

УДК 629.5.051:621.317.39

ПОГРЕШНОСТИ БЕСПЛАТФОРМЕННОГО СПОСОБА ИЗМЕРЕНИЯ КУРСА И КОМПОНЕНТ ВЕКТОРА НАПРЯЖЕННОСТИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ*Снигур А.К., к.т.н., доц.**Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова**54025, г. Николаев, пр-т Героя Сталинграда, 9**E-mail: larisa_alex@ukr.net*

У роботі розглянуті інструментальні похибки й отримані співвідношення бесплатформенного способу виміру курсу й компонент вектора напруженості геомагнітного поля, що обумовлені похибками первинних компонентних вимірів вектора напруженості магнітного поля й похибками відтворення вертикалі в зоні установки магнітометра із цілю рішення завдання орієнтації й визначення навігаційних параметрів і параметрів геомагнітного поля, що розвідуються.

Ключові слова: магнітометр, геомагнітне палі, вертикаль, компонентні виміри.

In this article instrumental errors of strapdown heading and geomagnetic strength components measurement method caused by primary geomagnetic field strength component sensors errors are considered. The principles of strapdown heading and geomagnetic strength components measurement method for determination of orientation and navigation parameters of geomagnetic field are proposed.

Key words: magnetometer, geomagnetic field, vertical, component measurements.

Введение. При применении бесплатформенного способа решения задачи курсоуказания, измерения модуля, горизонтальной и вертикальной проекций вектора напряженности магнитного поля - возникают погрешности. В зависимости от причин, порождающих эти погрешности, различают инструментальные и методические погрешности [1, 2].

К инструментальным – относятся те их составляющие, которые возникают вследствие несовершенства конструкции прибора и его элементов, а также материалов, из которых изготовлен прибор, погрешности, вызванные влиянием посторонних полей (электрических, магнитных, гравитационных), температурные погрешности.

Под методическими подразумеваются погрешности, обусловленные несовершенством метода измерения, принятого в данном измерительном устройстве. Методические погрешности возникают из-за приближенного характера формульных зависимостей, послуживших основой для разработки измерительного устройства. Величина методической погрешности определяется величинами погрешностей параметров и характером зависимости функции от параметра. Эти погрешности не зависят от качества изготовления прибора, могут быть оценены и скомпенсированы.

В свою очередь, инструментальные погрешности подразделяются на статические и динамические.

Под статическими понимаются погрешности, такие, которые наблюдаются при установившемся значении измеряемой величины и по окончании переходных процессов в самом измерительном устройстве.

Динамическими погрешностями называют по-

грешности, возникающие при изменении измеряемой величины. Динамические погрешности можно разделить на погрешности в переходном режиме и погрешности в установившемся режиме, когда переходной процесс можно считать окончанным. Динамические погрешности являются функциями времени.

Большое практическое значение имеет деление инструментальных погрешностей на мультипликативные и аддитивные составляющие. Мультипликативной называют составляющую погрешности, зависящую от значения измеряемой величины. Аддитивной, напротив, называют составляющую погрешности, не зависящую от значения измеряемой величины. Смысл разделения заключается во взаимной независимости этих составляющих, установление которой позволяет не только правильно нормировать погрешности вдоль рабочего диапазона, но и применять отдельные приемы или способы их минимизации [3, 5, 7].

Анализ предыдущих исследований. Для анализа погрешностей магнитометрических измерителей магнитного поля Земли широко применяются известные подходы, основанные на определении инструментальных и методических погрешностей по методикам, изложенным в работах Ю.В. Афанасьева, Г.Ф. Казаковой, Л.А. Кардашинского-Брауде, Я.М. Фомкина, Н.Д. Дятярева, Р.Я. Беркмана, Г.Я. Гектина, В.П. Кожухова, В.В. Воронова, В.В. Григорьева, Н.В. Студенцова, В.Н. Хорева, А.П. Щелкина, В.Я. Джокло, В.В. Кудрявцева и реализованным в современных магнитных компасах [3, 4, 5, 6, 8].

В частности, в работе В.Я. Джокло и

В.В. Кудрявцева «О необходимой точности горизонтирования чувствительного элемента индукционного датчика» предложены формулы для расчета инструментальной и методической погрешностей, обусловленных негоризонтальностью площадки с феррозондами, а также представлены результаты вычислений допустимых углов наклона площадки относительно плоскости горизонта, характеризующих точность горизонтирования чувствительного элемента для различных магнитных широт при заданной максимальной погрешности определения магнитного курса.

