

УДК 629.053.11
EDN OJZGVJ

Д. Г. ГРЯЗИН, Т. В. ПАДЕРИНА

МАГНИТНЫЙ КОМПАС С СИСТЕМОЙ КОРРЕКЦИИ ДИНАМИЧЕСКОЙ ПОГРЕШНОСТИ

В статье исследуются результаты эксплуатации магнитного компаса (МК) с системой коррекции динамических погрешностей. Оценивается эффективность применения этой системы для снижения погрешностей МК, проявляющихся в условиях качки и обусловленных влиянием перераспределенных сил судового магнетизма (креновой девиации), а также переносных ускорений при установке МК на некотором расстоянии от центра качания судна.

Анализируются возмущающие силы, действующие на МК во время качки и приводящие к возникновению погрешностей. Рассмотрена система коррекции на основе комплементарного фильтра с использованием микромеханического гироскопа (ММГ), реализованная в МК «Азимут КМ-05Д». Представлены результаты стендовых и натурных испытаний, подтверждающие эффективность этой системы коррекции.

Ключевые слова: магнитный компас, креновая девиация, переносные ускорения, микромеханический гироскоп, комплементарный фильтр.

Введение

Магнитные компасы (МК) традиционно применяются на судах. В настоящее время они не только используются как дублирующие или аварийные курсоуказатели, но и включаются в контур авторулевого малотоннажных судов, в связи с чем возникает потребность в повышении их точности до уровня, максимально приближенного к точности гироскопов.

Следует отметить, что современная тенденция развития систем курсоказания на магнитометрических датчиках, задействуемых в различных транспортных средствах, связана с повышением их точности за счет включения в их состав систем коррекции [1, 2, 3, 4, 5]. Так, в индукционных компасах Furuno PG 500, Furuno PG 700 [6], помимо магнитометрических датчиков, применяется твердотельный волновой гироскоп, позволяющий корректировать показания курса в условиях качки, что обеспечивает их более высокую стабильность. Коррекция современных цифровых МК, основу которых составляют малогабаритные цифровые магнитометры, осуществляется с помощью сигналов приемной аппаратуры глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС/GPS.

В условиях эксплуатации у судовых МК появляются динамические погрешности. В настоящей работе рассматриваются наибольшие из них, обусловленные действи-

Грязин Дмитрий Геннадиевич. Доктор технических наук, профессор, главный метролог – начальник отдела, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»; Университет ИТМО (С.-Петербург). Действительный член международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Падерина Татьяна Владимировна. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

ем только качки судна. Погрешности МК под воздействием линейной вибрации, как правило, имеют характер постоянных систематических смещений, уровень которых сохраняется сравнительно малым благодаря соответствующему выбору конструктивных параметров современных МК, прежде всего магниточувствительного элемента (МЧЭ), в том числе собственных частот и моментов инерции вокруг горизонтальных осей, определенного соотношения восстанавливающих моментов в гравитационном и магнитном поле Земли и т.д. [7].

Под действием качки судна возникают погрешности МК, обусловленные двумя факторами. Во-первых, это влияние перераспределенных сил судового магнетизма на магнитную систему картушки компаса, что вызывает креновую девиацию [8], которая может быть уничтожена только для конкретной широты места. Во-вторых, на картушку, представляющую собой короткопериодный маятник, воздействуют тангенциальные и центростремительные (переносные) ускорения, вызванные установкой МК на некотором расстоянии от центра качания судна [9].

В наибольшей степени эти погрешности проявляются при работе МК в высоких широтах, что служит дополнительным отрицательным фактором при решении задачи курсоуказания в этом районе, поскольку направляющий магнитный момент картушки, возникающий от горизонтальной составляющей магнитного поля Земли, имеет и так малое значение. Учитывая сегодняшнюю тенденцию к увеличению в северных морях количества судов, в том числе рыболовецких, что связано с нарастающей популярностью Северного морского пути, задача подавления динамических погрешностей МК приобретает особую актуальность.

Очевидно, что динамические погрешности МК с подвижной картушкой при воздействии качки не могут быть снижены простыми средствами. Их влияние может быть скомпенсировано лишь за счет применения в измерительной схеме МК системы коррекции, привлекающей информацию от разнородных источников. В настоящее время на отечественном рынке получили широкое распространение судовые МК фирм Saura [10], Sperry Marin [11], Tokio Keiki [12], однако подобная система коррекции у них отсутствует.

Учитывая конструктивные особенности МК, в качестве дополнительного источника данных о рыскании может использоваться гироскопический датчик угловой скорости (ДУС) с вертикально расположенной осью чувствительности. Объединение показаний магнитометрического и гироскопического датчиков в измерительной схеме МК позволяет получить качественно новые характеристики прибора, поскольку в этом случае сохраняются достоинства каждого датчика и при этом устраняются некоторые их недостатки.

В статье исследуется работа МК с системой коррекции и оценивается ее эффективность в части снижения динамических погрешностей, проявляющихся в условиях качки и обусловленных влиянием перераспределенных сил судового магнетизма, а также переносных ускорений при установке МК на некотором расстоянии от центра качания судна.

Кроме того, анализируются возмущающие силы, действующие на МК на качке и приводящие к его погрешностям, а также рассматривается система коррекции с использованием ММГ, реализованная в МК «Азимут КМ-05Д» [13]. Приводятся результаты стендовых и натурных испытаний этого МК.

Воздействие переносных ускорений на картушку МК

Центростремительное и тангенциальное ускорения, действующие на картушку МК при качке судна, определим как переносные ускорения. Их влияние обусловлено размещением МК на верхнем мостике судна над ходовой рубкой на некотором расстоянии от центра качания судна. Обычно котелок МК устанавливается в двухосном кардановом подвесе, при этом к нижней части картушки крепится груз [14], благодаря которому его центр масс смещается вниз относительно оси подвеса. Без этого груза картушка разворачивалась бы вдоль силовых линий магнитного поля Земли и наклонялась бы внутри котелка на угол, пропорциональный широте места. Подвесом картушки в котелке является игла, острие которой находится выше ее центра масс. Таким образом, система «карданов подвес – котелок – картушка» представляет собой двойной короткопериодный маятник [14], обеспечивающий высокую динамическую устойчивость МЧЭ в горизонтальной плоскости во время качки. Однако под влиянием переносных ускорений от качки картушка отклоняется от плоскости горизонта, что приводит к воздействию на ее магнитную систему проекции вертикальной составляющей напряженности магнитного поля Земли. В результате картушка будет отклоняться от направления магнитного меридиана [9].

Влияние возмущений картушки МК, вызванных бортовой качкой судна, при его установке на расстоянии по вертикальной координате h_e от центра качания судна было рассмотрено еще академиком А.Н. Крыловым [15]. Автор анализирует влияние на МК бортовой, килевой качки и рыскания, а также орбитального движения судна на волнении. При этом он полагает, что девиация устранена, картушка механически уравновешена в плоскости горизонта с помощью дополнительного грузика. Отметим, что в конце XIX века для уравновешивания картушки, которая наклонялась вдоль силовых линий магнитного поля Земли, применялись грузики, устанавливаемые на краю шкалы.

