
ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 54.07; 54.08; 531.717.35; 621.45.018.2
DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-567-575

НОВЫЕ СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ МАГНИТНЫХ КОМПАСОВ

Д. Г. ГРЯЗИН^{1,2}, К. С. ГОРОХОВСКИЙ¹

¹АО «Концерн „ЦНИИ „Электроприбор“», 197046, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: volnagdg@yandex.ru

²Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

Приводятся результаты разработки средств испытаний магнитных компасов в динамическом режиме. Показано влияние внешних воздействующих факторов на погрешность судового магнитного компаса, обусловленную качкой судна. Предложены результаты разработки двух стендов, имитирующих воздействие качки на картушку магнитного компаса, в том числе в условиях высоких широт. Разработана методика оценивания его динамической погрешности при воздействии, соответствующем реальной качке судна. Особое внимание уделено стенду для оценки эффективности работы системы коррекции магнитных компасов. На основе анализа результатов экспериментальных исследований сделан вывод, что разработанные стенды могут быть использованы для оценки погрешностей любых магнитных компасов.

Ключевые слова: *стенды, магнитный компас, погрешность, бортовая качка, высокие широты, малое значение горизонтальной составляющей магнитного поля Земли*

Введение. Магнитные компасы (МК) традиционно используются на кораблях и судах в составе навигационного оборудования. Развитием навигационного приборостроения, а также новыми экономическими тенденциями обусловлены и новые требования к этим традиционным приборам [1]. Наряду с этим в 2020 г. принята Стратегия развития Арктической зоны [2], которая, в том числе, обозначила и более интенсивное развитие судоходства в северных морях. Отдельное внимание в этом документе уделяется обеспечению безопасности при интенсивной эксплуатации Северного морского пути.

За последние годы АО «Концерн „ЦНИИ „Электроприбор“» достигнуты особые успехи в создании судовых МК, работающих в условиях высоких широт. Отметим, что технические решения, заложенные в высокоширотные МК, должны обеспечивать их функционирование при малом значении горизонтальной составляющей вектора магнитного поля Земли, а также уменьшение креновой погрешности, которая проявляется при работе МК на качке и зависит от курса судна. В значительной степени эта погрешность проявляется в высоких широтах. Одним из путей уменьшения погрешности, обусловленной качкой, является применение дополнительной системы коррекции показаний МК. Такая система может быть основана на дополнительном измерении углов рыскания с помощью гироскопического датчика угловой скорости [3]. В этом случае МК приобретает свойства гиромагнитного компаса. Разработка и исследования приборов, оснащенных такими системами коррекции, потребовали формирования

новых методов и средств контроля характеристик МК. Следует отметить, что методам калибровки и устранения девиации магнитных компасов посвящено множество работ (например [4, 5]), однако все предлагаемые методики направлены на оценку статических погрешностей МК и предлагают пути их уменьшения. При эксплуатации МК на качке определяющее значение имеет его динамическая погрешность, что доказано в трудах акад. А. Н. Крылова [6]. При использовании компаса в высоких широтах эта погрешность может увеличиться многократно.

Погрешность магнитного компаса, обусловленная качкой. Намагниченность судового железа приводит к искажению естественного магнитного поля Земли, на которое реагирует картушка МК, и вызывает девиацию. Девиация, определяемая как угол между плоскостями магнитного и компасного меридианов [7], характеризует погрешность МК. Она имеет постоянную и переменную составляющие, при этом зависит от курса судна.

Напряженность магнитного поля однородно намагниченного судна в точке размещения чувствительного элемента МК описывается уравнениями Пуассона [8]:

$$\begin{aligned} X_k &= X + aX + bY + cZ + P; \\ Y_k &= Y + dX + eY + fZ + Q; \\ Z_k &= Z + gX + hY + kZ + R, \end{aligned}$$

где X_k, Y_k, Z_k — компоненты вектора напряженности магнитного поля судна, действующие на чувствительный элемент компаса и направленные по корабельным осям координат; X, Y, Z — компоненты вектора напряженности магнитного поля Земли, направленные по корабельным осям координат; $a, b, c, e, f \dots k$ — постоянные коэффициенты, называемые параметрами Пуассона, характеризующие тензор влияния индуктивной намагниченности, которая зависит от широты места и перемагничивания магнитомягкого железа; P, Q, R — проекции вектора постоянной намагниченности корабельных конструкций на корабельные оси координат.

