УДК 629.12.053 DOI: 10.17587/mau.22.425-432

Д. Г. Грязин, д-р техн. наук, проф., глав. метролог, volnagdg@yandex.ru,
Т. В. Падерина, канд. техн. наук, доц., ст. науч. сотр., paderinata@gmail.com,
Национальный исследовательский университет ИТМО,
АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", г. Санкт-Петербург

Мехатронные устройства управления современным судовым магнитным компасом*

Основным недостатком судовых магнитных компасов (МК) является ограниченность возможности их применения в высоких широтах в связи с малым значением горизонтальной составляющей магнитного поля Земли на этих широтах и наличием погрешности МК от качки, обусловленной влиянием центростремительного и тангенциального ускорений при размещении МК на некотором расстоянии от центра качания судна. Влияние ускорений приводит к наклону картушки и обусловливает воздействие на ее магнитную систему вертикальной составляющей магнитного поля Земли. Возникающая при этом погрешность МК, пропорциональная тангенсу угла магнитного наклонения, может привести к недопустимо большим ошибкам курсоуказания судна, особенно в высоких широтах. Тем не менее, данное воздействие может быть скомпенсировано при использовании в измерительной схеме МК гироскопического датчика угловой скорости (ДУС), измеряющего угловую скорость рыскания морского объекта.

В работе представлены результаты исследований и имитационного моделирования двух вариантов построения системы коррекции, которая вводится в измерительную схему МК для уменьшения его погрешности от качки. Каждую из представленных в работе систем коррекции можно рассматривать как мехатронное устройство управления современным МК, одна из них — позиционная, другая — по угловой скорости рыскания судна. В работе показаны преимущества и недостатки каждой из схем. Так, особенностью системы позиционной коррекции является необходимость применения ДУС тактического класса точности (например, волоконно-оптического гироскопа), в погрешности которого присутствует низкочастотная составляющая ухода. В то же время система коррекции по угловой скорости рыскания позволяет использовать в качестве ДУС дешевый микромеханический гироскоп (ММГ). Несмотря на применение ДУС различных классов точности, обе предложенные системы коррекции позволяют добиться близких результатов, следствием чего является очевидный вывод о целесообразности применения в измерительной схеме МК системы коррекции по угловой скорости с ММГ, позволяющим значительно снизить стоимость МК, а также уменьшить его массу и габаритные размеры.

Ключевые слова: *магнитный компас, высокие широты, система коррекции погрешности компаса от воздействия качки*

Введение

Магнитные компасы (МК) являются одними из наиболее широко распространенных приборов, используемых на судах. Их разработкой и изготовлением заняты десятки промышленных предприятий по всему миру, так как эти приборы в соответствии с требованиями международной конвенции по охране человеческой жизни SOLAS 1974 должны быть установлены на каждом судне. Эти же указания отражены и в требованиях национальных регистров, которые нормируют состав МК и обозначают требования к конструкции МК на основе картушки с магниточувствительным элементом. Такие компасы рассматриваются как основные и должны функционировать даже при использовании резервного электропитания судна.

Традиционный судовой МК состоит из котелка, внутри которого в жидкости размещена картушка с магниточувствительным элементом, подвешенная на игле. Картушка разворачивается вдоль магнитного меридиана, на ней нанесена круговая шкала, а на стенке котелка имеется риска, определяющая продольную плоскость судна. С помощью этих элементов выполняется визуальный отсчет магнитного курса. В целях реализации дистанционной передачи курса от картушки к выносному индикатору внутри котелка установлен магниторезистивный бесконтактный датчик, измеряющий продольную и поперечную составляющие магнитного поля картушки относительно осей судна. Таким образом, магниточувствительный элемент картушки расположен в плоскости магнитного меридиана, а бесконтактный датчик вырабатывает сигналы о ее отклонении от продольной (диаметральной) плоскости судна. Котелок устанавливается в двухосном кардановом подвесе, что позволяет ему находиться в плоскости горизонта при качке, однако он имеет свойства только короткопериодного маятника и подвержен влиянию ускорений, обусловленных качкой.

Основным недостатком таких МК является ограниченность возможности их работы в высоких широтах в связи с малым значением горизонтальной составляющей магнитного поля на этих

*Статья подготовлена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-08-00265.

широтах и наличием погрешности МК от качки, обусловленной изменением влияния магнитных масс судна на чувствительный элемент МК при крене судна (креновая погрешность). Кроме того, установка МК на верхнем мостике судна над ходовой рубкой на некотором расстоянии от центра качания судна приводит к воздействию на него центростремительного и тангенциального ускорений при угловых колебаниях на качке и появлению дополнительной погрешности, пропорциональной тангенсу угла магнитного наклонения, что делает ее особенно значительной при работе МК в высоких широтах.

Активизация российского присутствия в арктической зоне привело к необходимости создания МК с системой коррекции, позволяющей скомпенсировать этот его недостаток.