Однако в известной и опубликованной литературе авторами не рассматривался вопрос определения инструментальных погрешностей, бесплатформенных магнитоинерциальных систем, которые обусловлены погрешностями измерения проекций вектора напряженности магнитного поля на связанные оси магнитометра и погрешностями определения вертикали.

Из выше изложенного следует, что для составления формульных зависимостей, используемых при решении задач курсоуказания, измерения модуля горизонтальной и вертикальной проекций вектора напряженности магнитного поля Земли с требуемой точностью, необходимо получить выражения для определения инструментальных погрешностей, которые обусловлены погрешностями измерения проекций вектора напряженности магнитного поля на связанные оси магнитометра и погрешностями определения вертикали в точке его установки [1, 2].

Цель работы – анализ погрешностей магнитометрических измерителей и составление выражения для инструментальных погрешностей трехосного бесплатформенного магнитометра, которые обусловлены погрешностями первичных компонентных измерителей вектора напряженности магнитного поля и погрешностями воспроизведения вертикали в зоне установки магнитометра.

Разработка математических зависимостей, приемлемых для решения задач ориентации, а также определения навигационных и разведываемых параметров геомагнитного поля.

Материал и результаты исследования. В отличие от традиционных способов измерения магнитного курса способ, реализуемый согласно схеме, предложенной в работе [2], призван при измерениях вектора напряженности магнитного поля \vec{T} в проекциях на связанные оси OXYZ объекта обеспечивать получение информации о модуле T этого вектора согласно соотношению:

$$T = \sqrt{T_x^2 + T_y^2 + T_z^2} \quad (1)$$

его вертикальной η и горизонтальной H проекций или угла магнитного наклона θ , при этом:

$$\eta = T_x \sin \nu + T_y \cos \gamma - T_z \cos \nu \sin \gamma;$$

$$H = T_{xg} = H_{xg} = \sqrt{H_{x1g}^2 + H_{z1g}^2} =$$

$$= \sqrt{\left(T_x \cos \nu - T_y \sin \nu \cos \gamma + T_z \sin \nu \sin \gamma \right)^2 + \left(T_y \sin \gamma + T_z \cos \gamma \right)^2};$$

$$\operatorname{tg} \theta = \eta / H, \quad (2)$$

а также угла магнитного курса ψ

$$\psi_1 = \operatorname{Arctg} \frac{T_{z1g}}{T_{x1g}} = \operatorname{Arctg} \frac{H_{z1g}}{H_{x1g}}, \quad (3)$$

где γ - угол крена объекта; ν - угол дифферента (тангажа) объекта; g - вектор гравитационного поля Земли [1, 2].

Применением процедур дифференцирования выражений (1, 2, 3) для искомым измерений или показаний по соответствующим переменным, получены выражения для инструментальных погрешностей, предложенной в [2] схемы построения системы в виде:

$$\Delta T = \frac{T_x \Delta T_x + T_y \Delta T_y + T_z \Delta T_z}{T};$$

$$\Delta \eta = \Delta T_{yg} = \Delta T_x \sin \nu + \Delta T_y \cos \nu \cos \gamma - \cos \nu \cos \gamma;$$

$$\Delta H = \Delta T_{xg} = \Delta T_x \cos \nu \cos \psi - \Delta T_y (\sin \gamma \sin \psi + \sin \nu \cos \gamma \cos \psi) + \Delta T_z (\sin \nu \sin \gamma \cos \psi - \cos \gamma \sin \psi);$$

$$\Delta \theta = \frac{1}{T} [\Delta T_x \cos \theta \sin \nu + \Delta T_y (\cos \theta \cos \nu \cos \gamma + \sin \theta \sin \gamma \sin \psi) + \Delta T_z (\sin \theta \cos \gamma \sin \psi - \cos \theta \cos \nu \sin \gamma)];$$

$$\Delta \psi = \frac{1}{H} [-\Delta T_x \sin \psi \cos \nu + \Delta T_y (\sin \psi \sin \nu \sin \gamma - \cos \psi \sin \gamma) - \Delta T_z (\cos \psi \cos \gamma + \sin \psi \sin \nu \sin \gamma)].$$

Здесь $\Delta T, \Delta \eta, \Delta H, \Delta \theta, \Delta \psi$ - погрешности определения искомым величин T, η, H, θ, ψ , обусловленные погрешностями компонентных измерений вектора напряженности $\Delta T_x, \Delta T_y, \Delta T_z$ [1].