Из уравнений следует, что приближенно девиация δ может быть описана выражением [9]

$$\delta = A + B \sin K_M + C \cos K_M + D \sin 2K_M + E \cos 2K_M,$$

где K_M — магнитный курс, измеряемый компасом; A — постоянная девиация; B и C — полукруговая девиация, а D и E — четвертная; причем названия видов девиации определяются количеством ее переходов через нулевые значения при изменении курса судна на 360° ; таким образом, коэффициенты B и C вызваны постоянной намагниченностью судна, а коэффициенты A, D и E его индуктивной намагниченностью.

Значительную часть девиации устраняют путем разворота специальных магнитов и установки вблизи котелка МК брусков из магнитомягкого железа. Эти элементы подбирают и ориентируют относительно магнитной системы прибора при девиационных работах, выполняемых при постройке судна или в порту перед его выходом в море.

Уравнения Пуассона соответствуют состоянию судна, не имеющего крена и дифферента. При наличии углов крена и дифферента последствия намагничивания судна магнитным полем Земли будут иными, чем для судна, находящегося на „ровном“ киле. Поскольку чувствительный элемент компаса обладает свойствами короткопериодного физического маятника, то он стремится к горизонтальному положению.

При отклонении судна от горизонтального положения возникает креновая девиация $\delta_{кр}$, величина которой зависит от проекции вертикальной составляющей индукции (напряженности) магнитного поля судна R на плоскость картушки МК и определяется величиной его крена и дифферента. Таким образом, при крене судна на угол θ возникает добавочный компонент в горизонтальной составляющей магнитного поля Земли Y_k , измеряемой МК [8]:

$$\Delta Y_k = [(e - k)Z - R] \cdot \sin \theta.$$

Этот компонент зависит от знака угла крена и на качке имеет знакопеременный характер, в связи с чем он проявляется в виде „рыскания“ показаний МК при качке и постоянной ошибки при статическом крене. Следует отметить, что в составляющих ΔY_k присутствуют

члены, зависящие от компоненты Z вектора напряженности магнитного поля Земли, таким образом, при изменении магнитной широты места будет изменяться и составляющая $\delta_{кр}$.

Как указано акад. А. Н. Крыловым [6], креновая девиация пропорциональна тангенсу угла наклона судна: чем тангенс меньше, тем меньше креновая погрешность $\delta_{кр}$.

В практике девиационных работ устранение креновой девиации осуществляется устройствами на основе постоянных магнитов, размещаемых в нактоузе МК и создающих в области чувствительного элемента компенсирующее магнитное поле R , но в противоположном направлении. Методики устранения креновой девиации описываются в эксплуатационной документации МК или в других нормативных документах (например, в [10]).

Точность существующих методов устранения креновой девиации при плавании в средних магнитных широтах составляет около $0,1^\circ$ на 1° крена [9].

Поскольку компенсирующее поле создается на конкретной магнитной широте и с конечной точностью, некомпенсированное значение креновой девиации $\delta_{кр}$ будет присутствовать в показаниях МК в качестве переменной составляющей, зависящей от курса, крена и дифферента судна.

Соответственно при значительном изменении географических координат судна компонента Z изменится и условие компенсации будет нарушено.

Кроме указанной причины, как отмечено в работе [11], колебания картушки МК вокруг вертикальной оси на качке могут происходить вследствие неравенства моментов инерции картушки относительно направлений NS и OW, т.е. из-за действия ускорений на картушку при условии воздействия на нее проекции вертикальной составляющей магнитного поля Земли. Эта погрешность определяется выражением

$$\delta_b = \arcsin \left(\frac{h}{l_0} \theta \cdot \operatorname{tg} H \cos K_M \right),$$

где h — высота картушки компаса над осью качаний судна; l_0 — длина маятника с периодом колебания $\tau = 2\pi\sqrt{l_0/g}$, соответствующим периоду колебаний судна; H — магнитное наклонение (угол между вертикальной и горизонтальной составляющими вектора магнитного поля Земли).