В своей статье [15] А.Н. Крылов описывает поведение картушки МК с помощью следующей системы дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \ddot{\theta}_1 + 2f_1\dot{\theta}_1 + m_1^2\theta_1 = \frac{m_1^2}{g}\ddot{F}_2(t), \\ \ddot{\psi} + 2f_2\dot{\psi} + m_2^2\psi = \frac{m_1^2}{g}\ddot{F}_1(t) + \frac{C}{B}\left(m_3^2\text{tgi} + \frac{p_1l_1}{C}\right), \\ \ddot{\phi} + 2f_3\dot{\phi} + m_3^2\phi = -\frac{p_1l_1}{gC}\ddot{F}_2(t) + \theta_1\left(m_3^2\text{tgi} + \frac{p_1l_1}{C}\right), \end{cases} \quad (1)$$

где θ_1 – колебания картушки по углу крена; ψ – колебания картушки по углу дифферента; ϕ – колебания картушки по углу рыскания; p_1 – вес дополнительного балансировочного грузика, который в ряде случаев устанавливали на шкалу картушки при проектировании МК того времени; l_1 – плечо, на котором закреплен грузик; i – магнитное склонение в данном месте; A , B и C – моменты инерции картушки относительно осей $N - S$, $W - O$ и вертикальной оси, проходящей через ее центр и перпендикулярной к плоскости лимба; f_1 , f_2 , f_3 – коэффициенты сопротивления при движении картушки вокруг соответствующих осей; F_1 и F_2 – координаты точки опо-

ры картушки (острия иглы) при килевых и бортовых колебаниях судна в связанной с ним системе координат. Восстанавливающие силы от маятниковой системы m_1 , m_2 и магнитной системы m_3 картушки определяются как

$$m_1 = \sqrt{\frac{P_0(h-a)}{A}}, \quad m_2 = \sqrt{\frac{P_0(h-a)}{B}}, \quad m_3 = \sqrt{\frac{MH}{C}}.$$

Их значения могут быть найдены из выражений

$$m_i = \frac{2\pi}{\tau_i}, \quad m_2 = \frac{2\pi}{\tau_2}, \dots,$$

где τ_i ($i = 1, 2, 3$) – периоды колебаний картушки в жидкости по соответствующей оси; P_0 – вес картушки МК; h – расстояние от центра тяжести картушки до точки ее подвеса; a – координата центра плавучести картушки; $H, Htgi$ – горизонтальная и вертикальная составляющие магнитного поля Земли; M – магнитный момент картушки МК.

Учитывая, что современные МК являются жидкостными, следует ввести в уравнение (1) присоединенные моменты инерции жидкости и коэффициенты гидродинамического сопротивления развороту картушки [16, 17].

Тогда уравнение (1) примет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{\theta}_1 + \frac{W_c^\theta}{(J_\theta + \lambda_\theta)} \dot{\theta}_1 + \omega_\theta^2 \theta_1 = \frac{\omega_\theta^2}{g} \ddot{F}_2(t), \\ \ddot{\psi} + \frac{W_c^\psi}{(J_\psi + \lambda_\psi)} \dot{\psi} + \omega_\psi^2 \psi = \frac{\omega_\psi^2}{g} \ddot{F}_1(t) + \frac{J_\varphi + \lambda_\varphi}{J_\psi + \lambda_\psi} \left(\omega_\psi^2 tgi + \frac{p_1 l_1}{J_\varphi + \lambda_\varphi} \right), \\ \ddot{\phi} + \frac{W_c^\phi}{(J_\phi + \lambda_\phi)} \dot{\phi} + \omega_\phi^2 \phi = -\frac{p_1 l_1}{g(J_\phi + \lambda_\phi)} \ddot{F}_2(t) + \theta_1 \left(\omega_\phi^2 tgi + \frac{p_1 l_1}{J_\phi + \lambda_\phi} \right), \end{array} \right. \quad (2)$$

где J_θ, J_ψ, J_ϕ – моменты инерции картушки относительно осей $N-S, W-O$ и вертикальной оси; $\lambda_\theta, \lambda_\psi, \lambda_\phi$ – присоединенные моменты инерции жидкости относительно осей $N-S, W-O$ и вертикальной оси; $W_c^\theta, W_c^\psi, W_c^\phi$ – коэффициенты гидродинамического сопротивления развороту картушки относительно осей $N-S, W-O$ и вертикальной оси;

$\omega_\theta = \sqrt{\frac{P_0(h-a)}{J_\theta + \lambda_\theta}}, \quad \omega_\psi = \sqrt{\frac{P_0(h-a)}{J_\psi + \lambda_\psi}}, \quad \omega_\phi = \sqrt{\frac{MH}{J_\phi + \lambda_\phi}}$ – круговые частоты собственных недемпфированных колебаний картушки относительно осей $N-S, W-O$ и вертикальной оси.

При воздействии гармонической бортовой качки $\theta = \theta_0 \sin(k_{\sigma\kappa} t + \varepsilon)$ (где $\theta_0, k_{\sigma\kappa} = \frac{2\pi}{T_{\sigma\kappa}}, \varepsilon$ – амплитуда, частота и фаза колебаний судна по углу крена) и размещении МК на расстоянии h_e от центра качания судна в работе [15] предлагается воспользоваться первым и третьим уравнением системы (1), при этом введем $\ddot{F}_2(t) = -h_e k_{\sigma\kappa}^2 \theta_0 \sin(kt + \varepsilon) \cos K$ и положим $p_1 = 0$. Тогда с учетом (2) имеем:

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{\theta}_1 + \frac{W_c^\theta}{(J_\theta + \lambda_\theta)} \dot{\theta}_1 + \omega_\theta^2 \theta_1 = -\frac{\omega_\theta^2}{g} k_{\sigma\kappa}^2 h_e \cdot \theta_0 \sin(k_{\sigma\kappa} t + \varepsilon) \cos K, \\ \ddot{\phi} + \frac{W_c^\phi}{(J_\phi + \lambda_\phi)} \dot{\phi} + \omega_\phi^2 \phi = \omega_\phi^2 tgi \cdot \theta_1, \end{array} \right. \quad (3)$$

где K – курс судна; h_e – расстояние по вертикали от центра качания судна до точки подвеса картушки.

В соответствии с частным решением первого дифференциального уравнения системы (3) для колебаний картушки по углу θ_1 получим следующее дифференциальное уравнение для движения картушки по углу рыскания φ :

$$\ddot{\varphi} + \frac{W_c^\varphi}{(J_\varphi + \lambda_\varphi)} \dot{\varphi} + \omega_\varphi^2 \varphi = -\frac{k_{\sigma\kappa}^2}{g} \frac{\omega_0^2 \cdot \omega_\varphi^2 \cdot \operatorname{tgi}}{R_1} h_e \cdot \theta_0 \sin(k_{\sigma\kappa} t + \varepsilon_1) \cos K. \quad (4)$$

Уравнение (4) можно представить следующим образом:

$$\ddot{\varphi} + \frac{W_c^\varphi}{(J_\varphi + \lambda_\varphi)} \dot{\varphi} + \omega_\varphi^2 \varphi = f_{ny}(\theta), \quad (5)$$

где $f_{ny}(\theta) = -\frac{k_{\sigma\kappa}^2}{g} \frac{\omega_0^2 \cdot \omega_\varphi^2 \cdot \operatorname{tgi}}{R_1} h_e \cdot \theta_0 \sin(k_{\sigma\kappa} t + \varepsilon_1) \cos K$, $R_1 = \sqrt{(\omega_0^2 - k_{\sigma\kappa}^2)^2 + \frac{(W_c^\theta)^2}{(J_\theta + \lambda_\theta)^2} k_{\sigma\kappa}^2}$.

Уравнение (5) отражает влияние на движение картушки по углу рыскания периодического возмущения $f_{ny}(\theta)$, обусловленного переносными ускорениями и пропорционального бортовой качке. Погрешность МК, вызванная действием $f_{ny}(\theta)$, проявляется в виде дополнительного угла рыскания показаний МК, имеющего знакопеременный характер. На курсах N и S эта погрешность максимальна, а на курсах O и W равна нулю. Возмущение $f_{ny}(\theta)$ также пропорционально тангенсу магнитного склонения, что в условиях северных широт при малом направляющем магнитном моменте картушки может привести к недопустимой погрешности МК.