Из этого следует, что при изменении в движении параметров угловой ориентации подвижного объекта, погрешность определения курса будет изменяться во времени, даже при наличии постоянных погрешностей компонентных измерений.

В настоящее время в магнитометрии феррозондовых магнитометров достигнут уровень предельной погрешности, не превышающей 5...10 нТл, а для прецизионных чувствительных элементов 1...2 нТл. Полагая компонентные измерители (зонды) равноточными и характеризуя их среднеквадратической погрешностью измерений σ_k , т.е.

$$\sigma_k = \sigma_{\Delta T_x} = \sigma_{\Delta T_y} = \sigma_{\Delta T_z}, \quad (5)$$

из (4) можно получить выражение для дисперсий или среднеквадратических погрешностей измерения

в виде:

$$\sigma_{\Delta T}^2 = \sigma_{\Delta T_{xg}}^2 = \sigma_{\Delta T_{yg}}^2 = \sigma_{\Delta T_{zg}}^2,$$

$$\sigma_{\Delta \theta}^2 = \left(\frac{1}{T}\right)^2 (\cos^2 \theta + \sin^2 \theta \sin^2 \psi) \sigma_k^2, \quad (6)$$

$$\sigma_{\Delta \psi}^2 = \left(\frac{1}{H}\right)^2 \sigma_k^2.$$

В выражениях (4) и (6) H – горизонтальная проекция вектора напряженности T магнитного поля Земли в точке местонахождения объекта, определяемая углом магнитного наклона θ . При этом [1]

$$H = T \cos \theta. \quad (7)$$

Современные, относительно недорогие феррозондовые или магниторезисторные бесформенные магнитометрические системы могут выполнять проекционные измерения с погрешностями, не превышающими 50...60 нТл.

Согласно (6), это приведет к погрешностям определения курса в 15'...18' в районе Кольского полуострова и Белого моря, где $H \approx 11000$ нТл; в 10'...13' в районе г. Москвы, где $H \approx 17100$ нТл; в 8'...11' на Украине, где $H \approx 20500$ нТл; в 5'...7' в районе стран Ближнего Востока и Персидского залива, где $H \approx 30000$ нТл.

Для района г. Москвы, где $T \approx 5 \cdot 10^4$ нТл при уровне предельной погрешности компонентных измерений в 8 нТл, предельные инструментальные погрешности измерения модуля T , проекций ΔH и $\Delta \eta$ составляют также 8 нТл, а предельные инструментальные погрешности измерения магнитного наклона θ и курса ψ объекта соответственно 0,5' и 1,6'. Для того, чтобы погрешность измерения курса не превышала 1° или $1,75 \cdot 10^{-2}$ рад, необходимо, чтобы предельная погрешность компонентных измерений не превышала 300 нТл. Такой уровень точности компонентных измерений в современных индукционных компасах давно превышает указанную выше величину [3, 4, 6].

Определенный вклад в уровень инструментальных погрешностей определяемых величин могут внести погрешности угловой ориентации зондов внутри корпуса магнитометра. Но при жесткой фиксации зондов эти погрешности имеют систематический характер и хорошо описываются моделью погрешностей вида [1, 2]:

$$\Delta T_{xyz} = m_0 + M T_{xyz}, \quad (8)$$

в этой модели, вектор погрешности проекционных измерений ΔT_{xyz} обусловленный наличием магнитного поля самого объекта.

Индекс “xyz” при переменных означает представление векторных переменных в проекциях на связанные оси OXYZ объекта. Таким образом, вектор ΔT_{xyz} является вектором собственного намагничивания.

Вектор m_0 определяет постоянную компоненту вектора напряженности магнитного поля, порожденного объектом за счет присутствия и размещения на объекте постоянных магнитов («магнитотвердого» материала) и полем проводников, по которым течет постоянный электрический ток, в зоне размещения зондов магнитометра. Матрица M (тензор намагниченности) определяется наличием и расположением на объекте так называемого «магнитомягкого» материала, способного перемагничиваться под действием внешнего магнитного поля. Матрица M , будучи умноженной слева на определяемый магнитометрический вектор напряженности магнитного поля Земли T_{xyz} в зоне размещения зондов (датчиков магнитного поля), формирует вектор влияния так называемого индуктивного намагничивания объекта.