Следует отметить, что погрешность МК, вызванная влиянием ускорений, подробно рассмотрена в трудах акад. А. Н. Крылова [6] и в работах его последователей [12]. Таким образом, на картушку МК будет действовать обусловленная частотой качки ω суммарная погрешность δ_p , величина которой в условиях плавания в высоких широтах может быть значительной:

$$\delta_p(\omega) = \sqrt{\delta_{кр}^2(\omega) + \delta_b^2(\omega)}.$$

Указанная погрешность в требованиях регистра к МК [1] не нормируется.

Стенды для оценки характеристик магнитных компасов при воздействии качки.

С целью оценки значения динамической погрешности МК в АО «Концерн „ЦНИИ „Электроприбор“» был разработан стенд для воспроизведения угловых колебаний картушки МК. Кинематическая схема стенда приведена на рис. 1. Стенд представляет собой две треугольные опоры, жестко связанные между собой продольными планками. В опорах, на подшипниках, закреплена штанга, на которой в двухступенном кардановом подвесе установлен котелок МК. Колебания котелка воспроизводятся с помощью редукторного привода с двигателем переменного тока, который не вносит искажений в постоянное магнитное поле вблизи котелка. Опоры имеют винтовые ножки для установки котелка компаса в горизонтальное положение. Стенд может воспроизводить колебания по одной оси. В случае если одна из осей карданова подвеса не будет совмещена с осью разворота стенда, а будет развернута по отношению к ней на 45° , возможно воспроизведение колебаний одновременно как по оси крена, так и дифферента.

Однако в этом случае разворот котелка по двум осям будет сопровождаться дополнительной систематической кардановой погрешностью. При колебаниях стенда эта погрешность будет вносить в результаты измерений дополнительную гармоническую составляющую, изменяющуюся с удвоенной частотой [13].

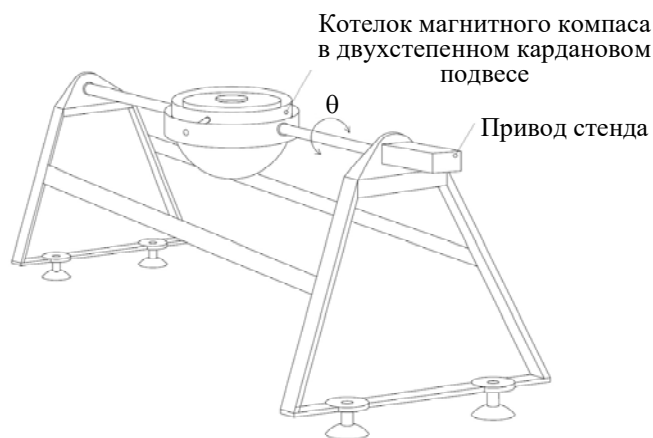


Рис. 1

Следует отметить, что в течение последних лет экспериментальная база АО «Концерн „ЦНИИ „Электроприбор“» пополнилась электромагнитным стендом, позволяющим воспроизводить в его камере различные значения вертикальной и горизонтальной составляющих постоянного магнитного поля Земли. Указанный электромагнитный стенд (рис. 2) имеет цилиндрическую форму и предназначен для испытаний магнитных компасов в статическом режиме, его высота 3 м, диаметр 4 м. Стенд состоит из защитного экрана, уменьшающего влияние промышленных помех, внутри экрана установлены пара вертикальных и пара горизонтальных колец Гельмгольца, между которыми образуется пространство с необходимым однородным направлением магнитного поля по осям X и Z и однородной напряженностью магнитного поля. На полу стенда установлено поворотное устройство, а в его стенке имеется дверь. На каждую пару колец подается регулируемое напряжение постоянного тока от двух источников питания. Направление вектора магнитного поля и его напряженность контролируются с помощью трехкомпонентного магнитометра.

