

Компенсация девиации магнитного компаса на одном произвольном курсе

Kompensacja dewiacji kompasu magnetycznego na wybranym dowolnym kursie

Compensation of magnetic compass deviation on any heading

Evgeniy M. Lushnikov

Maritime University of Szczecin, Faculty of Navigation, Institut of Marine Navigation
Akademia Morska w Szczecinie, Wydział Nawigacyjny, Instytut Nawigacji Morskiej
70-500 Szczecin, ul. Wały Chrobrego 1–2

Ключевые слова: магнитный компас, девиация магнитного компаса, актуализация таблицы девиации, точность девиации

Резюме

В статье предлагается новый метод актуализации таблицы девиации магнитного компаса на одном произвольном курсе. Приводится математическое описание метода. Исследована точность восстановления коэффициентов B и C . Сформулированы требования точности к инструментальным наблюдениям.

Słowa kluczowe: kompas magnetyczny, dewiacja kompasu magnetycznego, aktualizacja tabeli dewiacji, dokładność dewiacji

Abstrakt

Proponuje się nową metodę aktualizacji tabeli dewiacji kompasu magnetycznego na wybranym dowolnym kursie. Zaprezentowano opis matematyczny metody. Zbadano dokładność aktualizacji współczynników B i C półokrężnej dewiacji. Określono wymagania dokładności do obserwacji instrumentalnych.

Key words: magnetic compass, deviation of magnetic compass, updating of deviation table, accuracy of deviation

Abstract

A new method for updating the deviation table of a magnetic compass on any heading is proposed. The mathematical description of the method is presented. The accuracy of the restoration of factors B and C is investigated. The requirement of accuracy for instrumental observation is formulated.

Введение

Уничтожение девиации магнитного компаса обычно осуществляется на специальном полигоне, оборудованном веером навигационных створов. Первичное уничтожение при выходе судна со строительной верфи предполагает определение и, если необходимо, уничтожение всех пяти коэффициентов девиации. После

уничтожения девиации производится определение остаточной девиации и составление таблицы. Такая процедура может занимать несколько часов времени.

В последующем, как правило, на ежегодных регламентных девиационных работах производится лишь компенсация наиболее нестабильных коэффициентов полукруговой девиации B и C . Эти коэффициенты на вновь построенных

судах могут достигать значений 9° – 12° . Они подвержены сильным изменениям в штормовых условиях, ледовом плавании, при ударах о причал на швартовках и т.п. Как правило, таблица девиации гарантирует высокую достоверность данных до первого значительного шторма.

Наиболее применяемым методом компенсации полукруговой девиации является метод Эри, выполняющийся на 4-х главных магнитных курсах. Точность компенсации зависит от точности наблюдений, от точности операций магнитами-уничтожителями, от гистерезисных эффектов в корпусе судна, связанных с переменной курса. После компенсации девиации выполняется определение остаточной девиации и расчёт таблицы.

Особенно много хлопот доставляют девиационные маневры крупнотоннажным судам, инерционным и неповоротливым, таким, как супертанкера, большие пассажирские суда, большие военные корабли и подводные лодки, плавучие базы и т.п.

Каждое очередное проведение девиационных работ даже по минимальной программе связано с потерей эксплуатационного времени и дополнительными накладными расходами. Решение задачи безопасности мореплавания в этом случае входит в противоречие с экономическими задачами. Радикальное решение этого вопроса было бы возможно при наличии метода уничтожения девиации *без отвлечения судна от основной работы*. Такая постановка вопроса возможна лишь при наличии метода уничтожения девиации на одном произвольном курсе (в море или в порту). Девиационные работы на одном курсе позволили бы так же радикально исключить влияние гистерезисных эффектов на точность девиационных работ. Таким образом, способ уничтожения девиации на одном произвольном курсе это наиболее эффективный способ ликвидировать непроизводительные затраты времени.

Современное состояние вопроса девиации магнитного компаса

На подавляющем большинстве судов (симметричной конструкции) постоянный коэффициент A и коэффициент четвертной девиации E , зависящие от магнитомягкого несимметричного судового железа находятся в пределах 0.2° – 0.6° и характеризуются исключительно высокой стабильностью [1]. Коэффициент четвертной девиации D после компенсации с помощью

безындукционных пластин [2] не превышает 0.25° и так же отличается очень высокой стабильностью.

