схема стрелочного МК приведена на рис. 1.1.

Основным элементом стрелочного МК является стрелочный МЧЭ. В результате взаимодействия магнитного момента МЧЭ с индукцией МПЗ в МЧЭ возникает вращающий момент, направленный на совмещение его магнитной оси с направлением вектора индукции МПЗ. МЧЭ устанавливается на «точечное» опорное устройство — острие иглы или керн на подпятнике — и помещается в герметичный корпус, называемый котелком. Для уменьшения опорной силы, и следовательно погрешности от трения, полость котелка заполняется жидкостью, а в конструкцию МЧЭ вводится поплавков. Выбором вязкости жидкости дости-

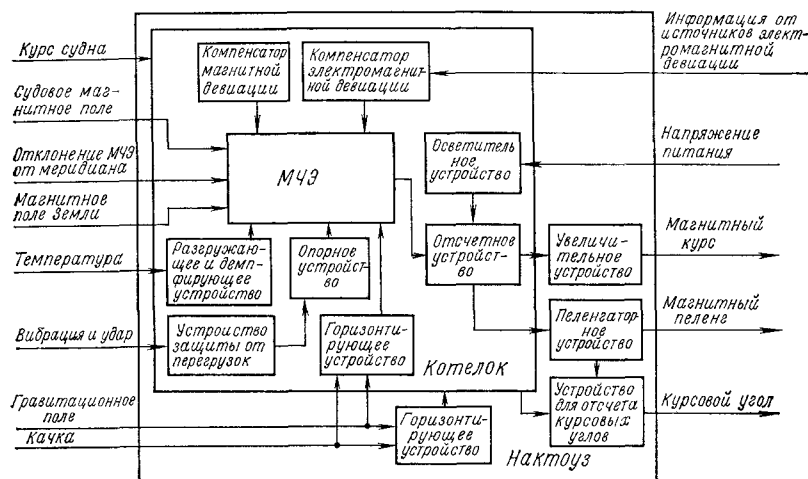


Рис. 1.1. Функциональная схема магнитного компаса

гается необходимое демпфирование колебаний МЧЭ, являющегося магнитным маятником. Для компенсации изменения объема жидкости при изменении температуры в котелке предусматривается устройство температурной компенсации. Для этого используются мембраны или сильфоны, а также воздушные объемы, заключенные в эластичные оболочки или размещенные в компенсационных камерах.

Поплавок и груз, в качестве которого часто используются магниты, представляют собой физический маятник, выполняющий функции горизонтирующего устройства МЧЭ. Восстанавливающий момент физического маятника во много раз (обычно в 50... 200 раз) превышает восстанавливающий момент магнитного маятника, поэтому погрешность удержания МЧЭ в плоскости горизонта даже при максимальных изменениях вертикальной составляющей индукции МПЗ не более  $\pm 2^\circ$ . При горизонтальном положении МЧЭ он находится под действием только горизонтальной составляющей индукции МПЗ.

Отсчетным устройством МК является шкальное устройство. Оно состоит из шкалы ( картушки) с градусными, цифровыми и часто буквенными отметками, а также курсового указателя [8]. Картушка крепится на МЧЭ в горизонтальной плоскости, проходящей через его точку опоры. Картушки морских МК, предназначенных для судов ограниченного и неограниченного районов плавания, в соответствии с требованиями ИСО и ИМО\* [27, 29, 31] градуируются через один градус. Их оцифровка должна выполняться через  $10^\circ$  трехзначными цифровыми

\* ИМО — Международная морская организация.

отметками. Главные румбы цифровыми отметками могут не отмечаться, но обязательно должны обозначаться литерами N, E, S, W; могут также отмечаться и четвертные румбы. Знак N иногда заменяется каким-либо другим, например символом фирмы предприятия-изготовителя МК. Градуировка и оцифровка картушек МК для шлюпок, катеров и т. п. плавсредств обычно упрощается. Курсовой указатель крепится на котелке. Он выполняется в виде нити, черты, отметки и т. п. Использование термина «курсовой индекс» вместо «курсовой указатель» не рекомендуется.

Отсчетное устройство проектируется таким образом, чтобы обеспечивался съем показаний МК как в светлое, так и в темное время суток с расстояния 1 и 1,4 м соответственно на судах ограниченного и неограниченного районов плавания. Для облегчения съема показаний МК, как правило, снабжаются съемной компасной лупой.

Для обеспечения съема показаний в темное время суток в МК предусматривается осветительное устройство: одна или несколько электроламп, которые устанавливаются в большинстве случаев непосредственно в котелке. Этим достигается хорошее освещение картушки и курсового указателя, исключаются блики и практически не освещается ближнее пространство. Осветительное устройство снабжается регулятором освещения.

При эксплуатации МК подвергается механическим возмущающим воздействиям: качке, статическим кренам, ударам и вибрациям. Удержание МЧЭ в плоскости горизонта при качке и статических кренах осуществляется с помощью упомянутого выше физического маятника, конструктивно связанного с МЧЭ. Воздействие вибраций и ударов ослабляется противоударными и противовибрационными амортизирующими устройствами.

Компасы снабжаются пеленгатором, представляющим собой устройство для визирования предметов, позволяющее одновременно произвести отсчет по картушке. С помощью пеленгатора (по азимутальной шкале котелка) измеряется также курсовой угол.

Магнитный компас на судне находится под действием возмущающих магнитных полей, вызывающих магнитную девиацию. По характеру проявления магнитная девиация МК [23, 43] может быть постоянной, полукруговой, четвертной, креновой и широтной.

Постоянная девиация неизменна на любом курсе судна. Полукруговая девиация при изменении курса судна на  $360^\circ$  дважды меняет свой знак, четвертная девиация — четыре раза.

При крене, дифференте или качке судна проявляется креновая девиация, а при изменении магнитной широты происходит широтное изменение девиации (широтная девиация).

Электромагнитная девиация имеет полукруговую, четвертную и креновую составляющие.

Уничтожение девиации производится с помощью компенсирующих устройств, создающих в области МЧЭ компенсирующие магнитные поля, векторы магнитной индукции которых равны и направлены противоположно возмущающим. Эти устройства называются компенсаторами. В МК используются компенсаторы полукруговой, четвертной, креновой и широтной магнитной девиации, а также полукруговой, четвертной и креновой электромагнитной девиации.

## 2. ОТКЛОНЕНИЯ МАГНИТНОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА В ОБЩЕМ СЛУЧАЕ КОЛЕБАНИЙ ОСНОВАНИЯ

### 2.1. Вывод уравнений движения магнитного чувствительного элемента

Движение МЧЭ исследуется в ряде работ (например, [12, 22, 23, 24, 37, 43, 44, 45]). В большинстве из них (кроме [12, 44, 45]) рассматривается влияние только качки, причем в работах [22, 23, 37 и 43] качка принята одномерной. В статье [24] анализируется поведение МЧЭ при трехмерной качке, но в ней ортогональные компоненты перемещения точки опоры МЧЭ не связаны между собой. В работе [12] рассмотрен общий случай колебания МЧЭ при вибрации и качке, однако в линейной постановке, в работе [44] анализируется влияние только горизонтальной линейной вибрации, а в статье [45] приводятся погрешности МК при его эксплуатации в условиях сильной вибрации.

В ряде работ изучаются вопросы влияния колебаний основания на отклонения от вертикали физических маятников: влияние вибрации — в работах [2, 5, 21, 25], качки — в работах [6, 11, 35, 38, 40]. Методы исследования влияния этих возмущений могут быть применены для изучения особенностей движения МЧЭ, представляющего собой систему маятников, находящуюся в магнитном и гравитационном полях Земли.

В последнее время появился ряд работ [1, 15, 17], исследующих погрешности МК, вызванные отклонениями МЧЭ при пространственной вибрации и качке основания.

В настоящем обзоре в целях учета влияния на движение МЧЭ взаимосвязей между ортогональными компонентами колебаний и поиска общих закономерностей отклонений МЧЭ рассматривается пространственная картина его движения для общего случая колебаний.

Магнитный чувствительный элемент компаса может быть представлен в виде тяжелого твердого тела с одной точкой опоры и тремя степенями свободы [17], обладающего восстано-

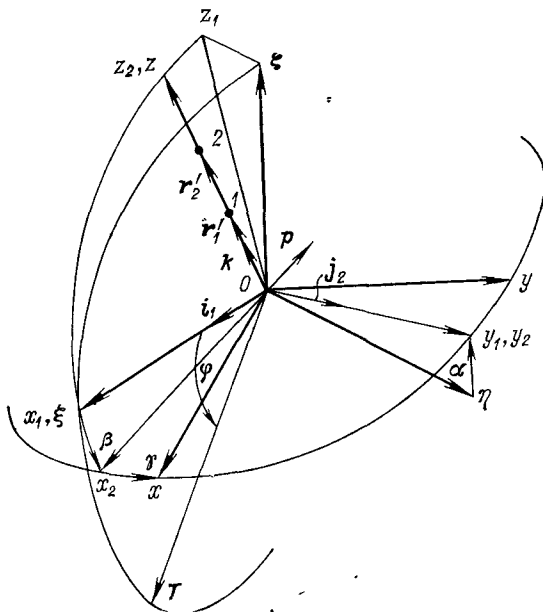


Рис. 2.1. Схема расположения модели МЧЭ в осях координат

ливающими моментами в магнитном  $M_m$  и гравитационном  $M_g$  полях Земли. МЧЭ находится в вязкой несжимаемой жидкости на неосвобождающейся опоре.

Положение МЧЭ будем определять относительно системы отсчета  $O\xi\eta\zeta$  (рис. 2.1), начало  $O$  которой совмещено с точкой опоры, ось  $O\xi$  вертикальна, а плоскость  $O\xi\zeta$  содержит вектор  $T$  индукции МПЗ ( $\varphi$  — угол, составленный вектором  $T$  с горизонтальной осью  $O\xi$ ). Положение системы координат  $Oxyz$ , связанной с главными осями инерции МЧЭ (ось  $Oz$  проходит через центры масс — точка 1 и объема — точка 2), относительно системы  $O\xi\eta\zeta$  определим малыми углами  $\alpha, \beta, \gamma$  при повороте МЧЭ вокруг осей  $O\xi, Oy_1, Oz$  соответственно.

Найдем кинематические соотношения, связывающие подвижную  $Oxyz$  и неподвижную  $O\xi\eta\zeta$  системы координат [9, 39]. МЧЭ участвует в трех вращениях. Первое вращение происходит с уг-

ловой скоростью  $\dot{\alpha}i_1$ , второе — со скоростью  $\dot{\beta}j_2$  (первое и второе вращения приводят к образованию вспомогательных систем координат  $Ox_1y_1z_1$  и  $Ox_2y_2z_2$ ), третье — со скоростью  $\dot{\gamma}k$ . Следовательно, абсолютная угловая скорость МЧЭ будет равна

$$\omega = \dot{\alpha}i_1 + \dot{\beta}j_2 + \dot{\gamma}k, \quad (2.1)$$

где  $i_1, j_2, k$  — единичные векторы осей координат  $O\xi, Oy_1$  и  $Oz$  соответственно.

Определяя последовательные переходы от одной системы координат к другой, получаем следующие матричные соотношения:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{pmatrix} = B \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{pmatrix} = C \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{pmatrix},$$

где

$$A = \begin{pmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix};$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}.$$

Перемножая матрицы  $A, B, C$ , учитывая, что углы  $\alpha, \beta$  и  $\gamma$  приняты малыми, т. е.:

$$\cos \alpha = 1; \quad \cos \beta = 1; \quad \cos \gamma = 1;$$

$$\sin \alpha = \alpha; \quad \sin \beta = \beta; \quad \sin \gamma = \gamma,$$

и ограничивая результат вторым порядком малости, получаем матрицы:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = D \begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{pmatrix}; \quad \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = E \begin{pmatrix} \xi(x_1) \\ y_1(y_2) \\ z_2(z) \end{pmatrix}, \quad (2.2)$$

где

$$D = ABC = \begin{pmatrix} 1 & \gamma + \alpha\beta & \alpha\gamma - \beta \\ -\gamma & 1 & \alpha + \beta\gamma \\ \beta & -\alpha & 1 \end{pmatrix}; \quad E = \begin{pmatrix} 1 & \gamma & 0 \\ -\gamma & 1 & 0 \\ \beta & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Проектируя равенство (2.1) на оси подвижной системы координат  $Oxyz$ , учитывая при этом равенства (2.2), найдем проекции  $\omega_\lambda$  вектора угловой скорости МЧЭ на эти оси:

$$\omega_1 = \dot{\alpha} + \gamma\dot{\beta}; \quad \omega_2 = -\gamma\dot{\alpha} + \dot{\beta}; \quad \omega_3 = \beta\dot{\alpha} + \dot{\gamma}, \quad (2.3)$$

где индексы  $\lambda=1, 2, 3$  относятся к осям  $Ox, Oy, Oz$  соответственно.

Дифференцируя выражения (2.3) по времени, получим:

$$\dot{\omega}_1 = \ddot{\alpha} + \dot{\gamma}\dot{\beta} + \gamma\ddot{\beta}; \quad \dot{\omega}_2 = \ddot{\beta} - \dot{\gamma}\dot{\alpha} - \gamma\ddot{\alpha}; \quad \dot{\omega}_3 = \ddot{\gamma} + \dot{\beta}\dot{\alpha} + \beta\ddot{\alpha}. \quad (2.4)$$

Выражения (2.3) и (2.4) представляют собой искомые кинематические соотношения.

Будем считать, что система  $O\xi\eta\zeta$  движется поступательно относительно некоторой инерциальной системы (не показанной на рис. 2.1) так, что перемещения  $l_v$  точки опоры в направлении соответствующих осей  $O\xi\eta\zeta$  определяются выражениями:

$$l_v(t) = a_v \cos(p_v t + \varepsilon_v) \quad (v = 1, 2, 3), \quad (2.5)$$

где индексы  $v=1, 2, 3$  относятся к амплитудам  $a_v$ , частотам  $p_v$  и начальным фазам колебаний  $\varepsilon_v$  в направлении соответствующих осей координат  $O\xi\eta\zeta$ ;  $t$  — время.

Для вывода уравнений движения МЧЭ относительно неинерциальной системы  $O\xi\eta\zeta$  воспользуемся теоремой моментов в относительно движении

$$\frac{dL_0}{dt} = M_0^e + M_l, \quad (2.6)$$

где  $L_0$  — кинетический момент МЧЭ относительно его неподвижной точки  $O$ ;  $M_0^e$  — главный момент всех внешних сил относительно той же точки;  $M_l$  — момент переносной силы инерции.

Определим все составляющие выражения (2.6) в проекциях на оси  $Oxyz$ . При этом проекциям всех физических величин на эти оси будем соответственно присваивать индексы  $\lambda=1, 2, 3$ .

Изменение кинетического момента МЧЭ может быть представлено выражением [10]

$$\frac{dL_0}{dt} = \frac{\tilde{d}L_0}{dt} + \omega \times L_0, \quad (2.7)$$

где

$$\begin{aligned} \frac{\tilde{d}L_0}{dt} &= \frac{dL_1}{dt} i + \frac{dL_2}{dt} j + \frac{dL_3}{dt} k; \\ \omega \times L_0 &= \begin{vmatrix} i & j & k \\ \omega_1 & \omega_2 & \omega_3 \\ L_1 & L_2 & L_3 \end{vmatrix} = (\omega_2 L_3 - \omega_3 L_2) i + \\ &+ (\omega_3 L_1 - \omega_1 L_3) j + (\omega_1 L_2 - \omega_2 L_1) k, \end{aligned} \quad (2.8)$$

а  $i, j, k$  — единичные векторы осей  $Ox, Oy, Oz$ .

Перепишем уравнение (2.6) в проекциях на оси подвижной системы координат  $Oxyz$ , учитывая равенства (2.7), (2.8) и (2.9), а также то, что при выборе подвижной системы координат, совпадающей с главными осями инерции МЧЭ для точки  $O$ , все центробежные моменты инерции будут равны нулю и, следовательно, проекции кинетического момента МЧЭ на оси координат  $Oxyz$  в этом случае могут быть представлены выражениями:

$$L_1 = I_1 \omega_1; \quad L_2 = I_2 \omega_2; \quad L_3 = I_3 \omega_3,$$

где  $I_\lambda$  — осевые моменты инерции МЧЭ с учетом присоединенных масс жидкости [34].

Проделив указанные преобразования, получим динамические уравнения:

$$\begin{aligned} I_1 \dot{\omega}_1 + (I_3 - I_2) \omega_2 \omega_3 &= M_1^e + M_{l1}; \\ I_2 \dot{\omega}_2 + (I_1 - I_3) \omega_1 \omega_3 &= M_2^e + M_{l2}; \\ I_3 \dot{\omega}_3 + (I_2 - I_1) \omega_1 \omega_2 &= M_3^e + M_{l3}. \end{aligned}$$

Принимая во внимание кинематические соотношения (2.3) и (2.4), получаем уравнения движения МЧЭ в виде:

$$\begin{cases} I_1 (\ddot{\alpha} + \gamma \ddot{\beta}) + (I_1 - I_2 + I_3) \dot{\beta} \dot{\gamma} = M_1^e + M_{l1}; \\ I_2 (\ddot{\beta} - \gamma \ddot{\alpha}) + (I_1 - I_2 - I_3) \dot{\alpha} \dot{\gamma} = M_2^e + M_{l2}; \\ I_3 (\ddot{\gamma} + \beta \ddot{\alpha}) + (-I_1 + I_2 + I_3) \dot{\alpha} \dot{\beta} = M_3^e + M_{l3}. \end{cases} \quad (2.10)$$

Найдем выражение для проекций на оси  $Oxyz$  главного момента внешних сил.

Главный момент внешних сил относительно точки  $O$  в соответствии с условиями задачи может быть определен выражением

$$M_0^e = M_g + M_m + M_c, \quad (2.11)$$

где  $M_c$  — момент сил сопротивления.

Момент  $M_g$  определяется выражением

$$\begin{aligned} M_g &= r_1 \times m_1 g - r_2 \times m_2 g = m_1 \begin{vmatrix} i & j & k \\ x_1 & y_1 & z_1 \\ g_1 & g_2 & g_3 \end{vmatrix} - \\ &- m_2 \begin{vmatrix} i & j & k \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ g_1 & g_2 & g_3 \end{vmatrix}, \end{aligned} \quad (2.12)$$

где  $r_1, r_2$  — радиус-векторы центров масс и объема МЧЭ;  $x_1, y_1, z_1$  и  $x_2, y_2, z_2$  — координаты этих центров на оси системы  $Oxyz$ ;  $m_1, m_2$  — массы МЧЭ и жидкости в объеме МЧЭ;  $g$  — ускорение свободного падения.

Поскольку центры масс и объема находятся на оси  $Oz$ , то

$$x_1 = x_2 = y_1 = y_2 = 0, \quad z_1 = r_1, \quad z_2 = r_2. \quad (2.13)$$

Проекция вектора  $g$  на оси  $Oxyz$  определим с помощью равенств (2.2) и с учетом того, что он совпадает с отрицательным направлением оси  $Oz$ . Имеем:

$$g_1 = -(\alpha\gamma - \beta)g; \quad g_2 = -(\alpha + \beta\gamma)g; \quad g_3 = -g. \quad (2.14)$$

Подставляя равенства (2.13) и (2.14) в выражение (2.12) и учитывая обозначение

$$M_g = -(m_1 r_1 - m_2 r_2)g, \quad (2.15)$$



получаем выражение для момента  $M_g$

$$\mathbf{M}_g = M_g [-(\alpha + \beta\gamma)\mathbf{i} + (\alpha\gamma - \beta)\mathbf{j} + 0\mathbf{k}],$$

из которого для проекций момента  $M_g$  на оси подвижной системы координат  $Oxyz$  будем иметь:

$$M_{g1} = -(\alpha + \beta\gamma) M_g; \quad M_{g2} = -(\beta - \alpha\gamma) M_g; \quad M_{g3} = 0. \quad (2.16)$$

Для момента  $\mathbf{M}_m$  магнитных сил, полагая, что магнитная ось МЧЭ параллельна оси  $Ox$ , можно записать выражение

$$\mathbf{M}_m = M\mathbf{i} \times \mathbf{T} = M \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ 1 & 0 & 0 \\ T_1 & T_2 & T_3 \end{vmatrix}, \quad (2.17)$$

где  $M$  — магнитный момент МЧЭ.

Используя равенства (2.2) и учитывая, что из условий задачи проекции вектора  $\mathbf{T}$  на оси системы координат  $O\xi\eta\xi$  определяются равенствами

$$T_\xi = T \cos \varphi; \quad T_\eta = 0; \quad T_\xi = -T \sin \varphi,$$

получаем выражения для проекций вектора  $\mathbf{T}$  на оси подвижной системы координат  $Oxyz$ :

$$\begin{aligned} T_1 &= T \cos \varphi - T(\alpha\gamma - \beta) \sin \varphi; \\ T_2 &= -T\gamma \cos \varphi - T(\alpha + \beta\gamma) \sin \varphi; \\ T_3 &= T\beta \cos \varphi - T \sin \varphi. \end{aligned} \quad (2.18)$$

Подставляя равенства (2.18) в уравнение (2.17) и учитывая обозначение

$$M_m = MT \cos \varphi, \quad (2.19)$$

будем иметь выражения для проекций вектора  $\mathbf{M}_m$  на оси подвижной системы координат  $Oxyz$ :

$$\begin{aligned} M_{m1} &= 0; \quad M_{m2} = -M_m(\beta - \gamma \varphi); \\ M_{m3} &= -M_m[\gamma + (\beta\gamma + \alpha) \gamma \varphi]. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Момент  $\mathbf{M}_c$  сил сопротивления при малых скоростях движения МЧЭ в первом приближении может быть представлен в виде проекций на оси подвижной системы координат  $Oxyz$ :

$$M_{c1} = -N_1 \dot{\alpha}; \quad M_{c2} = -N_2 \dot{\beta}; \quad M_{c3} = -N_3 \dot{\gamma}, \quad (2.21)$$

где  $N_1, N_2, N_3$  — коэффициенты вязкого трения МЧЭ при его движении вокруг соответствующих осей.

Момент  $\mathbf{M}_i$  переносных сил  $m_1\mathbf{W}$  и  $m_2\mathbf{W}$  инерции, вызванных перемещением точки  $O$  опоры МЧЭ, может быть представлен выражением

$$\mathbf{M}_i = -\mathbf{r}_1 \times m_1\mathbf{W} + \mathbf{r}_2 \times m_2\mathbf{W}, \quad (2.22)$$

где  $\mathbf{W}$  — переносное ускорение точки  $O$ , проекции которого на оси координат  $O\xi\eta\xi$  могут быть получены после двойного дифференцирования выражений (2.5) по времени

$$\mathbf{W}_v = -a_v p_v^2 \cos(p_v t + \varepsilon_v) \quad (v = 1, 2, 3). \quad (2.23)$$

Проекция ускорения  $\mathbf{W}$  на оси системы координат  $Oxyz$  определим с помощью равенств (2.2) и выражений (2.23). Имеем:

$$W_x = W_1 + (\alpha\beta + \gamma) W_2 + (\alpha\gamma - \beta) W_3;$$

$$W_y = -\gamma W_1 + W_2 + (\alpha + \beta\gamma) W_3;$$

$$W_z = \beta W_1 - \alpha W_2 + W_3.$$

Подставляя полученные выражения в равенство (2.22), учитывая при этом формулы (2.13) и (2.15), найдем проекции момента  $\mathbf{M}_i$  на оси подвижной системы координат  $Oxyz$ :

$$M_{i1} = g^{-1} M_g [\gamma W_1 - W_2 - (\alpha + \beta\gamma) W_3];$$

$$M_{i2} = g^{-1} M_g [W_1 + (\gamma + \alpha\beta) W_2 + (\alpha\gamma - \beta) W_3];$$

$$M_{i3} = 0. \quad (2.24)$$

Подставив выражения (2.11), (2.16), (2.20), (2.21) и (2.24) проекций всех составляющих главного момента  $\mathbf{M}_0^e$  в уравнения движения МЧЭ (2.10), получим эти уравнения в следующем виде:

$$\begin{aligned} I_1 (\ddot{\alpha} + \gamma \ddot{\beta}) + (I_1 - I_2 + I_3) \dot{\beta} \dot{\gamma} + N_1 \dot{\alpha} + M_g (\alpha + \beta\gamma) = \\ = g^{-1} M_g [\gamma W_1 - W_2 - (\alpha + \beta\gamma) W_3]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_2 (\ddot{\beta} - \gamma \ddot{\alpha}) + (I_1 - I_2 - I_3) \dot{\alpha} \dot{\gamma} + N_2 \dot{\beta} + M_g (\beta - \alpha\gamma) + \\ + M_m (\beta - \gamma \varphi) = g^{-1} M_g [W_1 + (\gamma + \alpha\beta) W_2 + (\alpha\gamma - \beta) W_3]; \end{aligned}$$

$$I_3 (\ddot{\gamma} + \beta \ddot{\alpha}) + (-I_1 + I_2 + I_3) \dot{\alpha} \dot{\beta} + N_3 \dot{\gamma} + M_m [\gamma + (\beta\gamma + \alpha) \gamma \varphi] = 0. \quad (2.25)$$

Для упрощения дальнейших преобразований введем обозначения:

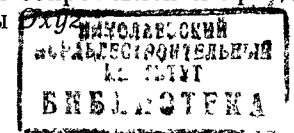
$$B_1 = (I_1 - I_2 + I_3) I_1^{-1}, \quad B_2 = (I_1 - I_2 - I_3) I_2^{-1},$$

$$B_3 = (-I_1 + I_2 + I_3) I_3^{-1};$$

$$k_1^2 = M_g I_1^{-1}, \quad k_2^2 = (M_g + M_m) I_2^{-1}, \quad k_3^2 = M_m I_3^{-1};$$

$$s_1^2 = M_m I_2^{-1}, \quad s_2^2 = M_g I_2^{-1}, \quad 2h_\lambda = N_\lambda I_\lambda^{-1} \quad (\lambda = 1, 2, 3), \quad (2.26)$$

где  $k_\lambda$  — собственные частоты МЧЭ вокруг соответствующих осей системы  $Oxyz$ ;  $h_\lambda$  — коэффициенты сопротивления при движении МЧЭ вокруг тех же осей системы



С учетом обозначений (2.26) уравнения движения (2.25) примут окончательный вид:

$$\begin{aligned}\ddot{\alpha} + 2h_1\dot{\alpha} + k_1^3\alpha(1 + W_3g^{-1}) &= -\gamma\ddot{\beta} - B_1\dot{\beta}\dot{\gamma} - \\ &- k_1^2\beta\dot{\gamma} + k_1^2g^{-1}(\gamma W_1 - W_2 - \beta\gamma W_3); \\ \ddot{\beta} + 2h_2\dot{\beta} + k_2^2\beta + s_2^2\beta g^{-1}(W_3 - \alpha W_2) &= \gamma\ddot{\alpha} - B_2\dot{\alpha}\dot{\gamma} + s_2^2\alpha\dot{\gamma} + \\ &+ s_1^2\operatorname{tg} \varphi + s_2^2g^{-1}[W_1 + \gamma W_2 + \alpha\gamma W_3]; \\ \ddot{\gamma} + 2h_3\dot{\gamma} + k_2^2\gamma(1 + \beta\operatorname{tg} \varphi) &= -\beta\ddot{\alpha} - B_3\dot{\alpha}\dot{\beta} - k_2^2\alpha\operatorname{tg} \varphi.\end{aligned}\quad (2.27)$$

Уравнения (2.27), представляющие собой систему нелинейных дифференциальных уравнений, описывают движение МЧЭ при пространственном перемещении его точки опоры в общем случае колебаний (при вибрации и качке). В этих уравнениях, ограниченных вторым порядком малости, учтено совместное влияние на отклонения  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  МЧЭ ортогональных составляющих ускорения (перемещения) его точки опоры.

Уравнения пригодны для исследования движения МЧЭ, обладающих одним или обоими восстанавливающими моментами (в магнитном и гравитационном полях Земли), имеющих три или менее степени свободы, т. е. пригодны для исследования стрелочных, индукционных и других видов МЧЭ.

## 2.2. Общие выражения для отклонений магнитного чувствительного элемента

Как показано в подразделе 2.1, движение МЧЭ при колебаниях основания характеризуется отклонениями  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  от положения равновесия. Отклонения  $\alpha$  и  $\beta$  происходят в вертикальных плоскостях — плоскости, перпендикулярной магнитному меридиану, и плоскости меридиана соответственно. Отклонение  $\gamma$  — азимутальное отклонение.

Для определения величин  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  в общем случае колебаний основания проинтегрируем уравнения (2.27) методом последовательных приближений [5, 26], т. е. будем искать выражения для них в виде рядов:

$$\begin{aligned}\alpha &= \alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 + \dots; \quad \beta = \beta_0 + \beta_1 + \beta_2 + \dots; \\ \gamma &= \gamma_0 + \gamma_1 + \gamma_2 + \dots,\end{aligned}\quad (2.28)$$

в которых слагаемые в правой части с индексом 0 соответствуют нулевому приближению (уравнения равновесия при отсутствии колебаний точки опоры), с индексом 1 — первому приближению (исходные уравнения, линейные относительно величин  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $W_3g^{-1}$  и их соответствующих производных), с индексом 2 — второму приближению (исходные уравнения (2.27) при условии,

что нелинейные члены определены из уравнений предыдущего приближения] [17].

Для определения вида приближений убедимся в том, что рассматриваемая однородная система уравнений [система (2.27) при  $W_v = 0$ ] является асимптотически устойчивой — все корни характеристических уравнений имеют отрицательную вещественную часть, что следует из наличия в левой части системы (2.27) слагаемых с коэффициентами сопротивления  $2h_\lambda$  ( $\lambda = 1, 2, 3$ ).

Приближения в таких системах необходимо определять в виде частных решений соответствующих неоднородных систем уравнений [25]. При этом уравнения первого приближения будут определять отклонения, происходящие с частотой вынужденных колебаний и пропорциональные их ускорениям.

Уравнения второго приближения отличаются от уравнений первого приближения только правой частью. После подстановки в них уравнений первого приближения их правая часть представляет собой сумму членов со слагаемыми вида  $\alpha_1 W_3$ ,  $\beta_1 W_3$ ,  $\beta_1 \ddot{\alpha}$ ,  $\dot{\alpha}_1 \dot{\beta}_1$  и т. д., которые учитывают взаимосвязь между имеющимися ортогональными направлениями отклонениями, скоростями и ускорениями МЧЭ, а также внешними ускорениями. Эти слагаемые в результате преобразований содержат множители вида

$$\sin(p_1 t + \varepsilon_1) \cos(p_2 t + \varepsilon_2); \quad \sin(p_1 t + \varepsilon_1) \sin(p_2 t + \varepsilon_2)$$

и др., приводящие к появлению в правой части слагаемых, зависящих от разности и суммы частот ортогональных колебаний относительно осей  $O\xi$ ,  $O\eta$  и  $O\zeta$ , а при равенстве частот — к появлению постоянных членов.

Таким образом, второе приближение определяет отклонения  $\alpha_2$ ,  $\beta_2$  и  $\gamma_2$ , зависящие от совместных взаимно перпендикулярных перемещений, и, следовательно, сохранение в уравнениях (2.27) слагаемых, содержащих произведения малых величин (второй порядок малости), оправданно.

Уравнения третьего приближения уточняют взаимосвязь ортогональных перемещений точки опоры, выявленную во втором приближении. Эти уравнения, как показано в работах [15, 25, 40] для задач с демпфированным маятником, приводят к решениям, имеющим третий-четвертый порядок малости. Руководствуясь стремлением получить результат, дающий качественную оценку влияния взаимно перпендикулярных перемещений на отклонения  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ , ограничимся их вторым порядком малости [при выводе уравнений движения (2.27) это обстоятельство уже учтено ограничением слагаемых в них до второго порядка малости включительно].

Таким образом, при решении уравнений (2.27) будем искать только нулевое, первое и второе приближения.

Нулевое приближение характеризуется статическим состоянием МЧЭ, т. е. условиями:

$$\dot{\alpha}_0 = \dot{\beta}_0 = \dot{\gamma}_0 = 0; \quad \ddot{\alpha}_0 = \ddot{\beta}_0 = \ddot{\gamma}_0 = 0; \quad W_v = 0,$$

с учетом которых система (2.27) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= -\beta_0 \gamma_0; \\ k_2^2 \beta_0 &= s_2^2 \alpha_0 \gamma_0 + s_1^2 \operatorname{tg} \varphi; \\ \gamma_0 &= -k_3^2 (\beta_0 \gamma_0 + \alpha_0) \operatorname{tg} \varphi. \end{aligned}$$

Из этих уравнений с использованием равенств (2.26) и (2.19) получим нулевое приближение решения уравнений (2.27):

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= 0; \\ \beta_0 &= s_1^2 k_2^{-2} \operatorname{tg} \varphi = M_m (M_g + M_m)^{-1} \operatorname{tg} \varphi; \\ \gamma_0 &= 0. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Найдем уравнения для определения первого и второго приближений. Для этого подставим выражения (2.28) в уравнения (2.27). В качестве малого параметра примем величину  $g^{-1}$ . После приравнивания в правой и левой частях полученных уравнений последовательно членов первого и второго порядка малости образуем системы уравнений для определения первого и второго приближений отклонений  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ .

С учетом изложенного запишем полученные неоднородные уравнения первого и второго приближений:

$$\begin{aligned} \ddot{\alpha}_1 + 2h_1 \dot{\alpha}_1 + k_1^2 \alpha_1 &= -g^{-1} k_1^2 W_2; \\ \ddot{\beta}_1 + 2h_2 \dot{\beta}_1 + k_2^2 \beta_1 &= g^{-1} s_2^2 W_1; \\ \ddot{\gamma}_1 + 2h_3 \dot{\gamma}_1 + k_3^2 \gamma_1 &= -k_3^2 \alpha_1 \operatorname{tg} \varphi; \\ \ddot{\alpha}_2 + 2h_1 \dot{\alpha}_2 + k_1^2 \alpha_2 &= -\ddot{\beta}_1 \gamma_1 - B_1 \dot{\beta}_1 \dot{\gamma}_1 - k_1^2 \beta_1 \dot{\gamma}_1 + k_1^2 g^{-1} (\gamma_1 W_1 - \alpha_1 W_3); \\ \ddot{\beta}_2 + 2h_2 \dot{\beta}_2 + k_2^2 \beta_2 &= \ddot{\alpha}_1 \gamma_1 - B_2 \dot{\alpha}_1 \dot{\gamma}_1 + s_2^2 \alpha_1 \dot{\gamma}_1 + s_2^2 g^{-1} (\gamma_1 W_2 - \beta_1 W_3); \\ \ddot{\gamma}_2 + 2h_3 \dot{\gamma}_2 + k_3^2 \gamma_2 &= -\ddot{\alpha}_1 \beta_1 - B_3 \dot{\alpha}_1 \dot{\beta}_1 - k_3^2 (\alpha_1 + \beta_1 \gamma_1) \operatorname{tg} \varphi. \end{aligned} \quad (2.30)$$

Проинтегрируем систему уравнений (2.30) первого приближения.

Для упрощения окончательных выражений для  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  введем обозначения:

$$\begin{aligned} A_v &= a_v p_v^2; \\ R_{\lambda (v \pm \mu)} &= \frac{k_\lambda^2}{\sqrt{[k_\lambda^2 - (p_v \pm p_\mu)^2]^2 + 4h_\lambda^2 (p_v \pm p_\mu)^2}}; \\ \operatorname{tg} \delta_{\lambda (v \pm \mu)} &= \frac{2h_\lambda (p_v \pm p_\mu)}{(p_v \pm p_\mu)^2 - k_\lambda^2} \quad (\mu = 0, 1, 2, 3); \\ p_{v \pm \mu} &= p_v \pm p_\mu; \quad \varepsilon_{v \pm \mu} = \varepsilon_v \pm \varepsilon_\mu; \quad p_0 = 0, \quad \varepsilon_0 = 0, \end{aligned} \quad (2.31)$$

с учетом которых, а также выражений (2.23) частные решения уравнений первого приближения, определяемые отклонениями  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$  и  $\gamma_1$ , могут быть представлены в виде:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= A_2 g^{-1} R_{12} \cos(p_2 t + \varepsilon_2 + \delta_{12}); \\ \beta_1 &= -A_1 g^{-1} s_2^2 k_2^{-2} R_{21} \cos(p_1 t + \varepsilon_1 + \delta_{21}); \\ \gamma_1 &= -A_2 g^{-1} R_{12} R_{32} \operatorname{tg} \varphi \cos(p_2 t + \varepsilon_2 + \delta_{12} + \delta_{32}). \end{aligned} \quad (2.32)$$

Произведя дифференцирование полученных отклонений первого приближения по времени, определим вспомогательные величины, необходимые для решения уравнений (2.30) второго приближения:

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}_1 &= -A_2 g^{-1} p_2 R_{12} \sin(p_2 t + \varepsilon_2 + \delta_{12}); \\ \dot{\alpha}_1 &= -A_2 g^{-1} p_2^2 R_{12} \cos(p_2 t + \varepsilon_2 + \delta_{12}); \\ \dot{\beta}_1 &= A_1 g^{-1} s_2^2 k_2^{-2} p_1 R_{21} \sin(p_1 t + \varepsilon_1 + \delta_{21}); \\ \dot{\beta}_1 &= A_1 g^{-1} s_2^2 k_2^{-2} p_1^2 R_{21} \cos(p_1 t + \varepsilon_1 + \delta_{21}); \\ \dot{\gamma}_1 &= A_2 g^{-2} p_2 R_{12} R_{32} \operatorname{tg} \varphi \sin(p_2 t + \varepsilon_2 + \delta_{12} + \delta_{32}). \end{aligned} \quad (2.33)$$

Проинтегрируем уравнения (2.30) второго приближения последовательно для отклонений  $\alpha_2$ ,  $\beta_2$  и  $\gamma_2$ .

Для определения отклонения  $\alpha_2$  воспользуемся первым уравнением второго приближения (2.30). Преобразуем это уравнение, подставив в него выражения (2.23), (2.32), (2.33). После

преобразований получим уравнение для второго приближения отклонения  $\alpha_2$

$$\begin{aligned} \ddot{\alpha}_2 + 2h_1\dot{\alpha}_2 + k_1^2\alpha_2 = & A_2g^{-1}k_1^2s_1^2k_2^{-2}R_{12}R_{32}\operatorname{tg}^2\varphi \times \\ & \times \cos(p_2t + \varepsilon_2 + \delta_{12} + \delta_{32}) + A_1A_2g^{-2}s_2^2k_2^{-2}p_1R_{12}R_{21}R_{32} \times \\ & \times \operatorname{tg}\varphi \cos(p_1t + \varepsilon_1 + \delta_{21}) \cos(p_2t + \varepsilon_2 + \delta_{12} + \delta_{32}) - \\ & - A_1A_2g^{-2}s_2^2k_2^{-2}B_1p_1p_2R_{12}R_{21}R_{32}\operatorname{tg}\varphi \sin(p_1t + \varepsilon_1 + \delta_{21}) \times \\ & \times \sin(p_2t + \varepsilon_2 + \delta_{12} + \delta_{32}) - A_1A_2g^{-2}s_2^2k_2^{-2}k_1^2R_{12}R_{21}R_{32} \times \\ & \times \operatorname{tg}\varphi \cos(p_1t + \varepsilon_1 + \delta_{21}) \cos(p_2t + \varepsilon_2 + \delta_{12} + \delta_{32}) + \\ & + A_1A_2g^{-2}k_1^2R_{12}R_{32}\operatorname{tg}\varphi \cos(p_1t + \varepsilon_1) \cos(p_2t + \varepsilon_2 + \delta_{12} + \delta_{32}) + \\ & + A_2A_3g^{-2}k_1^2R_{12}\cos(p_2t + \varepsilon_2 + \delta_{12}) \cos(p_3t + \varepsilon_3). \quad (2.34) \end{aligned}$$

Решение уравнения (2.34) с учетом обозначений (2.31) можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \alpha_2 = & A_2g^{-1}s_1^2k_2^2R_{12}R_{32}\operatorname{tg}^2\varphi \cos(p_2t + \varepsilon_2 + 2\delta_{12} + \delta_{32}) + \\ & + 0,5A_1A_2g^{-2}R_{12}R_{21}R_{32}\operatorname{tg}\varphi s_2^2k_2^{-2}[(p_1^2k_1^{-2} - 1 + B_1p_1p_2k_1^{-2})R_{1(1-2)} \times \\ & \times \cos(p_{1-2}t + \varepsilon_{1-2} + \delta_{21} - \delta_{12} - \delta_{32} + \delta_{1(1-2)}) + \\ & + (p_1^2k_1^{-2} - 1 - B_1p_1p_2k_1^{-2})R_{1(1+2)} \times \\ & \times \cos(p_{1+2}t + \varepsilon_{1+2} + \delta_{21} + \delta_{12} + \delta_{32} + \delta_{1(1+2)})] + \\ & + 0,5A_1A_2g^{-2}R_{12}R_{32}\operatorname{tg}\varphi [R_{1(1-2)}\cos(p_{1-2}t + \varepsilon_{1-2} - \\ & - \delta_{12} - \delta_{32} + \delta_{1(1-2)}) + R_{1(1+2)}\cos(p_{1+2}t + \varepsilon_{1+2} + \\ & + \delta_{12} + \delta_{32} + \delta_{1(1+2)})] + 0,5A_2A_3g^{-2}R_{12}[R_{1(2-3)}\cos(p_{2-3}t + \\ & + \varepsilon_{2-3} + \delta_{12} + \delta_{1(2-3)}) + R_{1(2+3)}\cos(p_{2+3}t + \varepsilon_{2+3} + \delta_{12} + \delta_{1(2+3)})]. \quad (2.35) \end{aligned}$$

Выражение (2.35) является вторым приближением отклонения  $\alpha$ .

Получив выражения для  $\alpha_0$ ,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  в соответствии с первым уравнением (2.28), используя при этом формулы (2.29), (2.32)

и (2.35), можем записать окончательное выражение для отклонения  $\alpha$

$$\begin{aligned} \alpha = & A_2g^{-1}R_{12}\cos(p_2t + \varepsilon_2 + \delta_{12}) + A_2g^{-1}s_1^2k_2^{-2}R_{12}R_{32} \times \\ & \times \operatorname{tg}^2\varphi \cos(p_2t + \varepsilon_2 + 2\delta_{12} + \delta_{32}) + 0,5A_1A_2g^{-2}s_2^2k_2^{-2} \times \\ & \times (p_1^2k_1^{-2} - 1 + B_1p_1p_2k_1^{-2})R_{12}R_{21}R_{32}R_{1(1-2)} \times \\ & \times \operatorname{tg}\varphi \cos(p_{1-2}t + \varepsilon_{1-2} + \delta_{21} - \delta_{12} + \delta_{32} + \delta_{1(1-2)}) + \\ & + 0,5A_1A_2g^{-2}s_2^2k_2^{-2}(p_1^2k_1^{-2} - 1 - B_1p_1p_2k_1^{-2})R_{12}R_{21}R_{32}R_{1(1+2)} \times \\ & \times \operatorname{tg}\varphi \cos(p_{1+2}t + \varepsilon_{1+2} + \delta_{21} + \delta_{12} + \delta_{32} + \delta_{1(1+2)}) + \\ & + 0,5A_1A_2g^{-2}R_{12}R_{32}R_{1(1-2)}\operatorname{tg}\varphi \cos(p_{1-2}t + \varepsilon_{1-2} - \delta_{12} - \\ & - \delta_{32} + \delta_{1(1-2)}) + 0,5A_1A_2g^{-2}R_{12}R_{32}R_{1(1+2)} \times \\ & \times \operatorname{tg}\varphi \cos(p_{1+2}t + \varepsilon_{1+2} + \delta_{12} + \delta_{32} + \delta_{1(1+2)}) + \\ & + 0,5A_2A_3g^{-2}R_{12}R_{1(2-3)}\cos(p_{2-3}t + \varepsilon_{2-3} + \delta_{12} + \delta_{1(2-3)}) + \\ & + 0,5A_2A_3g^{-2}R_{12}R_{1(2+3)}\cos(p_{2+3}t + \varepsilon_{2+3} + \delta_{12} + \delta_{1(2+3)}). \quad (2.36) \end{aligned}$$

Выражение (2.36) определяет отклонения  $\alpha$ , происходящие в плоскости, перпендикулярной магнитному меридиану. Оно устанавливает связь между отклонением  $\alpha$  и параметрами колебаний ( $A_v$ ,  $p_v$ ,  $\varepsilon_v$ ), параметрами магнитного и гравитационного полей ( $\varphi$ ,  $g$ ), а также параметрами МЧЭ ( $k_\lambda$ ,  $h_\lambda$ , которые входят в выражения для  $R_{\lambda v}$ ,  $R_{\lambda(v\pm\mu)}$ ,  $\delta_{\lambda v}$ ,  $\delta_{\lambda(v\pm\mu)}$ ).

Аналогично найденному выражению для отклонения  $\alpha$  определим окончательные выражения для отклонений  $\beta$  и  $\gamma$ . Для этого, интегрируя второе и третье уравнения второго приближения (2.30), найдем отклонения  $\beta_2$  и  $\gamma_2$ , с учетом которых, а также выражений (2.29) и (2.32) из равенств (2.28) определим искомые отклонения  $\beta$  и  $\gamma$ .

Опустив для краткости преобразования, аналогичные проделанным при выводе выражения для отклонения  $\alpha$ , сразу запишем окончательные результаты.

Для отклонения  $\beta$ , которое происходит в плоскости магнитного меридиана, будем иметь

$$\begin{aligned} \beta = & s_1^2k_2^{-2}\operatorname{tg}\varphi - A_1g^{-1}s_2^2k_2^{-2}R_{21}\cos(p_1t + \varepsilon_1 + \delta_{21}) + \\ & + A_3g^{-1}s_1^2s_2^2k_2^{-4}R_{32}\operatorname{tg}\varphi \cos(p_3t + \varepsilon_3 + \delta_{23}) + \\ & + 0,5A_2^2g^{-2}R_{12}R_{32}[p_2^2k_2^{-2}(1 + B_2) - s_2^2k_2^{-2}]\operatorname{tg}\varphi \cos\delta_{32} + \\ & + 0,5A_2^2g^{-2}R_{12}R_{32}R_{2(2+2)}[p_2^2k_2^{-2}(1 - B_2) - s_2^2k_2^{-2}]\operatorname{tg}\varphi \times \\ & \times \cos(2p_2t + 2\varepsilon_2 + 2\delta_{12} + \delta_{32} + \delta_{2(2+2)}) + \\ & + 0,5A_2^2g^{-2}s_2^2k_2^{-2}R_{12}R_{32}\operatorname{tg}\varphi \cos(\delta_{12} + \delta_{32}) + \\ & + 0,5A_2^2g^{-2}s_2^2k_2^{-2}R_{12}R_{32}R_{2(2+2)}\operatorname{tg}\varphi \cos(2p_2t + 2\varepsilon_2 + \delta_{12} + \\ & + \delta_{32} + \delta_{2(2+2)}) - 0,5A_1A_3g^{-2}s_2^4k_2^{-4}R_{21}R_{2(1-3)} \times \\ & \times \cos(p_{1-3}t + \varepsilon_{1-3} + \delta_{21} + \delta_{2(1-3)}) - 0,5A_1A_3g^{-2}s_2^4k_2^{-4}R_{21}R_{2(1+3)} \times \\ & \times \cos(p_{1+3}t + \varepsilon_{1+3} + \delta_{21} + \delta_{2(1+3)}). \quad (2.37) \end{aligned}$$

Азимутальное отклонение  $\gamma$  МЧЭ будет определяться выражением

$$\begin{aligned} \gamma = & A_2 g^{-1} (s_1^2 k_2^{-2} p_2^2 k_3^{-2} - 1) R_{12} R_{32} \operatorname{tg} \varphi \cos (p_2 t + \varepsilon_2 + \delta_{12} + \delta_{32}) + \\ & + A_2 g^{-1} s_1^2 k_2^{-2} R_{12} R_{32}^2 \operatorname{tg}^3 \varphi \cos (p_2 t + \varepsilon_2 + \delta_{12} + 2\delta_{32}) + \\ & + A_2 g^{-1} s_1^2 k_2^{-2} R_{12}^2 R_{32}^2 \operatorname{tg}^3 \varphi \cos (p_2 t + \varepsilon_2 + 2\delta_{12} + 2\delta_{32}) + \\ & + 0,5 A_1 A_2 g^{-2} (B_3 p_1 - p_2) p_2 s_2^2 k_2^{-2} k_3^{-2} R_{21} R_{12} R_{3(1-2)} \times \\ & \times \cos (p_{1-2} t + \varepsilon_{1-2} + \delta_{21} - \delta_{12} + \delta_{3(1-2)}) - \\ & - 0,5 A_1 A_2 g^{-2} (B_3 p_1 + p_2) p_2 s_2^2 k_2^{-2} k_3^{-2} R_{21} R_{12} R_{3(1+2)} \times \\ & \times \cos (p_{1+2} t + \varepsilon_{1+2} + \delta_{21} + \delta_{12} + \delta_{3(1+2)}) - \\ & - 0,5 A_1 A_2 g^{-2} s_2^2 k_2^{-2} R_{21} R_{12} R_{32} R_{3(1-2)} \operatorname{tg}^2 \varphi \times \\ & \times \cos (p_{1-2} t + \varepsilon_{1-2} + \delta_{21} - \delta_{12} - \delta_{32} + \delta_{3(1-2)}) - \\ & - 0,5 A_1 A_2 g^{-2} s_2^2 k_2^{-2} R_{21} R_{12} R_{32} R_{3(1+2)} \operatorname{tg}^2 \varphi \cos (p_{1+2} t + \varepsilon_{1+2} + \\ & + \delta_{21} + \delta_{12} + \delta_{32} + \delta_{3(1+2)}) - 0,5 A_1 A_2 g^{-2} (p_1^2 k_1^2 - 1 + B_1 p_1 p_2 k_1^{-2}) \times \\ & \times R_{12} R_{21} R_{32} R_{1(1-2)} R_{3(1-2)} \operatorname{tg}^2 \varphi \cos (p_{1-2} t + \varepsilon_{1-2} + \delta_{21} - \\ & - \delta_{12} - \delta_{32} + \delta_{1(1-2)} + \delta_{3(1-2)}) - 0,5 A_1 A_2 g^{-2} \times \\ & \times (p_1^2 k_1^2 - 1 - B_1 p_1 p_2 k_1^{-2}) R_{12} R_{21} R_{32} R_{1(1+2)} R_{3(1+2)} \operatorname{tg}^2 \varphi \times \\ & \times \cos (p_{1+2} t + \varepsilon_{1+2} + \delta_{21} + \delta_{12} + \delta_{32} + \delta_{1(1+2)} + \delta_{3(1+2)}) - \\ & - 0,5 A_1 A_2 g^{-2} R_{12} R_{32} R_{1(1-2)} R_{3(1-2)} \operatorname{tg}^2 \varphi \cos (p_{1-2} t + \varepsilon_{1-2} - \\ & - \delta_{21} - \delta_{32} + \delta_{1(1-2)} + \delta_{3(1-2)}) - 0,5 A_1 A_2 g^{-2} R_{12} R_{32} \times \\ & \times R_{1(1+2)} R_{3(1+2)} \operatorname{tg}^2 \varphi \cos (p_{1+2} t + \varepsilon_{1+2} + \delta_{21} + \\ & + \delta_{32} + \delta_{1(1+2)} + \delta_{3(1+2)}) - 0,5 A_2 A_3 g^{-2} R_{12} R_{1(2-3)} R_{3(2-3)} \operatorname{tg} \varphi \times \\ & \times \cos (p_{2-3} t + \varepsilon_{2-3} + \delta_{12} + \delta_{1(2-3)} + \delta_{3(2-3)}) - \\ & - 0,5 A_2 A_3 g^{-2} R_{12} R_{1(2+3)} R_{3(2+3)} \operatorname{tg} \varphi \times \\ & \times \cos (p_{2+3} t + \varepsilon_{2+3} + \delta_{12} + \delta_{1(2+3)} + \delta_{3(2+3)}). \quad (2.38) \end{aligned}$$

Из формул (2.36), (2.37) и (2.38) следует, что возможно уменьшение отклонений  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  путем снижения значений коэффициентов динамичности  $R_{12}$  и  $R_{21}$ , входящих множителями во все слагаемые этих формул. Обозначив значения этих коэффициентов динамичности, при которых отклонения  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  будут находиться в допустимых пределах, через  $R$ , получим неравенство  $R_{\lambda\lambda} < R$  или, с учетом обозначений (2.31) для всех возможных случаев соотношения собственных частот МЧЭ и колебаний,— неравенство

$$k_{\lambda}^2 < 2 p_{\lambda} h_{\lambda} R \quad (\lambda = 1, 2). \quad (2.39)$$

Из соотношения (2.39) следует, что уменьшение отклонений  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  МЧЭ при колебаниях основания может быть достигнуто увеличением демпфирования или уменьшением собственных частот МЧЭ при его движении только вокруг горизонтальных осей  $Ox$  и  $Oy$ . Степень уменьшения отклонений может быть оценена по формулам (2.31) для  $R_{\lambda\lambda}$ , а выбор коэффициентов сопротивления  $h_{\lambda}$  и собственных частот  $k_{\lambda}$  может быть проверен по формуле (2.39).

Полученный результат в части увеличения демпфирования согласуется с выводами работы [11] для плоских физических маятников на качке.

Уменьшение собственных частот  $k_1$  и  $k_2$  ограничено максимально допустимым значением  $\beta_0$  и размерами МЧЭ [см. формулы (2.26) и (2.29)], а увеличение демпфирования по осям  $Ox$  и  $Oy$  (коэффициенты сопротивления  $h_1$  и  $h_2$ ) для ряда МЧЭ (например, стрелочного МЧЭ, в котором демпфирование осуществляется за счет вязкости компасной жидкости) неизбежно приводит к его увеличению и по оси  $Oz$  ( $h_3$ ), что нежелательно из-за возрастающей погрешности МК при циркуляции судна (следует из результатов работы [12]).

Положительный эффект может быть достигнут при значительном увеличении параметров  $h_1$  и  $h_2$  и сохранении или незначительном увеличении параметра  $h_3$ . Однако это требует усложнения конструкции компаса.

Полученные в общем виде выражения для отклонений МЧЭ  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  ограничены вторым приближением. Третье и следующие приближения, уточняющие первое и второе, отброшены, что качественных изменений в результате исследования не вносит, а погрешность результата, находящаяся в пределах третьего приближения, приемлема для практических целей.

Аналитические выражения (2.36), (2.37) и (2.38) в отличие от известных частных случаев учитывают влияние колебаний основания во всем диапазоне частот, охватывающем качку и вибрацию. Эти выражения отличаются от полученных при решении задачи в линейной постановке наличием слагаемых, учитывающих совместное влияние ортогональных компонентов пространственных колебаний. Они устанавливают связи между отклонениями МЧЭ и его параметрами, а также характеристиками колебаний и силовых полей. Из этих выражений могут быть выявлены максимально влияющие на отклонения МЧЭ отдельные компоненты колебаний и взаимосвязь этих компонентов. Выражения можно использовать для анализа погрешностей при качке и вибрации стрелочных, индукционных и других видов компасов, МЧЭ которых имеют по крайней мере одну степень свободы.

### 3. ОТКЛОНЕНИЯ МАГНИТНОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ПРИ ВИБРАЦИИ И КАЧКЕ ОСНОВАНИЯ

#### 3.1. Отклонения магнитного чувствительного элемента при вибрации

В разделе 2 найдены общие средства снижения отклонений  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  МЧЭ. Однако их использование сопряжено с усложнением конструкции МК. Поэтому целесообразно определить дополнительные условия снижения отклонений МЧЭ, которые могут иметь место при раздельном рассмотрении влияния на МЧЭ компаса высокочастотных (вибрация) и низкочастотных (качка) колебаний основания.

В настоящем подразделе исследуются погрешности стрелочного МК, вызванные отклонениями его МЧЭ при пространственной гармонической вибрации, определяются систематические отклонения МЧЭ, производится оценка влияния параметров МЧЭ на его отклонения, даются рекомендации по выбору параметров МЧЭ при конструировании и методам стендовых испытаний МК.

Для оценки отклонений стрелочного МЧЭ при вибрации основания воспользуемся формулой (2.38) для азимутального отклонения  $\gamma$ .

Исходными ограничениями при рассмотрении влияния вибрации на стрелочный МЧЭ являются следующие [15]:

$$k_1 \approx k_2 \gg k_3; \quad h_1 \approx h_2 \gg h_3; \quad h_\lambda \leq k_\lambda; \quad M_g M_m^{-1} > 30; \\ k_\lambda \ll p_v; \quad h_\lambda \ll p_v; \quad p_v = (60 \dots 3000) c^{-1}. \quad (3.1)$$

Периодические решения (2.38) при учете ограничений (3.1) практически равны нулю в связи с малыми размерами соответствующих коэффициентов динамичности. Поэтому будем искать постоянные решения, имеющие место при одночастотной вибрации ( $p_1 = p_2 = p_3 = p$ ). Для этого случая по формулам (2.32) найдем необходимые для дальнейших преобразований значения коэффициентов динамичности  $R_{\lambda v}$ ,  $R_\lambda (v \pm \mu)$  и фазовых углов  $\delta_{\lambda v}$ ,  $\delta_\lambda (v \pm \mu)$  (табл. 3.1).

С учетом изложенного, а также выражений (2.26) и (2.39) и данных табл. 3.1 постоянное решение выражения (2.38) может быть представлено в виде

$$\gamma = -0,5 A_1 A_2 g^{-2} (I_1 - I_2) I_3^{-1} s_2^2 k_1^2 k_3^{-2} p^2 \cos \varepsilon_{1-2} + \\ + 0,5 A_1 A_2 g^{-2} s_2^2 k_1^2 k_3^{-2} p^{-6} \operatorname{tg}^2 \varphi \cos \varepsilon_{1-2} + 0,5 A_1 A_2 g^{-2} (2I_1 - I_2 + I_3) \times \\ \times I_1^{-1} k_2^2 k_3^2 p^{-4} \operatorname{tg}^2 \varphi \cos \varepsilon_{1-2} - 0,5 A_1 A_2 g^{-2} k_1^2 k_3^2 p^{-4} \operatorname{tg}^2 \varphi \times \\ \times \cos (\varepsilon_{1-2} - 2h_1 p^{-1}) + 0,5 A_1 A_2 g^{-2} k_1^2 p^{-2} \operatorname{tg} \varphi \cos (\varepsilon_{2-3} + 2h_1 p^{-1}).$$

Таблица 3.1

Возмущающая частота ( $p_v, p_v \pm \mu$ )	Значение коэффициентов динамичности			Значение фазовых углов		
	$R_{1v},$ $R_1 (v \pm \mu)$	$R_{2v},$ $R_2 (v \pm \mu)$	$R_{3v},$ $R_3 (v \pm \mu)$	$\delta_{1v},$ $\delta_1 (v \pm \mu)$	$\delta_{2v},$ $\delta_2 (v \pm \mu)$	$\delta_{3v},$ $\delta_3 (v \pm \mu)$
$p_1$	—	$k_2^2 p_1^{-2}$	—	—	$2h_2 p_1^{-1}$	—
$p_2$	$k_1^2 p_2^{-2}$	—	$k_3^2 p_2^{-2}$	$2h_1 p_2^{-1}$	—	$2h_3 p_2^{-1}$
$p_1 - p_2 = 0$	1	—	1	0	—	0
$p_2 - p_3 = 0$	1	—	1	0	—	0

Пренебрегая в этом выражении слагаемыми с малыми множителями  $p^{-4}$  и  $p^{-6}$  по сравнению со слагаемыми, имеющими множители  $p^{-2}$ , и раскрывая выражения (2.31) для  $A_v$  и  $\varepsilon_{v-\mu}$  и выражения (2.26) для  $s_2^2$ ,  $k_1^2$ ,  $k_3^2$ , получаем

$$\gamma = -0,5 a_1 a_2 g^{-2} k_1^2 p^2 M_g M_m^{-1} (I_1 - I_2) I_2^{-1} \cos (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) + \\ + 0,5 a_2 a_3 g^{-2} k_1^2 p^2 \operatorname{tg} \varphi \cos (\varepsilon_2 - \varepsilon_3 + 2h_1 p^{-1}). \quad (3.2)$$

Формула (3.2) определяет систематическое отклонение стрелочного МЧЭ при пространственной вибрации основания и одновременном действии гравитационного и магнитного полей. Она устанавливает зависимость отклонений от характеристик вибрации и параметров МЧЭ. Формула достаточно проста и тем не менее является более общей, чем известные решения, которые могут быть получены как ее частные случаи.

Так, например, полагая в формуле (3.2)  $a = (a_1^2 + a_2^2)^{0,5}$ ;  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$ ;  $h_1 = 0$ ;  $\operatorname{tg} \varphi = a_1 a_2^{-1}$ ;  $F = M_g l^{-1}$ ;  $M_1 = \gamma M \cos \varphi$ ,

где  $l$  — длина маятника, а  $\varphi$  — угол, составленный направлением вибрации с направлением меридиана, получаем

$$M_1 = 0,25 (I_1 - I_2) I_1^{-1} I_2^{-1} a^2 F^2 l^2 p^2 g^{-1} \sin 2\varphi$$

— выражение уводящего вибрационного момента при плоской горизонтальной вибрации [44].

Формула (3.2) пригодна для вычисления отклонений МЧЭ, вызванных наиболее неблагоприятными условиями воздействия вибрации [17]. Из нее можно определить максимальные отклонения при плоскостной и пространственной вибрации. Считая, что амплитуды  $a_v$  связаны условием

$$a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 = a^2 \quad (3.3)$$

(задана область, в которой происходит вибрация), представим выражение (3.2) в виде

$$\begin{aligned} \gamma &= ba_1a_2 + ca_2a_3; \\ b &= -0,5k_1^2p^2g^{-2}M_gM_m^{-1}(I_1 - I_2)I_2^{-1}\cos(\varepsilon_1 - \varepsilon_2); \\ c &= 0,5k_1^2p^2g^{-2}\operatorname{tg}\varphi\cos(\varepsilon_2 - \varepsilon_3 + 2h_1p^{-1}). \end{aligned} \quad (3.4)$$

Выражая отклонение  $\gamma$  через величины  $a$ ,  $a_1$  и  $a_2$  с использованием условий (3.3) и (3.4) и определяя условные экстремумы  $\partial\gamma/\partial a_1 = 0$  и  $\partial\gamma/\partial a_2 = 0$  полученной функции, будем иметь

$$ba_2 - ca_1a_2a_3^{-1} = 0 \text{ и } ba_1a_3 + ca_3^2 - ca_2^2 = 0.$$

Полагая, что  $a_v$  в этих выражениях не равны нулю и не бесконечны, получаем

$$\begin{aligned} a_{1m} &= ab[2(b^2 + c^2)]^{-0,5}; \quad a_{2m} = 2^{-0,5}a; \\ a_{3m} &= ac[2(b^2 + c^2)]^{-0,5} \end{aligned} \quad (3.5)$$

— выражения для перемещений  $a_v$ , при которых отклонение  $\gamma$  имеет экстремальные значения  $\gamma_m$ .

Проверив справедливость неравенства

$$\frac{\partial^2\gamma}{\partial a_1^2} \frac{\partial^2\gamma}{\partial a_2^2} - 2 \frac{\partial^2\gamma}{\partial a_1 \partial a_2} > 0,$$

убедимся в выполнении достаточных условий экстремума.

Из этих условий следует, что из восьми экстремумов четыре будут максимумами, а четыре — минимумами. В частности, при положительных  $a_{1m}$ ,  $a_{2m}$  и  $a_{3m}$  отклонение  $\gamma_m$  будет иметь максимальное значение.

Выражения для  $a_{1m}$ ,  $a_{2m}$ ,  $a_{3m}$  позволяют найти формулу для максимального значения отклонения  $\gamma$ . Для этого, подставляя выражения (3.5) в равенства (3.4), будем иметь

$$\gamma_m = 0,5a^2(b^2 + c^2)^{0,5}. \quad (3.6)$$

В то же время при плоскостной вибрации, например в горизонтальной плоскости ( $a_3 = 0$ ), максимальное отклонение  $\gamma_m = 0,5a^2b$ , в вертикальной плоскости ( $a_1 = 0$ )  $\gamma_m = 0,5a^2c$ .

Следовательно, при всех условиях рассмотрение частных задач приводит к заниженной оценке отклонения  $\gamma$ ; степень уменьшения оценки определяется соотношением между параметрами  $b$  и  $c$ .

Зависимости максимального азимутального отклонения  $\gamma$  при вибрации иллюстрируются графиками (рис. 3.1... 3.4), которые построены при изменении параметров МЧЭ, магнитного поля и вибрации в их возможных диапазонах ( $k_1 = 5 \dots 20 \text{ с}^{-1}$ ;

$$M_gM_m^{-1} = 30 \dots 500; \quad (I_1 - I_2)I_2^{-1} = 0 \dots 0,05; \quad \operatorname{tg}\varphi = 0 \dots 10,$$

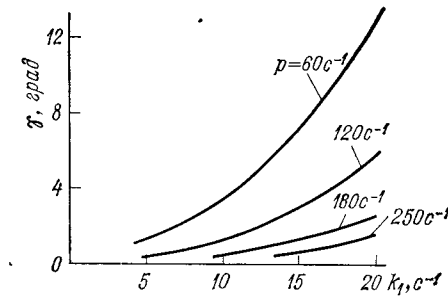


Рис. 3.1. График  $\gamma(k_1)$  при вибрации:

$$M_gM_m^{-1} = 100; \quad (I_1 - I_2)I_2^{-1} = 0,02; \\ \operatorname{tg}\varphi = 3; \quad ap^2 = 2g$$

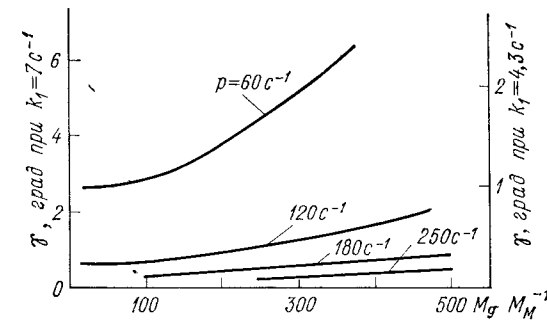


Рис. 3.2. График  $\gamma(M_gM_m^{-1})$  при вибрации:

$$(I_1 - I_2)I_2^{-1} = 0,02; \quad \operatorname{tg}\varphi = 3; \quad ap^2 = 2g$$

$p = 60 \dots 3000 \text{ с}^{-1}$ ). Приведенные графики дают количественные оценки систематических отклонений МЧЭ в зависимости от их параметров и условий работы.