Современные МК с дистанционной передачей курса оборудованы микроконтроллерами, расположенными в блоках управления для решения задач компенсации погрешности МК при воздействии качки и позволяющими автоматически вводить поправку в значение магнитного курса от магнитного склонения в зависимости от координат судна [1—3]. Откорректированная информация передается на цифровой выносной репитер в рулевую рубку для управления судном.

Таким образом, современный МК представляет собой мехатронное устройство с несколькими системами коррекции, обеспечивающими его работоспособность, в том числе позволяющими увеличить точность выработки магнитного курса судна. Система коррекции магнитного курса судна, позволяющая снизить воздействие качки, представляет особенный интерес, так как позволяет уменьшить динамические погрешности, характерные для режима функционирования прибора. Важность динамических характеристик МК при эксплуатации кораблей подчеркивал в своих трудах еще академик А. Н. Крылов [4].

Аналитическое исследование погрешности магнитного компаса при воздействии ускорений от качки

Входящий в состав МК магниторезистивный датчик магнитного курса (ДМК) выполняет преобразование двух горизонтальных составляющих вектора магнитной системы магниточувствительного элемента картушки в электрические сигналы постоянного тока, пропорциональные синусу H_x и косинусу H_y угла поворота корпуса прибора относительно чувствительного элемента, т. е. магнитному курсу судна:

$$\begin{aligned} H_x &= -H_E \cos I \sin K_{\text{м}}; \\ H_y &= H_E \cos I \cos K_{\text{м}}, \end{aligned} \tag{1}$$

где H_y, H_x — продольная и поперечная составляющие магнитного поля картушки относительно осей судна; $H_E\cos I$ — горизонтальная составляющая вектора напряженности магнитного поля Земли; $K_{\text{м}}$ — магнитный курс судна; I — угол магнитного наклонения.

Обработка этих сигналов и вычисление курса $K_{\text{м}}$ выполняется по формуле

$$\operatorname{tg} K_{\text{м}} = -\frac{H_x}{H_y}. \tag{2}$$

Во время качки судна под действием центростремительной и тангенциальной составляющих ускорения, обусловленного установкой МК на плече относительно центра качания судна (в дальнейшем будем называть это ускорение переносным [5]), картушка МК развернется на некий угол от плоскости горизонта, при этом сигналы с ДМК будут иметь следующий вид:

$$\begin{aligned} H_x &= H_E \cos I(\sin K_{\text{м}} \cos\gamma - \\ &- \cos K_{\text{м}} \sin\gamma \sin\beta) - H_E \sin I \sin\gamma \cos\beta; \\ H_y &= H_E \cos I \cos K_{\text{м}} \cos\beta - H_E \sin I \sin\beta, \end{aligned} \tag{3}$$

где угол β — мгновенное значение наклона картушки в плоскости углов килевой качки; угол γ — мгновенное значение наклона картушки в плоскости углов бортовой качки.

Магнитный курс судна при наклоне картушки $K_{\text{м}}^{\text{пр}}$ вычисляется с использованием выражения (2):

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} K_{\text{м}}^{\text{пр}} &= \frac{\sin K_{\text{м}} \cos\gamma - \cos K_{\text{м}} \sin\gamma \sin\beta}{\cos K_{\text{м}} \cos\beta - \operatorname{tg} I \sin\beta} - \\ &- \frac{\operatorname{tg} I \sin\gamma \cos\beta}{-\cos K_{\text{м}} \cos\beta - \operatorname{tg} I \sin\beta}. \end{aligned} \tag{4}$$

Учитывая, что $K_{\text{м}}^{\text{пр}} = K_{\text{м}} - \Delta K$, где ΔK — погрешность курса, и проводя преобразования выражения (4) с учетом малости углов наклона картушки β, γ: $\sin\beta = \beta$, $\sin\gamma = \gamma$, $\cos\beta = \cos\gamma = 1$, получим:

$$\operatorname{tg}(K_{\text{м}} - \Delta K) = \frac{\sin K_{\text{м}} - \operatorname{tg} I \cdot \gamma}{\cos K_{\text{м}} - \operatorname{tg} I \cdot \beta}. \tag{5}$$

Из формулы (5) легко получить выражение для погрешности ΔK:

$$\mathrm{tg}\Delta K = \mathrm{tg} I(\gamma \cos K_{\text{м}} - \beta \sin K_{\text{м}}). \qquad (6)$$

Введя обозначение

$$\alpha = \gamma \cos K_{\text{м}} - \beta \sin K_{\text{м}}, \qquad (7)$$

получим выражение для погрешности МК при воздействии переносного ускорения от действия бортовой и килевой качки:

$$\mathrm{tg}\Delta K = \mathrm{tg} I \cdot \alpha. \qquad (8)$$

Угол α представляет собой мгновенное значение наклона картушки в вертикальной плоскости горизонтного географического трехгранника, проходящей через линию Запад—Восток [6].