Получается так, что три этих коэффициента по своей величине находятся на уровне погрешностей наблюдения курсов и пеленгов. Однако, в соответствии с жёстким алгоритмом Эри, а так же большинства других алгоритмов, эти коэффициенты без всякой надобности определяются и пересчитываются заново для использования в новой таблице девиации [3]. Всё это можно квалифицировать, как непроизводительные работы с потерей времени на измерения, обработку и расчёты.

Точное выражение девиации магнитного компаса δ является неявной функцией от компасного курса KK и записывается в виде:

$$\sin \delta = A \cos \delta + B \cdot \sin KK + C \cdot \cos KK + D \cdot \sin(2KK + \delta) + E \cdot \cos(2KK + \delta) \quad (1)$$

где:

$$A = \frac{d-b}{2\lambda} \quad B = \frac{P+cZ}{\lambda H} \quad C = \frac{Q+fZ}{\lambda H}$$

$$D = \frac{a+e}{2\lambda} \quad E = \frac{d+b}{2\lambda}$$

при этом: H – горизонтальная составляющая силы земного магнетизма; Z – вертикальная составляющая силы земного магнетизма; P и Q – продольная и поперечная магнитные силы производимые магнитотвёрдым судовым железом; a , b , c , d , e , f – параметры Пуассона, характеризующие судовое магнитомягкое железо; $\lambda = 1 + (a+e)/2$ – коэффициент экранирования магнитного компаса.

Параметры Пуассона a , b , c , d , e , f , а так же коэффициент λ , являются функциями размеров и формы судового магнитомягкого железа, его удалённости от компаса, магнитных характеристик корпусного материала. Все эти характеристики являются постоянными конструктивными показателями судна, чем и объясняется высокая стабильность коэффициентов A , D , E .

Принимая в расчёт это обстоятельство, коэффициенты девиации A , D , E обычно считают неизменными и при выполнении ежегодных регламентных работ эти коэффициенты не регулируют. В этом случае задача производства ежегодных девиационных работ сводится к компенсации коэффициентов B и C и расчёту новой таблицы девиации. Такое проведение ежегодных девиационных работ уже давно является установившейся практикой.

Действующее наставление Министерства морского флота “Рекомендации штурманской службы” (РШС-89) не определяют время действия таблицы девиации, а лишь формулируют требования точности в соответствии с требованиями ИМО. В то же время “Наставления по организации штурманской службы на морских судах флота рыбной промышленности” содержат запись о максимальном годичном интервале времени действия таблицы девиации. Эти ведомственные различия лишь подчёркивают сложность и актуальность этой проблемы.

Прогресс в развитии спутниковых систем навигации и гирокомпасов привёл к тому, что магнитные компасы на морских судах в основном выполняют контрольно-резервную функцию. В этом случае непроизводительные затраты времени на производство девиационных работ вызывают всё более негативное отношение, как судовладельцев, так и капитанов судов. Современные рыночные условия требуют оптимизации производственного процесса и обоснованных временных затрат. Естественно, что такая оптимизация должна производиться с учётом безопасности мореплавания.

Предпосылки к уничтожению девиации без отрыва от производственной деятельности

Если коэффициенты девиации A , D , E малы, неизменны и с судовым железом не производилось никаких работ, то нет нужды затрачивать каждый раз заново время на определение этих коэффициентов. Надо просто учитывать их значения из предыдущей таблицы. Но в этом случае, эту логику можно продолжить дальше. Коэффициенты B и C при проведении девиационных работ можно не уничтожать до нуля, а восстанавливать их прежние малые по величине остаточные табличные значения [4]. Такой шаг даёт основание считать, что после восстановления коэффициентов B и C все коэффициенты девиации соответствуют значениям старой таблицы девиации и рассчитывать новую таблицу нет необходимости. Срок действия прежней таблицы в этом случае можно продлить ещё на один год. Все девиационные работы в этом случае сведутся лишь к восстановлению коэффициентов B и C без затрат времени на 8 курсов для определения и расчёта всех пяти коэффициентов, а так же без расчёта новой таблицы девиации. Такую актуализацию прежней таблицы девиации можно производить в течение 4–5 лет.

Однако определение коэффициентов B и C с целью возврата их к прежним табличным значениям в классической постановке требует не менее двух уравнений, и значит, как минимум, двух курсов. Это означает, что классический подход к решению задачи о компенсации двух коэффициентов на одном курсе не осуществим.