На рис. 3.1 показана зависимость азимутального отклонения  $\gamma$  МЧЭ, приводящего к погрешности МК при вибрации, от изменения собственной частоты  $k_1$  МЧЭ относительно его горизонтальной оси. Видно, что для обеспечения работоспособности МК (погрешность не превышает  $2^\circ$ ) в условиях, указанных на рис. 3.1, при вибрации с частотой выше  $60 \text{ с}^{-1}$  собственная частота  $k_1$  МЧЭ должна быть не более  $7 \text{ с}^{-1}$ .

На рис. 3.2 и 3.3 показаны зависимости отклонений  $\gamma$  от соотношения  $M_gM_m^{-1}$  восстанавливающих моментов в гравитационном и магнитном полях Земли и от разности  $I_1 - I_2$  моментов инерции МЧЭ относительно его горизонтальных осей. Показано, что изменением этих параметров можно снизить суммарную

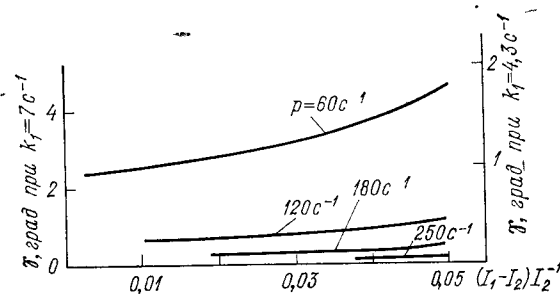


Рис. 3.3. График  $\gamma((I_1 - I_2)I_2^{-1})$  при вибрации:

$$M_g M_m^{-1} = 100; \operatorname{tg} \varphi = 3; a p^2 = 2g$$

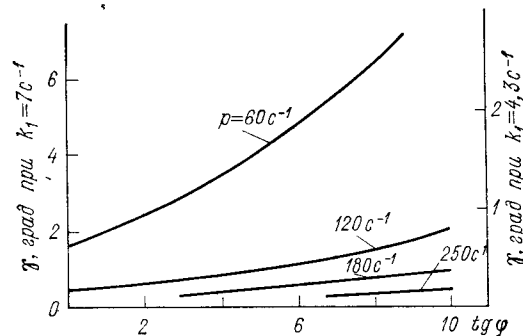


Рис. 3.4. График  $\gamma(\operatorname{tg} \varphi)$  при вибрации:

$$M_g M_m^{-1} = 100; (I_1 - I_2) I_2^{-1} = 0.02; a p^2 = 2g$$

погрешность МК при вибрации в 3... 4 раза, при этом составляющая погрешности [см. первое слагаемое формулы (3.2)], зависящая от вибрационных перемещений в горизонтальной плоскости, может быть снижена до нуля.

Влияние изменения магнитной широты плавания ( $\operatorname{tg} \varphi$ ) на изменение суммарной погрешности МК при вибрации иллюстрируется рис. 3.4. График показывает: в высоких широтах суммарная погрешность при вибрации резко возрастает, что определяется увеличением составляющей погрешности, вызванной вертикальной вибрацией [см. второе слагаемое формулы (3.2)]. Эта составляющая погрешности может быть снижена только уменьшением собственных частот колебаний МЧЭ относительно его горизонтальных осей.

Из полученных выражений и графиков следует, что никаким сочетанием параметров МЧЭ свести к нулю отклонения МЧЭ при вибрации невозможно и что наиболее опасны низкочастотные колебания. Однако рациональным выбором парамет-

ров  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $M_g$ ,  $M_m$ ,  $I_1$  и  $I_2$  при конструировании МЧЭ можно довести максимальные отклонения до допустимых значений. Наиболее эффективно на снижение отклонений влияет уменьшение параметров  $k_1$  и  $k_2$ . Изменение параметров  $k_3$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $h_3$  и  $I_3$  в пределах одного порядка практически не влияет на изменение погрешности  $\gamma$  МК при вибрации.

Из выражений (3.2) и (3.6) следуют основные особенности влияния вибрации основания на систематические отклонения МЧЭ, которые могут быть использованы при разработке не только МЧЭ, но и компасов.

Линейные вибрации по направлению, перпендикулярному плоскости магнитного меридиана, а также вибрация в плоскости магнитного меридиана не вызывают отклонений МЧЭ от положения равновесия.

Плоскостные одночастотные вибрации в горизонтальной плоскости и в плоскости, перпендикулярной магнитному меридиану, приводят к постоянным систематическим отклонениям МЧЭ, которые зависят от соотношения начальных фаз. При линейных вибрациях ( $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = 0$  и  $\varepsilon_2 - \varepsilon_3 = 0$ ) отклонения  $\gamma$  максимальны, при эллиптических ( $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \pi/2$  и  $\varepsilon_2 - \varepsilon_3 = \pi/2$ ) равны нулю.

Пространственная одночастотная вибрация приводит к максимальному систематическому отклонению МЧЭ, имеющему место при выполнении условий (3.5) и линейной вибрации ( $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \varepsilon_2 - \varepsilon_3 = 0$ ). При эллиптической вибрации ( $\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = \varepsilon_2 - \varepsilon_3 = \pi/2$ ) отклонение  $\gamma$  отсутствует.

Разночастотная вибрация ( $p_1 \neq p_2$ ,  $p_2 \neq p_3$  и  $p_3 \neq p_1$ ) не вызывает систематических отклонений МЧЭ.

Исходя из особенностей влияния вибрации [см. формулу (3.2)], можно исключить (или уменьшить) отклонения МЧЭ путем амортизации котелка МК только от горизонтальных вибраций или путем амортизации котелка только от вертикальной вибрации и одновременного обеспечения равенства моментов инерции МЧЭ  $I_1$  и  $I_2$ .

Из двух рассмотренных путей первый более предпочтителен, так как при его использовании расстояние между МЧЭ и компенсаторами магнитной девиации компаса остается неизменным.

Учет особенностей влияния вибрации приводит к возможности создания в лабораторных условиях наиболее неблагоприятного испытательного режима, который имеет место, когда первое и второе слагаемые в выражении (3.2) максимальны, что достигается при  $a_1 = a_2 = a_3$  (так как  $a_v$  ограничены сверху) и  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3$  (если  $2h_1 p^{-1}$  очень мало). Этот режим характеризуется линейной вибрацией в вертикальной плоскости, расположенной под углом  $45^\circ$  к магнитному меридиану, причем направление вибрации в этой плоскости с горизонтальной плоскостью составляет угол  $35^\circ$ .



Для оценки влияния на отклонения МЧЭ его отдельных параметров возможно последовательное испытание компаса вначале в горизонтальной плоскости при направлении вибрации под углом  $45^\circ$  к магнитному меридиану [получим отклонение, определяемое первым слагаемым выражения (3.2)], затем в вертикальной плоскости, перпендикулярной магнитному меридиану, при направлении вибрации под углом  $45^\circ$  к горизонтальной плоскости [отклонение, определяемое вторым слагаемым выражения (3.2)].

Оба метода испытаний соответствуют нормам, установленным Правилами [36].

### 3.2. Отклонения магнитного чувствительного элемента при качке

В настоящем подразделе исследуются погрешности стрелочного МК, вызванные отклонениями его МЧЭ при пространственной гармонической качке, определяются систематические отклонения МЧЭ, производится оценка влияния параметров МЧЭ на его отклонения и возможности их снижения, даются рекомендации по методам стендовых испытаний.

Для оценки отклонений стрелочного МЧЭ от положения статического равновесия при качке основания, так же как и при вибрации, воспользуемся формулой (2.38) для азимутального отклонения  $\gamma$ , преобразование которой проведем с учетом соотношений частотных параметров МЧЭ и качки. Эти соотношения имеют следующий вид [4, 15]:

$$k_1 \approx k_2 \gg k_3; \quad h_1 \approx h_2 \gg h_3; \quad h_\lambda \leq k_\lambda; \quad M_g M_m^{-1} > 30; \\ k_1^2 \gg p_v^2; \quad h_1^2 \gg p_v^2; \quad k_3^2 \ll p_v^2; \quad h_3^2 \ll p_v^2; \quad p_v = 0,3 \dots 2 \text{ с}^{-1}. \quad (3.7)$$

Будем иметь в виду, что предельные, очень редко встречающиеся частоты качки судна доходят до  $0,25 \text{ с}^{-1}$  (соответствуют длинам океанских волн до 900 м), а наиболее вероятные частоты находятся в пределах  $0,7 \dots 0,9 \text{ с}^{-1}$  (при длинах волн  $90 \dots 100 \text{ м}$ ) [41].

По формулам (2.31) найдем необходимые для дальнейших преобразований значения коэффициентов динамичности  $R_{\lambda v}$ ,  $R_\lambda (v \pm \mu)$  и фазовых углов  $\delta_{\lambda v}$ ,  $\delta_\lambda (v \pm \mu)$  (табл. 3.2). Под пространственной качкой основания будем понимать трехкомпонентную качку (совместное действие продольных и поперечных относительно магнитного меридиана, а также вертикальных колебаний).

Используя формулы (2.38), (2.26), (3.7) и значения физических величин из табл. 3.2, пренебрегая слагаемыми с произведением малых множителей  $s_1^2 k_2^{-2}$ ,  $R_{32}$ ,  $R_{3(1+2)}$ ,  $R_{3(2+3)}$ , взаимно-исключая практически равные (при  $B_1 = 0,5 \dots 2$ ,  $h_1 \approx h_2$  и  $k_1 \approx k_2$ ) слагаемые и принимая во внимание, что у МЧЭ

Таблица 3.2

Обозначение возмущающей частоты $p, p_v \pm \mu$	Значения возмущающей частоты, $\text{с}^{-1}$	Значения коэффициентов динамичности			Значения фазовых углов		
		$R_{3v}, R_3 (v \pm \mu)$			$\delta_{1v}, \delta_1 (1 \pm \mu)$	$\delta_{2v}, \delta_2 (v \pm \mu)$	$\delta_{3v}, \delta_3 (v \pm \mu)$
		$2h_3 < k_3$	$2h_3 = k_3$	$2h_3 > k_3$			
$p_1$	$\ll k_2$ $\ll k_1; \approx k_3$ $\ll k_1; \gg k_3$	$0,5k_3 h_3^{-1} > 1$ $k_3^2 p_2^{-2} \ll 1$ $k_3^2 (p_1 + p_2)^{-2} \ll 1$ $k_3^2 (p_2 + p_3)^{-2} \ll 1$ $1$	$0,5k_3 h_3^{-1} = 1$ $k_3^2 p_2^{-2} \ll 1$ $k_3^2 (p_1 + p_2)^{-2} \ll 1$ $k_3^2 (p_2 + p_3)^{-2} \ll 1$ $1$	$0,5k_3 h_3^{-1} < 1$ $k_3^2 p_2^{-2} \ll 1$ $k_3^2 (p_1 + p_2)^{-2} \ll 1$ $k_3^2 (p_2 + p_3)^{-2} \ll 1$ $1$	—	$-2k_2^{-2} h_2 p_1$	—
$p_2$	$\ll k_1; \approx k_3$ $\ll k_1; \gg k_3$	$0,5k_3 h_3^{-1} > 1$ $k_3^2 p_2^{-2} \ll 1$ $k_3^2 (p_1 - p_2)^{-2} \ll 1$ $-p_2)^{-2} \ll 1$ $1$	$0,5k_3 h_3^{-1} = 1$ $k_3^2 p_2^{-2} \ll 1$ $k_3^2 (p_1 - p_2)^{-2} \ll 1$ $-p_2)^{-2} \ll 1$ $1$	$0,5k_3 h_3^{-1} < 1$ $k_3^2 p_2^{-2} \ll 1$ $k_3^2 (p_1 - p_2)^{-2} \ll 1$ $-p_2)^{-2} \ll 1$ $1$	$-2k_1^{-2} h_1 p_2$ $-2k_1^{-2} h_1 \times (p_2 + p_3)$ $-2k_1^{-2} h_1 \times (p_2 + p_3)$	—	$\pi/2$ $2h_3 p_2^{-1}$ $2h_3 (p_1 + p_2)^{-1}$ $2h_3 (p_2 + p_3)^{-1}$ $-2k_3^{-2} h_3 \times (p_1 - p_2)$ $\pi/2$ $2h_3 (p_1 - p_2)^{-1}$ $-2k_3^{-2} h_3 (p_2 - p_3)$ $-p_3$ $\pi/2$ $2h_3 (p_2 - p_3)^{-1}$
$p_1 + p_2$	$\ll k_1; \approx k_3$ $\ll k_1; \gg k_3$	$0,5k_3 h_3^{-1} > 1$ $k_3^2 p_2^{-2} \ll 1$ $k_3^2 (p_1 + p_2)^{-2} \ll 1$ $k_3^2 (p_2 + p_3)^{-2} \ll 1$ $1$	$0,5k_3 h_3^{-1} = 1$ $k_3^2 p_2^{-2} \ll 1$ $k_3^2 (p_1 + p_2)^{-2} \ll 1$ $k_3^2 (p_2 + p_3)^{-2} \ll 1$ $1$	$0,5k_3 h_3^{-1} < 1$ $k_3^2 p_2^{-2} \ll 1$ $k_3^2 (p_1 + p_2)^{-2} \ll 1$ $k_3^2 (p_2 + p_3)^{-2} \ll 1$ $1$	$-2k_1^{-2} h_1 \times (p_1 - p_2)$ $-2k_1^{-2} h_1 \times (p_2 - p_3)$	—	—
$p_1 - p_2$	$\ll k_3$ $\approx k_3$ $\gg k_3$	$0,5k_3 h_3^{-1} > 1$ $k_3^2 p_2^{-2} \ll 1$ $-p_2)^{-2} \ll 1$ $1$	$0,5k_3 h_3^{-1} = 1$ $k_3^2 p_2^{-2} \ll 1$ $-p_2)^{-2} \ll 1$ $1$	$0,5k_3 h_3^{-1} < 1$ $k_3^2 p_2^{-2} \ll 1$ $-p_2)^{-2} \ll 1$ $1$	—	—	—
$p_2 - p_3$	$\ll k_3$ $\approx k_3$ $\gg k_3$	$0,5k_3 h_3^{-1} > 1$ $k_3^2 p_2^{-2} \ll 1$ $-p_3)^{-2} \ll 1$ $1$	$0,5k_3 h_3^{-1} = 1$ $k_3^2 p_2^{-2} \ll 1$ $-p_3)^{-2} \ll 1$ $1$	$0,5k_3 h_3^{-1} < 1$ $k_3^2 p_2^{-2} \ll 1$ $-p_3)^{-2} \ll 1$ $1$	—	—	—

компасов  $M_g(M_g + M_m)^{-1} \approx 1$ , можем представить уравнение для  $\gamma$  в виде

$$\begin{aligned} \gamma = & -a_2 p_2^2 g^{-1} R_{32} [1 - p_2^2 k_3^{-2} M_m (M_g + M_m)^{-1}] \times \\ & \times \operatorname{tg} \varphi \cos (p_2 t + \varepsilon_2 + \delta_{12} + \delta_{32}) - 0,5 a_1 a_2 p_1^2 p_2^2 k_3^{-2} g^{-2} (p_2 - B_3 p_1) \times \\ & \times R_{3(1-2)} \cos (p_{1-2} t + \varepsilon_{1-2} + \delta_{21} - \delta_{12} + \delta_{3(1-2)}) - \\ & - 0,5 a_1 a_2 p_1^2 p_2^2 k_3^{-2} g^{-2} (p_2 + B_3 p_1) R_{3(1+2)} \times \\ & \times \cos (p_{1+2} t + \varepsilon_{1+2} + \delta_{21} + \delta_{12} + \delta_{3(1+2)}) - \\ & - 0,5 a_1 a_2 p_1^2 p_2^2 g^{-2} R_{32} R_{3(1-2)} \operatorname{tg}^2 \varphi \cos (p_{1-2} t + \varepsilon_{1-2} + \\ & + \delta_{21} - \delta_{12} - \delta_{32} + \delta_{3(1-2)}) - 0,5 a_2 a_3 p_2^2 p_3^2 g^{-2} R_{3(2-3)} \operatorname{tg} \varphi \times \\ & \times \cos (p_{2-3} t + \varepsilon_{2-3} + \delta_{12} + \delta_{1(2-3)} + \delta_{3(2-3)}). \end{aligned} \quad (3.8)$$

Выражение (3.8) определяет в общем виде азимутальное отклонение МЧЭ при трехкомпонентной качке. Оно является суммой периодических слагаемых с частотами  $p_2$ ,  $p_{1-2}$ ,  $p_{1+2}$ ,  $p_{2-3}$ . В таком виде оно пригодно для определения отклонений МЧЭ при любом сочетании частот  $p_v$ . При сближении частот  $p_v$ , и особенно при их равенстве, периодические колебания с частотами  $p_{1-2}$  и  $p_{2-3}$  переходят в постоянные систематические. Такой режим качки является одним из наименее благоприятных, так как постоянные систематические погрешности МК в условиях эксплуатации обнаруживаются чрезвычайно трудно. Значения погрешностей в этом режиме максимальны при  $2h_3 \geq \geq k_3$  и близки к максимальным, если  $2h_3$  несколько меньше  $k_3$ .

Преобразовывая выражения (3.8) для режима  $p_v = p$ , учитывая, что для этого случая справедливы следующие соотношения:  $B_3 + 1 \approx 2$  (так как у МЧЭ компасов  $I_1 \approx I_2$ ),  $\delta_{21} \approx \delta_{12}$  (так как  $h_1 \approx h_2$  и  $k_1 \approx k_2$ ),  $\delta_{1(2-3)} = \delta_{3(1-2)} = \delta_{3(2-3)} = 0$ , получаем формулу для азимутального отклонения МЧЭ компаса при трехкомпонентной одночастотной качке

$$\begin{aligned} \gamma = & -a_2 p^2 g^{-1} R_{32} [1 - p^2 k_3^{-2} M_m (M_m + M_g)^{-1}] \times \\ & \times \operatorname{tg} \varphi \cos (pt + \varepsilon_2 + \delta_{12} + \delta_{32}) - 0,25 a_1 a_2 p^4 g^{-2} \times \\ & \times \cos (2pt + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \delta_{21} + \delta_{12} + \delta_{3(1+2)}) - \\ & - 0,5 a_1 a_2 p^6 k_3^{-2} g^{-2} (I_1 - I_2) I_3^{-1} \cos (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) - 0,5 a_1 a_2 p^4 g^{-2} R_{32} \times \\ & \times \operatorname{tg}^2 \varphi \cos (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \delta_{32}) - 0,5 a_2 a_3 p^4 g^{-2} \operatorname{tg} \varphi \cos (\varepsilon_2 - \varepsilon_3 + \delta_{12}), \end{aligned} \quad (3.9)$$

где коэффициент динамичности  $R_{32} \approx 0,5 k_3 h_3^{-1}$  при  $p = k_3$  и  $R_{32} \approx k_3^2 p^{-2}$  при  $p \gg k_3$ .

Выражение (3.9) удобно для инженерных расчетов погрешностей МК, вызванных отклонениями МЧЭ, в наиболее неблагоприятных условиях воздействия качки. Из него следует, что в режиме одночастотной качки отклонение МЧЭ определяется

тремя составляющими: периодической — с частотой качки (первое слагаемое), периодической — с двойной частотой качки (второе слагаемое) и постоянной (третье, четвертое и пятое слагаемые). Это выражение пригодно для вычисления максимальных систематических отклонений МЧЭ и определения условий качки, при которых они имеют место. Для этого, произведя вычисления, аналогичные проведенным при вибрации, убедимся, что выражения (3.5) и (3.6) с учетом соответствующих значений коэффициентов  $b$  и  $c$  пригодны также для оценки максимальных систематических отклонений МЧЭ компаса при качке.

Обычно качка задается в координатах, связанных с судном. Для оценки отклонения  $\gamma$  в этом случае представим выражения (3.8) и (3.9) в виде

$$\gamma = b a_1 a_2 + c a_2 a_3 + d a_2,$$

где  $b$ ,  $c$ ,  $d$  — коэффициенты при  $a_1 a_2$ ,  $a_2 a_3$ ,  $a_2$  в этих выражениях.

Воспользовавшись формулами преобразования координат

$$a_1 = (-\theta \sin \Phi + \psi \cos \Phi) l, \quad a_2 = (\theta \cos \Phi + \psi \sin \Phi) l,$$

в которых  $\theta$  и  $\psi$  — углы бортовой и килевой качки судна,  $\Phi$  — курс судна,  $l$  — радиус качки, получим

$$\begin{aligned} \gamma = & dl (\theta \cos \Phi + \psi \sin \Phi) + b l^2 [0,5 (\psi^2 - \theta^2) \sin 2\Phi + \theta \psi \cos 2\Phi] + \\ & + a_3 c l (\theta \cos \Phi + \psi \sin \Phi) \end{aligned} \quad (3.10)$$

— выражение для отклонений МЧЭ от положения статического равновесия при совместном действии бортовой и килевой качки судна и его вертикальных колебаний в зависимости от курса.

Формулы (3.8), (3.9) и (3.10) являются более общими по сравнению, например, с приведенными в работах [12 и 24]. Они содержат кроме периодических отклонений с частотой  $p_2$  качки в направлении, перпендикулярном магнитному меридиану, отклонения с разностными  $p_1 - p_2$  и  $p_2 - p_3$  и суммарной  $p_1 + p_2$  частотами качки. Причем при одночастотной трехкомпонентной качке отклонения с разностными частотами переходят в постоянные систематические. Из этих формул могут быть получены частные случаи воздействия качки на МЧЭ. Так, полагая в выражении (3.8), преобразованном к виду (3.10),  $\theta = 0$  и  $a_3 = 0$ , получаем выражение

$$\gamma = dl \psi \sin \Phi + 0,5 b l^2 \psi^2 \sin 2\Phi$$

для отклонения МЧЭ при килевой качке в зависимости от курса судна, в котором первое слагаемое, записанное с учетом соответствующих обозначений и имеющее вид

$$\gamma_1 = p_2^2 g^{-1} R_{12} R_{32} l \psi \operatorname{tg} \varphi \sin \Phi \cos (p_2 t + \varepsilon_2 + \delta_{12} + \delta_{32}),$$

совпадающий с данными работы [24], определяет периодические колебания МЧЭ компаса при килевой качке, второе — сумму колебаний с разностными и суммарными частотами.

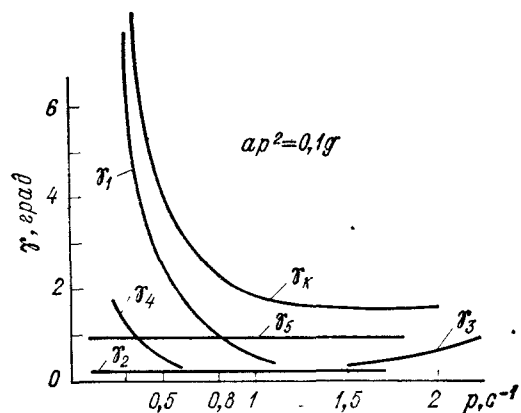


Рис. 3.5. График  $\gamma(p)$  при качке:  
 $k_3 = 0,2 \text{ с}^{-1}$ ;  $M_g M_M^{-1} = 100$ ;  $(I_1 - I_2) I_3^{-1} = 0,02$ ;  $\text{tg } \varphi = 3$

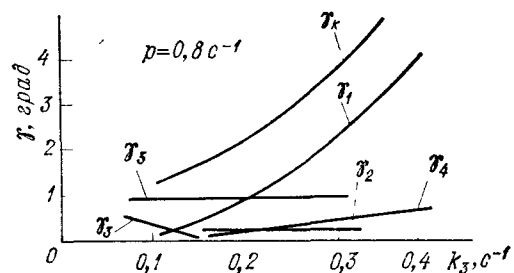


Рис. 3.6. График  $\gamma(k_3)$  при качке:  
 $M_g M_M^{-1} = 100$ ;  $(I_1 - I_2) I_3^{-1} = 0,02$ ;  $\text{tg } \varphi = 3$

Выражения (3.8), (3.9) и (3.10) устанавливают зависимости между отклонениями МЧЭ и его параметрами, параметрами качки и полей, которые иллюстрируются графиками (рис. 3.5... 3.8), построенными при изменении указанных параметров в следующих, реально возможных, диапазонах:  $p = 0,3 \dots 2 \text{ с}^{-1}$ ,  $ap^2 = 0 \dots 0,3g$ ,  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3$ ,  $\text{tg } \varphi = 0 \dots 10$ ,  $k_3 = 0,15 \dots 0,4 \text{ с}^{-1}$ ,  $M_g M_M^{-1} = 30 \dots 500$ ,  $(I_1 - I_2) I_3^{-1} = 0 \dots 0,03$ .

Для удобства анализа при вычислениях и построении графиков в них введены следующие обозначения:  $\gamma_K$  — суммарное отклонение МЧЭ при качке;  $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_5$  — составляющие откло-

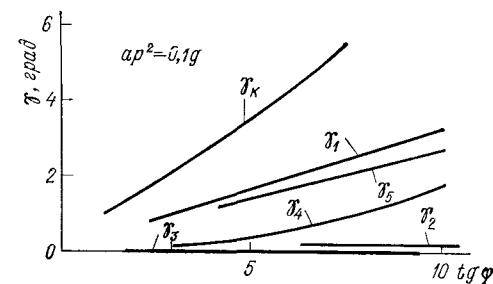


Рис. 3.7. График  $\gamma(\varphi)$  при качке:  
 $p = 0,8 \text{ с}^{-1}$ ;  $k = 0,2 \text{ с}^{-1}$ ;  $M_g M_M^{-1} = 100$ ;  
 $(I_1 - I_2) I_3^{-1} = 0,02$

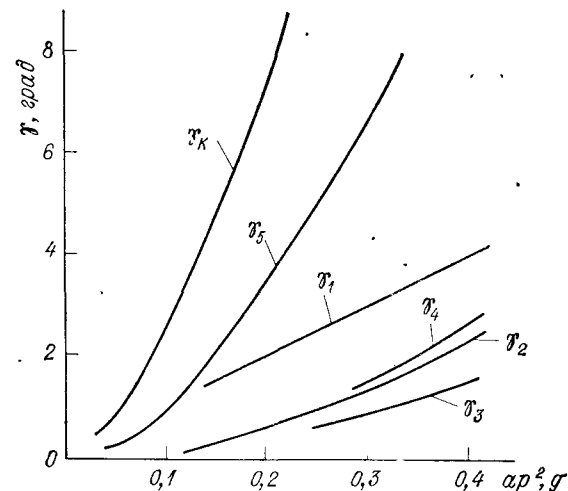


Рис. 3.8. График  $\gamma(ap^2)$  при качке:  
 $p = 0,8 \text{ с}^{-1}$ ;  $k = 0,2 \text{ с}^{-1}$ ;  $M_g M_M^{-1} = 100$ ;  
 $(I_1 - I_2) I_3^{-1} = 0,02$ ;  $\text{tg } \varphi = 3$

нения  $\gamma_K$ , соответствующие первому, второму, ..., пятому слагаемым (3.9).

При анализе формул (3.8) и (3.9) и графиков выявлено, что максимальное абсолютное значение имеют периодическая составляющая отклонения с частотой качки  $\gamma_1$  и систематическая составляющая  $\gamma_5$ , зависящая от вертикальных колебаний. Периодическая составляющая  $\gamma_2$  с двойной частотой обычно мала настолько, что в большинстве случаев ее можно не учитывать.

Составляющие отклонения, определяемые неравенством моментов инерции МЧЭ ( $\gamma_3$ ) и широтой места ( $\gamma_4$ ), существенны только в областях соответственно высоких и низких частот качки.

При неизменном ускорении качки и увеличении ее частоты (см. рис. 3.5) периодическая составляющая  $\gamma_2$  и постоянная составляющая  $\gamma_3$  остаются неизменными, периодическая составляющая  $\gamma_1$  и постоянная составляющая  $\gamma_4$  уменьшаются, а постоянная составляющая  $\gamma_5$  увеличивается.

Как можно установить из выражения (3.9), наиболее влияющим параметром МЧЭ является его собственная частота  $k_3$ . Из графика (см. рис. 3.6), представляющего эту зависимость, следует, что при установленных расчетных фиксированных значениях параметров качки и магнитного поля изменением параметра  $k_3$  можно существенно снизить основные составляющие  $\gamma_1$  и  $\gamma_4$  отклонения  $\gamma_k$ . Составляющая  $\gamma_3$  при этом растет незначительно и ее можно снизить уменьшением разности моментов инерции  $I_1$  и  $I_2$ . Однако составляющая  $\gamma_5$  остается неизменной.

Большое влияние параметра  $\varphi$  — угла наклона вектора индукции МПЗ — на отклонение  $\gamma_k$  очевидно при анализе формулы (3.9). Количественные соотношения зависимостей, приведенные на графике (см. рис. 3.7), свидетельствуют о том, что в высоких широтах при  $\operatorname{tg} \varphi > 5$  и больших ускорениях качки  $ap^2 > 0,1g$  (см. рис. 3.8) МК будет работать с большими погрешностями.

В режиме одночастотной качки при  $k_3^2 \ll p^2$  изменение параметра  $h_3$  от нуля до  $1,5k_3$  на отклонении  $\gamma_k$  (3.9) практически не сказывается.

При разночастотной качке влияние изменения параметра  $h_3$  в промежутке  $2h_3 \geq k_3$  также мало сказывается на отклонении  $\gamma_k$ . Однако, когда  $2h_3 < k_3$ , погрешность  $\gamma_k$  может возрасти значительно, особенно в режиме  $p_1 - p_2 \approx k_3$  и  $p_2 - p_3 \approx k_3$ . Так, например, если  $k_3 = 0,26 \text{ с}^{-1}$  ( $T = 24 \text{ с}$ );  $p_1 = p_3 = 1,045 \text{ с}^{-1}$  ( $T_1 = T_3 = 6 \text{ с}$ )  $p_2 = 0,785 \text{ с}^{-1}$  ( $T_2 = 8 \text{ с}$ ), а  $2h_3 = 0,025 \text{ с}^{-1}$ , то значения коэффициентов динамичности  $R_{3(1-2)}$  и  $R_{3(2-3)}$  и, следовательно, размеры последних трех низкочастотных составляющих отклонения  $\gamma$  (3.8) возрастают на порядок по сравнению со случаем, когда  $2h_3 \approx k_3$ . Значительное уменьшение отклонений  $\gamma$  в этом режиме возможно только путем увеличения параметра  $h_3$  до значений, примерно равных  $0,5k_3$ . Дальнейшее увеличение параметра  $h_3$  (если оно происходит за счет вязкости жидкости, то увеличиваются все параметры  $h_k$ ) до  $h_3 \gg p_v$  (случай сильного демпфирования) приводит к изменению коэффициентов динамичности, которые будут иметь вид  $R_{3v} = 0,5k_3^2 h_3^{-1} p_v^{-1}$  и  $R_{3(v \pm \mu)} = 0,5k_3^2 h_3^{-1} (p_v \pm p_\mu)^{-1}$ . Тогда, как следует из выражения (3.8), все составляющие отклонения  $\gamma_k$  будут уменьшаться с увеличением параметра  $h_3$ . Однако этот

прием снижения отклонения  $\gamma_k$  для практики проектирования стрелочных МК неэффективен, так как, если  $h_3 > h_3$ , погрешность МК при циркуляции и рыскании растет быстрее, чем снижается при качке.

Из выражений (3.8) и (3.9) и анализа графиков следует, что никаким сочетанием параметров МЧЭ свести к нулю погрешности МК при качке невозможно. Однако соответствующим выбором параметров  $k_3$ ,  $h_3$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $M_m$  и  $M_g$  можно снизить погрешность МК до допустимых значений. Изменение параметров МЧЭ  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $h_1$  и  $h_2$  в пределах одного порядка на изменение погрешности МК при качке практически не влияет.

Выражения (3.8) и (3.9) позволяют установить основные особенности влияния качки на отклонения МЧЭ; эти особенности могут быть использованы при разработке испытательного оборудования для компасов.