Закон изменения α можно получить из уравнения колебаний картушки с магниточувствительным элементом в этой плоскости, рассматривая ее как обычный короткопериодный физический маятник. Общее решение дифференциального уравнения для физического маятника складывается из решения однородного уравнения и частного решения. Поскольку собственные колебания картушки быстро затухают [7], интерес представляет только частное решение, которое при качке, заданной по гармоническому закону, будет иметь следующий вид:

$$\alpha = \frac{h}{g}[(\rho_\theta \omega_\theta^2 A_\theta \cos \omega_\theta t)\cos K_{\text{м}} - (\rho_\psi \omega_\psi^2 A_\psi \sin \omega_\psi t)\sin K_{\text{м}}], \qquad (9)$$

где A_ψ, A_θ, ω_ψ, ω_θ — соответственно амплитуды и частоты килевой и бортовой качки судна; h — высота картушки компаса над осью качаний морского объекта; g — ускорение силы тяжести; ρ_ψ, ρ_θ — коэффициенты динамичности [8], характеризующие отношение амплитуды вынужденных колебаний МК к его показанию в положении статического равновесия. Обычно коэффициенты ρ_ψ, ρ_θ близки к 1, что обеспечивается выбором соответствующих параметров МК в целях уменьшения динамических искажений по амплитуде (в дальнейших выражениях эти коэффициенты не приводятся).

Выражение (8) для погрешности МК при воздействии переносного ускорения, возникающего на качке, с учетом (9) примет следующий вид:

$$\mathrm{tg}\Delta K = \mathrm{tg} I \frac{h}{g}[(\omega_\theta^2 A_\theta \cos \omega_\theta t)\cos K_{\text{м}} - (\omega_\psi^2 A_\psi \sin \omega_\psi t)\sin K_{\text{м}}]. \qquad (10)$$

Исследованием этой погрешности для различных объектов ранее занимались Н. Ю. Рыбалтовский [9] и Д. А. Браславский [10] при решении частных задач. Используя соотношение (10), можно получить выражения, предложенные этими авторами. Так, исследуя работу МК судна и при этом рассматривая влияние только углов бортовой качки θ, полагая $\theta = A_\theta \sin \omega_\theta t$ и обозначая $\omega_\theta^2 = \frac{g}{l_0}$, где l_0 — длина маятника с периодом колебания $T = 2\pi\sqrt{l_0/g}$, а также учитывая, что тригонометрические функции sin и tg для малых углов практически равны, из выражения (9) можно получить выражение для погрешность $\delta_{\text{р}}$ показаний МК судна на качке, предложенное в работе [9]:

$$\delta_{\text{р}} = \arcsin[(h/l_0)\theta \mathrm{tg} I \cos K_{\text{м}}]. \qquad (11)$$

Исследуя работу МК, установленного на самолете, и при этом учитывая в соотношении (5) только углы наклона картушки γ, а также считая, что эти углы обусловлены влиянием центростремительного ускорения, возникающего на вираже самолета: $\gamma = \omega_{\text{ц}}^2 R/g$, где R — радиус виража, можно получить выражение для погрешности ΔK показаний МК для малых значений углов γ [10], которую иногда называют северной поворотной ошибкой:

$$\Delta K = K_{\text{м}} - \mathrm{arctg}\left(\mathrm{tg} K_{\text{м}} - \frac{\mathrm{tg} I \cdot \gamma}{\cos K_{\text{м}}}\right). \qquad (12)$$

В случае, если качка корабля носит случайный характер, используя выражения для спектральных плотностей углового ускорения бортовой и килевой качки, приведенные в работе [8], можно получить следующее выражение для спектральной плотности погрешности курса МК при воздействии переносного ускорения:

$$S[\Delta K(\omega)] = \mathrm{tg}^2 I \frac{h^2}{g^2} \frac{1}{(1 - T^2\omega^2)^2 + 4\zeta^2 T^2 \omega^2} \times \left[\left(\frac{2A_{\dot\theta}\mu_\theta}{\pi} \frac{b_\theta^2 \omega^2}{\omega^4 + 2a_\theta \omega^2 + b_\theta^4}\right)\cos^2 K_{\text{м}}\right] + \mathrm{tg}^2 I \frac{h^2}{g^2} \frac{1}{(1 - T^2\omega^2)^2 + 4\zeta^2 T^2 \omega^2} \times \left[\left(\frac{2A_{\dot\psi}\mu_\psi}{\pi} \frac{b_\psi^2 \omega^2}{\omega^4 + 2a_\psi \omega^2 + b_\psi^4}\right)\sin^2 K_{\text{м}}\right], \qquad (13)$$

где μ_θ, μ_ψ — коэффициенты, характеризующие степень нерегулярности соответственно бортовой и килевой качки; λ_θ, λ_ψ — преобладающие частоты бортовой и килевой качки на нерегу-

лярном волнении (для бортовой и килевой качки λ_θ, λ_ψ приближенно равны соответствующим частотам собственных колебаний корабля); ζ — относительный коэффициент затухания колебаний картушки МК; $a_\theta = \mu_\theta^2 - \lambda_\theta^2$, $b_\theta^2 = \mu_\theta^2 + \lambda_\theta^2$, $a_\psi = \mu_\psi^2 - \lambda_\psi^2$, $b_\psi^2 = \mu_\psi^2 + \lambda_\psi^2$, $A_\theta = D[\dot\theta] = b_\theta^2 D[\theta]$, $A_\psi = D[\dot\psi] = b_\psi^2 D[\psi]$, $D[\theta], D[\psi]$ — соответственно дисперсия углов бортовой и килевой качки; $T = \frac{1}{n}$, n — частота собственных колебаний картушки МК.