Можно, однако, заметить, что в навигационной практике существует два принципиально различных способа определения девиации. Первый способ опирается на использование навигационных измерений. Второй способ опирается на физические измерения магнитных сил с последующим расчётом на этой основе коэффициентов девиации.

Одновременное использование этих двух принципиально различных методов позволяет получить недостающую информацию для решения поставленной задачи об уничтожении двух коэффициентов полукруговой девиации B и C на одном произвольном курсе.

Определение коэффициентов B и C на одном произвольном курсе

Известно множество навигационных способов и средств определения девиации магнитного компаса на произвольном курсе судна. Для этой цели можно использовать створы, небесные светила, отдалённые ориентиры, системы АИС и гирокомпасы. Определённая навигационным способом девиация магнитного компаса δ может быть записана как неявная функция компасного курса KK в виде выражения (1).

Учитывая, что в выражении (1) заданными величинами являются девиация δ (измеренная навигационным способом) компасный курс KK , а так же коэффициенты A , D и E (из предыдущей таблицы), выражение (1) можно переписать к более компактному виду:

$$B \sin KK + C \cos KK = \Delta_1 \quad (2)$$

где:

$$\Delta_1 = \sin \delta - A \cos \delta - D \sin(2KK + \delta) - E \cos(2KK + \delta) \quad (3)$$

Таким образом, величина девиации δ , полученная навигационным измерением, позволяет написать уравнение (2), связывающее два неизвестных коэффициента полукруговой девиации B и C .

Второе недостающее уравнение может быть получено при помощи измерения дефлектором

суммарной судовой компасной силы H_k , действующей вдоль компасного меридиана. Известно [1], что величина измеренной компасной силы H_k имеет вид:

$$H_k = \lambda H [\cos \delta + A \sin \delta + B \cos KK - C \sin KK + D \cos(2KK + \delta) - E \sin(2KK + \delta)] \quad (4)$$

Выражение (4) можно переписать к более компактному виду:

$$B \cos KK - C \sin KK = \Delta_2 \quad (5)$$

где:

$$\Delta_2 = \frac{H_k}{\lambda H} - \cos \delta - A \sin \delta - D \cos(2KK + \delta) + E \sin(2KK + \delta) \quad (6)$$

Таким образом, получена система двух уравнений (2) и (5) с двумя неизвестными B и C :

$$\begin{aligned} B \sin KK + C \cos KK &= \Delta_1 \\ B \cos KK - C \sin KK &= \Delta_2 \end{aligned} \quad (7)$$

Решение этой системы уравнений даёт:

$$\begin{aligned} B &= \Delta_1 \sin KK + \Delta_2 \cos KK \\ C &= \Delta_1 \cos KK - \Delta_2 \sin KK \end{aligned} \quad (8)$$

Определив величины коэффициентов B и C , необходимо их сравнить с теми табличными значениями, которые они имели в последней таблице девиации. Если изменения коэффициентов не выходят за допустимые границы, то компенсацию можно не производить. Если обнаружены существенные изменения этих коэффициентов, то с помощью регуляторов B и C их необходимо восстановить в прежних значениях. Для восстановления прежних значений коэффициентов B и C рассчитываются величины коррекции ΔB и ΔC по формулам:

$$\begin{aligned} \Delta B &= B_T - B \\ \Delta C &= C_T - C \end{aligned} \quad (9)$$

где: B_T и C_T – значения коэффициентов B и C из таблицы девиации.

Если коэффициенты коррекции ΔB и ΔC положительны, то отсчёт каждого регулятора увеличивается на соответствующую величину и наоборот. Таким образом, совместное применение навигационных и физических измерений позволяет решить задачу, которая всё время считалась неразрешимой.

Оба коэффициента B и C зависят от поправочных компонент Δ_1 и Δ_2 . Навигационная компонента Δ_1 , как видно из выражения (4),

зависит от точности определения девиации δ и точности табличных коэффициентов A , D , E . Поправочная компонента Δ_2 , как видно из выражения (7), требует знания точных значений результирующей компасной силы H_k , горизонтальной составляющей земного магнетизма H , коэффициента λ , а так же девиации δ и коэффициентов A , D , E . Кроме точности навигационных данных здесь требуются точные данные физических измерений. Точность отношения H_k/H может быть обеспечена использованием того же самого дефлектора для измерений на берегу и на судне.