Действие возмущающих сил, приводящих к креновой девиации МК

Одной из основных погрешностей магнитного компаса является девиация – отклонение магнитного курса от его истинного значения вследствие воздействия магнитных сил, возникающих по причине наличия судового железа. Как правило эксплуатация МК на судне сопровождается периодическими работами по устранению его девиации, цель которых – компенсировать влияние намагниченности судна. Они выполняются при положении судна на ровном киле, т.е. при близких к нулю значениях углов качки. Отметим, что проблеме девиации посвящено множество исследований, в частности [18, 19, 20, 21], однако все они направлены на компенсацию статической погрешности МК.

В условиях отклонения судна от горизонтального положения при бортовой качке $\theta = \theta_0 \sin(k_{\sigma\kappa} t + \varepsilon)$ возникает креновая девиация, величина которой зависит от действия дополнительной поперечной силы [18]:

$$F_K(\theta) = -(kH\operatorname{tgi} - eH\operatorname{tgi} + R)\theta. \quad (6)$$

Здесь e и k – постоянные коэффициенты, называемые параметрами Пуассона и характеризующие тензор влияния индуктивной намагниченности, которая зависит от широты места и перемагничивания магнитомягкого железа судна; R – вертикальная составляющая постоянного судового магнетизма.

В уравнении (3) на картушку действует только земной магнетизм, приводящий к появлению в дифференциальном уравнении для φ моментов от горизонтальной

($-MH\varphi$) и вертикальной составляющих магнитного поля Земли ($MH\text{tg}i\theta_1$), которые входят во второе уравнение (3) в виде членов $\omega_\varphi^2\varphi + \omega_\varphi^2\text{tg}i \cdot \theta_1$.

При воздействии поперечной силы (6) в правой части второго уравнения (3) необходимо учесть действие возмущающего момента: $-[MH\text{tg}i(k - e) + MR] \cdot \theta \cos K$. В этом случае получим:

$$\ddot{\varphi} + \frac{W_c^\varphi}{(J_\varphi + \lambda_\varphi)} \dot{\varphi} + \omega_\varphi^2 \varphi = f_{\kappa\delta}(\theta), \quad (7)$$

где $f_{\kappa\delta}(\theta) = \left[-\omega_\varphi^2(k - e)\text{tg}i - \frac{MR}{J_\varphi + \lambda_\varphi} \right] \cdot \theta_0 \sin(k_{\delta\kappa}t + \varepsilon) \cos K$.

Переменное возмущение $f_{\kappa\delta}(\theta)$ вызывает, так же как и $f_{ny}(\theta)$ (5), дополнительную погрешность МК по углу рыскания, имеющую колебательный характер, при этом на курсах N и S эта погрешность максимальна и может достигать 3° на каждый градус крена [18], а на курсах O и W равна нулю. При росте магнитной широты величина $f_{\kappa\delta}(\theta)$, так же как и $f_{ny}(\theta)$, будет изменяться, что приведет к увеличению погрешности МК.

Таким образом, дифференциальное уравнение, описывающее движение картушки по углу φ в условиях бортовой качки, при действии обоих периодических возмущений с учетом (5) и (7) может быть представлено следующим образом:

$$\ddot{\varphi} + \frac{W_c^\varphi}{(J_\varphi + \lambda_\varphi)} \dot{\varphi} + \omega_\varphi^2 \varphi = f_{ny}(\theta) + f_{\kappa\delta}(\theta), \quad (8)$$

где $f_{ny}(\theta) = -\frac{k_{\delta\kappa}^2}{g} \frac{\omega_\theta^2 \cdot \omega_\varphi^2 \cdot \text{tg}i}{\sqrt{(\omega_\theta^2 - k_{\delta\kappa}^2)^2 + \frac{(W_c^0)^2}{(J_\theta + \lambda_\theta)^2} k_{\delta\kappa}^2}} h_e \cdot \theta_0 \sin(k_{\delta\kappa}t + \varepsilon_1) \cos K$,

$$f_{\kappa\delta}(\theta) = \left[-\omega_\varphi^2(k - e)\text{tg}i - \frac{MR}{J_\varphi + \lambda_\varphi} \right] \cdot \theta_0 \sin(k_{\delta\kappa}t + \varepsilon) \cos K, \quad \omega_\varphi = \sqrt{\frac{MH}{J_\varphi + \lambda_\varphi}}.$$

Следует отметить, что совершенно разная природа возмущений, действующих на качке на картушку МК, вызывает близкие по своему характеру погрешности МК:

- пропорциональные колебаниям по углу крена;
- одинаково зависящие от угла курса судна и магнитной широты места.

Обе рассмотренные динамические погрешности могут быть устранены при использовании предлагаемой системы коррекции МК.

2. Система коррекции динамических погрешностей МК

Система коррекции динамических погрешностей МК в условиях качки базируется на задаче оптимального комплексирования выходных сигналов датчика магнитного курса (ДМК) компаса и ДУС с вертикально расположенной осью чувствительности, вырабатывающих одну и ту же информацию – сумму угла курса и рыскания судна. При этом оба измерителя имеют разные динамические характеристики, поскольку, в отличие от чувствительного элемента МК, ДУС нечувствителен к действию не только переносных ускорений, но и перераспределенных магнитных масс при крене судна. Конструктивные особенности компаса предполагают, что ДУС может быть

установлен непосредственно на его котелке, поскольку при наклонах последнего на угол, не превышающий 10° [14], погрешность измерения угловой скорости рыскания ДУС будет составлять менее 1,5%.

В случае такого рода измерителей может успешно применяться комплементарный фильтр [22], принцип действия которого состоит в том, чтобы компенсировать динамические погрешности, обусловленные переносными ускорениями и судовым магнетизмом на качке, с помощью ДУС и погрешности, вызванные низкочастотными составляющими дрейфа ДУС, с помощью показаний ДМК. При этом для ДУС комплементарный фильтр является фильтром высоких частот (ФВЧ), а для ДМК – низких (ФНЧ) [23], следовательно, в вырабатываемом компасом значении угла, состоящем из суммы углов курса и рыскания, динамические погрешности, возникающие в условиях качки, будут снижены.

Уравнение комплементарного фильтра имеет вид [24]:

$$\hat{\alpha} = W_{\text{ФВЧ}}(p) \cdot \alpha_z + W_{\text{ФНЧ}}(p) \cdot \alpha_{\text{дмк}}, \quad (8)$$

где $W_{\text{ФВЧ}}(p)$ – передаточная функция ФВЧ; $W_{\text{ФНЧ}}(p)$ – передаточная функция ФНЧ; α_z , $\alpha_{\text{дмк}}$ – соответственно суммарные углы курса и рыскания, выработанные по информации ДУС и ДМК; $\hat{\alpha}$ – оценка суммарного угла курса и рыскания, выработанная фильтром.

В простейшем случае в качестве ФВЧ и ФНЧ можно воспользоваться соответствующими звеньями с передаточными функциями:

$$W_{\text{ФВЧ}}(p) = \frac{Tp}{Tp+1}, \quad W_{\text{ФНЧ}}(p) = \frac{1}{Tp+1}, \quad (9)$$

где T – постоянная времени ФВЧ и ФНЧ.