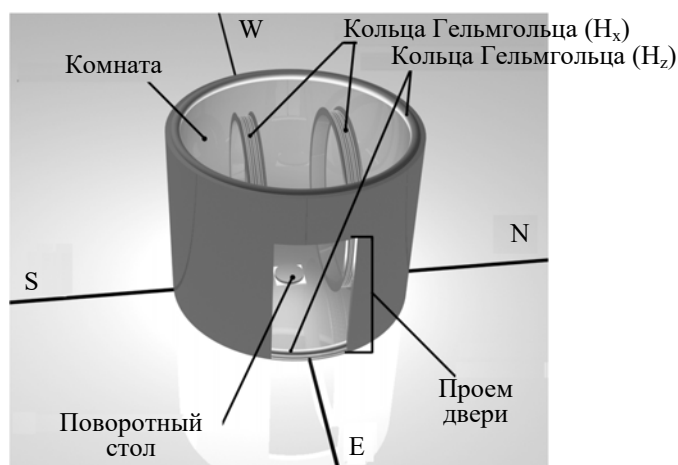


Рис. 2

Конструктивное исполнение стенда качки (см. рис. 1) позволяет размещать его внутри электромагнитного стенда таким образом, что котелок устанавливается в области неискаженного магнитного поля (рис. 3). Совместное использование двух стендов позволяет имитировать колебания котелка МК при значениях составляющих вектора магнитного поля Земли, соответствующих высоким широтам.



Рис. 3

Воспроизведение гармонических угловых колебаний котелка МК на задаваемых попеременно частотах не позволяет в полной мере оценить динамическую погрешность измерений курса при воздействии бортовой качки. Представляет интерес экспериментальная оценка погрешности компаса, вызванной качкой с заданным спектром частот, соответствующим реальной качке судна [14]. Метод оценивания погрешности в этих условиях был апробирован на двух режимах качки в условиях магнитного поля, соответствующего умеренным широтам. Первый режим воспроизводил бортовую качку с шириной спектра, имеющего период колебаний от 6 до 25 с, при этом амплитуда в 30 % случаев не превышала 9° , средний период качки 11 с, закон распределения близкий к нормальному. Этот спектр соответствует качке, например, научно-исследовательского судна „Ванкувер“ водоизмещением 5000 т на волнении 5 баллов [15]. Второй режим воспроизводил бортовую качку такую же, как при первом режиме, средняя амплитуда качки 6° , максимальное значение спектра обеспечивается при периоде колебаний 8—7 с, максимальный размах качки $\pm 19^\circ$, что соответствует качке сейнера „Дальнереченск“ водоизмещением 1000 т на волнении 5 баллов [16]. Графики спектральной плотности качки, воспроизводимой стендом в режиме 1 и в режиме 2, представлены на рис. 4, а, б соответственно.

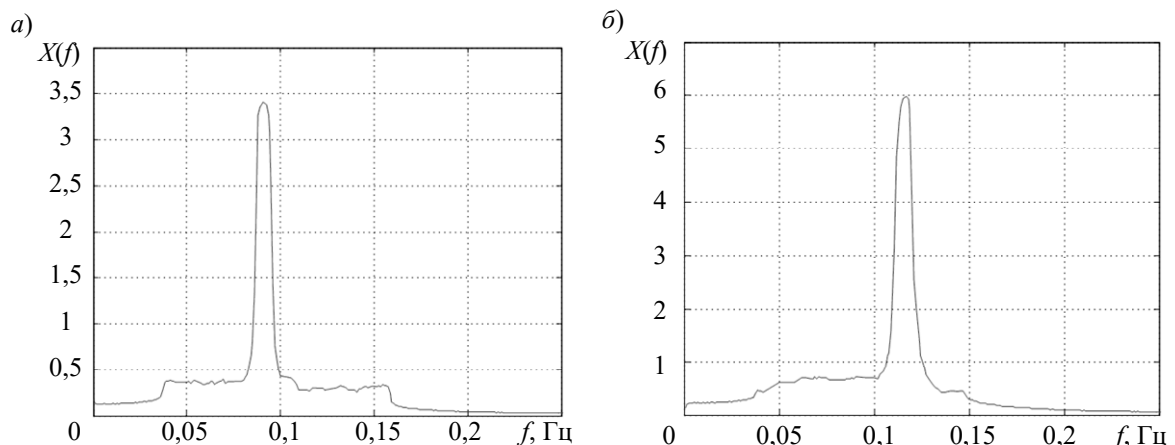


Рис. 4

Исследования проводились с использованием котелка МК „Азимут 125“. Перед проведением исследований была выполнена запись промышленных шумов на выходе датчика угла стенда, которые учитывались при дальнейшей обработке записанных реализаций. Графики спектральной плотности погрешностей МК при воздействии качки, построенные по результатам

обработки реализаций выходного сигнала компаса при неизменном курсе, записанных при первом и втором режимах, представлены на рис. 5, а, б соответственно.