Однокомпонентная качка в направлении магнитного меридиана и вертикальные колебания не вызывают отклонений МЧЭ от положения равновесия.

Однокомпонентная качка в направлении, перпендикулярном магнитному меридиану, приводит к периодическим отклонениям МЧЭ с частотой качки.

Двухкомпонентная качка в горизонтальной плоскости (в направлении осей  $O\xi$  и  $O\eta$  — см. рис. 2.1) и двухкомпонентная качка в вертикальной плоскости, перпендикулярной меридиану (в направлении осей  $O\eta$  и  $O\xi$ ), приводят к периодическим отклонениям МЧЭ с частотой качки и отклонениям с разностной частотой. При равенстве частот периодические отклонения МЧЭ с разностной частотой переходят в систематические, при линейных колебаниях ( $\epsilon_1 - \epsilon_2 = 0$  и  $\epsilon_2 - \epsilon_3 = 0$ ) эти отклонения максимальны, при эллиптических ( $\epsilon_1 - \epsilon_2 = \pi/2$  и  $\epsilon_2 - \epsilon_3 = \pi/2$ ) равны нулю. Двухкомпонентная качка в горизонтальной плоскости приводит, кроме того, к периодическим колебаниям МЧЭ с суммарной частотой качки, которые при равенстве частот качки преобразуются в колебания МЧЭ с двойной частотой.

Трехкомпонентная качка (в направлении осей  $O\xi$ ,  $O\eta$ ,  $O\xi$ ) приводит к наибольшим отклонениям МЧЭ. При равенстве частот отклонения МЧЭ включают в себя периодические и постоянные составляющие. Постоянные составляющие максимальны при  $\epsilon_1 - \epsilon_2 = 0$  и  $\epsilon_2 - \epsilon_3 = 0$ . Погрешность МК при качке измеряется на испытательном стенде, например, методами, изложенными в работах [1, 36]. Пример записи погрешности при испытании приведен на рис. 3.9, на котором хорошо виден характер изменения погрешности при переходе с одной частоты качки на другую.

Зависимость составляющих погрешностей в формулах (3.8) и (3.9) от параметров только отдельных пространственных компонентов колебаний приводит к возможности оценки макси-

### 3.3. Оценка влияния степени нерегулярности колебаний основания на отклонения магнитного чувствительного элемента

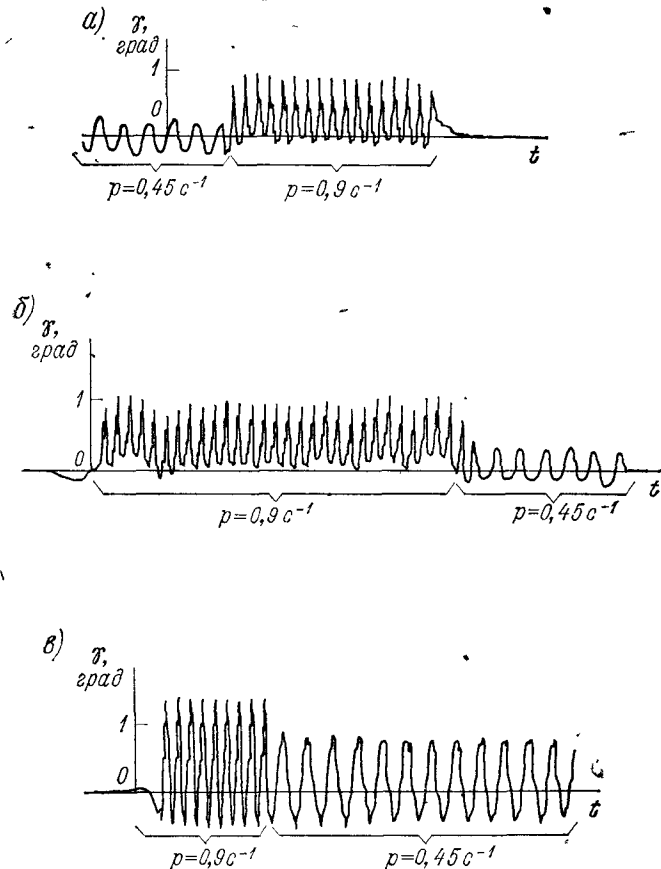


Рис. 3.9. Погрешности компаса КМ145 (макет) при качке:  
а:  $a_1=0,9$  м,  $a_2=0,3$  м,  $a_3=0$ ; б:  $a_1=0,9$  м,  $a_2=0,3$  м,  $a_3=0,3$  м; в:  $a_1=0,75$  м,  $a_2=0,75$  м,  $a_3=0,3$  м

мальной эксплуатационной погрешности путем лабораторных испытаний МК без использования сложного трехкомпонентного оборудования. Для этого достаточно просуммировать составляющие погрешности, полученные последовательно в условиях, вытекающих из формулы (3.9). Можно также провести испытание в направлении, составляющем с магнитным меридианом угол, равный  $\arctg a_2 a_1^{-1}$  ( $a_2 \geq a_1$ ), где  $a_2$  и  $a_1$  — максимальные амплитуды бортовой и килевой качки судна, а последнее слагаемое можно получить расчетом.

Считается [6, 38, 40], что бортовая и килевая качка судна на нерегулярном волнении являются несвязанными случайными функциями времени. Отсутствие корреляционной связи между бортовой и килевой качкой не означает, однако, отсутствия связанности колебаний точки опоры МЧЭ МК в земных осях координат — в направлении магнитного меридиана и перпендикулярных ему направлениях. Именно наличие связанности этих колебаний, как показывает анализ формул (3.8) и (3.9), приводит к появлению постоянных систематических отклонений МЧЭ при гармоническом законе возмущающих воздействий. Связь пространственных перемещений точки опоры МЧЭ может иметь место и при случайных колебаниях.

Например, для МК, установленного на корме судна, которое движется каким-либо четвертным магнитным курсом и подвергается только килевой качке, имеет место единичная корреляционная связь между перемещениями точки опоры МЧЭ в направлении всех осей системы координат  $O\xi\eta\zeta$  (см. рис. 2.1). Подобная связь возможна и при бортовой, и при смешанной качке, и при вибрации основания, а также на курсах, отличающихся от четвертных.

Целью настоящего подраздела является оценка влияния возможной нерегулярности вибрации и качки основания на отклонения МЧЭ, определение зависимостей отклонений МЧЭ от его параметров и характеристик случайных колебаний.

Как принято в подобных задачах, углы качки судна (перемещения точки опоры МЧЭ) для не особенно больших промежутков времени могут быть приняты стационарными случайными функциями времени [40]. Они могут быть охарактеризованы математическим ожиданием  $\bar{l}(t)$  и спектральной плотностью  $S_l(p)$ , которые достаточно хорошо аппроксимируются формулами [40]:

$$\begin{aligned} \bar{l}(t) &= M[l(t)] = 0; \\ S_l(p) &= \frac{2\sigma^2\mu}{\pi} \frac{b^2}{p^4 + 2d^2p^2 + b^4}; \\ S_l(p) &= p^2 S_l(p); \\ d^2 &= \mu^2 - \lambda^2, \quad b^2 = \mu^2 + \lambda^2, \end{aligned} \quad (3.11)$$

где  $\sigma$  и  $l$  — среднее квадратическое и мгновенное значения перемещений точки опоры;  $\lambda$  — частота, определяющая положение максимума спектральной плотности перемещения (преобладающая частота);  $\mu$  — параметр, характеризующий степень нерегулярности перемещений (в большинстве случаев возмущение имеет достаточно узкополосный спектр, т. е.  $\mu\lambda^{-1} \ll 1$ ).

Превышение в выражении (3.11) для спектральной плотности порядка знаменателя над порядком числителя на четыре единицы позволяет оперировать статистическим описанием не только углов, но и скоростей качки. Поскольку для оценки влияния степени нерегулярности требуется определение ускорений нерегулярной качки, то можно считать, что скорость качки является случайным процессом, имеющим спектральную плотность вида (3.11) [20]. Тогда

$$S_W(p) = p^2 S_l(p). \quad (3.12)$$

Вибрации судовых конструкций также носят случайный характер.

Математическое ожидание и спектральная плотность вибрации могут быть охарактеризованы выражениями (3.11) и (3.12) [38].

Для принятого режима колебаний проекции ускорения на соответствующие оси системы  $O\xi\eta\zeta$  могут быть определены выражениями:

$$W_v(t) = n_v W(t); \quad n_1^2 + n_2^2 + n_3^2 = 1 \quad (v = 1, 2, 3). \quad (3.13)$$

Уравнения движения МЧЭ имеют вид (2.27). Их исследование проведем на основе корреляционной теории случайных функций. Характеристики случайных отклонений МЧЭ будем искать в виде рядов

$$\begin{aligned} \sigma_\alpha^2 &= \sigma_{\alpha 0}^2 + \sigma_{\alpha 1}^2 + \sigma_{\alpha 2}^2 + \dots; & \bar{\alpha} &= \bar{\alpha}_0 + \bar{\alpha}_1 + \bar{\alpha}_2 + \dots; \\ \sigma_\beta^2 &= \sigma_{\beta 0}^2 + \sigma_{\beta 1}^2 + \sigma_{\beta 2}^2 + \dots; & \bar{\beta} &= \bar{\beta}_0 + \bar{\beta}_1 + \bar{\beta}_2 + \dots; \\ \sigma_\gamma^2 &= \sigma_{\gamma 0}^2 + \sigma_{\gamma 1}^2 + \sigma_{\gamma 2}^2 + \dots; & \bar{\gamma} &= \bar{\gamma}_0 + \bar{\gamma}_1 + \bar{\gamma}_2 + \dots, \end{aligned} \quad (3.14)$$

для чего воспользуемся уравнениями (2.29) и (2.30) нулевого, первого и второго приближений.

Из уравнений нулевого приближения имеем:

$$\begin{aligned} \sigma_{\alpha 0} &= \sigma_{\beta 0} = \sigma_{\gamma 0} = 0; \\ \bar{\alpha}_0 &= 0; \quad \bar{\beta}_0 = M_g(M_g + M_m)^{-1} \operatorname{tg} \varphi; \quad \bar{\gamma}_0 = 0. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Для определения математических ожиданий отклонений МЧЭ первого приближения на основании выражений (2.30) запишем систему уравнений:

$$\begin{aligned} \ddot{\bar{\alpha}}_1 + 2h_1 \dot{\bar{\alpha}}_1 + k_1^2 \bar{\alpha}_1 &= -g^{-1} k_1^2 \bar{W}_2; \\ \ddot{\bar{\beta}}_1 + 2h_2 \dot{\bar{\beta}}_1 + k_2^2 \bar{\beta}_1 &= g^{-1} s_2^2 \bar{W}_1; \\ \ddot{\bar{\gamma}}_1 + 2h_3 \dot{\bar{\gamma}}_1 + k_3^2 \bar{\gamma}_1 &= -k_3^2 \bar{\alpha}_1 \operatorname{tg} \varphi, \end{aligned}$$

из которой по окончании переходного процесса имеем:

$$\bar{\alpha}_1 = 0; \quad \bar{\beta}_1 = 0; \quad \bar{\gamma}_1 = 0. \quad (3.16)$$

Найдем выражения для средних квадратических отклонений  $\sigma_{\alpha_1}$  и  $\sigma_{\beta_1}$  первого приближения.

Для определения  $\sigma_{\alpha_1}$  воспользуемся первым уравнением (2.30), которое с учетом выражений (3.13) может быть представлено в виде

$$T_1^2 \ddot{\alpha}_1 + 2\zeta T_1 \dot{\alpha}_1 + \alpha_1 = -n_2 g^{-1} W,$$

где  $T_1 = k_1^{-1}$  (постоянная времени МЧЭ);  $\zeta_1 = h_1 k_1^{-1}$ .

Спектральная плотность стационарного решения этого линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами определяется выражением [40]:

$$S_{\alpha_1}(p) = |L_1(ip)|^2 S_W(p), \quad (3.17)$$

где передаточная функция МЧЭ

$$L_1(s) = n_2 g^{-1} (T_1^2 s^2 + 2\zeta_1 T_1 s + 1)^{-1}. \quad (3.18)$$

Подставляя выражения (3.11), (3.12) и (3.18), в равенство (3.17), имеем

$$S_{\alpha_1}(p) = \frac{n_2^2}{g^2} \frac{1}{(1 - T_1^2 p^2)^2 + 4\zeta_1^2 T_1^2 p^2} \frac{2\sigma^2 \mu}{\pi} \frac{p^4 b^2}{p^4 + 2d^2 p^2 + b^4}. \quad (3.19)$$

Тогда дисперсия

$$D[\alpha_1(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\alpha_1}(p) dp. \quad (3.20)$$

Проинтегрировав выражение (3.20), получим выражение для дисперсии

$$D[\alpha_1(t)] = \frac{n_2^2 b^2}{g^2} \frac{[b^2 + \mu (\zeta_1 T_1)^{-1}] \sigma^2}{(1 - T_1^2 b^2)^2 + 4 [T_1^2 \zeta_1^2 b^2 + T_1 \mu (\zeta_1 + T_1 \mu) + T_1^3 \zeta_1 \mu b^2]},$$

из которого с учетом обозначения

$$c_\alpha^2 = \frac{1 + \mu (\zeta_1 T_1 b^2)^{-1}}{(1 - T_1^2 b^2)^2 + 4 [T_1^2 \zeta_1^2 b^2 + T_1 \mu (\zeta_1 + T_1 \mu) + T_1^3 \zeta_1 \mu b^2]} \quad (3.21)$$

будем иметь

$$\sigma_{\alpha_1} = n_2 g^{-1} b^2 \sigma c_\alpha, \quad \sigma_{\beta_1} = n_2 g^{-1} b^3 \sigma c_\alpha, \quad \sigma_{\alpha_1} \approx n^2 g^{-1} b^4 \sigma c_\alpha. \quad (3.22)$$

Аналогичным образом найдем средние квадратические отклонения для  $\beta_1$  и его производных, приняв во внимание, что для МК  $M_m \ll M_g$ :

$$\delta_{\beta_1} = n_1 g^{-1} b^2 \sigma c_\beta, \quad \sigma_{\beta_1} = n_1 g^{-1} b^3 \sigma c_\beta, \quad \sigma_{\beta_1} \approx n_1 g^{-1} b^4 \sigma c_\beta; \quad (3.23)$$

$$c_\beta^2 = \frac{1 + \mu (\zeta_2 T_2 b^2)^{-1}}{(1 - T_2^2 b^2)^2 + 4 [T_2^2 \zeta_2^2 b^2 + T_2 \mu (\zeta_2 + T_2 \mu) + T_2^3 \zeta_2 \mu b^2]}; \quad (3.24)$$

$$T_2 = k_2^{-1}; \quad \zeta_2 = h_2 k_2^{-1}.$$

Найдем среднее квадратическое отклонение  $\sigma_{\gamma_1}$ . Из третьего уравнения (2.30) имеем

$$T_3^2 \ddot{\gamma}_1 + 2\zeta_3 T_3 \dot{\gamma}_1 + \gamma_1 = -\alpha_1 \operatorname{tg} \varphi; \quad T_3 = k_3^{-1}; \quad \zeta = h_3 k_3^{-1}.$$

Передаточная функция МЧЭ в азимутальной плоскости

$$L_3(s) = -\operatorname{tg} \varphi (T_3^2 s^2 + 2\zeta_3 T_3 s + 1). \quad (3.25)$$

Спектральная плотность

$$S_{\gamma_1}(p) = |L_3(ip)|^2 S_{\alpha_1}(p). \quad (3.26)$$

Подставив выражения (3.19) и (3.25) в уравнение (3.26), получим

$$S_{\gamma_1}(p) = \frac{\operatorname{tg}^2 \varphi}{(1 - T_3^2 p^2)^2 + 4\zeta_3^2 T_3^2 p^2} \frac{n_2^2}{g^2} \frac{1}{(1 - T_1^2 p^2)^2 + 4\zeta_1^2 T_1^2 p^2} \times \\ \times \frac{2\sigma^2 \mu}{\pi} \frac{p^4 b^2}{p^4 + 2d^2 p^2 + b^4}. \quad (3.27)$$

Определим средние квадратические отклонения  $\sigma_{\gamma_1}$  для режимов качки и вибрации.

При качке для МК  $T_1^2 p^2 \ll 1$  и  $4\zeta_1^2 T_1^2 p^2 \ll 1$ , тогда из соотношения (3.27) следует

$$S_{\gamma_{1к}}(p) = \frac{\operatorname{tg}^2 \varphi}{(1 - T_3^2 p^2)^2 + 4\zeta_3^2 T_3^2 p^2} \frac{2\sigma^2 \mu n_2^2}{\pi g^2} \frac{p^4 b^2}{p^4 + 2d^2 p^2 + b^4}.$$

Откуда по аналогии с выражениями (3.21) и (3.22) будем иметь:

$$\sigma_{\gamma_{1к}} = n_2 g^{-1} b^2 \sigma \operatorname{tg} \varphi c_{\gamma_{1к}}, \quad \sigma_{\gamma_{1к}} = n_2 g^{-1} b^3 \sigma \operatorname{tg} \varphi c_{\gamma_{1к}}; \\ \sigma_{\gamma_{1к}} \approx n_2 g^{-1} b^4 \sigma \operatorname{tg} \varphi c_{\gamma_{1к}}; \quad (3.28)$$

$$c_{\gamma_{1к}}^2 = \frac{1 + \mu (\zeta_3 T_3 b^2)^{-1}}{(1 - T_3^2 p^2)^2 + 4 [T_3^2 \zeta_3^2 b^2 + T_3 \mu (\zeta_3 + T_3 \mu) + T_3^3 \zeta_3 \mu b^2]} \cdot \quad (3.29)$$

При вибрации для МК  $T_3^2 p^2 \gg 1$  и  $T_3^2 p^2 \gg 4\zeta_3^2$ . Поэтому из соотношения (3.27)

$$S_{\gamma_{1в}}(p) = \frac{2n_2^2 \sigma^2 \mu}{\pi g^2 T_3^4} \frac{\operatorname{tg}^2 \varphi}{(1 - T_1^2 p^2)^2 + 4\zeta_1^2 T_1^2 p^2} \frac{b^2}{p^4 + 2d^2 p^2 + b^4};$$

$$D[\gamma_{1в}(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} S_{\gamma_{1в}}(p) dp. \quad (3.30)$$

Интегрируя уравнения (3.30), определяем

$$\sigma_{\gamma_{1в}} = n_2 g^{-1} b^2 \sigma \operatorname{tg} \varphi c_{\gamma_{1в}}; \quad \sigma_{\gamma_{1в}} = n_2 g^{-1} b^3 \sigma \operatorname{tg} \varphi c_{\gamma_{1в}}; \quad (3.31)$$

$$\sigma_{\gamma_{1в}} \approx n_2 g^{-1} b^4 \sigma \operatorname{tg} \varphi c_{\gamma_{1в}};$$

$$c_{\gamma_{1в}}^2 = \frac{1}{T_3^4 b^4} \frac{1 + 4T_1 \mu (T_1 \mu + \zeta_1) + T_1^3 b^2 \mu \zeta_1}{(1 - T_1^2 b^2)^2 + 4 [T_1^2 \zeta_1^2 b^2 + T_1 \mu (T_1 \mu + \zeta_1) + T_1^3 \zeta_1 \mu b^2]}. \quad (3.32)$$

Исследование коэффициентов  $c_{\alpha}$  и  $c_{\gamma}$  (вероятностных аналогов коэффициентов динамичности) по формулам (3.21), (3.29) и (3.32) показывает, что повышение степени нерегулярности  $\mu$  приводит к увеличению коэффициента  $c_{\alpha}$  в области низких частот качки, практически не влияя на коэффициент  $c_{\alpha}$  в диапазоне частот частот вибрации и на коэффициент  $c_{\gamma}$  в диапазоне частот вибрации и качки. Увеличение коэффициентов демпфирования  $\zeta_v$  приводит к значительному уменьшению коэффициентов  $c_{\alpha}$  и  $c_{\gamma}$ , а также к снижению влияния на них степени нерегулярности колебаний  $\mu$ .

Для определения средних квадратических отклонений второго приближения воспользуемся уравнениями второго приближения (2.30). При анализе этих уравнений замечаем, что после подстановки в них средних квадратических отклонений первого приближения слагаемые в правой части этих уравнений содержат малые сомножители  $c_{\gamma}$  и  $g^{-2}$ . Поэтому будем иметь

$$\sigma_{\alpha 2} \ll \sigma_{\alpha 1}; \quad \sigma_{\beta 2} \ll \sigma_{\beta 1}; \quad \sigma_{\gamma 2} \ll \sigma_{\gamma 1}; \quad (3.33)$$

и окончательно для средних квадратических отклонений МЧЭ можно записать

$$\sigma_{\alpha} \approx \sigma_{\alpha 1}; \quad \sigma_{\beta} \approx \sigma_{\beta 1}; \quad \sigma_{\gamma} \approx \sigma_{\gamma 1}, \quad (3.34)$$

где  $\sigma_{\alpha 1}$ ,  $\sigma_{\beta 1}$ ,  $\sigma_{\gamma 1}$  определяются выражениями (3.22), (3.23), (3.28), (3.31).

Проверим согласованность формул, полученных в детерминированной и вероятностной постановках задачи. Сравнение будем проводить по средним квадратическим отклонениям МЧЭ при условии, что средние квадратические перемещения точки опоры МЧЭ равны для обоих случаев.

Воспользовавшись формулами (3.28), (3.29), полагая  $\mu = 0$ , принимая во внимание, что для стрелочного МЧЭ  $\zeta_v \leq 2$ , а при качке  $T_1^2 p^2 \approx T_2^2 p^2 \ll 1$ , и учитывая равенства  $\sigma_{\gamma} = 2^{-0.5} \gamma$ ,  $n_{\gamma} \sigma_{\gamma} = 2^{-0.5} a_{\gamma}$ , получим для азимутального отклонения МЧЭ при гармонической качке основания формулу

$$\gamma_{к} = a_2 g^{-1} T_3^{-2} \operatorname{tg} \varphi,$$

совпадающую при  $M_g \gg M_m$  с амплитудным значением первого слагаемого формулы (3.9).

Проведя аналогичные преобразования для случая вибрации, найдем выражение для амплитудного отклонения МЧЭ стрелочного компаса в азимутальной плоскости при вибрации

$$\gamma_b = a_2 g^{-1} p^{-2} T_1^{-2} T_3^{-2} \operatorname{tg} \varphi,$$

из которой при подстановке в нее значений параметров

$$a_2 p^2 = 2g; \quad p = 60 \text{ с}^{-1}; \quad T_1 = 0,1 \text{ с}^{-1}; \quad T_3 = 3 \text{ с}^{-1}; \quad \operatorname{tg} \varphi = 3$$

получим пренебрежимо малое значение отклонения  $\gamma_b < 1''$ , что соответствует выводам подраздела 3.1.

Чтобы оценить влияние степени нерегулярности на среднее квадратическое отклонение стрелочного МЧЭ, воспользуемся отношениями  $\sigma_\gamma(\mu)$  при  $\mu \neq 0$  [выражения (3.28) и (3.31)] к  $\sigma_\gamma(0)$  при  $\mu = 0$ .

Расчеты показывают, что при изменении параметров нерегулярной качки и МЧЭ в возможном диапазоне:  $\lambda = 0,3 \dots 2 \text{ с}^{-1}$ ;  $\mu = 0,01 \dots 0,4 \text{ с}^{-1}$ ;  $T_3 = 3 \dots 6 \text{ с}$  и  $\xi = 0,25 \dots 2$  — относительное изменение среднего квадратического отклонения  $\sigma_\gamma(\mu)/\sigma_\gamma(0)$  невелико — в пределах  $0,91 \dots 1,04$ , что согласуется с результатами работ [3, 20].

При нерегулярной вибрации относительное значение среднего квадратического отклонения может увеличиться в несколько раз. Однако, так как размер отклонения остается в пределах нескольких угловых секунд, этой составляющей отклонения (как и при гармонических возмущениях) можно пренебречь.

Таким образом, решение уравнений движения МЧЭ в вероятностной постановке в первом приближении позволило найти формулы для средних квадратических отклонений МЧЭ, учитывающих возможную нерегулярность колебаний основания. Структура формул (3.28) и (3.31) и устанавливаемая ими связь отклонений МЧЭ с его параметрами и характеристиками колебаний подобны структуре формул (3.2) и (3.9) и устанавливаемой ими связи для периодических отклонений в детерминированной постановке задачи. Учет возможной нерегулярности колебаний не приводит к качественным изменениям влияния на азимутальное отклонение параметров МЧЭ. Количественные изменения несущественны (находятся в пределах первого порядка малости) и при необходимости могут быть учтены расчетным путем.

Определим математические ожидания отклонений МЧЭ  $\bar{\alpha}_2$  и  $\bar{\gamma}_2$ , приводящих к погрешностям МК.

Воспользовавшись четвертым и шестым уравнениями системы (2.30), можем записать исходные уравнения:

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_2 + 2h_1 \bar{\alpha}_2 + k_1^2 \bar{\alpha}_2 &= -\bar{\beta}_1 \gamma_1 - \bar{B}_1 \dot{\beta}_1 \dot{\gamma}_1 - k_1^2 \beta_1 \gamma_1 + k_1 g^{-1} (\gamma_1 \bar{W}_1 - \alpha_1 \bar{W}_3); \\ \bar{\gamma}_2 + 2h_3 \bar{\gamma}_2 + k_3^2 \bar{\gamma}_2 &= -\bar{\alpha}_1 \beta_1 - \bar{B}_3 \dot{\alpha}_1 \dot{\beta}_1 - k_3^2 \operatorname{tg} \varphi \bar{\alpha}_2 - k_3^2 \operatorname{tg} \varphi \beta_1 \gamma_1. \end{aligned} \quad (3.35)$$

Математическое ожидание произведения случайных величин  $\Lambda$  и  $N$  определяется выражением

$$\overline{\Lambda N} = \bar{\Lambda} \bar{N} + k_{\Lambda N}, \quad (3.36)$$

где  $k_{\Lambda N} = r_{\Lambda N} \sigma_\Lambda \sigma_N$  — корреляционные моменты;  $r_{\Lambda N}$  — коэффициент корреляции;  $\sigma_\Lambda$  и  $\sigma_N$  — средние квадратические отклонения случайных величин  $\Lambda$  и  $N$ .

Если корреляционные моменты  $k_{\Lambda N} = 0$ , то из уравнений (3.35) с учетом соотношений (3.11), (3.15) и (3.36) следует, что  $\bar{\alpha}_2 = 0$  и  $\bar{\gamma}_2 = 0$ .

Для случая связанных колебаний, о которых говорилось на стр. 41, коэффициенты корреляции равны единице, их знаки определяются из анализа формул (2.38) и (2.33). При условии, что спектральная плотность скорости качки достаточно хорошо может аппроксимироваться выражением вида (3.11), из уравнений (3.35) с учетом формул (3.36), (3.11), (3.12), (3.13) и (3.16) по окончании переходного процесса будем иметь:

$$\begin{aligned} \bar{\alpha}_2 &= T_1^2 \sigma_{\beta 1} \sigma_{\gamma 1} - T_1^2 B_1 \sigma_{\beta 1} \sigma_{\dot{\gamma} 1} - \sigma_{\beta 1} \sigma_{\gamma 1} + n_1 g^{-1} b^2 \sigma \sigma_{\gamma 1} + n_3 g^{-1} b^2 \sigma \sigma_{\alpha 1}; \\ \bar{\gamma}_2 &= -T_3^2 \sigma_{\alpha 1} \sigma_{\beta 1} + T_3^2 B_3 \sigma_{\alpha 1} \sigma_{\dot{\beta} 1} - \bar{\alpha}_2 \operatorname{tg} \varphi - \sigma_{\beta 1} \sigma_{\gamma 1} \operatorname{tg} \varphi. \end{aligned} \quad (3.37)$$

Выражения (3.37) определяют математические ожидания отклонений  $\alpha_2$  и  $\gamma_2$  во втором приближении. Третье и последующие приближения значительно меньше второго, так как в них множителями входят средние квадратические отклонения  $\sigma_{\alpha 2}$ ,  $\sigma_{\beta 2}$  и  $\sigma_{\gamma 2}$  и их производные, которые, как следует из соотношений (3.33), много меньше отклонений  $\sigma_{\alpha 1}$ ,  $\sigma_{\beta 1}$  и  $\sigma_{\gamma 1}$  и их соответствующих производных.

Подставляя в уравнения (3.37) значения средних квадратических отклонений МЧЭ и их производных из выражений (3.22), (3.23) и (3.28) и учитывая формулы (3.14), (3.15) и (3.16), получаем окончательно:

$$\begin{aligned} \bar{\alpha} &= n_1 n_2 g^{-2} b^4 \sigma^4 c_\gamma \operatorname{tg} \varphi [c_\beta (T_1^2 b^2 - 1 - B_1 T_1^2 b^2) + 1] + \\ &+ n_2 n_3 g^{-2} b^4 \sigma^2 c_\alpha; \end{aligned} \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned} \bar{\gamma} &= -n_1 n_2 g^{-2} b^4 \sigma^2 [c_\alpha c_\beta (1 - B_3) b^2 T_3^2 + c_\beta c_\gamma (1 - B_1) b^2 T_1^2 \operatorname{tg}^2 \varphi + \\ &+ c_\gamma \operatorname{tg}^2 \varphi] - n_2 n_3 g^{-2} b^4 \sigma^2 c_\alpha \operatorname{tg} \varphi. \end{aligned} \quad (3.39)$$

Формулы (3.38) и (3.39) определяют математические ожидания отклонений МЧЭ (постоянные систематические отклонения), приводящих к погрешностям МК при случайных колебаниях основания.

При оценке отклонений МЧЭ, вызванных качкой, входящие в формулы (3.38) и (3.39) коэффициенты  $c_\alpha$ ,  $c_\beta$  и  $c_\gamma$  выражаются равенствами (3.21), (3.24) и (3.29), а при оценке отклонений, вызванных вибрацией, — равенствами (3.21), (3.24) и (3.32).



Как и при исследовании средних квадратических отклонений, убедимся в том, что формулы, полученные при гармонических возмущениях, согласуются с формулами, учитывающими нерегулярность колебаний.

Для случая воздействия качки воспользуемся формулой (3.39), из которой с учетом выражений (3.21), (3.24), (3.29) при  $\mu=0$  будем иметь

$$\bar{\gamma}_k = -n_1 n_2 g^{-2} \sigma^2 p^6 (1 - B_3) T_3^2 - n_1 n_2 g^{-2} \sigma^2 p^4 (1 - B_1) T_1^2 T_3^{-2} \operatorname{tg}^2 \varphi - n_1 n_2 g^{-2} \sigma^2 p^2 T_3^{-2} \operatorname{tg}^2 \varphi - n_2 n_3 g^{-2} \sigma^2 p^4 \operatorname{tg} \varphi.$$

Учитывая соотношение

$$n_v \sigma = 2^{-0,5} a_v \quad (3.40)$$

между средним квадратическим и амплитудным значениями гармонических колебаний, принимая во внимание выражения (2.26), а также то, что в общем случае для стрелочного МЧЭ

$$T_3^4 p^2 (1 - B_3) \gg T_1^2 (1 - B_1) \operatorname{tg}^2 \varphi,$$

получаем формулу

$$\bar{\gamma}_k = -0,5 a_1 a_2 g^{-2} (I_1 - I_2) I_3^{-1} p^6 T_3^2 - 0,5 a_1 a_2 g^{-2} p^2 T_3^{-2} \operatorname{tg}^2 \varphi - 0,5 a_2 a_3 g^{-2} p^4 \operatorname{tg} \varphi$$

для математического ожидания отклонений МЧЭ в азимутальной плоскости при гармонической качке основания, которая без учета фазовых соотношений перемещений  $a_v$  совпадает с выражением для максимального постоянного систематического отклонения при детерминированной постановке задачи [третье, четвертое и пятое слагаемые формулы (3.9)].