При работе в высоких широтах направляющий магнитный момент картушки МК, возникающий от горизонтальной составляющей поля Земли, имеет малое значение. В связи с этим возникающее переносное ускорение может привести к недопустимой погрешности МК $\delta_р$, однако ее влияние может быть скомпенсировано в случае измерения углов рыскания гироскопическим датчиком, не подверженным влиянию переносного ускорения.

С учетом конструктивных особенностей МК наиболее удобным является применение для его системы коррекции датчика угловой скорости (ДУС) с вертикально расположенной осью чувствительности, который следует установить на котелке компаса. При применении ДУС возможно формирование систем коррекции двух типов — позиционной коррекции и коррекции по угловой скорости.

Исследования работы позиционной системы коррекции магнитного компаса на качке

На рис. 1 приведена блок-схема системы позиционной коррекции [11], в которой проводится выработка выходных сигналов с ДМК и ДУС.

В схеме используется позиционное управление, заключающееся в следующем [12]:

1. Выработка с помощью ДМК сигнала о мгновенных значениях курса в горизонтной системе координат, состоящего из магнитного курса $K_М$, угла рыскания $\gamma_р$ и погрешности $\delta_р$: $K_М + \gamma_р + \delta_р$.

2. Выработка с помощью ДУС сигнала угловой скорости, состоящего из угловых скоростей изменения курса $\dot K_М$, рыскания $\dot\gamma_Р$, погрешности $\dot\Delta_{ДУС}$ ДУС, характеризуемой его дрейфом: $\dot K_М + \dot\gamma_р + \dot\Delta_{ДУС}$.

3. Интегрирование сигнала ДУС с помощью апериодического звена $\frac{K_1}{T_1 p + 1}$ и формирование на выходе интегратора сигнала $K_М + \gamma_р + \Delta_{ДУС}$. В качестве начального условия при интегрировании используется значение ДМК $K_М(0)$.

4. Вычисление разности между выходными сигналами ДМК и интегратора в целях формирования сигнала $\delta_р - \Delta_{ДУС}$.

5. Фильтрация низкочастотной погрешности $\Delta_{ДУС}$ с помощью фильтра высоких частот (ФВЧ) $\frac{K_2 p}{T_2 p + 1}$.

6. Исключение из значений магнитного курса погрешности $\delta_р$ путем вычисления разности между выходным сигналом ДМК и сигналом с выхода ФВЧ, пропорциональным погрешности $\delta_р$.

Особенностью системы позиционной коррекции является использование в качестве ДУС волоконно-оптического гироскопа (ВОГ), имеющего низкочастотный дрейф, который практически полностью может быть устранен с помощью применения ФВЧ.

Выбор численных значений постоянных времени динамических звеньев схемы (рис. 1) определяется следующими соображениями:

— значение постоянной времени $T_1 = 7200$ с апериодического звена, применяемого в качестве интегратора, определяется необходимостью сокращения времени переходного процесса и значения перерегулирования при интегрировании сигналов ДУС, особенно при маневрировании судна;

— значение постоянной времени T_2 ФВЧ определяется необходимостью передачи без искажений сигнала $\delta_р$, зависящего от периодов качек. Значения периодов бортовой и килевой качек большинства типов судов находятся, соответственно, в диапазонах (6...28) с и (3...14) с [13], поэтому

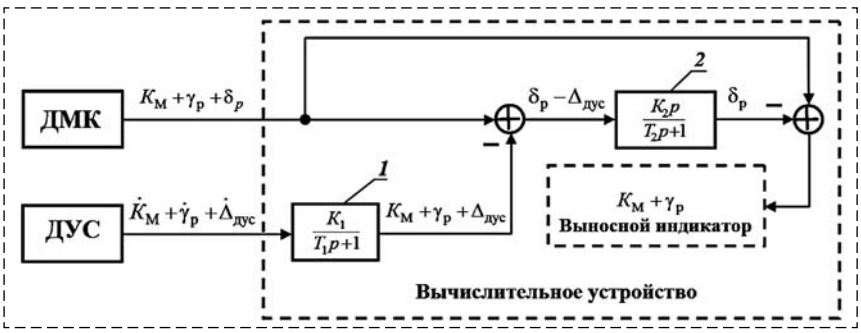

Рис. 1. Блок-схема позиционной системы коррекции МК:
1 — интегратор; *2* — фильтр высоких частот

Fig. 1. Block diagram of the positional correction system MC:
1 — integrator; *2* — high-pass filter

в качестве постоянной времени T_2 принимается значение 40 с — наибольшее из представленных значений периодов.