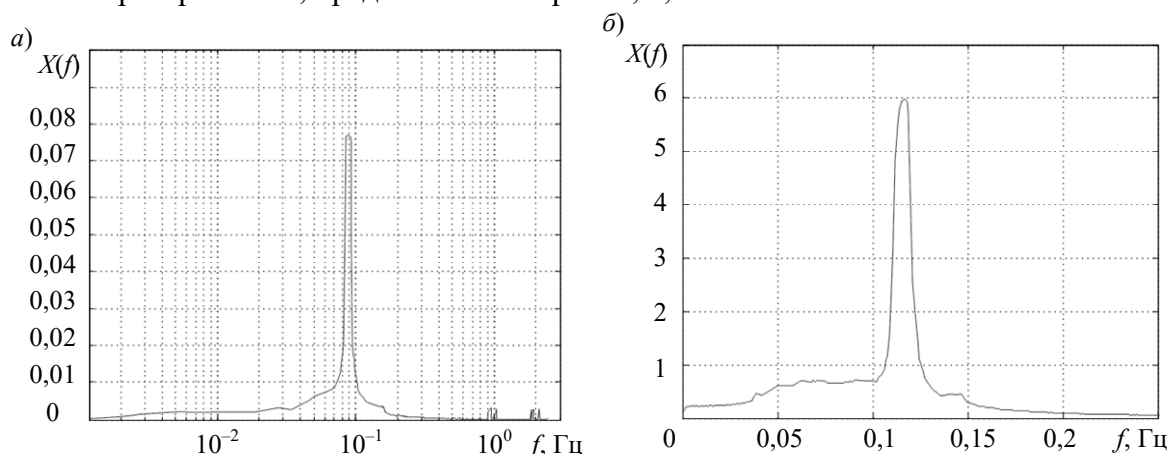


Рис. 5

Как видно из графиков, наибольшее значение погрешности наблюдается на частотах, соответствующих пику спектрального максимума качки. Значение СКО погрешности МК в первом режиме качки составило $0,33^\circ$, а во втором — $0,48^\circ$, что соответствует расчетным значениям погрешности и не превышает требований регистра [1]. Следует отметить также, что полученные значения погрешностей согласуются с выводами В. П. Кожухова [8], что остаточная девиация, обусловленная креновой погрешностью, на широте Санкт-Петербурга не превышает $0,1^\circ$ на 1° крена. Компенсация указанной погрешности может производиться путем оснащения МК дополнительной системой коррекции, работа которой подробно отражена в [3]. Эффективность работы МК с такой системой коррекции может быть экспериментально оценена с помощью созданного стенда рыскания.

Стенд рыскания для оценки эффективности работы системы коррекции МК. Стенд должен имитировать рыскание судна с заданной частотой. Кроме того, стенд должен изменять значение горизонтальной составляющей естественного вектора напряженности магнитного поля Земли, воздействующего на магнитную систему МК.

Кинематическая схема стенда представлена на рис. 6, а, а внешний вид — на рис. 6, б.

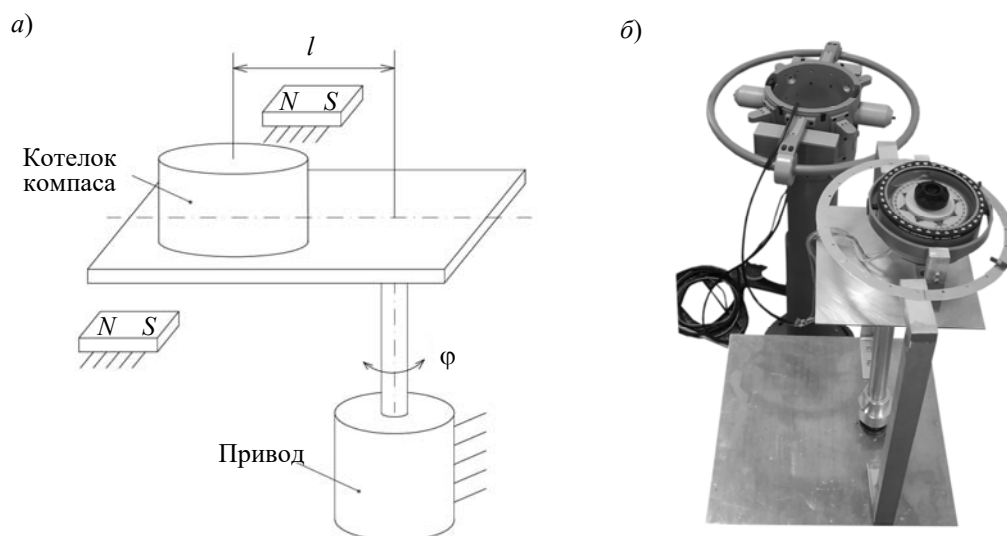


Рис. 6

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 относительно этой же оси разворота. При развороте котелка на ограниченный угол на катушку МК наводится дополнительное магнитное поле,