Из формулы (3.39) с использованием уравнений (2.26), (3.40), (3.34), (3.21), (3.24), (3.32) также без учета фазовых соотношений перемещений  $a_v$  может быть получена совпадающая с (3.2) формула для математического ожидания отклонений МЧЭ в азимутальной плоскости при вибрации основания

$$\bar{\gamma}_b = 0,5 a_1 a_2 g^{-2} p^2 T_1^{-2} M_g M_m^{-1} (I_1 - I_2) I_2^{-1} + 0,5 a_2 a_3 g^{-2} p^2 T_1^{-2} \operatorname{tg} \varphi.$$

Проведенное на основании формулы (3.39) исследование влияния степени нерегулярности на изменение постоянных систематических отклонений типовых МЧЭ иллюстрируется графиками (рис. 3.10 и 3.11). Из этих графиков видно, что в диапазоне низких частот при увеличении степени нерегулярности колебаний  $\mu$  математическое ожидание отклонения  $\bar{\gamma}$  возрастает, а в резонансной области (располагается обычно в диапазоне частот между диапазонами качки и вибрации) — снижается. При

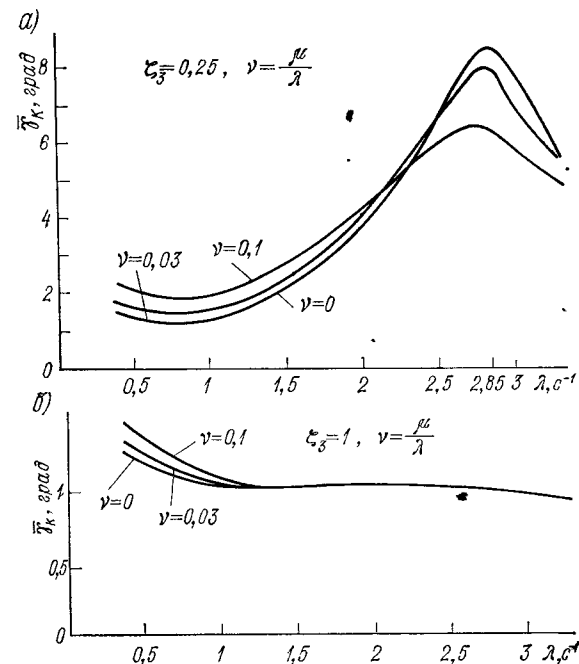


Рис 3.10. Графики  $\bar{\gamma}_k(\lambda)$  при нерегулярной качке.

$$T_1 = 0,35 \text{ с}; \quad T_3 = 6 \text{ с}; \quad (I_1 - I_2) I_3^{-1} = 0,02; \\ \operatorname{tg} \varphi = 3, \quad a p^2 = 0,1 g$$

увеличении коэффициента демпфирования  $\zeta_3$  влияние степени нерегулярности  $\mu$  ослабляется, а размер математического ожидания уменьшается.

В области высоких частот изменение степени нерегулярности  $\mu$  и коэффициента демпфирования  $\zeta_3$  на отклонении  $\bar{\gamma}$  практически не сказывается.

Из формул (3.38) и (3.39) следует, что качественная картина влияния основных конструктивных параметров МЧЭ на его отклонения при учете возможной нерегулярности колебаний остается такой же, как и при гармонических колебаниях. Количественные изменения существенны только в области низких частот, их учет можно проводить расчетным путем.

Таким образом, рассмотрение влияния случайной пространственной вибрации и качки основания дало возможность найти аналитические выражения, пригодные для оценки погрешностей МК независимо от закона, характеризующего возмущающее воздействие. Выражения могут быть использованы для выбора

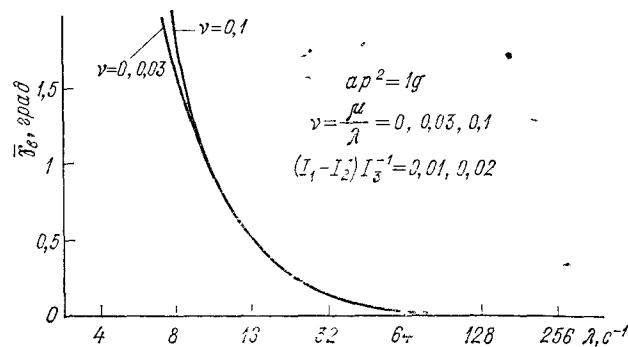
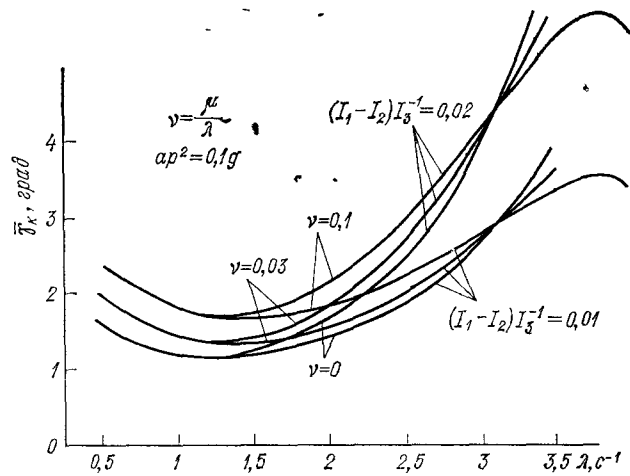


Рис. 3.11 Графики  $\bar{Y}_h(\lambda)$  и  $\bar{Y}_v(\lambda)$  при нерегулярной качке и вибрации:

$$T_1 = 0.25 \text{ с}, T_3 = 4 \text{ с}; \text{tg } \varphi = 3; \zeta = 0.25$$

параметров МЧЭ, обладающих необходимыми динамическими свойствами, на этапах проектирования и модернизации МК.

#### 4. ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПОГРЕШНОСТИ

##### 4.1. Определение динамических реакций магнитного чувствительного элемента

Срок службы МК во многом зависит от интенсивности износа опорных элементов его МЧЭ. Исследование причин износа в целях его снижения особенно важно для стрелочных МЧЭ, у которых опорные элементы (керы) из-за износа требуют замены

через год, а иногда и через 4,5... 5,5 месяцев с начала эксплуатации.

Снижение износа опорных элементов осуществляется статической разгрузкой МЧЭ путем построения его по схеме груз — поплавков [43]. Однако при вибрации и качке этого средства недостаточно. Использование рекомендации, приведенной в работе [43], в соответствии с которой для МК, работающих в условиях вибрации, точка опоры МЧЭ должна совмещаться с его центром масс, не дает положительных результатов.

Целью настоящего подраздела является исследование динамических реакций точки опоры МЧЭ при гармонической вибрации и качке основания, определение аналитических выражений для проекций реакции в зависимости от параметров МЧЭ и параметров колебания основания, уточнение рекомендаций по выбору параметров МЧЭ, при которых динамические реакции могут быть снижены.

Поскольку МЧЭ компасов обычно обладают осевой симметрией (моменты инерции  $I_\lambda$ , собственные частоты  $k_\lambda$  и коэффициенты демпфирования  $h_\lambda$  вокруг взаимно перпендикулярных горизонтальных осей примерно равны между собой), то достаточно рассмотрения плоской вертикальной картины движения МЧЭ.

Рассмотрим МЧЭ в заполненном жидкостью котелке компаса (см. рис. 2.1). Опорные реакции будем определять при поступательном перемещении точки  $O$  опоры МЧЭ в соответствии с выражениями (2.23) при условии, что  $W_2(t) = 0$ ,  $\varepsilon_1 = \varepsilon$ ,  $\varepsilon_3 = 0$ .

При заданном движении на МЧЭ действуют следующие силы: сила тяжести  $m_1 g$ , гидростатическая сила  $m_2 g = \rho V g$ , реакция точки опоры  $P_\lambda$ , переносные силы инерции  $m_1 W$ , гидродинамические силы, вызванные переносным ускорением жидкости  $m_2 W$ , инерционные гидродинамические силы  $\mu_\lambda m_2 W_{(2)\lambda}$  [34], где  $\mu_\lambda$  — характеристические коэффициенты присоединенной массы жидкости,  $\rho$  — плотность компасной жидкости,  $V$  — объем МЧЭ; магнитными силами и силами сопротивления пренебрегаем как малыми.

Для определения опорных реакций используем теорему о движении центра масс

$$m_1 W_{(1)} = P^e, \quad (4.1)$$

где  $W_{(1)}$  — ускорение центра масс МЧЭ;  $P^e$  — главный вектор всех внешних сил.

Найдем выражения для проекций всех внешних сил на подвижные оси (связанные с МЧЭ, см. рис. 2.1).

При выводе этих выражений будем пренебрегать величинами второго порядка малости.

Проекция силы  $P_g = (m_1 - m_2)g$  на подвижные оси координат с учетом равенств (2.14) могут быть представлены выражениями:

$$P_{g1} = \beta (m_1 - m_2) g; \quad P_{g2} = - (m_1 - m_2) g. \quad (4.2)$$

Переносная сила инерции и гидродинамическая сила, вызванная переносным ускорением жидкости, определяются уравнением  $\mathbf{P}_W = -(m_1 - m_2)\mathbf{W}$ , из которого с учетом выражений для проекций ускорения  $\mathbf{W}$  на подвижные оси  $W_x = \dot{W}_1 - \beta \dot{W}_3$ ,  $W_z = \beta \dot{W}_1 + \dot{W}_3$  получим соответствующие проекции сил:

$$P_{W1} = -(m_1 - m_2)W_1; \quad P_{W3} = -(m_1 - m_2)W_3. \quad (4.3)$$

Инерционная гидродинамическая сила в проекциях на подвижные оси может быть определена выражениями

$$P_{и\lambda} = \mu_\lambda m_2 W_{(2)\lambda} \quad (\lambda = 1, 3). \quad (4.4)$$

Проекция  $W_{(2)\lambda}$  ускорения центра объема МЧЭ [10]

$$W_{(2)1} = \dot{\omega}_2 z_2 + \dot{\omega}_3 y_2 + \omega_1 (\omega_1 x_2 + \omega_2 y_2 + \omega_3 z_2) - \omega^2 x_2;$$

$$W_{(2)3} = \dot{\omega}_1 y_2 - \dot{\omega}_2 x_2 + \omega_2 (\omega_1 x_2 + \omega_2 y_2 + \omega_3 z_2) - \omega^2 z_2$$

с учетом кинематических уравнений (2.3), (2.4) и условий  $\omega^2 = \omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2$ ,  $x_2 = 0$ ,  $y_2 = 0$ ,  $z_2 = r^2$  могут быть записаны в виде

$$W_{(2)1} = r_2 \ddot{\beta}; \quad W_{(2)3} = 0.$$

Тогда на основании выражений (4.4) получим выражения для проекций инерционных гидродинамических сил

$$P_{и1} = \mu_1 m_2 r_2 \ddot{\beta}; \quad P_{и2} = 0. \quad (4.5)$$

Подставляя выражения (4.2), (4.3), (4.5) в формулу (4.1), учитывая реакцию точки опоры и следующие равенства для проекций  $W_{(1)\lambda}$  ускорения центра масс:  $W_{(1)1} = r_1 \ddot{\beta}$ ,  $W_{(1)3} = 0$ , будем иметь уравнения, содержащие неизвестные динамические реакции:

$$m_1 r_1 \ddot{\beta} + \mu_1 m_2 r_2 \ddot{\beta} = P_1 + (m_1 - m_2)g\beta - (m_1 - m_2)W_1;$$

$$0 = P_3 - (m_1 - m_2)g - (m_1 - m_2)W_3. \quad (4.6)$$

Для определения углового отклонения  $\beta$  и его производных, входящих в соотношения (4.6), воспользуемся теоремой моментов в относительном движении, записанной для случая, когда моменты определены относительно центра масс МЧЭ, а кориолисовы ускорения и соответствующие силы инерции малы:

$$\frac{d\mathbf{L}_{(1)}}{dt} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{L}_{(1)} = \mathbf{M}_{(1)}^e + \mathbf{M}_{(1)}^w. \quad (4.7)$$

Внешние моменты, входящие в формулу (4.7), можно представить следующими выражениями:

— момент сил тяжести и гидростатических сил МЧЭ  $\mathbf{M}_{(1)g} = -(\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1) \times m_2 \mathbf{g}$  с учетом выражений (2.14) в проекциях на подвижные оси

$$M_{(1)g2} = m_2(r_2 - r_1)g\beta; \quad M_{(1)g3} = 0; \quad (4.8)$$

— момент сил, вызванных переносными ускорениями жидкости,  $\mathbf{M}_{(1)w} = (\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1) \times m_2 \mathbf{W}$

$$M_{(1)w2} = m_1(r_2 - r_1)W_1; \quad M_{(1)w3} = 0; \quad (4.9)$$

— проекции момента инерционной гидродинамической силы  $\mathbf{M}_{(1)и} = (\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1) \times \mathbf{P}_{и}$  и момента силы реакции  $\mathbf{M}_{(1)R} = \mathbf{r}_1 \times \mathbf{P}_\lambda$

$$M_{(1)и2} = \mu_1 m_2 r_2(r_2 - r_1)\ddot{\beta}; \quad M_{(1)и3} = 0;$$

$$M_{(1)R2} = -r_1 P_1; \quad M_{(1)R3} = 0. \quad (4.10)$$

Из выражения (4.7) с учетом зависимостей (4.8), (4.9), (4.10) получим

$$\beta = R_{21} g^{-1} W_1; \quad \ddot{\beta} = -R_{21} g^{-1} p_1^2 W_1.$$

Здесь

$$R_{21} = \frac{k_2^2}{\sqrt{(k_2^2 - p_1^2)^2 + 4h_2^2 p_1^2}};$$

$$k_2^2 = \frac{(m_2 r_2 - m_1 r_1)g}{I(1 + \kappa) + m_1 r_1^2 + \mu_2 m_2 r_2^2};$$

$I$  — момент инерции МЧЭ относительно горизонтальной оси, проходящей через его центр масс;  $\kappa$  — характеристический коэффициент присоединенного момента инерции массы жидкости.

Подставляя полученные выражения в равенства (4.6) и учитывая обозначения  $c = m_2 m_1^{-1}$ ,  $b = r_1 r_2^{-1}$ ,  $l = r_2 - r_1$ , будем иметь выражения для горизонтальной и вертикальной проекций опорной динамической реакции МЧЭ:

$$P_1 = m_1 W_1 [(1 - c)(1 - R_{21}) - l p_1^2 g^{-2} R_{21} (b + \mu c)(1 - b)^{-1}];$$

$$P_3 = m_1 (1 - c)(g + W_3). \quad (4.11)$$

Из этих выражений следует, что опорная динамическая реакция может быть равна нулю при условиях  $c = 1$ ,  $b = -\mu$ , в которых известное условие статической разгрузки опорных элементов МЧЭ ( $c = 1$ ) дополнено условием  $r_1 r_2^{-1} = -\mu$  динамической разгрузки.

Выражения (4.11) иллюстрируются графиками (рис. 4.1), на которых показаны зависимости модулей горизонтальной и вертикальной составляющих динамической реакции от изменения параметров  $b$  и  $c$  для типового МЧЭ стрелочного компаса.

При использовании в компасах одноопорных МЧЭ всегда  $c \neq 1$ . Для этого случая из выражений (4.11) может быть найдено условие динамической разгрузки опорных элементов при действии горизонтальных ускорений. Например, для МЧЭ

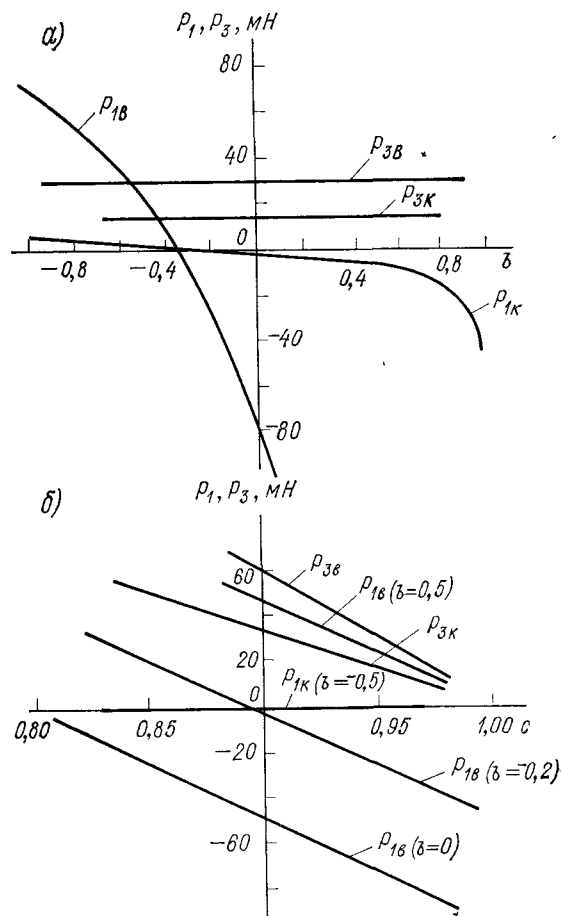


Рис. 4.1. Графики  $P_1$ ,  $P_3(b)$  и  $P_1$ ,  $P_3(c)$  при условиях:

$W_{1,3a}=2g$ ,  $W_{1,3k}=0.4g$ ,  $P_{kmax}=2 \text{ c}^{-1}$  для МЧЭ с параметрами:  $m_1=20 \text{ г}$ ;  $c=0.95$ ;  $\mu=0.5$ ;  $l=5 \text{ см}$ ;  $k=10 \text{ c}^{-1}$  (индексы «в» и «к» при параметрах соответствуют вибрации и качке)

с параметрами, приведенными на рис. 3.1, и  $b=-0.35$ , при качке и вибрации  $P_1=0$ . Вертикальная составляющая  $P_3$  реакции при  $c \neq 1$  всегда отличается от нуля и может быть значительной.

#### 4.2. Защита магнитного чувствительного элемента от ударов

Невозможность снижения вертикальной составляющей  $P_3$  динамической реакции путем оптимального выбора конструктивных параметров МЧЭ (показано в предыдущем подразделе)

приводит к необходимости создания устройств защиты опорных элементов МЧЭ от вертикальных ударных ускорений, многократно превышающих ускорения при вибрации и качке. Защита может быть осуществлена амортизацией котелка или опорных элементов МЧЭ.

Амортизация котелка эффективна, но из-за ее массивности применяется редко.

При внутренней амортизации опорного элемента необходимо учитывать следующую особенность его работы при вибрации.

Магнитный чувствительный элемент, имеющий среднюю плотность, практически равную плотности жидкости, при быстропротекающих процессах вибрации движется вместе с жидкостью по траекториям, близким к траекториям движения стенок котелка МК. Если при этом какой-либо из опорных элементов МЧЭ или котелка амортизирован, то они в общем случае будут двигаться по различным траекториям, т. е. будет иметь место движение одного опорного элемента относительно другого. Поскольку МЧЭ немного тяжелее жидкости и стремится опуститься на опорный элемент котелка, при каждом цикле вибрации будет происходить соударение опорных элементов с ускорением, значительно превышающим вибрационные ускорения на МК. Увеличение ускорений приводит к интенсивному износу опорных элементов.

Таким образом, применение традиционных амортизаторов опорных элементов внутри котелка нецелесообразно. Здесь может быть использовано устройство, обеспечивающее безотрывную связь опорных элементов при вибрации и амортизирующее перемещения МЧЭ при ударе. Такое устройство может быть осуществлено на амортизаторе с «заневоленной» на заданное заранее усилие пружиной. При его использовании сравнительно небольшие вибрационные перегрузки переносятся на опорные элементы без искажения, а значительные ударные перегрузки ослабляются. Степень ослабления перегрузок зависит от жесткости амортизаторов, однако при ударах с большими ускорениями, даже при наличии очень эластичных амортизаторов, возрастающие контактные напряжения могут привести к пластическим деформациям опорных поверхностей и преждевременному выходу опор из строя.

Для защиты опорных элементов целесообразно использование амортизатора, в котором при определенном пороговом значении ускорения, большего, чем вибрационные ускорения, разрывается кинематическая связь между опорными элементами МЧЭ и котелка. Этого можно достичь за счет применения в амортизирующем устройстве массивного поршня, поджатого пружиной (рис. 4.2).

Внутри котелка МК устанавливается пороговое устройство. Оно содержит поршень с керном, направляющий цилиндр, ограничитель перемещения поршня и пружину. При отсутствии

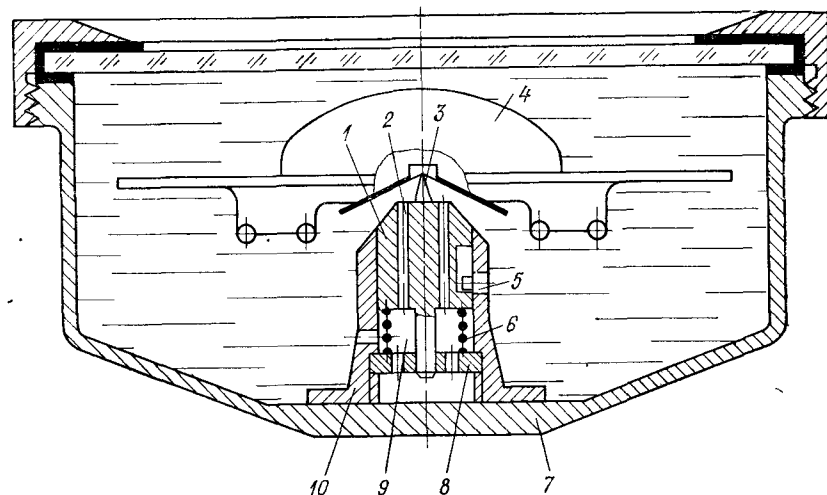


Рис. 4.2. Пороговое устройство защиты от ударов:

1 — поршень; 2 — вертикальные отверстия в поршне; 3 — опорный керн, 4 — МЧЭ; 5 — ограничитель перемещения; 6 — пружина, 7 — корпус котелка, 8 — регулировочная гайка, 9 — полость под поршнем; 10 — направляющий цилиндр

возмущающих ускорений и при малых ускорениях вибрации МЧЭ опирается на керн, который находится в верхнем положении, так как поршень нижним срезом прорези направляющего цилиндра прижат пружиной к ограничителю перемещения.

При вертикальных ударах поршень под действием вызванной ударным ускорением силы сжимает пружину. Поскольку МЧЭ при этом тормозится силами сопротивления его большой поверхности о жидкость, образуется разрыв контактной связи между керном и МЧЭ.

Порог срабатывания устройства защиты определяется выражением

$$\dot{W} = g(k - 1) + kg(m_3 - \rho V_3)(m_n - \rho V_n)^{-1},$$

где  $\dot{W}$  — ускорение, при котором разрывается контактная связь между керном и МЧЭ;  $g$  — ускорение свободного падения;  $k$  — коэффициент превышения усилия поджатия пружины над суммарным весом в жидкости МЧЭ и поршня;  $m_3$  — масса МЧЭ;  $m_n$  — масса поршня;  $\rho$  — плотность жидкости;  $V_3$  — объем МЧЭ;  $V_n$  — объем поршня.

По окончании удара пружина аperiодически (что обеспечивается соответствующим выбором вязкости жидкости, жесткости пружины и сечений отверстий, соединяющих полость под поршнем с полостью котелка) подает поршень в исходное положение, не вызывая жесткого соударения опорного керна и МЧЭ.

### 4.3. Определение геометрических погрешностей

При вибрации и качке судна имеют место отклонения  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$  МЧЭ компаса от положения статического равновесия. Азимутальное отклонение  $\gamma$ , происходящее в горизонтальной плоскости (показано в разделе 3), приводит непосредственно к погрешностям МК. Отклонения  $\alpha$  и  $\beta$  МЧЭ в вертикальных плоскостях вызывают изменение взаимного положения элементов съема показаний МЧЭ и котелка МК, что служит причиной появления дополнительных погрешностей — геометрических погрешностей съема показаний.

Цель настоящего подраздела — исследование геометрических погрешностей МК, вызванных отклонениями МЧЭ в вертикальных плоскостях при вибрации и качке основания, определение аналитических выражений для погрешностей, учитывающих условия максимального влияния отклонений МЧЭ, сопоставление схем съема показаний.

Геометрические погрешности МК рассматриваются в ряде работ [22, 33, 37]. Так, например, в работе [33] была найдена формула для определения геометрической погрешности, вызванной перемещением курсовой черты при последовательном наклоне котелка относительно двух взаимно перпендикулярных горизонтальных осей. Эта формула по виду совпадает с формулой кардановой погрешности между двумя параллельными плоскостями, связанными двумя кардановыми подвесами. Однако она не учитывает зависимость погрешности от ориентации оси наклона относительно отсчетных плоскостей при оптическом, электролитическом и индукционном методах съема показаний с МЧЭ. Определим геометрические погрешности при этих видах съема показаний.

Отличительные особенности схем съема показаний состоят в том, что в МК с кардановым подвесом отсчетная плоскость перпендикулярна внутреннему кольцу подвеса, в МК без карданова подвеса — перпендикулярна плоскости палубы судна. Кроме того, в визуальных и оптических МК отсчетная плоскость находится в диаметральной плоскости судна, в электролитических, как правило, — перпендикулярна плоскости меридиана (имеется в виду, что отсчетная плоскость отрабатывается до согласованного с МЧЭ положения).

Найдем формулы для вычисления геометрических погрешностей. Для этого введем в рассмотрение систему координат  $Oxyz'$  (рис. 4.3), начало  $O$  которой совместим с точкой опоры МЧЭ, ось  $Oz$  направим вверх перпендикулярно плоскости палубы для компасов без карданова подвеса и перпендикулярно внутреннему кольцу карданова подвеса для компасов с подвесом, ось  $Ox$  направим от кормы в сторону носа судна, а ось  $Oy$  — к левому борту.

Положение МЧЭ, связанного с осями координат  $Ox_1, Oy_1,$

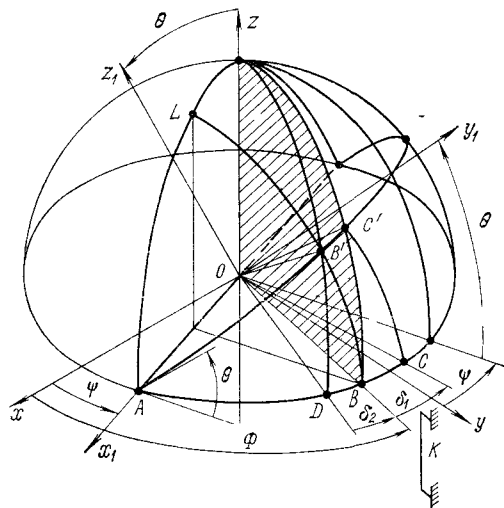


Рис. 43. Схема съема показаний компаса

$Oz_1$ , где ось  $Ox_1$  (линия узлов) находится в плоскости  $Oxy$ , определим углами Эйлера  $\psi$  и  $\theta$  ( $\psi$  — угол между положительными направлениями осей  $Ox$  и  $Ox_1$ ,  $\theta$  — наклон плоскости  $Ox_1y_1$  относительно плоскости  $Oxy$ ).

Положение отсчетной плоскости  $OB_z$  (в этой плоскости расположен курсовой указатель  $K$ ) относительно оси  $Ox$  зададим углом  $\Phi$ .

Для принятой модели дуга  $ABC$ , являющаяся отсчетным сре-  
зом МЧЭ, при его крене на угол  $\theta$  занимает положение  $AB'C'$ .

Рассмотрим механизм появления геометрической погрешности визуального и оптического компасов.

При отсутствии крена плоскость  $OAC$  МЧЭ пересекает отсчетную плоскость по линии  $OB$  (компас показывает курс  $B$ ). При крене  $\theta$  плоскость МЧЭ занимает положение  $OAC'$  и в отсчетной плоскости  $OBz$  уже находится точка  $C'$  (компас показывает курс  $C$ ), а точка  $B$  занимает положение  $B'$ . Очевидно, что  $B'C' = BC$  есть геометрическая погрешность визуального и оптического компасов.

Определим погрешность  $BC$ . Для этого рассмотрим сферический прямоугольный треугольник  $AC'B$ , образованный дугами больших кругов. В этом треугольнике  $\angle ABC' = \pi/2$ ,  $\angle C'AB = \theta$ ,  $AB = \Phi - \psi$ .

Применяя для данного треугольника известное соотношение сферической тригонометрии

$$\operatorname{tg} AB = \operatorname{tg} AC' \cos \theta,$$

В КОТОРОМ

$$\operatorname{tg} AB = \operatorname{tg} (\Phi - \psi); \quad \operatorname{tg} AC' = \operatorname{tg} AC = \operatorname{tg} (\Phi - \psi + \delta_1),$$

получим тригонометрическое уравнение

$$\operatorname{tg}(\Phi - \psi) = \operatorname{tg}(\Phi - \psi + \delta_1) \cos \theta,$$

решая которое относительно  $\delta_1$  будем иметь

$$\operatorname{tg} \delta_1 = (1 - \cos \theta) \operatorname{tg} (\Phi - \psi) [\cos \theta + \operatorname{tg}^2 (\Phi - \psi)]^{-1} \quad (4.12)$$

— выражение для геометрической погрешности стрелочного компаса с визуальным и оптическим съемом показаний.

В частности, при малых  $\theta$  формула (4.12) может быть преобразована к виду

$$\delta_1 = 0,25\theta^2 \sin 2(\Phi - \psi). \quad (4.13)$$

Рассмотрим особенности возникновения геометрической погрешности в стрелочном компасе с электролитическим съемом показаний. В нем контакты питания (плоскость съема) разворачиваются следящей системой до согласованного положения с дуговым контактом на МЧЭ. Положим, что при отсутствии наклона  $\theta$  МЧЭ точка  $B$  МЧЭ совпадает с концом его дугового контакта. Тогда соответствующий контакт питания находится в плоскости  $OBz$ . При наклоне  $\theta$  МЧЭ конец контакта  $B$  займет положение  $B'$ . Тогда отсчетная плоскость развернется на угол  $\delta_2$  и будет проходить через точки  $B'$  и  $D$ . Очевидно, что угол  $\delta_2$  есть геометрическая погрешность компаса с электролитическим съемом показаний.

Для определения погрешности  $\delta_2$  рассмотрим сферический треугольник  $AB'D$ , в котором  $\angle ADB' = \pi/2$ ;  $\angle B'AD = \theta$ ;  $AD = \Phi - \psi - \delta_2$ . Применяя для него известное соотношение

$$\operatorname{tg} AD = \operatorname{tg} AB' \cos \theta$$

и принимая во внимание, что

$$\operatorname{tg} AD = \operatorname{tg} (\Phi - \psi - \delta_2); \quad \operatorname{tg} AB' = \operatorname{tg} AB = \operatorname{tg} (\Phi - \psi),$$

получаем тригонометрическое уравнение

$$\operatorname{tg}(\Phi - \psi - \delta_2) = \operatorname{tg}(\Phi - \psi) \cos \theta,$$

решая которое относительно  $\delta_2$  будем иметь

$$\operatorname{tg} \delta_2 = (1 - \cos \theta) \operatorname{tg} (\Phi - \psi) [1 + \cos \theta \operatorname{tg}^2 (\Phi - \psi)]^{-1} \quad (4.14)$$

— выражение для геометрической погрешности стрелочного компаса с электродлитическим съемом показаний.

Для малых  $\theta$  может быть получена аналогичная выражению (4.13) формула

$$\delta_2 = 0,25\theta^2 \sin 2(\Phi - \psi).$$

Формулы (4.12) и (4.14), выраженные через тригонометрические функции  $\sin \delta_1$ ,  $\sin \delta_2$ ,  $\sin (\Phi - \psi)$  и  $\cos (\Phi - \psi)$ , имеют вид:

$$\begin{aligned}\sin \delta_1 &= (1 - \cos \theta) \sin (\Phi - \psi) \cos (\Phi - \psi) [\sin^2 (\Phi - \psi) + \\ &\quad + \cos^2 (\Phi - \psi) \cos^2 \theta]^{-0,5}; \\ \sin \delta_2 &= (1 - \cos \theta) \sin (\Phi - \psi) \cos (\Phi - \psi) [\cos^2 (\Phi - \psi) + \\ &\quad + \sin^2 (\Phi - \psi) \cos^2 \theta]^{-0,5}.\end{aligned}$$

Формулы (4.12) и (4.14) могут быть использованы для определения максимальных значений геометрических погрешностей  $\delta_{1 \max}$ ,  $\delta_{2 \max}$  и условий, при которых они имеют место. Для этого, решая уравнения

$$\frac{d\delta_1}{d(\Phi - \psi)} = 0 \text{ и } \frac{d\delta_2}{d(\Phi - \psi)} = 0$$

относительно  $(\Phi - \psi)$  и проверяя полученные решения по достаточным условиям максимума, будем иметь:

$$\operatorname{tg} (\Phi - \psi) \delta_{1 \max} = \pm (\cos \theta)^{0,5}; \quad (4.15)$$

$$\operatorname{tg} (\Phi - \psi) \delta_{2 \max} = \pm (\cos \theta)^{-0,5} \quad (4.16)$$

и соответственно для малых углов  $\theta$ :

$$\operatorname{tg} (\Phi - \psi) \delta_{1 \max} = \pm (1 - 0,25\theta^2);$$

$$\operatorname{tg} (\Phi - \psi) \delta_{2 \max} = \pm (1 + 0,25\theta^2).$$

Подставляя выражения (4.15) и (4.16) соответственно в выражения (4.12) и (4.14), будем иметь для  $\delta_{1 \max}$  и  $\delta_{2 \max}$  выражение

$$\operatorname{tg} \delta_{1 \max} = \operatorname{tg} \delta_{2 \max} = \pm 0,5 (1 - \cos \theta) (\cos \theta)^{-0,5} \quad (4.17)$$

или

$$\sin \delta_{1 \max} = \sin \delta_{2 \max} = \pm (1 - \cos \theta) (1 + \cos \theta)^{-1},$$

а для малых углов  $\theta$   
— выражение

$$\delta_{1 \max} = \delta_{2 \max} = \pm 0,25\theta^2.$$

Полученные формулы иллюстрируются графиками. На рис. 4.4, а представлена зависимость  $\delta_{\max}(\theta)$ , построенная в соответствии с формулой (4.17), на рис. 4.4, б — зависимости  $(\Phi - \psi)(\theta)$  в соответствии с формулами (4.15) и (4.16).