Можно сказать, что вектор m_0 определяет аддитивную составляющую погрешности, а матрица M формирует ее мультипликативную составляющую.

Для большинства практически важных случаев магнитные помехи на подвижном объекте, согласно (8), могут быть представлены линейной стационарной моделью, когда матрица M размерности 3×3 образуется девятью постоянными числами или, коэффициентами m_{ij} ($i=1,2,3; j=1,2,3$) тензора намагниченности $M = [m_{ij}]$. При необходимости возможно использование нестационарной линейной модели магнитных помех, когда вектор m_0 и матрица M являются функциями времени, или использование так называемой расширенной нелинейной модели, когда вектор m_0 и матрица M являются функциями фазовых координат, определяющих состояние систем, грузов и массо-геометрических размеров подвижного объекта. При этом число столбцов матрицы M может быть увеличено, а часть ее элементов могут являться функциями вектора T_{xyz} . Однако такое усложнение модели магнитных помех оправдано лишь для высокоточных измерений в интегрированных магнитометрических БИНС, а также в интересах корреляционно-экстремальной навигации и магнитометрической разведки, и совершенно излишне при решении задач определения магнитного курса объекта или магнитных пеленгов ориентиров с погрешностью 0,5...1°.

Модель погрешностей или магнитных помех в форме (8) удобна в применении еще и потому, что помимо описания влияния магнитного поля объекта, она прекрасно описывает и так называемые инструментальные погрешности магнитометра, обусловленные различными факторами, в том числе погрешностями крепления как зондов в корпусе датчика магнитометра, так и самого датчика магнитометра в корпусе блока чувствительных элементов. При девиационной процедуре устраняются все составляющие погрешности одновременно.

Погрешности углової орієнтації зондов всередині корпусу магнітометра, при їх жорсткій фіксації, можливо так же описати моделлю виду [2]:

$$\begin{bmatrix} \Delta T_x \\ \Delta T_y \\ \Delta T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{10} \\ m_{20} \\ m_{30} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}, \quad (9)$$

де $\Delta T_x, \Delta T_y, \Delta T_z$ - погрешности проекційних вимірювань; T - модуль вектора напруженності магнітного поля; m_0 - постійна компонента вектора напруженності магнітного поля, породжуваного об'єктом в зоні розміщення зондов магнітометра (вектор власного намагнічування).

Погрешности, описані моделлю виду (8) або (9), легко усуваються в процесі калібрувальних випробувань, після збирання магнітометра або в процесі девіаційних робіт на об'єкті.

Реалізація безплатформенного способу організації компонентних вимірювань і рішення задачі курсоказання передбачає інтеграцію в данню вимірну систему, крім трьохкомпонентного магнітометра, вимірників крену γ і диферента (тангажа) ν об'єкта [1, 2].

Використанням процедур знаходження частних похідних від функцій багатьох змінних, згідно (1), (2), (3) і (4), отримані вираження для погрешностей шуканих змінних в залежності від погрешностей $\Delta \nu$ і $\Delta \gamma$ визначення крену диферента (тангажа) ν і крену γ трьохосного магнітометра в такій формі:

$$\begin{aligned} \Delta \eta &= H(\Delta \gamma \sin \psi \cos \nu + \Delta \nu \cos \psi); \\ \Delta H &= \eta(\Delta \gamma \cos \nu \sin \psi - \Delta \nu \cos \psi); \\ \Delta \theta &= \Delta \gamma \cos \nu \sin \psi + \Delta \nu \cos \psi; \\ \Delta \psi &= \Delta \gamma(\sin \nu - \operatorname{tg} \theta \cos \psi \cos \nu) + \\ &+ \Delta \nu \operatorname{tg} \theta \sin \psi, \end{aligned} \quad (10)$$

де $\Delta \psi$ - погрешність курсоказання з-за погрешностей визначення вертикалі.