имитирующее изменяющуюся креновую погрешность. Таким образом, при воспроизведении рыскания картушка компаса будет отклоняться от значения физического рыскания на дополнительный угол. Система коррекции при этом должна компенсировать воздействие дополнительной креновой погрешности.

Стенд рыскания может быть также использован для оценки точности работы МК при циркуляции судна. Для этого следует демонтировать постоянные магниты и воспроизводить разворот котелка с необходимой угловой скоростью на заданный угол.

Исследование характеристик стенда показало, что отклонение картушки МК при развороте стенда в два раза больше воспроизводимого угла рыскания. Характеристика отклонения при калибровке стенда с помощью МК „Азимут 125“ представлена на рис. 7, где (по осям) σ_k — отклонение картушки компаса, $\sigma_{ст}$ — отклонение стенда в плоскости рыскания.

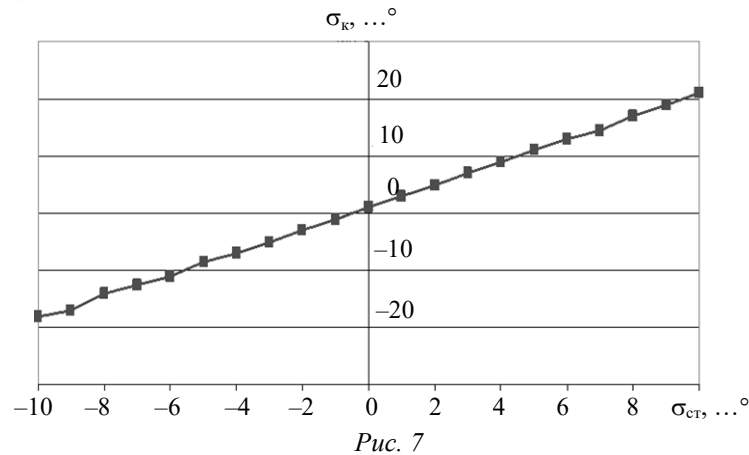


Рис. 7

Исследование макета МК с дополнительной системой коррекции на разработанном стенде показало эффективность его применения при настройке системы коррекции. Отметим, что стенд рыскания, как и стенд качки может быть установлен в электромагнитный стенд (см. рис. 2) для исследования эффективности работы системы коррекции МК в условиях высоких широт.

Заключение. Анализ литературных источников показывает, что исследованиям динамических характеристик МК уделяется недостаточно внимания. По-видимому, это обусловлено отсутствием требований к ним со стороны правил Регистра. Однако развитие МК трудно представить без подобных исследований, кроме того, отсутствие информации о динамических характеристиках затрудняет выполнение сравнительной оценки качества МК, выпускаемых разными производителями.

В работе представлен комплекс нестандартизованных средств испытаний для регулировки МК и оценки их динамических характеристик. Комплекс оборудования позволяет воспроизводить условия качки, а также воздействия на картушку дополнительных сил, обусловленных качкой судна. Разработанные методы позволяют оценивать погрешность МК на качке, а также выполнить эффективную регулировку системы коррекции МК. Рассмотренные методы и средства прошли апробацию, результаты которой соответствуют теоретическим расчетам креновой погрешности и могут быть рекомендованы при контроле характеристик всех известных МК.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 20-08-00265.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила по оборудованию морских судов. Часть V. Навигационное оборудование. СПб: Российский морской регистр судоходства, 2020. С. 246.
2. Указ Президента РФ от 26 октября 2020 г. № 645 „О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года“ [Электронный ресурс]: <<https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74710556/>>, 02.02 2021.