Для того чтобы фильтры ФНЧ и ФВЧ не влияли на полезный сигнал, необходимо выполнить условие инвариантности [25]

$$W_{\text{ФНЧ}}(p) + W_{\text{ФВЧ}}(p) = 1, \quad (10)$$

с учетом которого погрешность оценки угла $\Delta\hat{\alpha} = \alpha - \hat{\alpha}$ будет зависеть от погрешностей ДМК $\Delta\alpha_{\text{дмк}}$, ДУС $\Delta\alpha_z$ и постоянной времени T :

$$\Delta\hat{\alpha} = \frac{1}{Tp+1} \Delta\alpha_{\text{дмк}} + \frac{Tp}{Tp+1} \Delta\alpha_z. \quad (11)$$

Переходя от операторной формы представления аperiodического звена первого порядка к его дискретному виду [25], запишем разностное уравнение для нахождения текущей оценки угла курса и рыскания $\hat{\alpha}_t$:

$$\hat{\alpha}_t = \frac{T}{T+\Delta t} [\hat{\alpha}_{t-1} + \omega_z \Delta t] + \frac{\Delta t}{T+\Delta t} \alpha_{\text{дмк}}, \quad (12)$$

где $\hat{\alpha}_{t-1}$ – оценка суммарного угла курса и рыскания в предыдущий момент времени; ω_z – угловая скорость по показаниям ДУС; $\alpha_{\text{дмк}}$ – значение угла курса и рыскания, полученное по показаниям ДМК; Δt – интервал дискретизации.

В качестве ДУС в системе коррекции МК [13] используется ММГ CRM 100 (Silicon Sensing) [26], имеющий следующие характеристики: диапазон измерения угловой скорости – от $75^\circ/\text{с}$ до $900^\circ/\text{с}$ (настраивается); нестабильность смещения

нуля – не более $24^\circ/\text{час}$, ARW – не более $0,28^\circ/\sqrt{\text{час}}$, ширина полосы пропускания – до 160 Гц.

С учетом технических характеристик этого ММГ, интервала дискретизации $\Delta t = 0,01$ с, а также результатов имитационного моделирования выбрано значение постоянной времени T фильтра: $T = 10$ с.

На рис. 1 приведена блок-схема системы коррекции МК на основе комплементарного фильтра [27], реализованная в МК [13].

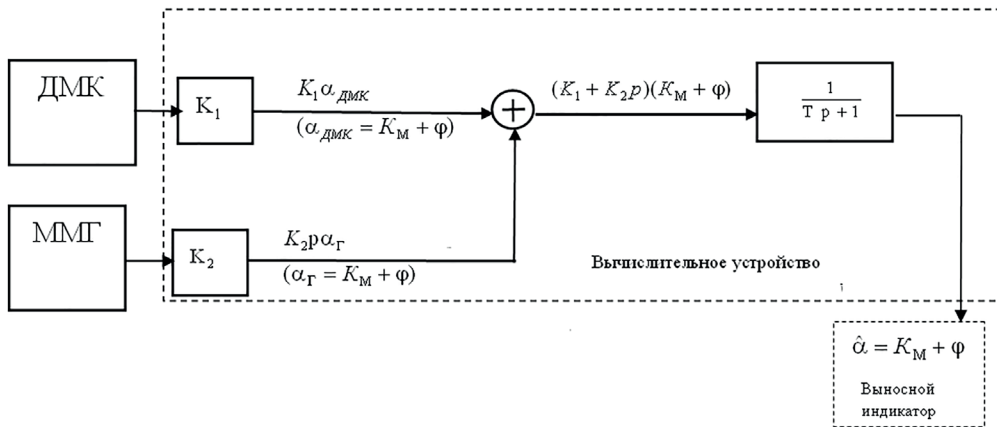


Рис. 1. Блок-схема системы коррекции МК на основе комплементарного фильтра

Чтобы обеспечить условия инвариантности (10), коэффициенты K_1 и K_2 (рис. 1) следует выбирать исходя из условия

$$T = \frac{K_2}{K_1}.$$

В случае если выбирается $K_1 = 1$, то значение коэффициента K_2 должно быть равно постоянной времени: $K_2 = T$. Таким образом, суммарный угол курса и рыскания $K_M + \varphi$ (K_M – курс магнитный, φ – угол рыскания) в соответствии с рис. 1 должен вырабатываться по следующему алгоритму:

- 1) выходной сигнал с датчика ДМК поступает на звено с коэффициентом усиления K_1 , а выходной сигнал с ММГ – на звено с коэффициентом усиления K_2 ;
- 2) сигнал с ДМК $K_1 \cdot \alpha_{\text{ДМК}}$ (где $\alpha_{\text{ДМК}} = K_M + \varphi$) суммируется с сигналом с ММГ – $K_2 p \alpha_2$ (где $\alpha_2 = K_M + \varphi$);
- 3) полученная сумма сигналов подается на вход аperiодического звена $\frac{1}{T p + 1}$. Сигнал с выхода аperiодического звена $\hat{\alpha} = K_M + \varphi$, в котором снижена динамическая погрешность МК от качки, подается на выносной индикатор.

3. Конструктивные решения при реализации системы коррекции в магнитном компасе «Азимут КМ-05Д»

Основным прибором МК [13] является компас магнитный дистанционный (КМД) (рис. 2).

КМД представляет собой визуальный стрелочный магнитный компас с дистанционной электрической и телеметрической передачей курса. Прибор предназначен для

определения магнитного курса судна, магнитных пеленгов и курсовых углов, а также для выдачи в приборы МК магнитного курса по электрическому и телеметрическому каналам передачи.

КМД состоит из нактоуза, котелка, компенсаторов девиации, ручки и основания. Нактоуз с помощью основания крепится к палубе судна. В верхней части нактоуза расположены компенсатор вертикальной составляющей магнитной девиации и блок обработки данных (ОДК). Снаружи по диаметральной линии КМД размещены девиационные устройства – компенсаторы полукруговой девиации, в правой и левой частях – компенсаторы четвертной девиации. Для удобства работы с КМД при пеленговании нактоуз оснащен ручкой.

Котелок КМД (рис. 3, 4) представляет собой замкнутый герметичный сосуд, корпус которого выполнен из алюминиевого сплава, сверху и снизу закрыт прозрачными стеклами. Котелок устанавливается в карданном подвесе в нактоузе. Внутри котелка расположен МЧЭ, содержащий поплавков с положительной плавучестью и шкалу. Основные характеристики МЧЭ МК [13]: магнитный момент кольцевого магнита МЧЭ – не менее $1,3 \text{ А} \cdot \text{м}^2$, период собственных колебаний МЧЭ при $H = 15 \text{ мкТл}$ – 39 с.

В центре МЧЭ расположена опорная втулка в виде конуса. В нижней его части имеется опорный узел (корундовый камень), в который упирается игла колонки. В нижней части поплавка размещены магнитные стрелки и груз. Рабочая камера котелка заполнена смесью нетоксичных демпфирующих жидкостей. В процессе эксплуатации появившиеся в рабочей камере пузыри воздуха убираются в вводную камеру.

В нижней части котелка установлены ММГ (рис. 4) и телевизионная камера для трансляции курса на выносной монитор РК-Т (рис. 2).