При моделировании углы качек судна задавали в виде гармонических колебаний:

$$K = K_0 + A_{\text{K}} \sin\left(\frac{2\pi}{T_K} t + \psi_K\right),$$
$$\psi = A_\psi \sin\left(\frac{2\pi}{T_\psi} t + \psi_\psi\right), \theta = A_\theta \sin\left(\frac{2\pi}{T_\theta} t + \psi_\theta\right), \quad (14)$$

где K_0 — постоянное значение угла курса; A_{K}, A_ψ, A_θ — амплитуды гармонических колебаний углов рысканья, килевой и бортовой качек судна; T_{K}, T_ψ, T_θ, ψ_{K}, ψ_ψ, ψ_θ — периоды и фазы соответствующих колебаний (фазы ψ_{K}, ψ_ψ, $\psi_\theta = 0$). Проведенное моделирование системы позиционной коррекции для различных условий углового движения судна подтвердило ее эффективность при использовании ВОГ с низкочастотной составляющей ухода со среднеквадратическим отклонением $\sigma = 3°/\text{ч}$.

Характеристикой эффективности системы коррекции является коэффициент подавления погрешности от качки K_Π, который рассчитывается как отношение погрешности системы коррекции МК к заданной динамической погрешности компаса от воздействия переносного ускорения. Как показывают результаты моделирования, коэффициент подавления погрешности от качки K_Π зависит от численных значений периодов качки. При исследовании режима работы МК с системой позиционной коррекции получены следующие результаты:

— при задании бортовой качки судна с периодами от 6 до 8 с и движении судна с курсом $K_0 = 0°$ значения коэффициента K_Π лежат в диапазоне 0,12...0,25, а его среднее значение составляет 0,19;

— при задании килевой качки судна с периодами от 3 до 14 с и движении судна с курсом $K_0 = 90°$ значения коэффициента K_Π лежат в диапазоне 0,11...0,21, а его среднее значение составляет 0,17.

Таким образом, приведенные значения коэффициента подавления погрешности K_Π показывают хорошее качество предложенной системы коррекции.

Для примера рассчитаем погрешность МК при условии использования в нем системы коррекции в условиях установки компаса на научно-исследовательском судне "Ванкувер" водоизмещением 5 тыс. т, имеющем среднее значение периода бортовой качки 11 с при отсутствии килевой на волнении 5 баллов, а среднее значение амплитуды качки — 9° [14]. Кроме того, в расчетах будем задавать курс равным 0°, что определяет максимальное значение погрешности. Считаем, что расстояние h от центра качания равно 2,5 м, а тангенс угла магнитного наклонения $\text{tg}I = 14$, что соответствует 82° с. ш. В соответствии с выражением (10) получим амплитудное значение погрешности МК от действия переносного ускорения, равное 10,5 °. С учетом значения коэффициента K_Π подавления погрешности, соответствующего выбранному периоду качки, абсолютная погрешность МК с системой коррекции составит ±1,99 °, что более чем в 2,5 раза превосходит допустимое требование по погрешности курсоуказания в условиях качки, приведенное в п. 5.2.1 части V Правил по оборудованию морских судов РМРС [15].

Система коррекции магнитного компаса по угловой скорости рыскания

Использование в системе коррекции МК в качестве ДУС дешевого микромеханического гироскопа (ММГ) позволяет обеспечить повышение конкурентоспособности магнитного компаса за счет снижения его цены, а также уменьшения его массы и габаритных размеров.

Однако применение ММГ в рассмотренной выше системе позиционной коррекции (рис. 1) не представляется возможным из-за присутствия в его выходном сигнале флуктуационных составляющих типа белого шума и случайного блуждания угла, которые при интегрировании показаний гироскопа вызовут появление быстро накапливающейся ошибки, что, в свою очередь, приведет к резкому увеличению погрешности МК. Поэтому для применения ММГ в измерительной схеме МК следует использовать систему коррекции по угловой скорости рыскания, блок-схема которой приведена на рис. 2.

В указанной схеме используется управление по угловой скорости рыскания, заключающееся в следующем:

1. Выработка с помощью ДМК сигнала $K_{\text{M}} + \gamma_{\text{p}} + \delta_{\text{p}}$.

2. Выработка с помощью ММГ с вертикальной осью чувствительности, установленного в горизонтной системе координат на котелке компаса, сигнала $\dot{K}_{\text{M}} + \dot{\gamma}_{\text{p}} + \dot{\Delta}_{\text{ДУС}}$.

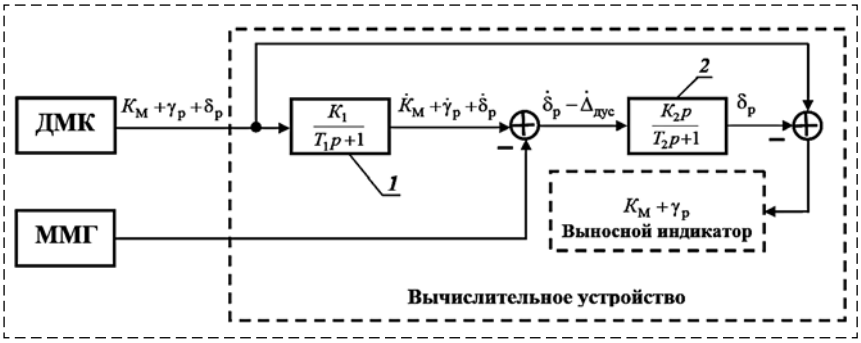

Рис. 2. Блок-схема системы коррекции МК по угловой скорости рыскания:
1 — дифференцирующее звено; *2* — фильтр низких частот
Fig. 2. Block diagram of the MC correction system for yaw rate:
1 — differentiating link; *2* — low-pass filter