Из формул (4.15) ... (4.17) следуют основные особенности появления геометрических погрешностей съема показаний.

Максимальные значения геометрических погрешностей для всех схем съема (визуального, оптического и электролитического) равны [определяются формулой (4.17)]. Они не зависят

от расположения отсчетной плоскости относительно диаметральной плоскости судна и определяются только наклоном  $\theta$ . При  $\theta < 10^\circ$   $\delta_{\max} < 0,5^\circ$ , при  $\theta \approx 30^\circ$   $\delta_{\max}$  составляет уже  $4^\circ$ .

Положение  $(\Phi - \psi)$  отсчетной плоскости относительно оси наклона, при котором имеет место максимальная геометрическая погрешность, непостоянно и также зависит от наклона  $\theta$ . При малых  $\theta$  это положение  $(\Phi - \psi)$  примерно равно  $45, 135, 225, 315^\circ$ .

Отсчетная плоскость стрелочных МК совпадает с диаметральной плоскостью судна. В целях уменьшения геометрических погрешностей при эксплуатации судна в условиях качки показания компаса на магнитных курсах, близких к четвертным, целесообразно снимать в момент прохождения котелком горизонтального положения (при  $\theta \approx 0$ ); на магнитных курсах, близких к главным, съем показаний может осуществляться постоянно, при любых наклонах.

Для исключения геометрических погрешностей при стендовых испытаниях на воздействие качки необходимо устанавливать МК на стенде таким образом, чтобы при любых наклонах стенда его оси и соответствующие оси карданова подвеса котелка были параллельны между собой.

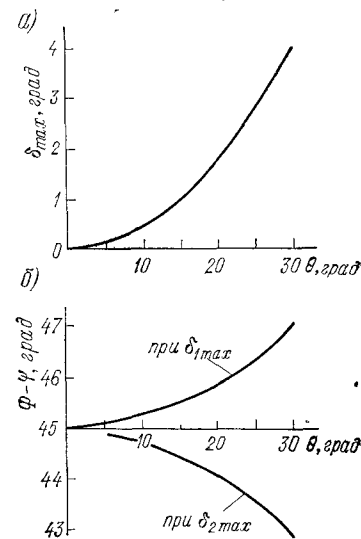


Рис 4.4. Графики  $\delta_{\max}(\theta)$  и  $(\Phi - \psi)(\theta)$

## 5. ТЕМПЕРАТУРНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ИЗМЕНЕНИЯ ОБЪЕМА КОМПАСНОЙ ЖИДКОСТИ

### 5.1. Температурные компенсаторы

В котелках современных МК для разгрузки опорных устройств и демпфирования колебаний МЧЭ чаще всего используется жидкость. В качестве компасной жидкости применяются в основном керосин, водно-спиртовой раствор, органосилоксановые (полиметил- и полиэтилсилоксановые). Керосин обладает высокой горючестью и текучестью, поэтому в МК последних разработок не используется. Водно-спиртовой раствор и полиметил-силоксановая жидкость, например ПМС-5, имеют примерно

равноценные основные физико-химические свойства: плотность соответственно 0,87... 0,93 и 0,93 г/см<sup>3</sup>, вязкость при температуре +20 °С соответственно  $(1,2... 5) \cdot 10^{-6}$  и  $5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, относительный коэффициент вязкости 0,009 и 0,15 град<sup>-1</sup>, коэффициент объемного расширения  $(0,8... 1) \cdot 10^{-3}$  и  $1 \cdot 10^{-3}$  град<sup>-1</sup>. По давлению паров и агрессивности к основным конструкционным материалам водно-спиртовой раствор значительно уступает жидкости ПМС-5, хотя и имеет несомненное преимущество в стоимости и неограниченности запасов сырья. Поэтому в МК используются обе эти жидкости, однако в МК последних разработок из-за широкого применения пластмасс и алюминиевых сплавов, с которыми водно-спиртовой раствор вступает во взаимодействие, его широкое использование приостановилось.

Конструкции замкнутых емкостей жидкостных котелков требуют введения в них специальных функциональных устройств, решающих задачу температурной компенсации значительного изменения объема компасной жидкости, составляющего в диапазоне температур от —55 до +65 °С около 12 % ее первоначального объема.

Могут быть использованы компенсаторы следующих типов:

- упругие (мембранные и сильфонные, в том числе металлические, резиновые или пластмассовые);
- в виде воздушных или газовых объемов;
- комбинированные;
- поршневые.

Жесткость упругого компенсатора должна быть такой, чтобы во всем диапазоне изменения температуры давление, создаваемое компенсатором внутри котелка, было больше давления паров компасной жидкости.

Металлические мембранные компенсаторы характеризуются ограниченной упругой деформацией, недостаточной для обеспечения компенсации изменения объема жидкости во всем диапазоне изменения температуры. Поэтому такие компенсаторы рекомендуется применять только в совокупности с другими компенсаторами.

Так как зона упругой деформации металлического сильфона составляет 10... 15 % его длины (объема), с его помощью провести требуемую компенсацию возможно при условии, что он будет использоваться в качестве котелка МК. Однако при таком конструктивном решении котелок становится нежестким, в нем при вибрации и ударах может появиться «раскачка» жидкости, вызывающая уводящие моменты, действующие на МЧЭ

Резиновые и пластмассовые упругие компенсаторы также приводят к нежесткости котелка.

Все виды упругих компенсаторов требуют установки дополнительных пружин с таким расчетом, чтобы избыточное давление внутри котелка во всем диапазоне изменения температуры

превышало давление паров компасной жидкости. Для жидкости ПМС при температуре +65 °С избыточное давление паров около 5 кПа, для водно-спиртового раствора — до 150 кПа.

Для обеспечения работоспособности котелка достаточно увеличения его объема всего на 0,045 от объема при нормальной температуре. Однако требуется еще и объем для установки силовых пружин. Расчеты показывают, что необходимы пружины, развивающие усилие, например для компаса КМ145 при температуре +65 °С, до 1 кН, что усложняет конструкцию котелка, увеличивает его массо-габаритные характеристики.

Исполнение компенсаторов в виде воздушных или газовых объемов возможно с помощью:

- воздушной камеры, расположенной наверху, сбоку (за специальной рубашкой) или внизу (в ловушке) котелка;
- камеры, заполненной парами компасной жидкости.

Процессы, происходящие при компенсации по первому способу, выражаются в сжатии или расширении объема воздуха под давлением практически несжимаемой жидкости. При повышении температуры в котелке давление поднимается, при понижении — падает, однако во всем диапазоне изменения температуры оно должно превышать давление паров жидкости. Начальный объем воздуха определяется исходя из допустимого давления внутри котелка.

Для получения при изменении температуры избыточного давления, не превышающего 100 кПа, достаточно воздушной камеры с объемом порядка 15 % объема жидкости.

Температурный компенсатор в виде камеры, заполненной парами компасной жидкости, характеризуется тем, что объем котелка должен быть равен объему компасной жидкости при максимальной положительной температуре. При понижении температуры жидкость остывает, испаряется и ее пары собираются в специальной уводящей камере. При этом возможно временное снижение давления внутри котелка, вызванное разностью скоростей снижения температуры жидкости и испарения. При повышении температуры насыщенные пары под действием увеличивающегося давления расширяющейся жидкости конденсируются. Максимальное давление, которое может быть внутри котелка при повышении температуры, определяется давлением паров жидкости. Температурный компенсатор, выполненный по такой схеме, имеет минимальные, по сравнению с остальными компенсаторами, размеры и сравнительно небольшие перепады давления при изменении температуры. Однако для такого компенсатора необходима верхняя уводящая камера, что неприемлемо для компасов, съём показаний в которых производится сверху. Расположение уводящей камеры за рубашкой или в нижней части компаса потребует при значительном снижении температуры перевертывания компаса, чтобы «загнать» образовавшийся пузырь пара в уводящую камеру.



Комбинированные компенсаторы (мембранно-сильфонные и газовые) характеризуются тем, что после заливки котелка происходит испарение компасной жидкости до тех пор, пока давление в котелке, определяемое давлением паров жидкости при данной температуре, не уравнивается давлением, создаваемым упругим компенсатором. В этой схеме могут быть объединены достоинства и уменьшены недостатки мембранно-сильфонных и газовых компенсаторов.

Работа поршневого компенсатора аналогична работе упругого компенсатора, так как поршень во избежание образования паров компасной жидкости должен быть поджат пружиной. Усилие пружин определяется так же, как и для упругого компенсатора, но с учетом дополнительных сил на преодоление сил трения в подвижном герметичном уплотнении.

## 5.2. Определение основных параметров температурных компенсаторов

Рассмотрим схему МК (рис. 5.1) с температурным компенсатором, обобщающим особенности компенсаторов, приведенных в предыдущем подразделе. Представим котелок этого МК в виде замкнутой оболочки со связанными между собой рабочей и компенсационной камерами. В котелке, имеющем жесткость  $c$  и эффективную площадь  $s$ , размещен не деформируемый при изменении температуры МЧЭ. Котелок заполнен несжимаемой жидкостью и газом объемами  $V_{ж}$  и  $V_{г}$  соответственно при давлении  $p$ .

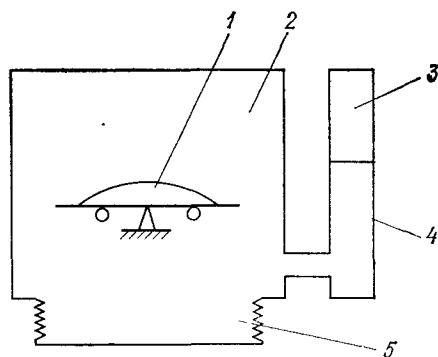


Рис 5.1. Схема компаса с температурным компенсатором:

1 — МЧЭ, 2 — рабочая камера, заполненная жидкостью, 3 — воздушный компенсатор; 4 — компенсационная камера, 5 — мембранный или сильфонный компенсатор

При изготовлении и эксплуатации котелок может находиться в трех установившихся состояниях:

— нулевое — котелок собран и загерметизирован при номинальной температуре  $t$ ;

— первое — в котелке при номинальной температуре создано избыточное внутреннее давление для предотвращения образования паров жидкости во всем диапазоне эксплуатационных температур (например, путем закачки в котелок дополнительного объема  $V_{д}$  жидкости);

— второе — когда изменяется температура окружающей среды на  $\Delta t$ .

В дальнейшем при обозначении зависящих от этих состояний физических величин вводятся соответствующие индексы: 0, 1, 2.

При сборке давление внутри котелка равно атмосферному давлению  $p$ .

При введении в котелок дополнительного объема  $V_{д}$  жидкости ее объем будет

$$V_{ж1} = V_{ж0} + V_{д}, \quad (5.1)$$

при этом в котелке создается давление  $p_1$ . Условие равновесия оболочки котелка определяется действующими на нее силами. Сила  $F_1 = (p_1 - p_0)s$ , приводящая к деформации оболочки, компенсируется упругой силой оболочки  $F'_1 = \Delta l c$  (здесь и в дальнейшем  $\Delta l$  — деформация оболочки котелка). При линейной зависимости деформации от давления имеем

$$\Delta l_1 = s^{-1}(V_{г1} + V_{ж1} - V_{г0} - V_{ж0}).$$

С учетом этих выражений уравнение равновесия оболочки имеет вид

$$(p_1 - p_0)s^2 = c(V_{г1} + V_{ж1} - V_{г0} - V_{ж0}). \quad (5.2)$$

Состояние газового объема при этом определяется равенством

$$p_1 V_{г1} = p_0 V_{г0}. \quad (5.3)$$

Из выражений (5.1) ... (5.3) получим уравнение

$$p_1^2 s^2 c^{-1} + p_1(V_{г0} - V_{д} - p_0 s^2 c^{-1}) - V_{г0} p_0 = 0, \quad (5.4)$$

которое позволяет определить давление  $p_1$ , а затем из формулы (5.3) найти объем  $V_{г1}$ .

При изменении температуры происходят дальнейшая деформация оболочки котелка, а также изменение состояний заполняющих его жидкости и газа. Для установившейся температуры  $t + \Delta t$  равновесие оболочки котелка может быть описано уравнениями, аналогичными выражениям (5.2) и (5.3):

$$(p_2 - p_1)s^2 = c(V_{г2} + V_{ж2} - V_{г1} - V_{ж1});$$

$$p_2 V_{г2} = p_1 V_{г1} (1 + \alpha_{г} \Delta t);$$

$$V_{ж2} = V_{ж1} (1 + \alpha_{ж} \Delta t). \quad (5.5)$$

Из них может быть найдено выражение

$$p_2^2 s^2 c^{-1} + p_2 [V_{r1} - p s^2 c^{-1} - \alpha_{ж} \Delta t (V_{ж0} + V_d)] - p_1 V_{r1} (1 + \alpha_r \Delta t) = 0, \quad (5.6)$$

из которого определяется давление  $p_2$ , а затем из равенств (5.5) находится объем газа  $V_{r2}$ .

Выражения (5.4)... (5.6) позволяют определить параметры компенсаторов общего и частных случаев.

Так, при использовании только газового компенсатора ( $s = 0$ ) имеем следующие расчетные выражения:

$$p_1 = p_0 V_{r0} (V_{r0} - V_d)^{-1}; \quad V_{r1} = V_{r0} - V_d;$$

$$p_2 = p_0 V_{r0} (1 + \alpha_r \Delta t) [V_{r0} - V_d - \alpha_{ж} \Delta t (V_{ж0} + V_d)]^{-1};$$

$$V_{r2} = V_{r0} - V_d - \alpha_{ж} \Delta t (V_{ж0} + V_d).$$

Когда используется только упругий компенсатор, например на основе силфона ( $V_r = 0$ ), получаем формулы:

$$p_1 = p_0 + c s^{-2} V_d; \quad V_{ж1} = V_{ж0} + V_d;$$

$$p_2 = p_0 + c s^{-2} [V_d + \alpha_{ж} \Delta t (V_{ж0} + V_d)];$$

$$V_{ж2} = (1 + \alpha_{ж} \Delta t) (V_{ж0} + V_d).$$

## 6. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА И ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ МАГНИТНОГО КОМПАСА

### 6.1. Определение параметров магнитного чувствительного элемента

Погрешность стрелочного МК зависит от правильности расчета его МЧЭ при создании компаса.

Последовательность расчета МЧЭ, включающая общие рекомендации по выбору опорной силы, магнитного момента, полярного момента инерции и статических углов крена, дана в работе [43]. Основное внимание в приводимой там методике уделено выбору рациональной магнитной системы и ее проверке на минимум девиаций высших порядков.

На основе результатов, полученных в предыдущих разделах, методика [43] может быть дополнена определением значений параметров МЧЭ, влияющих на погрешность МК при вибрации и качке основания.

В связи с многозначностью задачи определения параметров МЧЭ рациональным является расчетно-графический метод с оценкой параметров МЧЭ на физических моделях.

Определение параметров МЧЭ целесообразно начать с выбора диаметра картушки, поскольку этот параметр в конечном счете влияет на частотные параметры МЧЭ, массо-габаритные характеристики и эргономические показатели МК.

Диаметр картушки определяется исходя из необходимой цены деления, дистанции считывания показаний, учета минимально допустимого угла зрения между отметками картушки и устанавливается в соответствии со стандартным рядом предпочтительных чисел. Дистанция считывания регламентируется для МК разного назначения в виде ряда 0,7; 1 и 1,4 м [27, 29, 36]. Угол зрения для контрастных шкал при неблагоприятных условиях эксплуатации (сумеречном освещении ходовой рубки) должен быть не менее 2...3 угл. мин [42].

В качестве критерия при определении параметров МЧЭ, влияющих на измерительные свойства МК, может быть принято минимальное значение его погрешности при действии дестабилизирующих возмущающих моментов во время вибрации и качки.

Для этого могут быть использованы формулы (3.2) и (3.9) для отклонений при вибрации и качке, а также формула

$$\gamma_r = M_r M_m^{-1} \quad (6.1)$$

для погрешности МК от трения, где  $M_r$  — момент трения МЧЭ на опорном устройстве, а  $M_m$  — момент, определяемый формулой (2.19).

Так как моменты  $M_r$  и  $M_m$ , входящие в выражение (6.1), линейно связаны с опорной силой МЧЭ, а момент  $M_m$ , кроме того, пропорционален намагниченности его магнитной системы, целесообразно для этой системы выбирать материал, обладающий максимальной намагниченностью на единицу его массы.

Для стрелочной магнитной системы исходя из условий работы МК и в соответствии с рекомендациями работы [43] выбирается тип рациональной системы, так как такие системы позволяют значительно подавить девиации высших порядков. Степень подавления девиации высших порядков рациональной системой может быть оценена сравнением ее с эквивалентной одинарной стрелкой. Шести-, четырех- и двухстрелочные магнитные системы эквивалентны одинарной стрелке, эквиполусное расстояние которой меньше диаметра соответствующей магнитной системы в 23, 17 и 8 раз.

Магнитный момент  $M$  магнитной системы определяется с учетом требований стандартов ИСО [27, 29] в зависимости от диаметра картушки. Например, для диаметров 100 и 145 мм момент  $M$  должен быть не менее 0,7 и 1,3 А · м<sup>2</sup> соответственно.

Восстанавливающий момент  $M_m$  определяется по формуле (2.19).

Восстанавливающий момент  $M_g$  МЧЭ в гравитационном поле Земли определяется по формуле (2.29) исходя из обеспечения

допустимого статического крена МЧЭ, возникающего в результате действия на магнитную систему вертикальной составляющей индукции МПЗ. Поскольку угол крена  $\beta_0$  регламентируется в стандартах ИСО [27, 29] ( $\beta_0 < 2^\circ$ ), а производственный допуск на статический крен может быть установлен в пределах  $\beta_{01}$ , то момент  $M_g$  определяется по формуле

$$M_g \geq MT \sin \varphi (\beta_0 - \beta_{01})^{-1}.$$

Здесь  $\varphi$  — максимальное значение магнитной широты, на которой должен работать МК.

Конструкционные материалы для МЧЭ и марка компасной жидкости выбираются из условия взаимной стойкости и неизменности параметров при эксплуатации и с течением времени.

Массы и объемы элементов МЧЭ, суммарные значения масс  $m_1$  и  $m_2$  (см. раздел 4), центры масс и объема, расстояние  $l$  между ними определяются расчетно-графическим способом при разработке чертежа. При этом добиваются обеспечения в конструкции определенных выше значений моментов  $M_m$  и  $M_g$ , а также значения опорной силы МЧЭ при температуре  $-40^\circ\text{C}$ , не превышающего 5 мН.

По чертежу исследуется возможность увеличения моментов инерции  $I_\lambda$  ( $\lambda = 1, 2, 3$ ) МЧЭ как за счет максимального разнесения масс на периферийные участки МЧЭ, так и за счет балластных камер, заполненных компасной жидкостью. Целесообразность введения этих камер обоснована в работах [22, 24]. Размеры камер выбираются из конструктивных соображений с последующей проверкой их эффективности на моделях. Опыт использования камер в МЧЭ показывает, что за счет их введения можно уменьшить собственные частоты  $k_\lambda$  МЧЭ на 10...30 %.

Оцениваются значения моментов инерции  $I_\lambda$ . По формулам (2.26) определяются собственные частоты  $k_\lambda$  и коэффициенты сопротивления  $h_\lambda$  МЧЭ.

Измеряя в дальнейшем на моделях и опытных образцах периоды колебаний  $T_\lambda$  и коэффициенты затухания  $\psi_\lambda$  из выражений [2]

$$k_\lambda = \frac{2\pi}{T_\lambda} \sqrt{1 + \frac{\ln^2 \psi_\lambda}{4\pi}} \quad \text{и} \quad \psi_\lambda = e^{h_\lambda T_\lambda},$$

уточняют значения собственных частот и коэффициентов сопротивления МЧЭ.

При больших значениях погрешности МК при циркуляции и рыскании изменяют вязкость компасной жидкости и, если этого недостаточно, увеличивают зазор между МЧЭ и стенками котелка.

Представляя МЧЭ в виде эллипсоида вращения с осями  $l_\lambda$  в соответствии с методикой [34], можно рассчитать характеристические коэффициенты  $\mu_\lambda$  присоединенных масс жидкости.

Задаваясь допустимым значением горизонтальной составляющей динамической реакции  $P_1$ , по формуле (4.14) в зависимости от предполагаемых механических возмущений можно определить область для предпочтительного расположения точки опоры МЧЭ относительно его центров масс и объема.

Правильность выбора расположения точки опоры целесообразно проверить на физических моделях или макетах. Критерием правильности выбора может являться сохранение в допустимых пределах погрешности от трения МК после многократных горизонтальных ударов или двухкомпонентных вибраций с большим ускорением.

Допуск на отклонение точки опоры МЧЭ от его вертикальной оси, соединяющей центры масс и объема, устанавливается исходя из допустимой постоянной систематической погрешности, вызванной неравенством моментов инерции  $I_1$  и  $I_2$  МЧЭ, на основании формул (3.2) и (3.9) и с использованием теоремы Гюйгенса—Штернера [10].

После определения параметров МЧЭ по формулам (3.2) и (3.9) оцениваются погрешности МК в самых неблагоприятных эксплуатационных условиях.

## 6.2. Оценка погрешности магнитного компаса

Источники первичных погрешностей выявляются при анализе функциональной схемы МК и определении параметров основных функциональных узлов. При этом производится их оценка, установление возможных взаимосвязей и законов распределения плотностей вероятностей.

Для функциональной схемы, приведенной на рис. 1.1, имеют место следующие виды первичных погрешностей:

- погрешность, вызванная трением МЧЭ;
- погрешность при вибрации;
- погрешность при качке;
- погрешность при рыскании;
- геометрическая погрешность при крене и дифференте;
- погрешность изготовления;
- погрешность интерполяции при отсчитывании;
- погрешность от параллакса;
- остаточная девиация.

Оценку погрешности нагляднее всего провести на примере одного из компасов, например компаса КМ100. Ниже приводятся основные параметры и характеристики компаса КМ100, необходимые для оценки его погрешности:

Опорная сила $P_1$ МЧЭ при температуре $t =$	
$-40^\circ\text{C}$ . . . . .	5 мН (0,5 Г)
Опорная сила МЧЭ при $t = +20^\circ\text{C}$ . . . . .	30 мН (3 Г)

Погрешность от трения при  $t=+20^\circ\text{C}$  и горизонтальной составляющей индукции  $H$  МПЗ, равной 6 мкТл . . . . .  
Магнитный момент  $M$  МЧЭ . . . . .  
Восстанавливающий момент  $M_m$  МЧЭ при  $H=12$  мкТл . . . . .

0,3°  
1,2 А · м²  
18 · 10⁻³ мН · м  
(0,18 гсм)  
4 мН · м (40 гсм)

Восстанавливающий момент  $M_g$  МЧЭ . . . . .  
Собственные частоты  $k_1$  и  $k_2$  МЧЭ относительно его горизонтальных осей . . . . .  
Собственная частота  $k_3$  МЧЭ относительно его вертикальной оси при  $H=12$  мкТл . . . . .  
Коэффициенты сопротивления  $h_1$  и  $h_2$  МЧЭ относительно его горизонтальных осей . . . . .  
Коэффициент сопротивления  $h_3$  МЧЭ относительно его вертикальной оси . . . . .  
Момент инерции  $I_1$  и  $I_2$  МЧЭ вокруг горизонтальных осей . . . . .  
Момент инерции  $I_3$  МЧЭ вокруг вертикальной оси . . . . .  
Неравенство моментов инерции МЧЭ . . . . .

4,3 с⁻¹  
0,27 с⁻¹  
1,1 с⁻¹  
0,09 с⁻¹  
2,2 · 10³ гсм² (2,2 гсм · с²)  
2,5 · 10⁻³ г · см² (2,5 гсм · с²)  
( $I_1 - I_2$ )  $I_2^{-1} = 0,018$ ;  
( $I_1 - I_2$ )  $I_3^{-1} = 0,016$   
до 20 м/с² (частота 60... 1200 с⁻¹, или 10... 200 Гц)  
до 1 м/с² (частота 0,5... 2 с⁻¹, период 3... 16 с).

Вибрационные ускорения . . . . .  
Ускорения при качке . . . . .

Оценки первичных погрешностей целесообразно провести для условий эксплуатации, характеризующихся фиксированными значениями индукции  $H$ : 9, 15 и 25 мкТл и соответствующими им значениями отношения вертикальной и горизонтальной составляющих индукции МПЗ —  $\text{tg } \varphi$ : 6, 3 и 1,5.

Погрешность  $\delta_t$  МК, вызванная трением МЧЭ, зависит от температуры  $t$  и горизонтальной составляющей индукции  $H$  МПЗ

$$\delta_t = (at + b) H^{-1}. \quad (6.2)$$

Здесь  $a$  и  $b$  — постоянные коэффициенты.

Учитывая, что  $\delta_t = 0,3^\circ$  при  $t=+20^\circ\text{C}$  и  $H=6$  мкТл, а также принимая во внимание, что если  $\delta_t = 0,3^\circ$  при  $P_1=30$  мН, то при  $P_1=5$  мН следует  $\delta_t = 0,05^\circ$ , из выражения (6.2) после решения двух уравнений будем иметь:  $a=0,025$  и  $b=1,3$ .

Погрешность  $\delta_t$  подчиняется закону равномерной плотности распределения вероятностей. Средняя квадратическая погрешность  $\sigma_t$  определяется по формуле

$$\sigma_t = 3^{-0,5} \delta_t. \quad (6.3)$$

Значения погрешности  $\sigma_t$ , полученные из формулы (6.3) с учетом выражения (6.2), при различных возможных сочетаниях температуры  $t$  и индукции  $H$  сведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Температура $t$ , °C	Погрешность $\sigma_t$ , град		
	при $H$ , мкТл		
	9	15	25
−40	0,02	0,01	—
−20	0,05	0,03	0,02
0	0,08	0,05	0,03
+20	0,12	0,07	0,04
+40	0,15	0,09	0,05
+66	—	0,11	0,07

Погрешность  $\delta_b$  МК при вибрации описывается выражением (3.2). Она определяется большим числом независимых случайных величин — частотами и амплитудами вибрации по каждому из ортогональных направлений, степенью совпадения частот по этим направлениям, соотношением частот вибрации и собственных частот колебаний МЧЭ относительно горизонтальных осей, размером неравенства моментов инерции, значениями начальных фаз колебаний по ортогональным направлениям, коэффициентами сопротивления при движении МЧЭ вокруг его горизонтальных осей и курсом судна. Такое число факторов дает основание считать, что погрешность  $\delta_b$  имеет нормальное распределение плотности вероятностей, т. е.  $\sigma_b = 3^{-1} \delta_b$ .

Значения погрешности  $\sigma_b$  приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Ускорение вибрации $ap^2$ , м/с <sup>2</sup>	Погрешность $\sigma_B$ , град								
	при $H=9$ мкТл и $\text{tg } \Phi=6$			при $H=15$ мкТл и $\text{tg } \varphi=3$			при $H=25$ мкТл и $\text{tg } \varphi=1,5$		
	при частоте $p$ , с <sup>-1</sup>								
	60	120	240	60	120	240	60	120	240
5	0,15	0,04	0,01	0,09	0,02	0,00	0,04	0,01	0,00
10	0,58	0,15	0,04	0,34	0,09	0,02	0,18	0,04	0,01
20	—	0,58	0,15	—	0,34	0,09	—	0,18	0,04

Погрешность  $\delta_k$  МК при качке описывается выражением (3.9). Эта погрешность, так же как и погрешность  $\delta_b$ , определяется большим числом независимых случайных величин по каждому из трех ортогональных направлений — амплитудами и частотами качки, начальными фазами колебаний, значениями коэффициентов сопротивлений при движении МЧЭ относительно всех его осей, степенью совпадения частот колебаний по

различным направлениям, неравенством моментов инерции вокруг горизонтальных осей, соотношением частот качки и собственной частоты колебаний МЧЭ относительно его вертикальной оси, курсом судна. Эта совокупность факторов также позволяет считать погрешность  $\delta_K$  погрешностью, имеющей нормальное распределение плотности вероятностей, т. е.  $\sigma_K = 3^{-1} \delta_K$ .

Значения погрешности  $\sigma_K$  приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Ускорение качки $ap^2$ , м/с <sup>2</sup>	Погрешность $\sigma_K$ , град								
	при $H=9$ мкТл и $\text{tg } \varphi=6$			при $H=15$ мкТл и $\text{tg } \varphi=3$			при $H=25$ мкТл и $\text{tg } \varphi=1,5$		
	при частоте $p$ , с <sup>-1</sup>								
	0,5	1	2	0,5	1	2	0,5	1	2
	0,57	0,21	0,08	0,44	0,11	0,04	0,36	0,07	0,03
0,25	0,57	0,21	0,08	0,44	0,11	0,04	0,36	0,07	0,03
0,5	1,29	0,44	0,25	0,96	0,30	0,16	0,74	0,22	0,09
1,0	—	1,29	0,89	—	0,78	0,50	—	0,53	0,29

Погрешность  $\delta_p$  при рыскании целесообразно определять на моделях или опытных образцах в связи со сложностью математического описания моментов, приводящих к увлечению МЧЭ, возникающих в опорном устройстве и в жидкости. Однако если влиянием жидкостного увлечения можно пренебречь, например, при достаточно больших расстояниях МЧЭ от стенок котелка, то на этапе проектирования может быть произведена приближенная оценка, учитывающая увлечение только от момента трения. Для этого воспользуемся амплитудной частотной характеристикой МК при механических возмущениях [12]

$$A_p(p) = k_3^2 M_m^{-1} [(k_3^2 - p^2)^2 + 4h_3^2 p^2]^{-0,5}.$$

При частоте рыскания, равной 0,35 с<sup>-1</sup>, будем иметь

$$A_p(p) = 0,925 M_m^{-1}.$$

Возмущающим моментом при рыскании является момент  $M_T$  трения, тогда

$$\delta_p = M_T A_p(p) = 0,925 M_T M_m^{-1}.$$

Из этого выражения с использованием формул (6.1) и (6.3) получим  $\delta_p = 1,6 \sigma_T$ .

Так как погрешность  $\delta_p$  изменяется по гармоническому закону, то  $\sigma_p = 0,5^{0,5} \delta_p$ ; тогда  $\sigma_p = 1,13 \sigma_T$ .

Значения погрешности  $\sigma_p$  приведены в табл. 6.4.

Таблица 6.4

Температура $t$ , °C	Погрешность $\sigma_p$ , град		
	при $H$ , мкТл		
	9	15	25
-40	0,02	0,01	—
-20	0,06	0,03	0,02
0	0,09	0,06	0,03
+20	0,13	0,08	0,04
+40	0,17	0,10	0,06
+66	—	0,12	0,08

Геометрическая погрешность  $\delta_T$  может быть определена по формуле (4.17). Она возникает в связи с изменением при качке, вибрации и наклонах судна взаимного положения элементов съема показаний из-за разных частотных свойств МЧЭ и котелка, а также трения в осях карданова подвеса. Поскольку углы  $\theta$  рассогласования этих элементов не превышают 3°, то  $\delta_T = 0,04^\circ$ . Так как погрешность  $\delta_T$  в зависимости от курса судна изменяется по гармоническому закону, погрешность  $\sigma_T$  не более 0,03°.

Погрешность  $\delta_n$  изготовления складывается из погрешности градуировки картушки, погрешности ее установки относительно магнитной системы и погрешности от эксцентриситета картушки. Допуски на составляющие погрешности  $\delta_n$  устанавливаются такими, что суммарная погрешность после выставки картушки не превышает 0,5°. Поскольку погрешность  $\delta_n$  имеет нормальное распределение плотности вероятностей, то  $\sigma_n = 3^{-1} \delta_n = 0,17^\circ$ .

В практике измерений принято, что погрешность при съеме отсчета по шкале равняется половине цены деления шкалы. Однако при измерениях допускается интерполяция интервала. Так, в работе [42] указано, что при интервале между отметками шкалы более 1,5 мм возможна визуальная интерполяция на 10 отрезков, при интервале более 1,2 мм — на 5 отрезков. Погрешность интерполяции не превышает длины отрезка, на которые мысленно делится весь интерполируемый интервал.

Компас КМ100 снабжается лупой с увеличением 1,4—1,5. Поэтому оцениваемый наблюдателем интервал между отметками, соответствующий 1°, находится в пределах от 1,2 до 1,3 мм. Для таких интервалов возможна визуальная интерполяция на 5 отрезков. Следовательно, погрешность интерполяции при отсчитывании показаний  $\delta_o = 0,2^\circ$ . Учитывая, что погрешность  $\delta_o$  имеет равномерную плотность распределения вероятностей, средняя квадратическая погрешность  $\sigma_o = 3^{-0,5} \delta_o = 0,12^\circ$ .