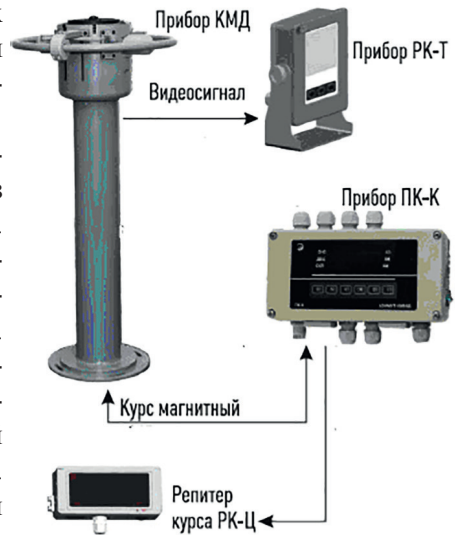


Рис. 2. Состав компаса «Азимут КМ-05Д»

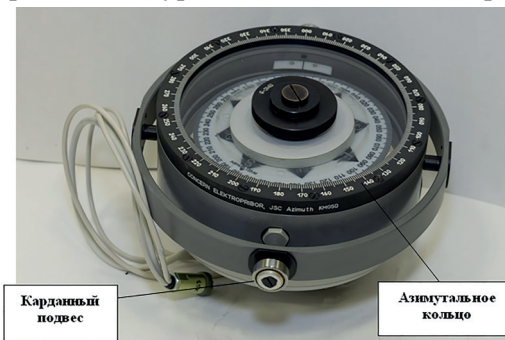


Рис. 3. Котелок прибора КМД

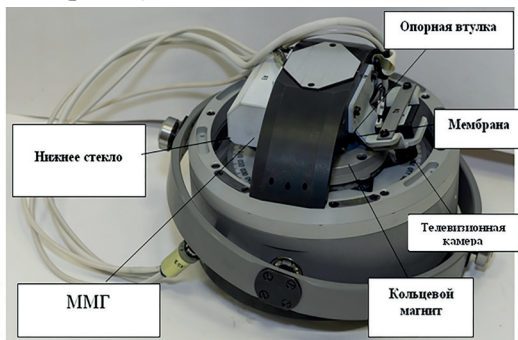


Рис. 4. Вид нижней части котелка

Широкополосный магниторезистивный преобразователь, находящийся в нижней части котелка, преобразует составляющие вектора магнитной системы МЧЭ в сигналы напряжения постоянного тока, пропорциональные синусу и косинусу угла курса судна, которые далее поступают в блок ОДК. В этот же блок поступают и текущие значения выходных сигналов ММГ.

Блок ОДК содержит микроконтроллер, где обрабатываются входные сигналы ММГ и магниторезистивного преобразователя в соответствии с рассмотренной блок-схемой системы коррекции на основе комплементарного фильтра, сигнал с выхода которого, представляющий собой откорректированный угол курса МК, подается в прибор ПК-К (рис. 2), а с выхода этого прибора – на выносной цифровой индикатор.

4. Результаты стендовых испытаний МК «Азимут КМ-05Д» с системой коррекции

Эффективность работы системы коррекции МК [13], построенной на основе комплементарного фильтра с постоянной времени $T = 10$ с для снижения динамической погрешности МК на качке, периоды которой лежат в диапазоне 4–30 с, может быть экспериментально оценена с помощью специализированного стенда [28].

В лабораторных условиях нет возможности воспроизвести добавочное влияние судовых магнитных масс на МК, которые изменяются под действием качки и приводят к еще большему отклонению катушки по углу рыскания. В связи с этим стенд должен имитировать рыскание судна с заданными периодами и формировать с помощью постоянных магнитов дополнительное магнитное поле, воссоздающее возмущающее воздействие на качке судна. Кроме того, стенд должен изменять значение горизонтальной составляющей естественного вектора напряженности магнитного поля Земли, влияющего на магнитную систему МК на разных широтах.

Кинематическая схема стенда представлена на рис. 5, а внешний вид – на рис. 6. Стенд состоит из привода переменного тока, платформы для монтажа котелка МК и двух постоянных магнитов, расположенных на некотором расстоянии от оси разворота привода. Котелок МК установлен на плече l ($l = 0,15$ м) относительно этой же оси разворота.

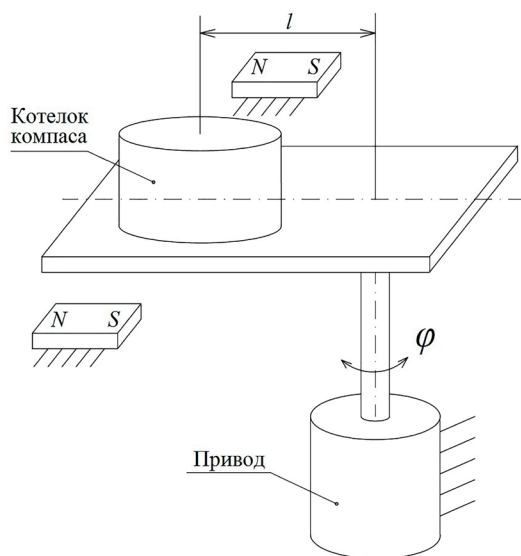


Рис. 5. Кинематическая схема стенда рыскания

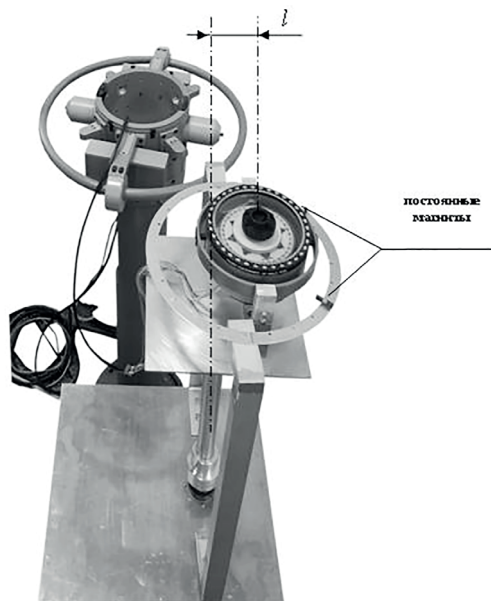


Рис. 6. Стенд рыскания

При развороте котелка на ограниченный угол на катушку МК наводится добавочное магнитное поле, в результате при воспроизведении углового движения по

рысканию картушка компаса будет отклоняться от значения физического рыскания на дополнительный угол. Такая конструкция стенда позволяет приложить к магнитной системе картушки МК еще один магнитный момент, что приводит к ее большему развороту. Этот магнитный момент и имитирует влияние судовых магнитных сил, вызванных качкой. Система коррекции МК при этом должна компенсировать дополнительную погрешность.

Система коррекции испытывалась при использовании опытного образца котелка МК [13], установленного на стенде рыскания, при этом на котелке МК был размещен ММГ CRM 100.

МК с системой коррекции проверялся на 60° с.ш. (горизонтальная составляющая напряженности магнитного поля (15 ± 1) мкТл), угловое движение по рысканию задавалось в диапазоне углов $\pm 10^\circ$ с разными периодами – от 4 с до 30 с.

При этом постоянными магнитами, размещенными вблизи компасного котелка, в крайних (10° и -10°) положениях при угловом движении по рысканию имитировалась креновая девиация, приводящая к дополнительному развороту картушки, т.е. картушка разворачивалась в диапазоне углов порядка $\pm 20^\circ$. Система коррекции МК, компенсируя дополнительную погрешность, должна возвращать показания МК к углам рыскания, заданным стендом (т.е. к углам в диапазоне $\pm 10^\circ$).

На рис. 7 в качестве примера приведены графики углов рыскания, выработанных МК с работающей и отключенной системой коррекции при воздействии постоянных магнитов и заданном движении по рысканию в диапазоне $\pm 10^\circ$ с периодом 20 с. Как видим, система коррекции хорошо справляется с возмущающим воздействием, предельная погрешность по модулю выработки угла рыскания МК не превышает в данном случае $0,5^\circ$.