3. Дифференцирование показаний ДМК и формирование на выходе дифференцирующего звена $\frac{K_1 p}{T_1 p+1}$ сигнала, состоящего из угловых скоростей $\dot{K}_M$, рыскания $\dot{\gamma}_p$ и погрешности $\dot{\delta}_p$: $\dot{K}_M + \dot{\gamma}_p + \dot{\delta}_p$.

4. Вычисление разности между выходными сигналами дифференцирующего звена и ММГ: $\dot{\delta}_p - \dot{\Delta}_{ДУС}$.

5. Фильтрация сигнала $\dot{\delta}_p - \dot{\Delta}_{ДУС}$ с помощью фильтра низких частот (ФНЧ) $\frac{K_2}{T_2 p+1}$.

6. Исключение из значений магнитного курса погрешности δ_p путем вычисления разности между выходным сигналом ДМК и сигналом с выхода ФНЧ, пропорциональным погрешности δ_p.

При выборе постоянной времени T_1 дифференцирующего звена следует учитывать, что она связана с постоянной времени T_2 ФНЧ. Обе указанные постоянные времени фильтров должны позволять выделить ошибку δ_p и сгладить высокочастотную погрешность от шума ММГ. С учетом этого при моделировании режима функционирования системы коррекции в условиях различных значений качки выбраны постоянные времени $T_1 = 1{,}27$ с, $T_2 = 5$ с, обеспечивающие минимальные значения коэффициента подавления погрешности $K_П$ в диапазоне изменения периодов бортовой качки судна от 10 до 20 с и килевой — от 10 до 14 с.

Имитационное моделирование работы системы коррекции проводили в среде MATLAB (Simulink) с приведенными выше значениями постоянных времени звеньев, заданными условиями качки и уровнем шума ММГ, соответствующим $\sigma = 110°/ч$ при частоте дискретизации 0,01 с. Указанный уровень шума был выбран исходя из характеристик дешевых микросхем ММГ типа ADXRS 649, ADXRS 645.

При исследовании режима работы МК с системой коррекции по угловой скорости получены следующие результаты:

— при задании бортовой качки судна с периодами от 6 до 28 с и движении судна с курсом $K_0 = 0°$ значения коэффициента подавления погрешности $K_П$ лежат в диапазоне 0,15...0,28, а его среднее значение составляет 0,2;

— при задании килевой качки судна с периодами от 3 до 14 с и движении судна с курсом $K_0 = 90°$ значения коэффициента $K_П$ также лежат в диапазоне 0,15...0,28, а его среднее значение составляет 0,19.

Следует отметить, что зависимость коэффициента подавления погрешности $K_П$ от периодов бортовой и килевой качки в рассматриваемой системе коррекции несколько иная, чем в системе позиционной коррекции. Так, в диапазоне периодов бортовой качки от 10 до 20 с и килевой качки от 10 до 14 с коэффициент $K_П$ имеет значение, не превышающее 0,2, а при периодах бортовой качки менее 10 с и более 20 с значение коэффициента возрастает до значения 0,28. Для килевой качки изменение коэффициента становится иным. Он возрастает до значения 0,28 лишь при периодах килевой качки менее 10 с.

Если повторить расчет абсолютной погрешности МК с системой коррекции по угловой скорости в условия, заданных при исследовании позиционной системы коррекции для судна "Ванкувер", то получим также значение погрешности МК, равное ±1,99°, что подтверждает близость характеристик двух систем коррекции.

Анализ полученных в обеих системах коррекции значений коэффициента подавления $K_П$ показывает, что эффективность работы системы коррекции по угловой скорости, использующей дешевый ММГ, соответствует системе позиционной коррекции с использованием дорогого ВОГ.

Следует отметить, что обе предложенные системы коррекции позволяют скомпенсировать не только погрешность, обусловленную непосредственно влиянием переносного ускорения, но и погрешность от перераспределения магнитных масс при качке судна [16, 17].

Заключение

Развитие современных судовых основных МК привело к появлению МК с дистанционной передачей курса, имеющих ряд преимуществ по сравнению с традиционными МК. Эти приборы позволяют в автоматическом режиме с помощью приемников GPS, ГЛОНАСС корректировать магнитный курс судна и выводить на цифровой репитер информацию об истинном курсе. Они могут быть размещены не только на верхнем мостике судна над его рулевой рубкой, но и в другом месте открытой палубы. Введение системы коррекции в такие приборы позволяет скомпенсировать погрешность, вызванную качкой судна. По существу, такие МК являются мехатронными системами с несколькими системами коррекции, позволяющими повысить точность выработки курса, имеющими в своем составе механические и электронные преобразователи различного назначения, а также вычислительные средства обработки информации и управления на основе микропроцессоров.