Точность коэффициента λ в обычных обстоятельствах никогда не представляла особого интереса. В данном случае к точности знания этого коэффициента предъявляются высокие требования. Положение облегчается тем, что его достаточно определить с необходимой точностью один раз, поскольку стабильность его так же исключительно высока, как стабильность коэффициентов A , D , E .

Полагая, что девиации характеризуются относительно малыми углами, что обычно соответствует действительности, обе расчётные компоненты Δ_1 и Δ_2 с точностью до величин второго порядка малости можно упростить к виду:

$$\begin{aligned} \Delta_1 &= \delta - A - D \sin 2KK - E \cos 2KK \\ \Delta_2 &= \frac{H_k}{\lambda H} - 1 - D \cos 2KK + E \sin 2KK \end{aligned} \quad (10)$$

С учётом этих упрощений величины коэффициентов B и C примут вид:

$$\begin{aligned} B &= (\delta - A + E) \sin KK + \left[\frac{H_k}{\lambda H} - 1 - D \right] \cos KK \\ C &= (\delta - A - E) \cos KK - \left[\frac{H_k}{\lambda H} - 1 + D \right] \sin KK \end{aligned} \quad (11)$$

Окончательная запись величин B и C может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} B &= (\delta - M) \sin KK + \left[\frac{H_k}{\lambda H} - N \right] \cos KK \\ C &= (\delta - U) \cos KK - \left[\frac{H_k}{\lambda H} - V \right] \sin KK \end{aligned} \quad (12)$$

где:

$$M = A - E$$

$$N = 1 + D$$

$$U = A + E$$

$$V = 1 - D$$

Коэффициенты M , N , U , V следует рассчитать сразу же после полной компенсации девиации и расчёте таблицы остаточной девиации. Формулы (12) и величины коэффициентов M , N , U , V используются при дальнейших ежегодных регламентных работах по уничтожению полукруговой девиации.

Непосредственные работы на мостике сводятся к определению девиации δ при помощи створа или другим способом и к измерению компасной силы H_k при помощи дефлектора. Подстановка этих числовых величин в заранее подготовленные формулы позволяет быстро рассчитать величины коэффициентов коррекции ΔB и ΔC и ввести их с помощью соответствующих регуляторов.

Применение такого метода непосредственно у грузового причала, как правило, не целесообразно по причине наличия на причале и в конструкциях причала больших железных масс, а так же положения судового железа не по-походному.

Метод целесообразнее всего применять при выходе судна из порта, когда оно находится на выходных створах. Такую работу может произвести как девиатор, так и судовой штурман, ответственный за магнитный компас. Для выполнения работ требуется не более 10 минут. В этом случае отпадает необходимость в девиационном полигоне и отрыве судна от производственного процесса.

Весь этот процесс можно назвать процессом восстановления или процессом актуализации прежней таблицы девиации. Самым важным во всём этом является то, что эта актуализация может быть произведена на одном произвольном курсе без отрыва от производственной деятельности.

Анализ точности метода

Очевидно, что точность восстановления таблицы девиации зависит от точности определения корректируемых величин B и C . Они же, в свою очередь, зависят от точности измерения девиации δ , от точности информации о напряжениях магнитных полей H_k и H , а так же от точности коэффициента λ .

Систематические погрешности актуализации таблицы девиации

Для оценки систематической погрешности восстановления таблицы девиации необходимо выполнить дифференцирование выражений (11), в результате чего получается:

$$\begin{aligned} d B &= d \delta \cdot \sin K K + \\ &+ \left[\frac{\lambda H d H_k - H H_k d \lambda - \lambda H_k d H}{\lambda^2 H^2} \right] \cdot \cos K K \\ d C &= d \delta \cdot \cos K K - \\ &+ \left[\frac{\lambda H d H_k - H H_k d \lambda - \lambda H_k d H}{\lambda^2 H^2} \right] \cdot \sin K K \end{aligned} \quad (13)$$

Полагая, что измерение силы H на берегу и силы H_k на судне производилось тем же самым дефлектором и тем же наблюдателем эти измерения можно считать равноточными:

$$d H = d H_k$$

В этом случае выражение (13) переписывается к виду:

$$\begin{aligned} d B &= d \delta \cdot \sin K K + \\ &+ \left[\frac{(H - H_k) d H}{\lambda H^2} - \frac{H_k d \lambda}{H \lambda^2} \right] \cdot \cos K K \\ d C &= d \delta \cdot \cos K K - \\ &+ \left[\frac{(H - H_k) d H}{\lambda H^2} - \frac{H_k d \lambda}{H \lambda^2} \right] \cdot \sin K K \end{aligned} \quad (14)$$

Как видно из выражения (14), точность восстановления таблицы девиации зависит от точности навигационной составляющей измерений $d\delta$, технической составляющей измерений dH , а также информационной составляющей $d\lambda$.