3. Пат. 268890 РФ, МПК G01C 17/30. Способ измерения магнитного курса судна в высоких широтах и его реализация / В. М. Зиненко, Д. Г. Грязин, А.А. Молочников и др. 2019.
4. Пат. 2623192 РФ, G01C17/28. Способ калибровки электронного магнитного компаса / А. Ю. Каплин, М. Г. Степанов и др. Оpubл. 22.06.2017.
5. Мишенков В. С., Козлов П. Г., Федюк Р. С. Основная составляющая погрешности магнитного компаса // Современная техника и технологии. 2017. № 5 [Электронный ресурс]: <<http://technology.snauka.ru/2017/05/13257>>, 02.02.2021.
6. Крылов А. Н. О возмущениях показаний компасов, происходящих на качке корабля на волнении // Избранные труды акад. А. Н. Крылова. М.: Изд-во АН СССР, 1958. С. 115—170.
7. Скворцов М. И. Основы кораблевождения. М.: Военное изд-во МО СССР, 1972. 316 с.
8. Кожухов В. П., Воронов В. В., Григорьев В. В. Магнитные компасы. М.: Транспорт, 1981. 212 с.
9. Кардашинский-Брауде Л. А. Современные судовые магнитные компасы. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 1999. 138 с.
10. Правила Штурманской службы / ПШС № 38 / Девиационные работы на кораблях и судах военно-морского флота. СПб: ГУНиО МО РФ, 2009.
11. Рыбалтовский Н. Ю. Магнитно-компасное дело. М.: Гос. изд-во водного транспорта, 1954. 612 с.
12. Кардашинский-Брауде Л. А. Повышение динамической устойчивости показаний судовых магнитных компасов при горизонтальных ускорениях [Электронный ресурс]: <<http://www.navydevices.ru/informations/section-publications/publications/85-2002-09-21-13-29-52>>, 23.07.2020.
13. Ишлинский А. Ю. Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. М.: Наука, 1976. С. 671.
14. Пат. 2718691 РФ, G01D 3/00. Способ определения динамической погрешности магнитного компаса, вызванной качкой, и устройство для его реализации / Д. Г. Грязин, К. С. Гороховский. Оpubл. 13.04.2020. Бюл. № 11.
15. Прикладные задачи динамики судов на волнении / Под ред. И. К. Бородая. Л.: Судостроение, 1989. С. 51.
16. Труб М. С., Грязин Д. Г., Андреев И. Н. Комплексные натурные испытания сейнера-траулера „Дальнереченск“ / ЦНИИ им. А. Н. Крылова // Науч.-техн. сб. „Судостроительная промышленность“. Сер. „Проектирование судов“. 1991. Вып. 18. С. 43—56.

Сведения об авторах

- Дмитрий Геннадиевич Грязин** — д-р техн. наук, доцент; АО «Концерн „ЦНИИ „Электроприбор“»; главный метролог - начальник отдела 068; Университет ИТМО; E-mail: volnagdg@yandex.ru
- Константин Сергеевич Гороховский** — АО «Концерн „ЦНИИ „Электроприбор“»; начальник бюро; E-mail: begmt@mail.ru

Поступила в редакцию
24.03. 2021 г.

Ссылка для цитирования: Грязин Д. Г., Гороховский К. С. Новые средства контроля динамических погрешностей магнитных компасов // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 7. С. 567—575.

NEW TOOLS FOR MONITORING THE DYNAMIC ERRORS OF MAGNETIC COMPASSES

D. G. Gryazin^{1,2}, K. S. Gorokhovskiy¹

¹Concern CSRI Elektropribor, JSC, 197046, St. Petersburg, Russia
E-mail: volnagdg@yandex.ru

²ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia

Results of development of new means for testing magnetic compasses in a dynamic mode are presented. The effect of external influencing factors on a ship's magnetic compass error, caused by the ship's pitching, is shown. Two stands, developed for simulating the impact of rolling on the card of a magnetic compass, including the case of high latitudes conditions, are proposed. A method for assessing its dynamic error under an action corresponding to the actual pitching of the vessel is developed. Particular attention

is paid to the stand for evaluating the efficiency of the magnetic compass correction system. Based on the analysis of the results of experimental studies, it is concluded that the developed stands can be used to assess the errors of any magnetic compass.