Погрешность  $\delta_n$  от параллакса зависит от расстояния между отсчетным срезом картушки и курсовым указателем. Это

расстояние для компаса КМ100 равно 1,5 мм. При дистанции считывания показаний, равной 1 м, и средним расстоянием между глазами наблюдателя 64 мм погрешность  $\delta_n$  составляет 0,05°. Погрешность имеет равномерную плотность распределения вероятностей, т. е.  $\delta_n = 3 \cdot 0,5 \delta_n = 0,03^\circ$ .

После проведения девиационных работ производится определение остаточной девиации. Допустимые значения коэффициентов остаточной девиации оговариваются в инструкции по эксплуатации МК. Так как остаточная девиация является систематической погрешностью МК, то по полученным коэффициентам рассчитывается таблица остаточной девиации (таблица поправок) для различных компасных курсов. Таблица поправок составляется сразу после завершения девиационных работ.

В связи с этим погрешность от остаточной магнитной девиации в суммарной погрешности МК можно не учитывать.

При длительной эксплуатации судна остаточная девиация может медленно изменяться. Эти изменения обычно фиксируются при сличении показаний МК с показаниями других измерителей курса путем пеленгования предметов, измерения магнитной индукции на равноотстоящих курсах и другими способами. Они принимаются во внимание при измерении курса, поэтому в суммарной погрешности МК также могут не учитываться.

Итак, суммарная погрешность  $\Delta$  магнитного компаса КМ100 без учета погрешности от остаточной девиации определяется по формуле

$$\Delta = n(\sigma_r^2 + \sigma_v^2 + \sigma_k^2 + \sigma_p^2 + \sigma_n^2 + \sigma_o^2 + \sigma_n^{0,5}),$$

где  $n=2$  при вероятности погрешности  $\Delta$ , равной 0,95;  $n=3$  при вероятности погрешности  $\Delta$ , равной 0,997.

Погрешность  $\Delta$  рассчитана для нескольких эксплуатационных режимов, характеризующихся различными магнитными условиями и уровнями механических возмущений. Магнитные условия различаются возможными значениями горизонтальной составляющей индукции МПЗ (9, 15 и 25 мкТл) и соответственно значениями  $\tan \varphi$  (6; 3 и 1,5). Механические возмущения подразделяются на четыре уровня:

- нулевой — отсутствуют вибрация, качка и рыскание;
- минимальный — вибрация с частотой более 240 с<sup>-1</sup> и ускорением менее 5 м/с<sup>2</sup>, качка с частотой более 2 с<sup>-1</sup> и ускорением менее 0,25 м/с<sup>2</sup>, рыскание с частотой 0,35 с<sup>-1</sup>;
- номинальный — вибрация с частотой 120... 240 с<sup>-1</sup> и ускорением 5... 10 м/с<sup>2</sup>, качка с частотой 1... 2 с<sup>-1</sup> и ускорением от 0,25 до 0,5 м/с<sup>2</sup>, рыскание с частотой 0,35 с<sup>-1</sup>;
- максимальный — вибрация с частотой 60... 120 с<sup>-1</sup> и ускорением 5... 10 м/с<sup>2</sup>, качка с частотой 0,5... 1 с<sup>-1</sup> и ускорением 0,25... 0,5 м/с<sup>2</sup>, рыскание с частотой 0,35 с<sup>-1</sup>.

Значения суммарной погрешности  $\Delta$  для этих режимов приведены в табл. 6.5.

Таблица 6.5

Уровень механических возмущений	Суммарная погрешность магнитного компаса, град, с вероятностью					
	0,95	0,997	0,95	0,997	0,95	0,997
	при $H$ , мкТл					
	9	15	25			
Нулевой	0,52	0,78	0,46	0,69	0,43	0,65
Минимальный	0,64	0,96	0,48	0,72	0,44	0,66
Номинальный	1,12	1,68	0,79	1,18	0,62	0,93
Максимальный	2,90	4,35	2,09	3,13	1,62	2,43

Из табл. 6.5 видно, что на всех уровнях механических возмущений, кроме максимального, МК обеспечивает измерение курса с достаточной для практических целей точностью.

## 7. ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ МАГНИТНЫХ КОМПАСОВ

### 7.1. Основные определения

Надежность МК — это его свойство выполнять измерение курса, сохраняя эксплуатационные показатели в заданных пределах в течение требуемого промежутка времени.

Работоспособность МК — состояние МК, при котором с его помощью возможно измерение курса в условиях эксплуатации с заданной точностью (погрешности не выходят за пределы эксплуатационных допусков).

Нарушения работоспособности характеризуются отказами [7, 43, 45].

Отказ МК — событие, заключающееся в превышении погрешности над установленной в технической документации.

Отказы МК могут быть классифицированы:

— по динамике их возникновения — на внезапные и постепенные;

— по степени снижения эффективности использования МК — на полные и частичные.

Внезапные и постепенные отказы МК — отказы, характеризующиеся соответственно скачкообразным или постепенным изменением его погрешности над значением, установленным в технической документации.

Полный отказ МК — отказ, характеризующийся неопределенным размером превышения погрешности над установленным в технической документации.

Частичный отказ МК — отказ, характеризующийся погрешностью, превышающей установленную в технической документации в известных пределах, ухудшением возможности съема информации либо отказом части каналов передачи измерительной информации.

Частичные отказы — отказы, после возникновения которых МК может быть использован по назначению, но с меньшим эффектом. Например, появление дополнительной погрешности, вызванной износом керна опорного устройства, сильной качкой, действием циркуляции, кратковременным магнитным возмущением и др., может быть квалифицировано как частичный отказ. К частичным отказам могут быть отнесены незначительная течь и помутнение компасной жидкости, появление в котелке воздушного пузыря, выпадение хлопьев в жидкости, увеличение люфтов в кардановом подвесе, загрязнение его подшипников и т. п., при которых МК в основном сохраняет свои точностные параметры, а съем показаний затрудняется незначительно.

Частичным отказом МК можно считать также выход из строя одного из каналов дистанционной передачи показаний, например оптического или электрического.

Частичные отказы, вызванные внешними возмущающими воздействиями, после их исчезновения устраняются, а вызванные постепенными изменениями свойств функциональных устройств, со временем усугубляются и могут привести к полному отказу МК.

По характеру применения МК могут быть отнесены к аппаратуре непрерывного действия, курсовые системы — к аппаратуре многократного действия.

По возможности ремонта и восстановления компасы и курсовые системы относятся к ремонтируемой и восстанавливаемой аппаратуре.

По числу уровней качества функционирования компасы и курсовые системы относятся к аппаратуре, имеющей три уровня качества функционирования: номинальный уровень, пониженный уровень (частично работоспособное состояние) и полный отказ. По влиянию отказов на результат выполнения задачи: выходной эффект равен 1 при безотказной работе в течение требуемого промежутка времени и может находиться в пределах от 0 до 1 при частичном отказе.

Надежность МК, являющаяся комплексным свойством, включающим показатели безотказности, долговечности, ремонтопригодности и др., может быть охарактеризована вероятностью безотказной работы, средним сроком службы до списания (средним ресурсом до списания) и средним временем восста-

новления. Причем для стрелочных визуальных МК целесообразно установление одного показателя долговечности — срока службы, так как МК находятся в работе постоянно и их ресурс полностью определяется сроком службы. Дистанционные МК, у которых возможны отказы дистанционной передачи курса вследствие ограниченного ресурса электроэлементов, целесообразно характеризовать двумя показателями долговечности: сроком службы и ресурсом.

## 7.2. Статистические исследования надежности магнитных компасов

Количественная оценка параметров надежности приборов осуществляется вероятностными методами по критериям, принятым в теории надежности. Достоверные результаты могут быть получены при исследовании большого количества приборов в течение длительного периода их эксплуатации. Такими приборами являются компасы КТ-М и УКП-М, эксплуатирующиеся не одно десятилетие. Информация о надежности этих компасов может быть использована при их модернизации, а также проектировании новых МК, строящихся на имеющих одинаковое назначение функциональных устройствах, схемные и конструктивные различия которых вызваны в основном расширением диапазонов их работы и повышенными требованиями к точности выполнения функциональных задач. Статистическая информация позволяет также прогнозировать параметры надежности разрабатываемых и проектируемых МК.

В целях получения информации о надежности у служб мореплавания морского, речного и рыболовского флотов запрашивается информация о среднем возрасте находящихся в эксплуатации МК, о сроках службы до их списания, характерных неисправностях и отказах, о недостаточно надежных функциональных узлах.

При обработке информации принимаются следующие допущения:

- вся информация считается однородной и достоверной;
- срок службы МК отсчитывается от даты его изготовления;
- время от даты изготовления до начала эксплуатации принимается равным полугоду;
- ресурс визуального МК определяется его непрерывной наработкой в течение всего срока службы за вычетом времени ремонтов, т. е. 7500 ч за один год эксплуатации.

Обследованию подвергаются МК за ограниченный период времени — например, 3 года, а также не все МК, находящиеся в эксплуатации. Однако количество обследованных МК должно

быть достаточным для получения убедительных сведений о параметрах их эксплуатационной надежности.

В результате сбора статистической информации о надежности МК, проведенного в 1978 г., получены следующие результаты.

Средний срок службы до списания по выборке из 137 списанных компасов УКП-М составляет 17,5 лет; из них 15 % списано после 14... 16 лет, 80 % — после 17... 19 лет эксплуатации.

Средний срок службы до списания по выборке из 125 списанных компасов КТ-М составляет 14,8 лет; из них 25 % компасов списано в возрасте 8... 14 лет, а 61 % — в возрасте 17... 19 лет. Ежегодно списывается около 5 % компасов из числа старше 15 лет.

Основной причиной отказов является износ опорного керна, что приводит к необходимости его замены у компасов КТ-М и УКП-М через 4,5... 5,5 мес. (3200... 4000 ч). Износ керна происходит постоянно при рыскании судна, скорость износа увеличивается при воздействии качки, вибрации и ударов. К другим повторяющимся причинам отказов могут быть отнесены разгерметизация котелка, появление неубирающегося пузыря в рабочей камере над МЧЭ, разгерметизация поплавка.

Эти причины приводят в основном к частичным отказам, которые имеют случайный характер и устраняются в процессе обслуживания и ремонта.

Причинами списания компасов КТ-М и УКП-М являются в основном коррозионное разрушение нактоуза (материал АЛ-2) в местах крепления его к палубе и крепления к нему мягкого железа, износ деталей котелка, элементов карданных подвесов и компенсаторов девиации.

У компасов с оптической передачей типа КМО-Т к недостаткам компасов КТ-М и УКП-М прибавляется ограниченная прочность среднего стекла, к которому крепится опорный узел МЧЭ, а также разгерметизация температурного компенсатора, происходящая, как правило, по соединительному шву, выполненному пайкой. Однако срок службы до списания компасов КМО-Т при правильной организации обслуживания и ремонта может быть больше, чем у компасов УКП-М, так как нактоуз и его конструктивные элементы выполнены из более коррозионностойкого материала (АЛ-28).

### 7.3. Установление показателей надежности магнитных компасов

На этапе разработки МК строгое количественное определение их показателей надежности в настоящее время невозможно из-за отсутствия достаточных статистических сведений. В ос-

новном это относится к механическим функциональным устройствам котелка и вызвано тем, что, несмотря на одинаковость назначения функциональных узлов котелков в различных типах компасов, они имеют значительные конструктивные и технологические отличия, которые в конечном счете определяют различные количественные показатели надежности одинаковых функциональных узлов. Поэтому до сих пор не удалось определить характеристики надежности основных функциональных элементов котелков МК. Количественная же оценка параметров безотказности дистанционных передач МК, выполненных на электромеханических и электрорадиоэлементах, возможна.

В связи с этим в настоящее время применяется комбинированный метод оценки вероятности безотказной работы разрабатываемых МК, состоящий в расчете этого показателя для электрической схемы и переносе на вновь разрабатываемые МК результатов статистических исследований серийных, значительное время эксплуатирующихся МК. При этом предполагается, что основная часть выявленных при эксплуатации недостатков, приводящих к отказам и преждевременным списаниям у разрабатываемых компасов, устранена. Определенные таким образом показатели безотказности механической схемы МК, а также результаты стендовых и объектовых испытаний подвергаются экспертному анализу, после которого устанавливается окончательное значение показателя.

В результате такого подхода для МК широкого применения установлены следующие значения вероятности безотказной работы за 3000 ч: для визуальных МК — 0,98, для МК с электромагнитным компенсатором — 0,93, для МК с электрической дистанционной передачей и электромагнитным компенсатором — 0,71.

Требуемые показатели долговечности МК определяются сроками службы существующих и перспективных судов и их межремонтными сроками. Реально достижимые показатели ограничиваются параметрами надежности использованных в МК функциональных устройств, электроэлементов, материалов (в основном неметаллических), резинотехнических изделий, монтажных проводов и др.

Сроки службы судов колеблются от 18 до 24 лет и составляют: 20 лет — у танкеров, 22 года — у сухогрузов, 24 года — у пассажирских судов, 23 года — у судов БКРТ, БМРТ, РТМ, ПР, ТР, плавбаз и приемно-транспортных судов, 18 лет — у судов СРТ-Р, СРТ, РС и вспомогательных судов.

Среднегодовой эксплуатационный период в целом по морскому флоту превышает 330 суток [32].

Как показывают результаты статистических исследований работоспособности серийных МК, большинство их функциональных устройств работают надежно в течение всего срока службы объекта. Недостаточно надежные функциональные узлы, послу-



жившие причиной списания МК, подвергаются конструктивному и технологическому анализу и соответствующей доработке, приводящей в большинстве случаев к улучшению их показателей надежности.

Параметры долговечности пластмассовых и резинометаллических изделий оценить трудно, так как они не регламентируются поставщиками сырья и этих изделий. Исключения составляют лишь резиновые уплотнительные кольца, для которых установлены предельные сроки службы в экстремальных условиях 6...10 лет.

Оценка долговечности изделий из пластмасс широкого применения свидетельствует о значительном изменении во времени свойств материала: увеличение хрупкости, усадка и коробление деталей. Однако в ряде узлов компаса КМО-Т, где пластмассовые детали не несут значительных силовых нагрузок, в частности в котелке и в МЧЭ они зарекомендовали себя достаточно надежно при сроках службы до 10 лет.

Показатели долговечности МК зависят также от рациональной организации технического обслуживания и ремонта.

Техническое обслуживание и ремонт МК на судах морского и речного флотов производится силами базовых электрорадионавигационных камер (БЭРНК) морских пароходств, морских рыбных портов и баз океанрыбфлота. В отдельных случаях производится замена опорного керна МЧЭ во время рейса силами личного состава. По установившейся практике компасный котелок сдается для технического обслуживания и ремонта один раз в год перед началом очередной навигации. Здесь котелок проверяется, подвергается текущему или среднему ремонту и доводится до полного соответствия требованиям эксплуатационной документации.

Техническое обслуживание в ряде ведомств производится экипажем. Проверка на соответствие эксплуатационной документации и пополнение ЗИП осуществляются после каждого выхода. Один раз в три года котелки и раз в 5—6 лет компасы сдаются в базовые мастерские для проверки и выполнения текущего или среднего ремонта. Капитальный ремонт компасов не практикуется. В объем среднего ремонта обязательно входят замена внутреннего электрического монтажа, замена вышедших из строя электроэлементов, чистка, смазка, регулировка, восстановление гальванического и лакокрасочного покрытий. При любом виде ремонта проверяется герметичность поплавка МЧЭ, который часто заменяется из-за течи; обязательно заменяется и шпилька.

Ремонтные мастерские снабжены типовой ремонтно-технической документацией и руководствами по ремонту МК, которые содержат описание всех ремонтных операций (демонтаж, ремонт, монтаж), перечень материалов, запчастей, инструмента, технологической оснастки, а также методику швартовых и хо-

довых испытаний. Нормы, расценки и другие экономические нормативы устанавливаются ремонтными органами.

Стоимость ремонта компаса составляет около 10 %, а котелка компаса — 5 % их стоимости. Эти показатели свидетельствуют об экономической целесообразности ремонта компасов и их котелков.

При установлении межремонтных сроков МК рекомендуется их совмещение с межремонтными сроками объектов.

В настоящее время межремонтные сроки судов морского флота не оговорены нормативными документами и устанавливаются практикой эксплуатации. Однако с развитием системы непрерывного технического обслуживания (развитие сети баз обслуживания, расширение существующих и создание новых баз и складов) намечаются следующие ремонтные циклы [32]:

- для сухогрузных судов универсального назначения, лесовозов и малых танкеров — 5-6 лет;

- для специализированных сухогрузных судов (ролкеры, контейнеровозы, лихтеровозы и т. п.), навалочников и средних танкеров — в основном 2 года.

Для рыболовных судов практикой установлены следующие межремонтные сроки:

- для судов со сроком службы до списания 23 года: малый ремонт через 2-3 года, большой ремонт через 6-8 лет;

- для судов со сроками службы до списания 18 лет: малый ремонт через 2 года, большой ремонт через 6-7 лет.

Анализ статистической надежности серийных МК, учет объема типовых ремонтных работ, сроков службы судов и их межремонтных сроков позволяют признать рациональными следующие виды техобслуживания и ремонта перспективных МК.

Перед каждым рейсом должны производиться межпоходовые регламентные работы — чистка, смазка, регулировка, замена отказавших элементов и деталей из ЗИП, пополнение ЗИП одиночного, доведение компаса до полного соответствия требованиям эксплуатационной документации.

Эксплуатация компасов должна осуществляться без их капитального ремонта.

Средний ремонт компасных котелков целесообразно проводить один раз в 2-3 года во время малого ремонта судна.

Средний ремонт компаса в целом должен производиться один раз в 8-10 лет во время заводского ремонта судна. При этом необходимо производить замену ответственных электромеханических устройств дистанционной передачи курса, резиномеханических и пластмассовых изделий. При необходимости возможна замена котелков и МЧЭ. Такая замена экономически оправдана, так как стоимость котелков компасов КМ69 и КМ100 составляет 25...30 %, а котелка компаса КМ145 — 5...10 % соответствующего компаса. Стоимость МЧЭ составляет 10...30 % стоимости котелка.

Таким образом, исходя из фактических данных о параметрах долговечности судов, принимая во внимание достигнутые показатели долговечности серийных МК, планируемые мероприятия по устранению недостатков, сведения о долговечности электрорадиоэлементов, материалов, резинотехнических изделий и учитывая рациональные сроки проведения технического обслуживания и ремонта МК и их функциональных узлов, в перспективных МК широкого применения можно достигнуть следующих показателей долговечности: средний срок службы — 15 лет, средний ресурс электрической дистанционной передачи курса — 75 тыс. ч. При этом для пластмассовых узлов и деталей, электроэлементов, электрического монтажа, резинотехнических и пластмассовых изделий целесообразно ограничить срок службы до 10 лет, а ресурс до 50 тыс. ч. Достижение показателей долговечности компасов должно обеспечиваться заменой указанных деталей, элементов и узлов при среднем ремонте компасов.

Оценка параметров ремонтпригодности производится экспертным методом для типовых неисправностей в расчете на достаточную квалификацию личного состава. Таким образом получены параметры ремонтпригодности компасов КМ69, КМ100 и КМ145: среднее время восстановления составляет 20...30 мин, оперативное время ремонта с использованием ремонтного комплекта ЗИП в зависимости от характера неисправности находится в пределах от 20 мин до 8 ч (без учета времени проведения девиационных работ). Такие показатели ремонтпригодности обеспечиваются блочно-модульным принципом построения компасов и наличием в дистанционных передачах курса устройств контроля неисправностей.

## 8. ВОПРОСЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ И УНИФИКАЦИИ МАГНИТНЫХ КОМПАСОВ

### 8.1. Стандартизация магнитных компасов

Большое распространение МК на судах всех классов и назначений сделало их объектом широкой международной стандартизации. С 1965 г. Международной организацией по стандартизации (ИСО) разработаны стандарты:

ИСО 449 — Магнитные компасы и нактоузы класса А;

ИСО 613 — Магнитные компасы, нактоузы и пеленгаторы класса В;

ИСО 694 — Расположение магнитных компасов на судне;  
ИСО 1069 — Магнитные компасы и нактоузы для морской навигации. Термины и определения;

ИСО 2269 — Магнитные компасы и принадлежности. Правила испытаний [28].

В этих стандартах, как следует из их названий, установлены требования к компасам классов А и В (для судов неограниченного и ограниченного районов плавания), требования, учитывающие особенности расположения компасов на судне, специфические методы испытаний, а также приведены магнитно-компасные термины и даны их определения. Упорядочение параметров и характеристик выпускаемых компасов оказало положительное влияние на практику судовождения. Об этом свидетельствуют решения состоявшейся в марте 1976 г. 18-й сессии Международной морской организации (ИМО), закрепленные в резолюции ИМО А.382(Х) 1977 г. В соответствии с этой резолюцией требования ИМО, соответствующие требованиям стандартов ИСО, стали обязательными для морского и рыболовного флотов.

В отечественной промышленности необходимость проведения работ по стандартизации МК [19] возникла в начале 70-х годов. Она была вызвана тем, что к этому времени на снабжении судов отечественного флота находились компасы КТ и УКП-М; кроме того, были созданы еще семь типов компасов: КМО-Т, «Сектор», КМШ-Т, «Яхта», КМП, КМК и «Дельфин», в основном частного применения. Одни из них были внедрены в серийное производство, внедрение же других встретило трудности из-за ограниченных возможностей производственной базы. Вместе с тем развивающийся отечественный флот требовал оснащения вновь создаваемых судов магнитными компасами, отвечающими вновь создаваемым судам магнитными компасами, отвечающими изменившимся, более жестким, условиям эксплуатации.

Возник вопрос, можно ли доработать серийные конструкции МК до требуемого уровня. Для ответа на него были проведены их сравнительные испытания, показавшие, что обеспечение работоспособности МК в расширенном диапазоне механических и климатических возмущений, обеспечение технологичности конструкции, надежности, эргономических и эстетических показателей на любом из серийных МК путем его модернизации неоправданно и неизбежно приведет к созданию нового МК.

Анализ возможных функциональных схем МК, точности работы серийных МК, перспективных требований, выдвигаемых отечественным судостроением, привел к необходимости создания новых, унифицированных конструкций МК.

Для выполнения этой задачи оказалось недостаточно требований, установленных в стандартах ИСО: отсутствовали требования к динамическим характеристикам при вибрации и качке, к допустимым значениям погрешностей, к виду и струк-

туре дистанционной передачи курса, к компенсаторам магнитной и электромагнитной девиации, а также к параметрам надежности. В связи с этим возникла необходимость разработки [19] отечественного нормативного документа, которым явился опережающий стандарт на типы и основные параметры МК. Этот стандарт разработан в соответствии со стандартами ИСО, а отсутствующие в них требования установлены на основе анализа конструкций и технологии изготовления серийных МК, обобщения характеристик разрабатываемых и перспективных судов. При обобщении все типы судов и плавсредств широкого применения оказалось возможным разделить по эксплуатационным характеристикам на три большие группы. Соответственно для каждой группы судов были выработаны требования к МК, которые и были стандартизованы.

Разделение компасов на типы произведено в зависимости от диаметров их картушек, так как диаметр картушки визуального компаса является основным параметром, определяющим эксплуатационные и экономические показатели МК.

Диаметры картушек — 69, 100 и 145 мм — установлены исходя из максимальных дистанций считывания показаний, регламентируемых стандартами ИСО и Правилами по конвенционному оборудованию морских судов, и минимально допустимого угла зрения между градусными отметками картушек.

В соответствии с диаметрами картушек установлены три типа компасов широкого применения — КМ69, КМ100 и КМ145-С, каждый из которых может иметь по несколько модификаций, отличающихся от базовой конструкции (конструкции МК широкого применения, максимально оснащенной функциональными устройствами), в частности, наличием и видом дистанционной передачи курса, осветителей, способом установки, объемом компенсаторов.

Для каждого МК в стандарте установлены ограничительные ряды на параметры МЧЭ, компенсаторов девиации, дистанционных передач, пеленгаторов, нактоузов, осветительных устройств, а также на параметры надежности, на погрешности при качке, вибрации и циркуляции, на массу, габаритные и присоединительные размеры. Стандартизуемые параметры либо соответствуют стандартам ИСО, либо перекрывают их. Ряд важных параметров стандартизован только в отечественном стандарте. На основе этого стандарта была разработана рекомендация по стандартизации МК по линии СЭВ [30].

В нижеследующих подразделах дана краткая характеристика унифицированных МК типов КМ69, КМ100 и КМ145-С. Ввиду того что компас КМ145-С содержит максимальное по сравнению с другими типами количество функциональных узлов, целесообразно начать описание именно с него.

## 8.2. Магнитный компас КМ145-С

Магнитный компас КМ145-С предназначен для крупнотоннажных судов ограниченного и неограниченного районов плавания.

Компас обеспечивает измерение магнитного курса судна, его дистанционную передачу на оптический репитер, определение истинного курса путем введения в магнитный курс поправки на остаточную девиацию и магнитное склонение, дистанционную электрическую передачу истинного курса в навигационный комплекс и на электрические репитеры, а также измерение магнитных пеленгов и курсовых углов.

Базовая модификация компаса (функциональная схема представлена на рис. 8.1) состоит из котелка с МЧЭ, пеленгатора, нактоуза, центрального прибора, оптического репитера и вспомогательных приборов (регулирующего устройства и приборов питания).

Минимально оснащенная модификация — это перископический магнитный компас без компенсатора электромагнитной девиации. Он состоит из нактоуза с котелком, пеленгатора и прибора питания. Внешний вид компаса без прибора питания показан на рис. 8.2.

Дистанционная оптическая передача в большинстве модификаций МК построена на базе жесткой геометрической оптики, размещенной в перископической трубе, а в одной из модификаций — на основе гибкого светопровода.

Перископическая дистанционная передача курса содержит две линзы, электрообогревное стекло, поворотное зеркало и две электролампы, которые установлены под котелком МК.

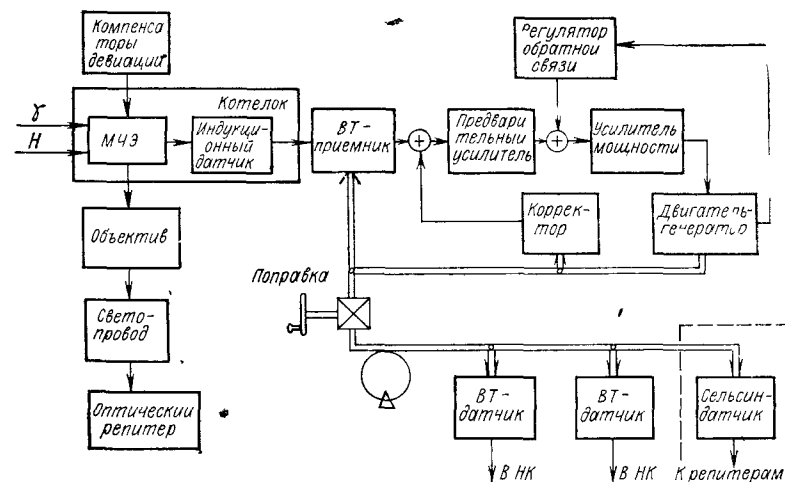


Рис. 8.1. Функциональная схема компаса КМ145-С

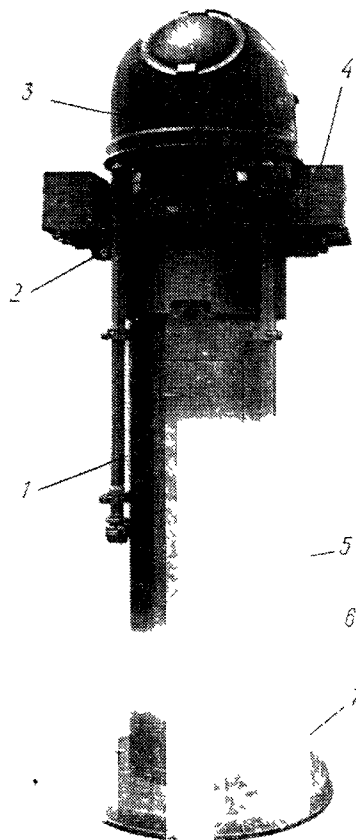


Рис. 8.2 Магнитный компас КМ145-С

1 — компенсатор широтной девиации, 2 — верхнее основание, 3 — защитный колпак, 4 — компенсатор четвертной девиации, 5 — крышка нактоуза, 6 — цилиндрический корпус, 7 — нижнее основание

В основу волоконно-оптической дистанционной передачи курса положена проекционная система, включающая в себя объектив, светопровод и оптический репитер, который состоит из объектива, зеркала и матового экрана. Осветитель дистанционной передачи выполнен на галогенной лампе накаливания с отражателем и конденсором. Осветитель установлен над котелком на кронштейне, связанном с нактоузом. Когда кронштейн мешает пеленгованию, он может быть повернут в любую сторону на угол до  $10^\circ$ .

Датчиком дистанционной электрической передачи курса является индукционный преобразователь. Он смонтирован в котелке вблизи МЧЭ и находится в его сильном магнитном поле. При изменении курса судна индукционный преобразователь реагирует на изменение магнитного поля МЧЭ. В его измерительных обмотках вырабатываются сигналы, пропорциональные синусу и косинусу угла поворота судна. Эти сигналы суммируются на вращающемся трансформаторе (ВТ)-приемнике. Суммарный сигнал поступает на предварительный усилитель, а затем через усилитель мощности — на двигатель-генератор, который через редуктор разворачивает ротор ВТ-приемника до тех пор, пока его выходной сигнал не будет равен нулю. Одновременно разворачивается корректор. Сигнал с корректора, выставленный равным погрешности дистанционной передачи курса с обратным знаком, подается на вход предварительного усилителя.

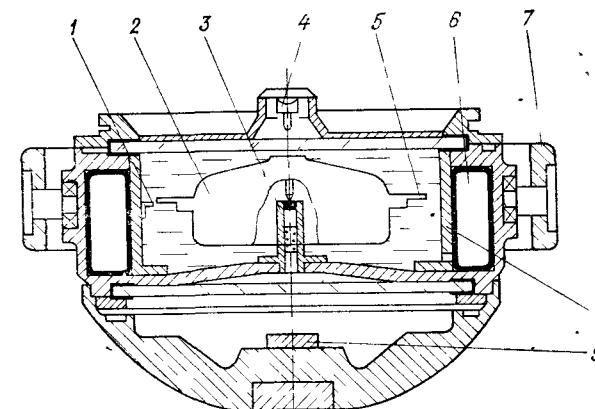


Рис. 8.3. Котелок компаса КМ145-С:

1 — курсовой указатель; 2 — МЧЭ, 3 — опорное устройство, 4 — осветитель, 5 — картушка, 6 — компенсационная камера, 7 — кольцо карданова подвеса, 8 — экран, 9 — индукционный датчик

На выходе дистанционной передачи курса установлены дифференциал, шкала курса, сельсин-датчик синхронной передачи курса (необходимость оговаривается при заказе) на электрические репитеры, не входящие в состав МК, и два ВТ-датчика для выдачи информации о курсе в навигационный комплекс. Через дифференциал на выходные датчики и шкалу курса вручную вводится поправка, равная сумме склонения для данного района плавания и остаточной девиации на данном курсе.

Качество переходного процесса обеспечивается обратной связью, сигнал которой снимается с тахогенератора двигателя-генератора и через регулятор вводится на вход усилителя мощности.

Дистанционная электрическая передача курса снабжена встроенной системой контроля, содержащей переключатель входа предварительного усилителя от выхода вращающегося трансформатора к источнику напряжения постоянной амплитуды. При контроле шкала курса центрального прибора вращается с постоянной скоростью.

При неисправности дистанционной электрической передачи курса — рассогласовании следящей системы — срабатывает пороговая схема контроля неисправности.

В качестве МЧЭ в компасе использована шестистрелочная магнитная система. МЧЭ установлен на точечном подпружиненном опорном устройстве и снабжен поплавком и горизонтальной картушкой. Цена деления картушки  $1^\circ$ . Она оцифрована через  $10^\circ$ , а деления 0, 90, 180 и  $270^\circ$  дополнительно обо-

значены символами N, E, S и W. МЧЭ расположен в котелке (рис. 8.3), закрытом сверху и снизу стеклами. На уровне картушки в носовой части котелка закреплен курсовой указатель. Прорезь указателя, а также градусные, цифровые и буквенные отметки картушки выполнены прозрачными.

Внутренние боковые стенки котелка представляют собой экран, за которым расположена замкнутая эластичная камера, заполненная воздухом, обеспечивающая компенсацию изменения объема компасной жидкости при изменении температуры.

На верхнем стекле котелка расположен осветитель картушки и курсового указателя. В нижней части котелка на грузе закреплен датчик дистанционной электрической передачи курса.

На цилиндрической поверхности котелка имеются два закрытых пробками отверстия, служащие: одно — для заливки котелка, другое — для ввода дополнительного объема жидкости, создающего избыточное давление внутри котелка.

Для уменьшения влияния качки котелок помещен в карданов подвес.

Пеленгатор состоит из основания, предметной и глазной мишеней, а также съемной чашки для установки дефлектора. Мишени пеленгатора расположены в вертикальной плоскости, проходящей через центр компаса, называемой визирной плоскостью.