Для оценочных расчётов с достаточной степенью точности можно считать $H \approx H_k$, $\lambda \approx 1$. С учётом сказанного, для оценки точности в первом приближении выражение (14) можно упростить к виду:

$$\begin{aligned} d B &= d \delta \cdot \sin K K - d \lambda \cdot \cos K K \\ d C &= d \delta \cdot \cos K K + d \lambda \cdot \sin K K \end{aligned} \quad (15)$$

Из этого выражения видно, что определяющими факторами систематических погрешностей являются точность навигационных наблюдений и точность знания коэффициента λ . Систематическая погрешность определения девиации на створе исключительно мала. В связи с этим основная роль принадлежит составляющей зависящей от коэффициента λ . Для обеспечения точности на уровне 0.5° относительная погрешность коэффициента λ не должна превышать 0.8% . Такое требование является достаточно высоким, но вполне реальным. Определение коэффициента λ осуществляется измерением компасных сил H_k на четырёх главных и четырёх промежуточных курсах с последующим вычислением по формуле:

$$\lambda = \frac{\sum_{k=1}^8 H_k}{8H}$$

Анализ показал, что, если выполнены требования регистра в части компенсации девиации $\delta \leq 3^\circ$, то относительная *методическая* погрешность определения коэффициента λ будет не хуже, чем 0.12%. Такая точность является более чем достаточной.

Точное значение коэффициента λ должно определяться при спуске судна на воду. Информация о коэффициентах A, D, E , а так же о коэффициенте λ должна тщательно сохраняться до очередной комплексной проверки и компенсации девиации на судне. При капитальной реконструкции судна, замене двигателя эти коэффициенты должны определяться заново.

Случайные погрешности актуализации таблицы девиации

Влияние случайных погрешностей наблюдений и измерений оценивается с помощью средней квадратической погрешности по формуле:

$$m_x = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 m_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 m_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 m_{x_n}^2}$$

Используя в качестве функции f выражения (11), получим средние квадратические погрешности восстановления коэффициентов B и C в виде:

$$m_B = \sqrt{m_\delta^2 \sin^2 KK + \left[\frac{m_{H_k}^2}{\lambda^2 H^2} + \frac{H_k^2 m_H^2}{\lambda^2 H^4} + \frac{H_k^2 m_\lambda^2}{\lambda^4 H^2} \right] \cos^2 KK}$$

$$m_C = \sqrt{m_\delta^2 \cos^2 KK + \left[\frac{m_{H_k}^2}{\lambda^2 H^2} + \frac{H_k^2 m_H^2}{\lambda^2 H^4} + \frac{H_k^2 m_\lambda^2}{\lambda^4 H^2} \right] \sin^2 KK}$$

(16)

Для оценочных расчётов можно принять $H_k \approx H$; $\lambda \approx 1$. При таких допущениях выражения (16) упрощаются к виду:

$$\begin{aligned} m_B &= \sqrt{m_\delta^2 \sin^2 KK + \left[\left(\frac{m_{H_k}}{H_k}\right)^2 + \left(\frac{m_H}{H}\right)^2 + m_\lambda^2 \right] \cos^2 KK} \\ m_C &= \sqrt{m_\delta^2 \cos^2 KK + \left[\left(\frac{m_{H_k}}{H_k}\right)^2 + \left(\frac{m_H}{H}\right)^2 + m_\lambda^2 \right] \sin^2 KK} \end{aligned} \quad (17)$$

Из этих выражений видно, что случайные погрешности компенсации коэффициентов B и C зависят от относительных погрешностей всех трёх факторов – навигационного, технического и информационного.