Keywords: stand, magnetic compass, error, rolling, high latitudes, small value of the Earth's magnetic field horizontal component

REFERENCES

1. *Pravila po oborudovaniyu morskikh sudov. Chast' V. Navigatsionnoye oborudovaniye. Rossiyskiy morskoy registr sudokhodstva* (Rules for the Equipment of Sea-Going Vessels. Part V. Navigation Equipment. Russian Maritime Register of Shipping, St. Petersburg, 2020, 246 p. (in Russ.))
2. <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74710556/>. (in Russ.)
3. Patent RU268890, G01C 17/30, *Sposob izmereniya magnitnogo kursa sudna v vysokikh shirotax i yego realizatsiya* (A Method for Measuring the Magnetic Course of a Ship in High Latitudes and Its Implementation), V.M. Zinenko, D.G. Gryazin, A.A. Molochnikov et al. Published 2019. (in Russ.)
4. Patent RU 2623192 G01C17/28, *Sposob kalibrovki elektronnoy magnitnoy kompasa* (Method of Calibration of Electronic Magnetic Compass), A.Yu. Kaplin, M.G. Stepanov et al., Published 22.06.2017. (in Russ.)
5. <http://technology.snauka.ru/2017/05/13257>. (in Russ.)
6. Krylov A.N. *Izbrannyye trudy akademika A.N. Krylova* (Selected Works of Academician A.N. Krylov), Moscow, 1958, pp. 115–170. (in Russ.)
7. Skvortsov M.I. *Osnovy korablevozhdeniya* (Navigation Basics), Moscow, 1972, 316 p. (in Russ.)
8. Kozhukhov V.P., Voronov V.V., Grigoriev V.V. *Magnitnyye kompasy* (Magnetic Compasses), Moscow, 1981, 212 p. (in Russ.)
9. Kardashinsky-Braude L.A. *Sovremennyye sudovyye magnitnyye kompasy* (Modern Marine Magnetic Compasses), St. Petersburg, 1999, 138 p. (in Russ.)
10. *Pravila Shturmanskoy sluzhby / PSHS№38 / Deviatsionnyye raboty na korablyakh i sudakh voyenno-morskogo flota / GUNiO MO Rossiyskoy Federatsii* (Rules of the Navigation Service / PSHS No. 38 / Deviation Work on Ships and Vessels of the Navy / GUNiO of the Ministry of Defense of the Russian Federation), St. Petersburg, 2009. (in Russ.)
11. Rybaltofskiy N.Yu. *Magnitno-kompasnoye delo* (Magnetic Compass), Moscow, 1954, 612 p. (in Russ.)
12. <http://www.navydevices.ru/informations/section-publications/publications/85-2002-09-21-13-29-52>. (in Russ.)
13. Ishlinskiy A.Yu. *Oriyentatsiya, giroskopy i inertsiyal'naya navigatsiya* (Orientation, Gyroscopes and Inertial Navigation), Moscow, 1976, 671 p. (in Russ.)
14. Patent RU 2718691, G01D 3/00, *Sposob opredeleniya dinamicheskoy pogreshnosti magnitnoy kompasa, vyzvannoy kachkoy, i ustroystvo dlya yego realizatsii* (A Method for Determining the Dynamic Error of a Magnetic Compass Caused by Rolling, and a Device for its Implementation), D.G. Gryazin, K.S. Gorokhovskiy, Published 13.04.2020, Bulletin 11. (in Russ.)
15. Borodai I.K., ed., *Prikladnyye zadachi dinamiki sudov na volnenii* (Applied Problems of Ship Dynamics in Waves), Leningrad, 1989, pp. 51. (in Russ.)
16. Trub M.S., Gryazin D.G., Andreyev I.N. *Nauchno-tekhnicheskiy sbornik "Sudostroitel'naya promyshlennost'"*, ser. "Proyektirovaniye sudov", 1991, no. 18, pp. 43–56. (in Russ.)

Data on authors

- Dmitry G. Gryazin** — Dr. Sci., Associate Professor; Concern CSRI Elektropribor, JSC; Chief Metrologist - Head of Department 068; ITMO University; E-mail: volnagdg@yandex.ru
- Konstantin S. Gorokhovskiy** — Concern CSRI Elektropribor, JSC; Head of the Bureau; E-mail: begmt@mail.ru

For citation: Gryazin D. G., Gorokhovskiy K. S. New tools for monitoring the dynamic errors of magnetic compasses. *Journal of Instrument Engineering*. 2021. Vol. 64, N 7. P. 567—575 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-567-575