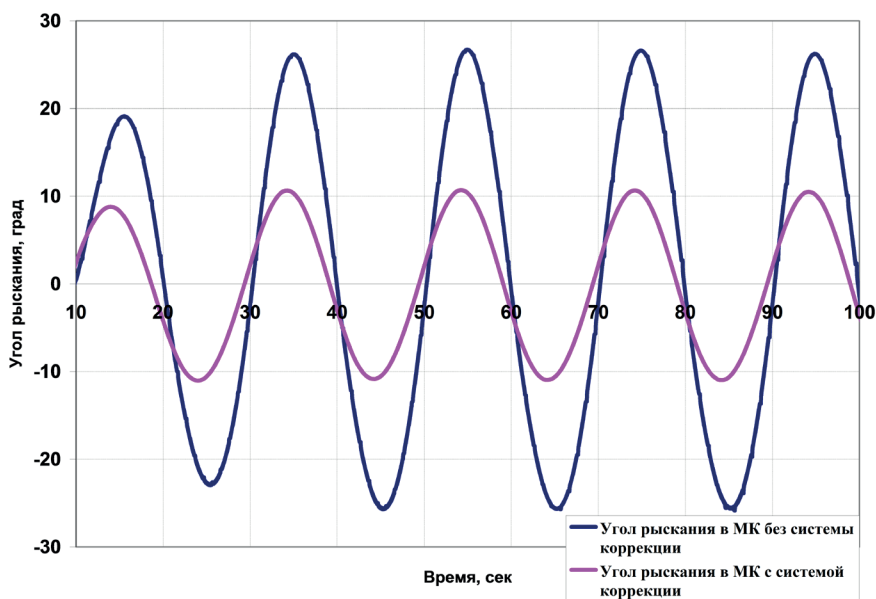


Рис. 7. Углы рыскания, выработанные на стенде при испытаниях МК с работающей и отключенной системой коррекции при воздействии постоянных магнитов и заданном движении по рысканию в диапазоне $\pm 10^\circ$ с периодом 20 с

Оценить работу системы коррекции МК можно посредством коэффициента эффективности, который рассчитывается следующим образом:

$$K_{эф} = \left| DK_{без\ кор}^M \right| / \left| DK_{с\ кор}^M \right|, \quad (13)$$

где $DK_{без\ кор}^M$, $DK_{с\ кор}^M$ – погрешности МК, представляющие собой максимальные значения разностей соответственно выходных сигналов МК без системы коррекции и с системой коррекции и истинных значений углов рыскания.

На рис. 8 приведен график зависимости $K_{эф}$ от периодов возмущающих воздействий (во время стендовых испытаний это периоды заданных гармонических колебаний углов рыскания). Значения $K_{эф}$ находятся в диапазоне от 3,7 до 9,8 при изменении периодов углов рыскания от 4 с до 30 с, при этом максимальное значение $K_{эф}$ соответствует периоду 18 с. Таким образом, стендовые испытания подтвердили результаты имитационного моделирования, при проведении которого постоянная времени комплементарного фильтра была выбрана $T = 10$ с, чтобы наиболее эффективно решить задачу фильтрации для периодов качки от 10 с до 25 с. Обеспечить одинаково высокое значение $K_{эф}$ для всего диапазона периодов качки не представляется возможным, поскольку для каждого периода необходимо выбирать свою постоянную времени T , зависящую в каждом конкретном случае от соотношения погрешностей $\Delta\alpha_{дмк}$ и $\Delta\alpha_2$.

Коэффициент эффективности работы МК с системой коррекции

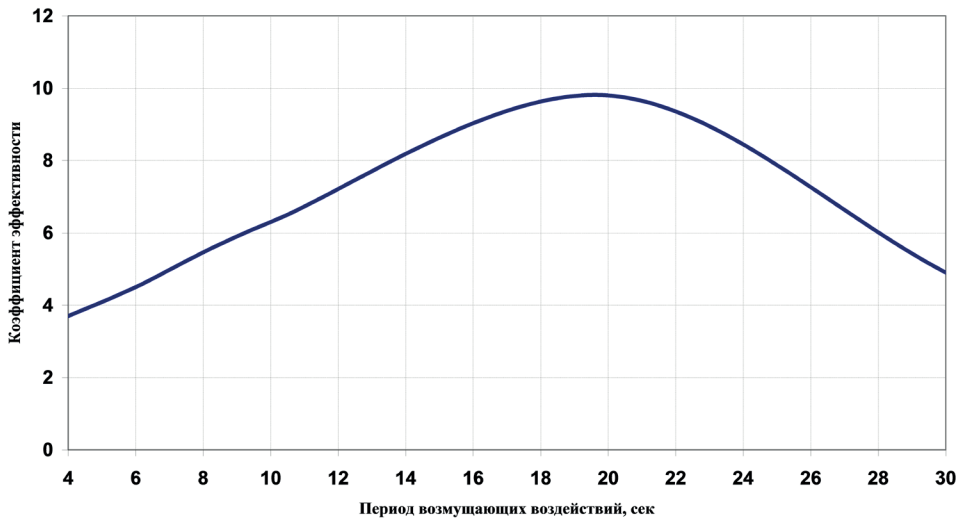


Рис. 8. Зависимость коэффициента эффективности работы системы коррекции МК от периодов возмущающих воздействий по результатам стендовых испытаний

Конструкция стенда рыскания позволяет провести еще один эксперимент, в котором не нужно использовать постоянные магниты, размещенные вблизи котелка.

Поскольку ось стенда рыскания расположена на расстоянии l от оси котелка, то можно оценить погрешность МК с работающей и отключенной системой коррекции при воздействии переносного ускорения $\ddot{\phi} \cdot l$, где $\ddot{\phi}$ – угловое ускорение рыскания. Поскольку плечо l мало, влияние возмущающего воздействия, пропорционального $\ddot{\phi} \cdot l$, будет наибольшим при близости периодов гармонических колебаний углов рыскания и собственных колебаний катушки МК в этой плоскости (период собственных колебаний – 39 с).

На рис. 9 приведены графики выработанных стендом углов рыскания МК с работающей и отключенной системой коррекции в условиях заданного движения по рысканию в диапазоне $\pm 10^\circ$ с периодом 40 с. Из представленных графиков следует, что при частоте возмущения, близкой к частоте собственных колебаний МК, резонанса не возникает. Наоборот, амплитуда колебаний МК [13] уменьшается, что обусловлено наличием большого значения коэффициента вязкого трения $\frac{W_c^\varphi}{2(J_\varphi + \lambda_\varphi)}$ (см. (3)), составляющего не менее $0,7\omega_\varphi$ [29].

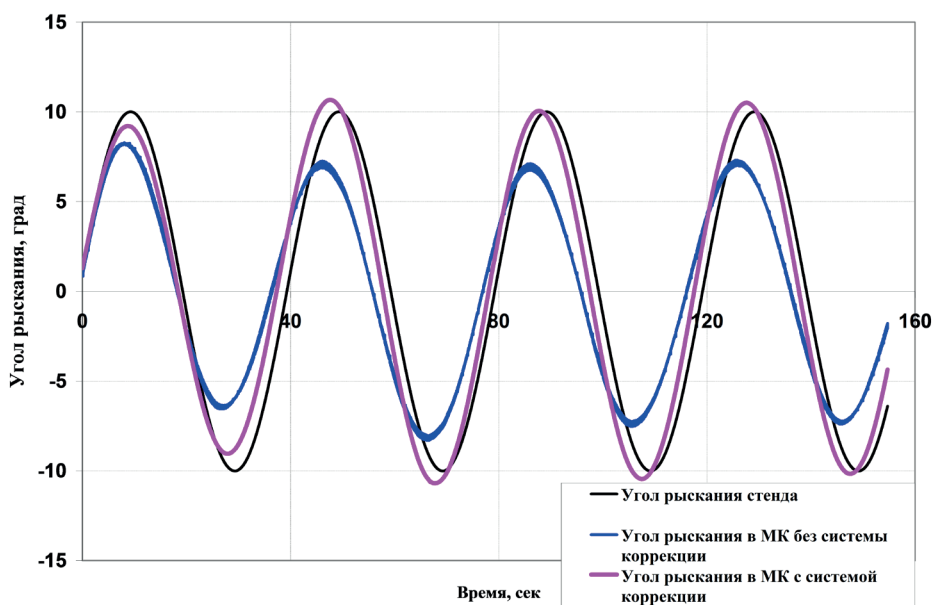


Рис. 9. Углы рыскания, выработанные на стенде при испытаниях МК с работающей и отключенной системой коррекции в условиях заданного движения по рысканию в диапазоне $\pm 10^\circ$ с периодом 40 с

На основании этого рисунка можно сделать вывод о том, что система коррекции хорошо справляется и с этим возмущающим воздействием: предельная погрешность по модулю выработки угла рыскания МК с отключенной системой коррекции составляет 3° , а с работающей системой коррекции не превышает $0,5^\circ$.