Результирующая средняя квадратическая погрешность актуализации таблицы девиации M_δ определяется выражением:

$$M_\delta = \sqrt{m_B^2 + m_C^2} = \sqrt{m_\delta^2 + \frac{m_{H_k}^2}{H_k^2} + \frac{m_H^2}{H^2} + m_\lambda^2} \quad (18)$$

Точность определения девиации на уровне 0.5° , точность измерений магнитных сил дефлектором на уровне 1%, а так же знание коэффициента λ с точностью 1% позволяют определить поправочные величины ΔB и ΔC с точностью в пределах $0.5^\circ - 1^\circ$.

График СКП корректурных коэффициентов m_B и m_C для таких исходных данных представлен на рисунке 1.

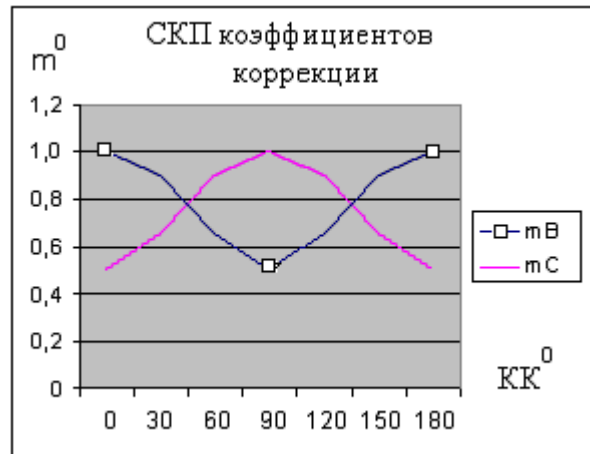


Рис. 1. Значения среднеквадратических погрешностей m_B и m_C в зависимости от компасного курса при значениях $m_\delta = 0.5^\circ$, $m_H / H = m_{H_k} / H_k = m_\lambda / \lambda = 0.01$

Rys. 1. Wartości błędów średnich m_B i m_C w zależności od kursu kompasowego przy $m_\delta = 0.5^\circ$, $m_H / H = m_{H_k} / H_k = m_\lambda / \lambda = 0.01$

Fig. 1. The value of errors m_B and m_C in depending from compass course at value $m_\delta = 0.5^\circ$, $m_H / H = m_{H_k} / H_k = m_\lambda / \lambda = 0.01$

Верхняя граница на этом рисунке обусловлена относительной точностью дефлектора и относительной точностью коэффициента λ . Нижняя граница обусловлена точностью определения девиации δ .

Результирующая средняя квадратическая погрешность актуализации таблицы девиации для выше указанных условий, рассчитанная по формуле (18) составляет $M_\delta = 1.1^\circ$.

Следует помнить, что в конечном результате добавятся погрешности от нестабильности коэффициентов A , D и E , но сами эти коэффициенты малы, а стабильность их очень высока. Такая точность актуализации таблицы девиации без отрыва от основной работы и без всяких дополнительных требований и ограничений вполне достаточна.

Далеко не всегда нововведение даёт выигрыш без побочных эффектов и дополнительных затрат. Этот случай как раз не влечёт за собой никаких дополнительных ограничений и расходов.

Заключение

1. Предлагаемый метод компенсации девиации магнитного компаса на одном произвольном курсе судна является принципиально новым методом, позволяющим радикально уменьшить объём трудоёмкой рутинной работы

судна, связанной со значительными временными и финансовыми затратами.

2. Метод отличается исключительной простотой, в связи с чем, может применяться судоводителями в условиях рейса.

3. Для внедрения метода в практику судовождения он должен найти отражение в соответствующих учебных программах высших и средних специальных морских учебных заведений, а так же факультетов и курсов повышения квалификации.

Литература

1. Кожухов В.П., Воронов В.В., Григорьев В.В.: Магнитные компасы. Транспорт, 1981, 212.
2. Воронов В.В., Григорьев Н.Н., Яловенко А.В.: Магнитные компасы. Санкт-Петербург, "Элмор", 2004, 191.
3. Лушников Е.М.: Компенсация девиации магнитного компаса в современных условиях. Международная научная конференция "Инновации в науке и образовании – 2008", Калининград, КГТУ, 2008, 22–24.
4. LUSHNIKOV E.M.: The problem of magnetic compass deviation at contemporary condition. International Navigational Symposium "TransNav 09". Maritime University, Gdynia 2009, 219–224.

*Recenzent:
prof. dr hab. inż. Andrzej Felski
Akademia Marynarki Wojennej*