Предложенные варианты систем коррекции позволяют придать МК свойства гиромагнитного компаса, в котором за счет применения гироскопического датчика угловой скорости и мехатронной системы коррекции в значительной степени компенсируются погрешности магнитного компаса от качки судна. Отметим, что предложенные системы позиционной коррекции и коррекции по угловой скорости позволяют добиться близких результатов при подавлении указанной погрешности. Учитывая тот факт, что система позиционной коррекции работает с использованием ВОГ, а вторая — с использованием ММГ, целесообразно применять для решения поставленной задачи бюджетный микромеханический гироскоп, значительно снижающий стоимость МК. Специально подобранные настройки динамических звеньев этой системы коррекции обеспечивают "сглаживание" погрешностей микромеханического гироскопа и не позволяют ей накапливаться.

Список литературы

1. **Basterretxea-Iribal Imanol, Sotes Iranzu, Uriarte Jose Ignacio.** Towards an Improvement of Magnetic Compass Accuracy and Adjustment // The Journal of Navigation. 2016. Vol. 69, N .6. P. 1325—1340.

2. **Lushnikov E.** Magnetic Compass in Modern Maritime Navigation // The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2015. Vol. 9, N. 4. P. 539—543.

3. **Arribalzaga J., Martinez A. T. Vila J. A.** Analysis and calculation of the magnetic moment of a magnet compensation for type A magnetic needle // The Journal of Maritime Research. 2013. Vol. 10, N. 2. P. 80—81.

4. **Крылов А. Н.** О возмущениях показаний компасов, происходящих на качке корабля на волнении. Избранные труды академика А. Н. Крылова. М.: Изд. АН СССР, 1958. С. 115—170.

5. **Ривкин С. С.** Определение линейных скоростей и ускорений качки корабля инерциальным методом. Часть I. Линейные скорости и ускорения качки корабля. Л.: ЦНИИ "Румб", 1980. С. 20—23.

6. **Анучин О. Н., Емельянцев Г. И.** Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. СПб.: ФГУП ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2003. С. 181—182.

7. **Кардашинский-Брауде Л. А.** Современные судовые магнитные компасы. СПб.: ФГУП ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 1999. С. 95—98.

8. **Ривкин С. С.** Расчет динамических погрешностей гироскопических устройств на качающемся основании. Л.: НПО "Азимут", 1991. С. 51—57.

9. **Рыбалтовский Н. Ю.** Магнитно-компасное дело. Л.: Гос. изд-во водного транспорта, 1954. С. 421—422.

10. **Браславский Д. А.** Приборы и датчики летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1970. С. 351—353.

11. **Грязин Д. Г., Падерина Т. В., Сергачев И. В.** О возможности использования судовых магнитных компасов в высоких широтах // Материалы XXXII конф. памяти Н. Н. Острякова. Санкт-Петербург, ГНЦ РФ АО "Концерн "ЦНИИ "Электроприбор", 2020. С. 122—125.

12. **Зиненко В. М., Грязин Д. Г., Молочников А. А., Сергачев И. В., Матвеев Ю. В., Короленко И. В.** Способ измерения магнитного курса судна в высоких широтах и устройство для его реализации, патент RU 2688900, дата регистрации 22.05.2019.

13. **Благовещенский С. Н., Холодилин А. Н.** Справочник по статике и динамике корабля. Т. 2. Динамика (качка) корабля. Л.: Судостроение, 1976. С. 58—59.

14. **Бородай И. К.** Прикладные задачи динамики судов на волнении. Л.: Судостроение, 1989. С. 125—127.

15. **Правила** по оборудованию морских судов. Часть V. Навигационное оборудование. Санкт-Петербург, Российский морской регистр судоходства, 2016. 166 с.

16. **Androjna A., Belev B., Pavic I., Perkovic M.** Determining Residual Deviation and Analysis of the Current Use of the Magnetic Compass // The Journal on Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9, N. 204. P. 2—14.

17. **Tan Van Pham, Nguyen Van Suong.** The Method to Calculate the Deviation Coefficients for Marine Magnetic Compass // The International Journal of Engineering Research and Technology. 2019. Vol. 12, N. 11. P. 1941—1944.

Mechatronic Control Devices for a Modern Ship's Magnetic Compass

D. G. Gryazin, volnagdg@yandex.ru, **T. V. Paderina**, paderinata@gmail.com,
ITMO University, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation,
Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation

Corresponding author: **Paderina Tatyana Vl.**, Ph.D., Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, e-mail: paderinata@gmail.com

Accepted on April 21, 2021

Abstract

One of the disadvantages of existing main magnetic compasses (MC) is the presence in their readings of an error from pitching due to the influence of centripetal and tangential accelerations when the MC is placed at a certain distance from the center rocking of the ship. This error can be unacceptably large, especially when using the compass in high latitude environments. This effect can be compensated by using a gyroscopic angular rate sensor (ARS), which measures the angular yaw rate of the ship. The work is devoted to the results of research and simulation of two correction system, which is introduced into the measuring circuit of the MC. Each of the correction systems presented in this work can be considered as mechatronic control device for a modern MC, one of them is positional, and the other is according to the angular yaw rate of the ship. The paper shows the advantages and disadvantages each of systems. So, a feature of the positional correction system is the need to use ARS of a tactical accuracy class (for example, a fiber-optic gyroscope). At the same time, the yaw rate correction system makes it possible to use a cheap micromechanical gyroscope (MMG). Despite the use ARS of various accuracy classes, both proposed correction systems allow achieving similar results, which leads to an obvious conclusion about the advisability of using the correction system with MMG, which allows to significantly reduce the cost of the MC, as well as to reduce its weight and dimensions.