Отметим следующее:

- возмущающее воздействие, пропорциональное переносному ускорению $\dot{\phi} \cdot r_y$ (где r_y – отстояние МК по продольной оси судна от его центра качания), будет проявляться и при плавании на тихой воде, т.е. в условиях отсутствия качки судна;
- периоды углового движения по рысканию в диапазоне 35–40 с не являются чем-то исключительным. В частности, законы управления судами в ледовых условиях (при плавании в мелкобитых и тертых льдах) с целью сохранения их устойчивости на курсе и оптимизации маневрирования предполагают рыскание с большими периодами [30, 31]. Учитывая, что граница полярных областей с ледяным покровом распространяется до 60-й параллели, такие параметры рыскания будут характерны для большинства судов, плавающих в этих прибрежных районах России.

5. Результаты натурных испытаний МК «Азимут КМ-05Д» с системой коррекции

Испытания проводились на судне «Азимут» водоизмещением 100 т в акватории Ладожского озера в сентябре 2023 г. Магнитный компас [13] был установлен на верхнем мостике судна. В качестве дополнительного оборудования были задействованы бесплатформенная система ориентации (БСО) «Мининавигация» (АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор») с приемником СНС-сигналов для определения углов качек судна и судовой гирокомпас ГКУ-5 в качестве источника эталонного курса.

В ходе испытаний были выполнены девиационные работы для магнитного компаса с использованием гирокомпаса ГКУ-5. Для проверки влияния нескомпенсированной креновой девиации на эффективность системы коррекции измерения проводились при снятых с нактоуза дополнительных магнитах, которые обычно в штатном режиме применяются для компенсации креновой девиации [32, 33].

На рис. 10, 11 представлены характерные фрагменты записанных реализаций погрешностей МК, полученные с помощью соответствующих разностей выходных сигналов МК с работающей и отключенной системой коррекции и показаний судового гирокомпаса при движении судна прямым курсом в условиях качки. Во время натурных испытаний амплитуда бортовой и килевой качки изменялась соответственно в пределах $(8-17)^\circ$ и $(3-4,5)^\circ$, периоды обеих качек составляли около 4 с.

На рис. 10 представлены графики погрешностей МК с работающей и отключенной системой коррекции (курс судна $K = 40^\circ$, длительность фрагмента записи – 800 с).

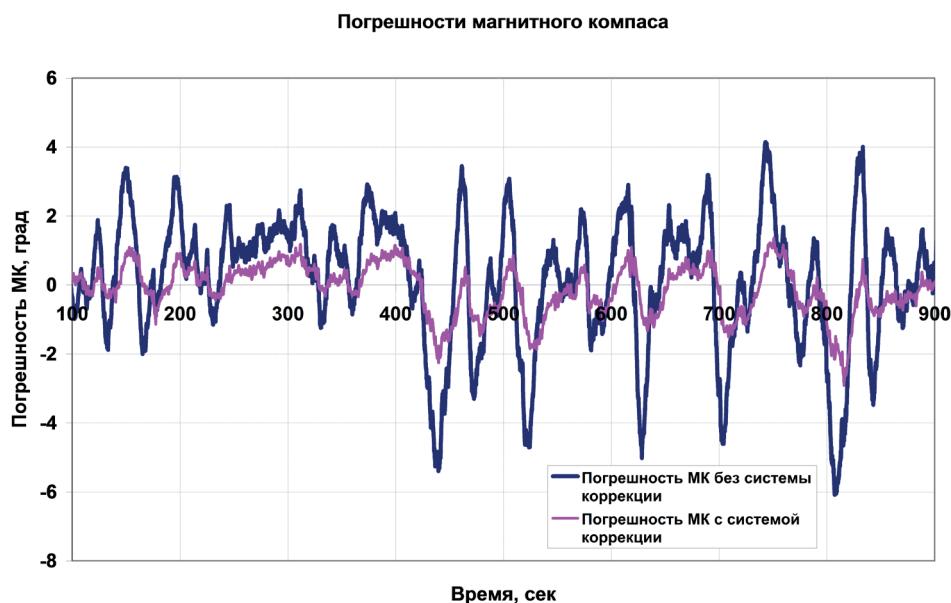


Рис. 10. Погрешности МК с работающей и отключенной системой коррекции (курс судна $K = 40^\circ$)

На рис. 11 представлены графики погрешностей МК с работающей и отключенной системой коррекции (курс судна $K = 0^\circ$, длительность фрагмента записи – 400 с).

В таблице приведены результаты натурных испытаний МК с работающей и отключенной системой коррекции при движении судна прямым курсом в условиях качки.



Рис. 11. Погрешности МК с работающей и отключенной системой коррекции (курс судна $K = 0^\circ$)

Т а б л и ц а

Результаты натурных испытаний МК с работающей и отключенной системой коррекции

Курс судна K , град	Крен θ , град (предельное по модулю значение)	Дифферент ψ , град (предельное по модулю значение)	Погрешность МК без системы коррекции, град (A)	Погрешность МК с системой коррекции, град (B)	$K_{эф} = A/B$
0	8,0	3,1	4,5	1,3	3,5
40	15,1	4,5	5,9	2,5	2,4
102	9,8	3,8	3,9	1,2	3,3
50	17,0	4,5	6,2	2,6	2,4
230	9,8	3,8	4,8	1,5	3,2

Натурные испытания МК показали, что в условиях бортовой качки с амплитудой до 17° и килевой качки с амплитудой до $4,5^\circ$ и периодами обеих качек около 4 с применение в измерительной схеме МК системы коррекции приводит к снижению его погрешности, при этом коэффициент эффективности системы коррекции $K_{эф}$, зависящий от периодов качки, находится в пределах от 2,4 до 3,5. Это согласуется с полученными результатами испытаний на стенде рыскания с дополнительными магнитами, имитирующими влияние креновой девиации, где для периодов рыскания около 4 с $K_{эф} = 3,7$.