На основании пеленгатора имеется указатель курсовых углов. С его помощью по азимутальной шкале может также производиться установка пеленгатора в то или иное положение относительно диаметральной плоскости судна.

Нактоуз компаса состоит из трех частей: верхнего и нижнего оснований и цилиндрического корпуса. Верхнее основание имеет углубление, в котором помещается котелок компаса в кардановом подвесе. Оно приспособлено также для крепления к нему кронштейна с безындукционным компенсатором четвертной магнитной девиации. Компенсатор представляет собой два пакета пластин мягкого железа. Кронштейн с компенсатором может быть развернут вокруг вертикальной оси нактоуза, положение кронштейна оценивается по шкале.

В углублении верхнего основания нактоуза расположен также компенсатор электромагнитной девиации, состоящий из четырех катушек, попарно симметричных относительно продольной и поперечной плоскости нактоуза, и вертикальной катушки. Компенсатор представляет собой блок, залитый компаундом. Компенсатор охватывает нижнюю часть котелка и создает в области МЧЭ и индукционного датчика равные компенсирующие магнитные поля.

Верхнее основание нактоуза закрывается защитным колпаком, имеющим окно для съема показаний, закрытое стеклом и шторкой.

В цилиндрическом корпусе нактоуза размещены компенсатор полукруговой и креновой магнитной девиации, а также труба дистанционной оптической передачи курса.

Компенсатор полукруговой и креновой магнитной девиации закреплен на кронштейне в центре нактоуза. Компенсатор включает в себя три пары поворотных магнитов — продольных, поперечных и креновых, расположенных на редукторах. Ручки управления поворотными магнитами выведены в сторону окна в нактоузе. Ручки управления снабжены шкальными отсчетными устройствами. В корпусе компенсатора магнитной девиации в специальных гнездах могут быть дополнительно размещены два продольных и два поперечных магнита. Дополнительные креновые магниты устанавливаются внутри нактоуза вертикально. Дополнительные магниты позволяют расширить пределы компенсации полукруговой и креновой магнитной девиации.

Для доступа к компенсатору полукруговой и креновой девиации, а также к элементам оптической передачи курса в цилиндрической части нактоуза имеется окно, закрываемое крышкой.

Снаружи к корпусу нактоуза крепится безындукционный компенсатор широтной девиации, представляющий собой два набора брусков мягкого железа, помещенных в вертикальных футлярах. Компенсатор может быть установлен со стороны носа или кормы в зависимости от магнитных условий судна.

Нижнее основание нактоуза выполнено в виде фланца для крепления компаса на палубе мостика или рубки.

### 8.3. Магнитный компас КМ100

Компас КМ100 [46] предназначен для малых судов и спасательных шлюпок.

Компас (рис. 8.4) содержит котелок (рис. 8.5), размещенный с помощью карданова подвеса в верхней части нактоуза. Котелок закрыт защитным колпаком со стеклом. Он имеет две сообщающиеся камеры — рабочую и компенсационную. В рабочей камере, заполненной жидкостью, на опорном устройстве установлен МЧЭ с картушкой. МЧЭ имеет четырехстрелочную магнитную систему. Картушка оцифрована аналогично картушке компаса КМ145-С. Компенсационная камера заполнена частично жидкостью, а частично воздухом, который является температурным компенсатором изменения объема компасной жидкости.

В верхней части нактоуза размещены компенсаторы полукруговой, креновой, четвертной и электромагнитной девиации.

Компенсатор полукруговой и креновой девиации выполнен в виде магнитов, поворачивающихся с помощью редукторов.

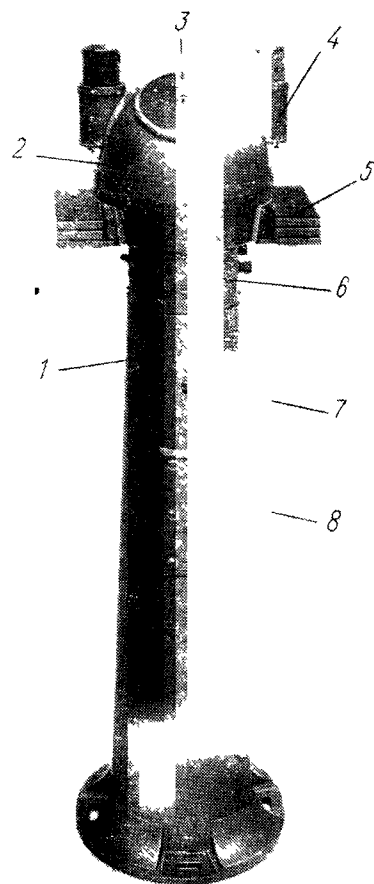


Рис. 8.4. Магнитный компас КМ100:

1 — нактоуз; 2 — защитный колпак; 3 — котелок; 4 — масляный фонарь; 5 — компенсатор четвертной девиации; 6 — крышка, закрывающая доступ к компенсатору полуциркулярной девиации; 7 — гнездо продольного дополнительного магнита; 8 — крышка, закрывающая доступ к дополнительному креновому магниту

Валики редукторов выведены на лицевую панель компенсатора. Окно в верхней части нактоуза для доступа к компенсатору закрывается крышкой. Кроме поворотных магнитов в комплект компенсатора входят продольный, поперечный и креновый дополнительные магниты, которые при необходимости устанавливаются в соответствующие гнезда в нактоузе.

Компенсатор четвертной девиации, выполненный в виде набора пластин, обеспечивает ступенчатую компенсацию девиации, при этом не создавая девиации от индукции.

Компенсатор электромагнитной девиации состоит из вертикальной, двух продольных

и двух поперечных катушек. Он размещен внутри верхней части нактоуза.

Освещение картушки в ночное время обеспечивается электрическим осветительным устройством, встроенным в котелок, в аварийном режиме — масляными фонарями, расположенными в защитном колпаке.

Компас снабжен пеленгатором, аналогичным пеленгатору компаса КМ145-С; на пеленгаторе при выполнении девиационных работ может быть установлен дефлектор.

В одной из модификаций компаса котелок дополняется индукционным датчиком для выдачи сигнала о курсе в авторулевой. В других модификациях может отсутствовать компенсатор электромагнитной девиации. Модификации различаются также размером нактоузов.

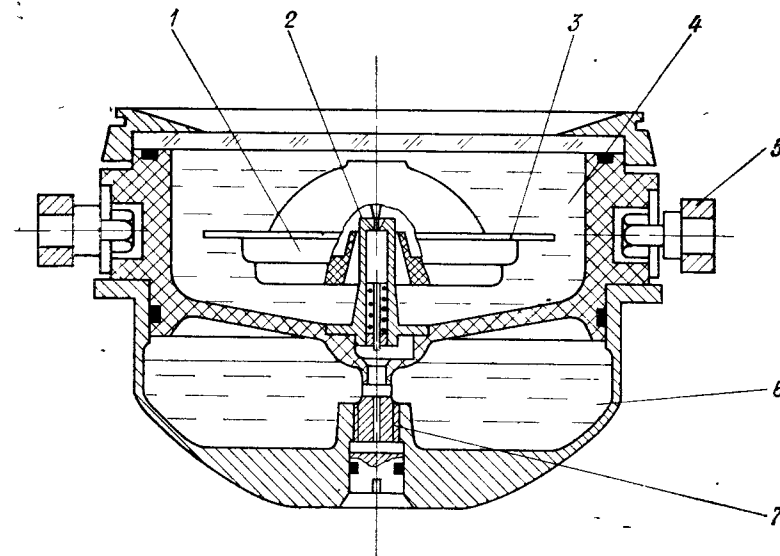


Рис. 8.5. Котелок компаса КМ100:

1 — МЧЭ; 2 — опорное устройство; 3 — картушка; 4 — рабочая камера; 5 — кольцо карданова подвеса; 6 — компенсационная камера; 7 — заливочная пробка

На высоком нактоузе выпускаются компасы, используемые в качестве главных. Конструкция компаса на низком нактоузе позволяет устанавливать его в навигационный пульт и использовать в качестве путевого компаса в рубке.

Компас КМ100 выпускается также в виде переносного прибора, предназначенного для установки на шлюпках. Он не имеет нактоуза, электрического осветительного устройства и компенсаторов девиации. Корпус компаса оснащен кронштейном для подвешивания и ручкой для переноса.

#### 8.4. Магнитный компас КМ69

Компас КМ69 [46] предназначен для малых судов, катеров и шлюпок. Компас (рис. 8.6) состоит из котелка (рис. 8.7) и компенсатора полукруговой и креновой девиации, установленных в кронштейне.

Котелок представляет собой прозрачный герметичный сосуд, выполненный из двух сообщающихся камер. В рабочей камере на опорном устройстве, таком же, как и у компаса КМ100, установлен МЧЭ с картушкой. МЧЭ имеет двухстрелочную магнитную систему. Градусные и цифровые отметки картушки покрыты светосоставом временного действия.

Таблица 8.1

Параметры и характеристика	КМ69	КМ100	КМ145-С
1	2	3	4
Диаметр картушки, мм	69±1	100±1	145±1
Цена деления, град	2	1; 2	1
Полупериод колебаний МЧЭ после его начального отклонения на 40°, с	6... 10	10... 15	17... 23
Время возвращения МЧЭ к магнитному меридиану в зону ±1 деления картушки после его отклонения на 90°, с	≤50	≤60	≤90
Магнитный момент МЧЭ, А·м <sup>2</sup>	≥0,3	≥0,7	≥1,3
Угол наклона котелка, при котором картушка сохраняет горизонтальное положение, град	≥30	≥10	≥10
Изменение наклона картушки при изменении вертикальной составляющей индукции МПЗ от 0 до 50 мкТл, град	≤2	≤2	≤2
Угол наклона котелка в кардановом подвесе, град	—	≥45	≥45 50
Отрицательная температура, °С:			
рабочая	—40	—40	—40
предельная	—55	—55	—55
Положительная температура, °С:			
рабочая	+60	+66	+60
предельная	+65	+66	+65
Относительная влажность при температуре до +40 °С, %	98	98	98
Вибрационные нагрузки:			
частота, Гц	200	200	60
ускорение, м/с <sup>2</sup>	20	20	15
Ударные нагрузки:			
частота, удар/мин	40... 80	40... 80	40... 80
ускорение, м/с <sup>2</sup>	150	150	100
Бортовая качка:			
рабочая:			
амплитуда, град	10	30	30
период, с	3... 16	3... 16	6... 16
предельная:			
амплитуда, град	30	45	45
период, с	3... 16	3... 16	6... 16 3.16
Килевая качка:			
рабочая:			
амплитуда, град	10	22	22
период, с	3... 16	3... 16	6... 10
предельная:			
амплитуда, град	30	45	45
период, с	3... 16	3... 16	6... 10 3.16

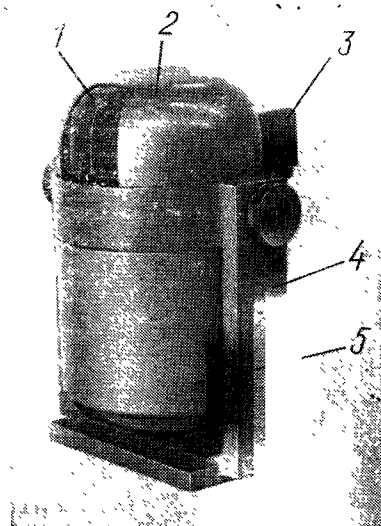


Рис. 8.6. Магнитный компас КМ69:

1 — котелок; 2 — защитный кожух котелка; 3 — осветитель; 4 — кронштейн; 5 — кожух, закрывающий доступ к компенсатору девиации

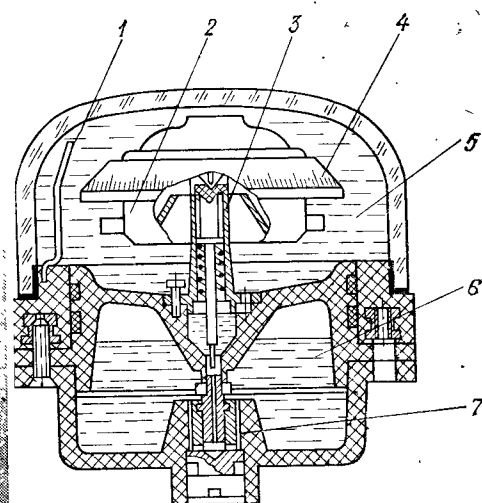


Рис. 8.7. Котелок компаса КМ69:

1 — курсовой указатель; 2 — МЧЭ; 3 — опорное устройство; 4 — картушка; 5 — рабочая камера; 6 — компенсационная камера; 7 — заливочная пробка

Компенсатор полукруговой и креновой девиации аналогичен примененному в компасе КМ100.

Кронштейн имеет возможность поворота относительно осей котелка. Это позволяет устанавливать компас как на горизонтальной, так и на наклонной или вертикальной плоскости.

Модификации различаются блоками питания: одна — с автономным герметичным блоком, работающим на сухих элементах, другая — с блоком, работающим от судовой сети постоянного или переменного тока. Имеется модификация, в которой отсутствуют осветительное устройство и компенсатор девиации.

### 8.5. Основные параметры и характеристики унифицированных магнитных компасов

Конструкции унифицированных магнитных компасов КМ69, КМ100 и КМ145-С разработаны исходя из обеспечения устойчивого курсоуказания в условиях возросших механических и климатических воздействий, увеличения ресурса и срока службы. Большое внимание уделено вопросам технологичности конструкции и удовлетворения требованиям эргономики и эстетики. Компасы предназначены для замены морально устаревших компасов КИ-13, КМК, КМП, «Яхта», КМШ-Т, КТ-М, УКП-М и др.



Параметры и характеристика	КМ69	КМ100	КМ145-С
1	2	3	4
Циркуляция со скоростью, град/с	20	20	6
Погрешность визуального компаса с вероятностью 0,99, град			
от трения при горизонтальной составляющей индукции магнитного поля ( $6 \pm 0,6$ ) мкТл	$\pm 0,5$	$\pm 0,3$	$\pm 0,2$
на ходу — при качке с амплитудой $22^\circ$ , периодом 7 с и ускорением $1 \text{ м/с}^2$	Не регламентируется	$\pm 4$	$\pm 4$
на ходу — при качке с амплитудой $10^\circ$ , периодом 7 с и ускорением $1 \text{ м/с}^2$	$+3$	Не регламентируется	
при вибрации	$\pm 2$	$\pm 2$	$\pm 1$
через 40 с после разворота на $180^\circ$ со скоростью 6 град/с	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 1$
через 20 с после разворота на $180^\circ$ со скоростью 20 град/с	$\pm 3$	$\pm 4$	Не регламентируется
Погрешность электрической и оптической дистанционных передач, град	—	—	$\pm 0,5$
Пределы компенсации девиации:			
полукруговой, град	$\pm 45$	$\pm 60$	$\pm 70$
четвертной, град	—	$\pm 8$	$\pm 10$
креновой, мкТл	$\pm 30$	$\pm 75$	$\pm 75$
широтной, град	—	—	$\pm 20$
Поле зрения пеленгатора, град			
ниже линии горизонта	—	$\geq 5$	$\geq 5$
выше линии горизонта	—	$\geq 60$	$\geq 60$
Высота стекла котелка относительно основания нактоуза, мм	—	$\geq 1100$	$\geq 1250$
Расстояние, с которого отчетливо видны курсовые указатели и деления картушек МЧЭ и репитеров при дневном и искусственном освещении, м	$\geq 0,75$	$\geq 1$	$\geq 1,4$
Напряжение питания, В	12; 24; 27	24; 27	127; 220
Потребляемая мощность, ВА (Вт)	2	2	500
Масса, кг	3,5	54	200
Средний срок службы, лет	15	15	15

Компасы КМ69, КМ100 и КМ145-С разработаны на основе опережающего стандарта типов и основных параметров в соответствии с требованиями международных стандартов ИСО 449 и ИСО 613, рекомендаций по стандартизации по линии СЭВ РС 4366-74, резолюции А.382(X) от 14.11.77 Международной морской организации, Правил по конвенционному оборудованию морских судов и Международной конвенции по охране человеческой жизни на море.

В табл. 8.1 приведены основные параметры и характеристики модификаций компасов КМ69, КМ100 и КМ145-С, максимально оснащенных функциональными узлами и приборами. Эти параметры и характеристики, если не оговорено особо, установлены для компасов при температуре  $(20 \pm 3)^\circ\text{C}$  и значениях горизонтальной и вертикальной составляющих индукции МПЗ соответственно  $(12 \pm 0,6)$  мкТл и  $(50 \pm 2,5)$  мкТл.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Стрелочный магнитный компас является древнейшим навигационным прибором, не потерявшим своего значения благодаря независимости от внешних источников питания. На малых и средних судах он используется как единственное курсовое измерительное средство, на крупнотоннажных судах — в качестве аварийного. Задача сохранения работоспособности магнитного компаса в условиях постоянно увеличивающегося уровня механических возмущений на современных судах, особенно в аварийных условиях, требует при создании компаса учета особенностей влияния дестабилизирующих механических возмущений типа вибрации и качки.

В обзоре рассмотрено влияние пространственных колебаний основания на отклонения МЧЭ, приводящие к погрешностям стрелочных магнитных компасов.

Стрелочный МЧЭ представлен в виде тяжелого твердого тела с одной точкой опоры и тремя степенями свободы, обладающего восстанавливающими моментами в магнитном и гравитационном полях Земли. При пространственных колебаниях основания (трехкомпонентных колебаниях: в направлении магнитного меридиана, в перпендикулярном ему направлении и в вертикальном направлении) движение МЧЭ описано системой трех нелинейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. При интегрировании этих уравнений методом последовательных приближений получены общие выражения, устанавливающие зависимости отклонений МЧЭ от его параметров, характеристик колебаний основания и параметров гравитационного и магнитного полей.

На основе общих выражений отдельно для частотных диапазонов пространственной вибрации и качки основания получены зависимости отклонений от упомянутых параметров и характеристик, содержащих помимо периодических постоянные систематические составляющие, найдены условия, при которых эти постоянные составляющие максимальны, а также условия их снижения.



Для частотных диапазонов, кроме того, получены зависимости отклонений МЧЭ, учитывающие возможную нерегулярность колебаний. Оценено влияние изменения характеристик случайных колебаний на отклонения МЧЭ. Показано, что качественная картина влияния параметров МЧЭ на его отклонения при учете возможной нерегулярности колебаний остается такой же, как и при рассмотрении гармонических колебаний. Количественные изменения существенны только в области качки; их учет возможен расчетным путем.

Выражения для отклонений МЧЭ, полученные при рассмотрении задачи в детерминированной и вероятностной постановках, удобны для инженерных оценок погрешностей магнитных компасов на этапах их создания, испытаний и эксплуатации.

На основе этих выражений выявлены важнейшие особенности влияния пространственных колебаний на отклонения МЧЭ. При вибрации практически имеют место только постоянные систематические отклонения, при качке, кроме того, случайные знакопеременные. Максимальные постоянные отклонения проявляются при трехкомпонентных линейных вибрациях и качке; отклонения равны нулю при эллиптических колебаниях с равными  $\pi/2$  сдвигами фаз между ортогональными компонентами колебаний, колебаниях в плоскости магнитного меридиана и однокомпонентных колебаниях. Знакопеременные отклонения при качке проявляются в тех случаях, когда присутствуют составляющие перемещения в направлении, перпендикулярном плоскости магнитного меридиана.

На основе этих особенностей рекомендованы методы испытаний, позволяющие выявить в лабораторных условиях не только периодические, но и постоянные систематические составляющие погрешности магнитного компаса.

Полученные выражения позволили оценить влияние изменения конструктивных параметров МЧЭ на его отклонения. Учет этого влияния дал возможность выработать рекомендации по выбору параметров МЧЭ.

Для уменьшения постоянных систематических отклонений МЧЭ при вибрации и качке целесообразно снижение собственных частот МЧЭ вокруг всех его осей, увеличение значений восстанавливающего момента в МПЗ, осевых моментов инерции вокруг всех его осей, коэффициентов демпфирования движения МЧЭ вокруг горизонтальных осей, а также снижение значений восстанавливающего момента в гравитационном поле и разности моментов инерции вокруг горизонтальных осей.

В целях уменьшения вертикальной составляющей качки и соответствующей ей составляющей отклонения МЧЭ целесообразно установку магнитного компаса на судне производить по возможности ближе к вертикали судна, проходящей через центр его качания.

Существенно уменьшить погрешность магнитного компаса от трения и повысить срок его службы можно путем учета при конструировании МЧЭ особенностей действующих на опорные элементы механических нагрузок. С этой целью в обзоре рассмотрены динамические реакции, возникающие в опорном устройстве. Получены зависимости размеров реакций от параметров МЧЭ и возмущений. Показана возможность практического исключения горизонтальной составляющей динамической реакции путем выбора конструктивных параметров МЧЭ. Отмечено, что вертикальная составляющая реакции при этом снижена быть не может — необходимо пороговое защитное устройство. Рассмотрена схема и оценены параметры такого устройства. Определены геометрические погрешности для основных схем съема показаний.

Особенностью современных магнитных компасов является наличие в них функциональных устройств температурной компенсации изменения объема компасной жидкости. В обзоре проанализированы основные схемы компенсации, определены основные расчетные соотношения.

Определение параметров МЧЭ основано на использовании формул, описывающих их отклонения при пространственных вибрациях и качке основания. На базе особенностей, отражаемых этими формулами, развита методика определения параметров МЧЭ, пригодная для практического использования. При оценке погрешностей компасов установлены источники их появления, на примере произведена количественная оценка первичных погрешностей для ряда наиболее вероятных эксплуатационных режимов. Суммарная погрешность определена с учетом законов распределения плотностей вероятностей первичных погрешностей. Показано, что в большинстве эксплуатационных режимов магнитный компас может работать с достаточной для практических целей точностью.

Вопросы надежности рассмотрены на основе статистических исследований. С учетом устранения выявленных неисправностей результаты статистических исследований надежности серийных магнитных компасов можно перенести на вновь разрабатываемые и модернизируемые магнитные компасы.

В обзоре приводятся результаты опережающей отечественной стандартизации, позволившей обосновать необходимость и своевременность переоснащения флота унифицированными магнитными компасами широкого применения, удовлетворяющими требованиям международных стандартов и современным условиям эксплуатации. Приводятся основные параметры и характеристики разработанных в соответствии с опережающим стандартом унифицированных магнитных компасов.

Следует ожидать, что дальнейшее развитие стрелочных магнитных компасов пойдет по пути совершенствования их технических характеристик при модернизации, создания новых

компасов для работы в специфических условиях, например в полярных районах, а также для индивидуального пользования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. с. 956985 (СССР). Способ измерения погрешности магнитного компаса при качке/Н. Д. Дегтерев.— Опубл. в Б. И., 1982, № 33.
2. Бабаков И. М. Теория колебаний.— М.: Наука, 1968.— 506 с.
3. Бесекерский В. А., Фабрикант Е. А. Динамический синтез систем гироскопической стабилизации.— Л.: Судостроение, 1968.— 351 с.
4. Благовещенский С. Н., Холодили А. Н. Справочник по статике и динамике корабля. Ч. 2.— Л.: Судостроение, 1975.— 176 с.
5. Боголюбов Н. Н., Митропольский Ю. А. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний.— М.: Наука, 1974.— 503 с.
6. Бородай И. К., Нецветов Ю. А. Качка судов на морском волнении.— Л.: Судостроение, 1969.— 432 с.
7. Браславский Д. А., Логунов С. С., Пельпор Д. С. Авиационные приборы и автоматы.— М.: Машиностроение, 1978.— 427 с.
8. Бурдуи Г. Д., Марков Б. Н. Основы метрологии.— М.: Изд-во стандартов, 1972.— 317 с.
9. Бутенин Н. В., Лунц Я. Л., Меркин Д. Р. Курс теоретической механики. Т. 1.— М.: Наука, 1970.— 240 с.
10. Бутенин Н. В., Лунц Я. Л., Меркин Д. Р. Курс теоретической механики. Т. 2.— М.: Наука, 1971.— 464 с.
11. Вольфон Г. Б., Ривкин С. С., Тиль А. В. Влияние демпфирования физического маятника на уменьшение его систематических погрешностей при качке корабля.— Изв. АН СССР. Механика твердого тела, 1973, № 3, с. 24... 28.
12. Воронов В. В. Передаточные функции и точность магнитного компаса.— Судостроение, 1966, вып. 6, с. 66... 71.
13. ГОСТ 16263—70. Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Термины и определения.— М., 1970.
14. ГОСТ 21063—81. Оборудование судов навигационное. Термины и определения.— М., 1981.
15. Дегтерев Н. Д. Исследование погрешности магнитных компасов при механических возмущениях.— В сб.: Применение методов магнитодинамики и магнитной девиации при постройке и эксплуатации судов.— Л.: Судостроение, 1978, вып. 268, с. 133... 138.
16. Дегтерев Н. Д. Об уточнении понятия «магнитный компас».— Судостроение, 1984, № 1, с. 32.
17. Дегтерев Н. Д., Поньрко С. А. О систематических отклонениях тяжелого твердого тела в магнитном поле при вибрации его точки опоры.— Изв. АН СССР. Механика твердого тела, 1978, № 2, с. 11... 14.
18. Дегтерев Н. Д., Чернышева Н. Е. Вопросы терминологии судовых магнитных компасов.— Судостроение, 1975, № 12, с. 25... 27.
19. Дегтерев Н. Д., Чернышева Н. Е. Основные направления стандартизации судовых магнитных компасов.— Вопросы судостроения, сер. Стандартизация и метрология, 1979, вып. 17, с. 33... 36.
20. Журавлев Л. Д., Фабрикант Е. А. Динамика систем сопровождения на подвижном основании.— Л.: ЦНИИ «Румб», 1983.— с. 8... 9.
21. Капица П. Л. Динамическая устойчивость маятника на колеблющейся точке подвеса.— ЖЭТФ, 1951, т. 21, вып. 5, с. 588... 597.
22. Кардашинский Л. А. Исследование динамической устойчивости картушки морского магнитного компаса и некоторых видов съема сигнала курсоказания: Автореф. на соиск. учен. степени канд. техн. наук.— Л., ЛВИМУ им. адмирала С. О. Макарова, 1969.— 11 с.

23. Кожухов В. П., Воронов В. В., Григорьев В. В. Магнитные компасы.— М.: Транспорт, 1981.— 212 с.
24. Крылов А. Н. Возмущения показаний компаса, происходящие от качки корабля на волнении.— Изв. АН СССР, сер. Географическая и геофизическая, 1938, № 5—6, с. 439... 476.
25. Лунц Я. Л. Ошибки гироскопических приборов.— Л.: Судостроение, 1968.— 232 с.
26. Магнитные компасы и нактоузы для морской навигации. Термины и определения. Международный стандарт ИСО 1069—73.
27. Магнитные компасы и нактоузы. Класс А. Международный стандарт ИСО 449—79.
28. Магнитные компасы и принадлежности. Правила испытаний и выдачи сертификатов. Международный стандарт ИСО 2269—73.
29. Магнитные компасы, нактоузы и приборы для определения азимута. Класс В. Международный стандарт ИСО 613—82.
30. Магнитные компасы судовые. Основные параметры. Рекомендация СЭВ/РС 4366—74.
31. Магнитные компасы. Требования и эксплуатационные стандарты ИМО. Рез. А. 382 (X), 1977.
32. Мирошниченко И. П., Соколов Л. Г. Перспективы развития морского флота СССР.— Знание, сер. Транспорт, 1977, № 10, с. 37... 41.
33. Одинцов А. А. О геометрических погрешностях магнитного компаса.— Изв. вузов. Приборостроение, 1970, № 11, с. 86... 89.
34. Патрашев А. Н., Кивако Л. А., Гожий С. И. Прикладная гидромеханика.— М.: Воениздат, 1970.— 688 с.
35. Поньрко С. А. О систематических отклонениях маятника при качке основания.— Изв. вузов. Приборостроение, 1971, № 8, с. 95... 96.
36. Правила по конвенционному оборудованию морских судов. Регистр СССР.— Л.: Транспорт, 1981, с. 151... 173.
37. Ракитин В. Д. Исследование точности дистанционного магнитного компаса и возможности его использования в системах автоматического управления курсом судна: Автореф. на соиск. учен. степени канд. техн. наук.— Л., ЛВИМУ им. адмирала С. О. Макарова, 1975.— 21 с.
38. Ривкин С. С., Ивановский Р. И., Костров А. В. Статистическая оптимизация навигационных систем.— Л.: Судостроение, 1976.— 280 с.
39. Ривкин С. С. Определение линейных скоростей и ускорений качки корабля инерциальным методом. Ч. 1.— Л.: ЦНИИ «Румб», 1980.— 113 с.
40. Свешников А. А., Ривкин С. С. Вероятностные методы в прикладной теории гироскопов.— М.: Наука, 1974.— 536 с.
41. Семенов-Тянь-Шанский В. В., Благовещенский С. Н., Холодили А. Н. Качка корабля.— Л.: Судостроение, 1969.— 392 с.
42. Справочник конструктора опико-механических приборов/М. Я. Кругер, В. А. Панов, В. В. Кулагин и др.— Л.: Машиностроение, 1968.— 591 с.
43. Терехов П. Н., Вешняков Н. И. Курс кораблевождения. Т. 5, кн. 2. Магнитные компасы.— Л.: УНГС ВМФ, 1959.— 639 с.
44. Тихменев С. С. Элементы точных приборов.— М.: Оборонгиз, 1956.— 360 с.
45. Тюрин Н. Компас КМО-Т на судах типа «Волгонефть».— Речной транспорт, 1969, № 10, с. 40.
46. Чернышева Н. Е., Дегтерев Н. Д., Архипова Н. И. Унифицированные магнитные компасы для малотоннажных судов.— Судостроение, 1978, № 2, с. 40... 42.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение . . . . .	3
<b>1. Вопросы терминологии и классификации магнитных компасов . . .</b>	<b>5</b>
1.1. Обоснование основных терминов . . . . .	—
1.2. Классификация магнитных компасов . . . . .	7
1.3. Функциональная схема стрелочного магнитного компаса . . .	8
<b>2. Отклонения магнитного чувствительного элемента в общем случае колебаний основания . . . . .</b>	<b>11</b>
2.1. Вывод уравнений движения магнитного чувствительного элемента . . . . .	—
2.2. Общие выражения для отклонений магнитного чувствительного элемента . . . . .	18
<b>3. Отклонения магнитного чувствительного элемента при вибрации и качке основания . . . . .</b>	<b>26</b>
3.1. Отклонения магнитного чувствительного элемента при вибрации . . . . .	—
3.2. Отклонения магнитного чувствительного элемента при качке . . . . .	32
3.3. Оценка влияния степени нерегулярности колебаний основания на отклонения магнитного чувствительного элемента . . . . .	41
<b>4. Динамические реакции и геометрические погрешности . . . . .</b>	<b>50</b>
4.1. Определение динамических реакций магнитного чувствительного элемента . . . . .	—
4.2. Защита магнитного чувствительного элемента от ударов . . . . .	54
4.3. Определение геометрических погрешностей . . . . .	57
<b>5. Температурная компенсация изменения объема компасной жидкости . . . . .</b>	<b>61</b>
5.1. Температурные компенсаторы . . . . .	—
5.2. Определение основных параметров температурных компенсаторов . . . . .	64
<b>6. Определение параметров магнитного чувствительного элемента и оценка погрешности магнитного компаса . . . . .</b>	<b>66</b>
6.1. Определение параметров магнитного чувствительного элемента . . . . .	—
6.2. Оценка погрешности магнитного компаса . . . . .	69
<b>7. Вопросы надежности магнитных компасов . . . . .</b>	<b>75</b>
7.1. Основные определения . . . . .	—

7.2. Статистические исследования надежности магнитных компасов . . . . .	77
7.3. Установление показателей надежности магнитных компасов . . . . .	78
<b>8. Вопросы стандартизации и унификации магнитных компасов . . .</b>	<b>82</b>
8.1. Стандартизация магнитных компасов . . . . .	—
8.2. Магнитный компас КМ145-С . . . . .	85
8.3. Магнитный компас КМ100 . . . . .	89
8.4. Магнитный компас КМ69 . . . . .	91
8.5. Основные параметры и характеристики унифицированных магнитных компасов . . . . .	92
Заключение . . . . .	95
Список литературы . . . . .	98

Главный редактор *В. Г. Пешехонов*  
Научный редактор *В. П. Иванченков*  
Редактор *А. К. Крытова*  
Технический редактор *Г. В. Парвизайнен*  
Корректор *В. С. Сергеева*

Сдано в набор 16.08.84. Подписано в печать 03.12.84. М-34925. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Гарнитура литературная. Печать высокая Печ. л. 6,5 Уч.-изд. л. 6,1. Тираж 600 экз. Индекс 4750. Заказ № 250. Цена 90 к. (с пересылкой 1 р. 20 к.).  
Издание подписное

ЦНИИ «Румб». 198188, Ленинград

Ленинградская типография № 8 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли,  
190000, г. Ленинград, Прачечный переулок, 6