Keywords: *magnetic compass, high latitude, error from pitching, angular rate sensor, correction systems*

Acknowledgements: This article was prepared with the financial support of Russian Foundation for Basic Research (20-08-00265).

For citation:

Gryazin D. G., **Paderina T. V.** Mechatronic Control Devices for a Modern Ship's Magnetic Compass, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie,* 2021, vol. 22, no. 8, pp. 425—432.

DOI: 10.17587/mau.22.425-432

References

1. **Basterretxea-Iribal Imanol, Sotes Iranzu, Uriarte Jose Ignacio.** Towards an Improvement of Magnetic Compass Accuracy and Adjustment**,** *The Journal of Navigation*, 2016, vol. 69, no. 6, pp. 1325—1340.

2. **Lushnikov E.** Magnetic Compass in Modern Maritime Navigation, *The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation,* 2015, vol. 9, no. 4, pp. 539—543.

3. **Arribalzaga J., Martinez A. T. Vila J. A.** Analysis and calculation of the magnetic moment of a magnet compensation for type A magnetic needle, *The Journal of Maritime Research*, 2013, vol. 10, no. 2, pp. 80—81.

4. **Krylov A. N.** About indignations of indications the compasses occurring on rolling of the ship on excitement, Selected works of academician A. N. Krylov, Moscow, Edit. AS USSR, 1958, pp. 115—170 (in Russian).

5. **Rivkin S. S.** Definition of linear speeds and accelerations of rolling of the ship by an inertial method, Part I, Linear speeds and accelerations of rolling of the ship. Leningrad, CSRI "Rumb", 1980, pp. 20—23 (in Russian).

6. **Anuchin O. N. Emeljantsev G. I.** The integrated systems of orientation and navigation for sea mobile objects, State Research Center of the Russian Federation St.-Petersburg, CSRI " Electropribor", 2003, pp. 181—182 (in Russian).

7. **Kardashinsky-Braude L. A.** The modern ship magnetic compasses, Research Center of the Russian Federation CSRI "Electropribor", St.-Petersburg, 1999, pp. 95—98 (in Russian).

8. **Rivkin S. S.** Calculation dynamic errors of gyroscopic devices on the shaking basis, Leningrad, NPO "Azimut", 1991, pp. 51—57 (in Russian).

9. **Rybaltovsky N. U.** Magnitno-compass business. Leningrad, Gosudarstvennoye izdatelstvo vodnogo transporta, 1954, pp. 421—422 (in Russian).

10. **Braslavsky D. A.** Devices and gauges of flying machines, Moscow, Mashinostroenie, 1970, pp. 351—353 (in Russian).

11. **Gryazin D. G., Paderina T. V., Sergachev I. V.** About possibility of use of ship magnetic compasses in high latitudes, *materials XXXII of conference of memory of the outstanding designer of gyroscopic devices of N. N. Ostrjakova*, Saint Petersburg**,** State Research Center of the Russian Federation — Concern CSRI Elektropribor, 7—8 October 2020, pp. 122—125 (in Russian).

12. **Zinenko V. M., Gryazin D. G., Molochnikov A. A., Sergachev I. V., Matveev J. V, Korolenko I. V.** The way of measurement of a magnetic heading of a vessel in high latitudes and the device for its realization, patent RU 2688900, date of registration 22.05.2019 (in Russian).

13. **Blagoveshchensky S. N., Holodilin A. N.** Directory on a statics and dynamics of the ship, Vol. 2. Dynamics (rolling) of the ship, Leningrad, Sydostroenie, 1976, pp. 58—59 (in Russian).

14. **Boroday I. K.** Applied problems of dynamics ships on excitement, Leningrad, Sydostroenie, 1989, pp. 125—127 (in Russian).

15. **Rules** on the equipment of sea ships, Part V. The navigating equipment. Saint-Petersburg, The Russian sea register of navigation, 2016, 166 p. (in Russian).

16. **Androjna A., Belev B., Pavic I., Perkovic M.** Determining Residual Deviation and Analysis of the Current Use of the Magnetic Compass, *The Journal on Marine Science and Engineering,* 2021, vol. 9, no. 204, pp. 2—14.

17. **Tan Van Pham, Nguyen Van Suong.** The Method to Calculate the Deviation Coefficients for Marine Magnetic Compass, *The International Journal of Engineering Research and Technology,* 2019, Vol. 12, N. 11, pp. 1941—1944.