Выводы

По результатам исследований можно сделать следующие выводы:

- при плавании судна в условиях качки появляются динамические погрешности МК, обусловленные влиянием перераспределенных сил судового магнетизма,

а также переносных ускорений при установке МК на некотором расстоянии от центра качания судна, по причине которых на магнитную систему картушки действует проекция вертикальной составляющей магнитного поля Земли. Наиболее критичны эти погрешности для малых рыболовецких судов, где МК используется в системе авторулевого. Кроме того, они пропорциональны тангенсу магнитного наклона и могут иметь недопустимо большие значения при плавании в высоких широтах;

- динамические погрешности МК появляются и в отсутствие качки при воздействии углового ускорения рыскания, обусловленного установкой МК на некотором расстоянии от центра качания по продольной оси судна. В наибольшей степени этим динамическим погрешностям подвержены МК, размещенные на судах, плавающих во льдах и имеющих периоды рыскания, близкие к периоду собственных колебаний картушки в этих широтах;
- динамические погрешности МК могут быть снижены с помощью введения в измерительную схему МК системы коррекции, основу которой составляют применение и обработка выходной информации двух датчиков – ДМК и ММГ с вертикально расположенной осью чувствительности, обладающих разными динамическими свойствами;
- полученные результаты стендовых испытаний МК [13] с системой коррекции подтвердили эффективность построения этой системы на основе комбинированного фильтра, позволяющего уменьшить динамические погрешности МК в 3,5-9,8 раз в зависимости от преобладающих частот (периодов) качки судна;
- коэффициент эффективности МК с системой коррекции по результатам натурных испытаний МК [13] в акватории Ладожского озера, где периоды качки не превышают 4 с, составил 2,4-3,5, что согласуется с результатами стендовых испытаний.

Полученные результаты могут найти применение при разработке современных МК, обеспечивающих за счет использования системы коррекции более высокую точность курсоуказания. Кроме того, система позволяет также повысить стабильность текущего показания курса на цифровом индикаторе рулевого при воздействии качки, что делает управление судном более эффективным.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 23-29-00090.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хау В.С., Иванов В.Э., Нгуен Д.Т. Использование сигналов навигационных систем ГЛОНАСС/GPS для коррекции показаний цифрового магнитного компаса // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. 2020. Вып. 1. Ч. 1.
2. Зиновьев П.Д., Кветкин Г.А. Корректируемая бесплатформенная инерциальная навигационная система на базе микромеханических датчиков первичной информации // Известия ТулГУ. Технические науки. 2016. Вып. 6.
3. Муравьев Л.А. Возможности высокочувствительных магнитометров POS при проведении геомагнитных съемок // Уральский геофизический вестник. 2007. №10.
4. Ильин Е.В., Ситникова А.А. О возможности применения навигационных GPS-приемников при полевых геофизических исследованиях // Уральский геофизический вестник. 2005. №7.
5. Галкин В.И., Кузин Е.В., Кондратьев А.В. Формирование гироманнитного курса в микромеханической курсовертикали // Навигация и управление летательными аппаратами. 2023. №1(40).
6. [Электронный ресурс] URL: <https://furuno.ru/navigacija/ukazatel-kursa/pg-700/> (дата обращения: 25.01.2024).

7. Дегтярев Н.Д. Стрелочные магнитные компасы. Л.: ЦНИИ «Румб», 1984.
8. Нечаев П.А, Григорьев В.В. Магнитно-компасное дело / 4-е изд. М.: Транспорт, 1983.
9. Рыбалтовский Н.Ю. Магнитно-компасное дело. Л.: Государственное издательство водного транспорта, 1954.
10. [Электронный ресурс] URL: <https://radiomarine.ru> (дата обращения: 27.01.2024).
11. [Электронный ресурс] URL: <https://www.sperrymarine.com> (дата обращения: 09.02.2024).
12. [Электронный ресурс] URL: <https://www.tokyokeiki.jp> (дата обращения: 10.02.2024).
13. [Электронный ресурс] URL: <http://www.elektropribor.spb.ru/katalog/navigatsionnye-pribory/azimut-km05d-vseshirotnuyu-magnitnyu-kompas> (дата обращения: 11.02.2024).
14. Кардашинский-Брауде Л.А. Современные судовые магнитные компасы. Санкт-Петербург: ФГУП ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 1999.
15. Крылов А.Н. Возмущения показаний компасов, происходящих на качке корабля на волнении // Крылов А.Н. Избранные труды. М.: Изд. АН СССР, 1958. С. 115–170.
16. Семенов-Тянь-Шанский В.В., Благовещенский С.Н., Холодилин А.Н. Качка корабля. Л.: Судостроение, 1969.
17. Кочин Н.Е, Кибель И.А, Розе Н.В. Теоретическая гидромеханика. Часть 1. М.: Гос. изд. физико-математической литературы, 1963.
18. Кожухов В.П., Воронов В.В., Григорьев В.В. Девиация магнитного компаса. М.: Транспорт, 1981.
19. Дмитриев В.И., Евменов В.Ф., Каратаев О.Г., Ракитин В.Д. Технические средства судовождения. М.: Транспорт, 1990.
20. 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.
21. Кардашинский-Брауде Л.А. Девиация магнитных компасов. Л.: ЦНИИ «Румб», 1986.
22. Матвеев В.В. Анализ комплементарных фильтров при построении бескарданной гировертикали // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2019. №8. С. 153–164.
23. Ивойлов А.Ю. О применении МЭМС-датчиков при разработке системы автоматической стабилизации двухколесного робота // Сборник научных трудов НГТУ. 2017. №3 (89). С. 32–51.
24. Степанов О.А., Мансур М. Алгоритмы комплексной обработки в задаче коррекции показаний навигационных систем при наличии нелинейных измерений // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 6. С. 89–102
25. Зо Мью Наин, Щагин А.В., Ле Винь Тханг, Хтин Линн У. Комплементарный фильтр для оценки угла с использованием микромеханической системы гироскопа и акселерометра // Инженерный вестник Дона. 2020. №3.
26. [Электронный ресурс] URL: <https://www.siliconsensing.com> (дата обращения: 25.01.2024)
27. Матвеев Ю.В., Грязин Д.Г., Падерина Т.В. Способ измерения магнитного курса с использованием системы коррекции, патент RU 2804444, дата регистрации 29.09.2023.
28. Грязин Д.Г. Способ определения динамической погрешности магнитного компаса с системой коррекции от качки и устройство для его реализации, патент RU 2783479, дата регистрации 14.11.2022.
29. Бутиков Е.И. Осциллятор с сухим и вязким трением. [Электронный ресурс]. Режим доступа URL: http://butikov.faculty.ifmo.ru/Applets/manlr_2.pdf (дата обращения 09.02.2024).
30. Лобанов В.А. Численная оценка ледовых качеств судна. Управляемость // Вестник научно-технического развития. 2012. №8.
31. Лобанов В.А. Совместное маневрирование судов во льдах на малых расстояниях // Науковедение. 2014. №6. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/104TVN614.pdf>.
32. Грязин Д.Г., Сергачев И.В. Влияние внешних факторов на переходные процессы магнитных компасов в высоких широтах // Известия высших учебных заведений. Серия «Приборостроение». 2020. Т. 63. №10. С. 921–929.
33. 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: АО «Концерн» ЦНИИ «Электроприбор», 2020. С. 122–125.

Gryazin, D.G. (Concern CSRI Elektropribor, JSC; ITMO Unoversyty, St. Petersburg), **Paderina, T.V.** (Concern CSRI Elektropribor, JSC)

Magnetic Compass with Dynamic Error Correction System, *Giroskopiya i Navigatsiya*, 2024, vol. 32, no. 2 (125), pp. 133–150.

Abstract. The article studies the operation results for a magnetic compass (MC) with a system for correcting dynamic errors. The efficiency of using a correction system to reduce MC errors occurring under the ship roll and pitch motion and conditioned by the influence of the ship's redistributed magnetic forces (heeling deviation) and translational accelerations if the compass is installed at some distance from the ship's oscillation center, is estimated. The article analyzes the disturbing forces acting on the MC during roll and pitch motion and leading to its errors. The correction system based on a complementary filter using a MEMS gyroscope (MMG), implemented in the MC Azimuth KM-05D, is considered. The results from bench and field tests of the magnetic compass are presented, which confirm the effectiveness of this correction system.

Key words: magnetic compass, heeling deviation, translational accelerations, MEMS gyroscope, complementary filter.

Материал поступил 02.03.2024