Для дисперсій або середньоквадратических погрешностей в цьому випадку маємо:

$$\begin{aligned} \sigma_{\eta}^2 &= H^2 \left(\sin^2 \psi \cos^2 \nu \sigma_{\gamma}^2 + \cos^2 \psi \sigma_{\nu}^2 \right); \\ \sigma_H^2 &= \eta^2 \left(\cos^2 \nu \sin^2 \psi \sigma_{\gamma}^2 - \cos^2 \psi \sigma_{\nu}^2 \right); \\ \sigma_{\theta}^2 &= \cos^2 \nu \sin^2 \psi \sigma_{\gamma}^2 - \cos^2 \psi \sigma_{\nu}^2; \\ \sigma_{\psi}^2 &= (\sin \nu - \operatorname{tg} \theta \cos \psi \cos \nu)^2 \sigma_{\gamma}^2 + \\ &+ \operatorname{tg}^2 \theta \sin^2 \psi \sigma_{\nu}^2. \end{aligned} \quad (11)$$

З (11), в припущенні однаковості середньоквадратических погрешностей вимірювання крену σ_{γ} і диферента (тангажа) σ_{ν} , і рівності їх значень середньоквадратическої погрешності воспроизведення вертикалі в системі σ_B , т.е. при

$$\sigma_{\gamma} = \sigma_{\nu} = \sigma_B, \quad (12)$$

можуть бути отримані спрощені вираження для

оцінки нижньої межі досяжної точності компонентних вимірювань в такій формі:

$$\begin{aligned} \sigma_{\eta} &= H \sigma_B; \\ \sigma_H &= \eta \sigma_B; \\ \sigma_{\nu} &= \sigma_B; \\ \sigma_{\psi} &= \operatorname{tg} \theta \sigma_B. \end{aligned} \quad (13)$$

З (13) випливає пряма залежність середньоквадратических погрешностей оцінки шуканих параметрів від середньоквадратическої погрешності воспроизведення вертикалі σ_B . Крім того, згідно (13), середньоквадратическа погрешність визначення курсу σ_{ψ} залежить від тангенса кута магнітного нахилу θ .

Для більшості території України (на середніх широтах), де

$$\operatorname{tg} \theta = \eta / H \approx 2 \dots 2,6, \quad (14)$$

середньоквадратическа погрешність визначення курсу в 2...2,6 рази більше середньоквадратическої погрешності воспроизведення вертикалі

$$\sigma_{\psi} = (2 \dots 2,6) \cdot \sigma_B. \quad (15)$$

Тобто, на території України точність побудови вертикалі в інтересах рішення задачі визначення курсу безплатформенної магнітометричної системою повинна бути в (2...2,6) рази вище необхідної точності визначення магнітного курсу. В районі країн Середземного моря, де горизонтальна складова вектора напруженності магнітного поля Землі становить $(25 \dots 30) \cdot 10^3$ нТл, а вертикальна - $(30 \dots 40) \cdot 10^3$ нТл, тангенс кута магнітного нахилу, визначаючий співвідношення між точністю рішення задачі визначення курсу і необхідною для цього точністю воспроизведення вертикалі, зменшується до рівня 1...1,6 [1].

Співвідношення

$$\sigma_{\Delta \psi}^2 = (H^{-1})^2 \sigma_{\kappa}^2; \sigma_{\gamma} = \sigma_{\nu} = \sigma_B, \quad (16)$$

дозволяють пред'являти вимоги до точності компонентних вимірювань вектора напруженності магнітного поля трьохосним магнітометром. В припущенні незалежності складових погрешностей визначення курсу від погрешностей компонентних вимірювань і погрешностей воспроизведення вертикалі, для сумарної середньоквадратическої погрешності визначення курсу використовується співвідношення:

$$\sigma_{\psi}^2 = (H^{-1})^2 \sigma_{\kappa}^2 + \sigma_B^2 \operatorname{tg}^2 \theta. \quad (17)$$

В тих випадках, коли для цілей навігації вповне достатньо точність визначення курсу, відповідна погрешність $1,5^\circ$, необхідно оцінювати вертикаль з погрешністю $0,5^\circ$, що вповне досяжимо з використанням звичайних гіровертикалей. Якщо ж вертикаль воспроизводиться з рівнем погрешності в $4' \dots 10'$, забезпечуваним сучасними платформеними і безплатформеними інерціальними системами, то для середніх широт середньоквадратическі погрешності становлять

$$\begin{aligned}\sigma_{\eta} &= 20 \dots 60 \text{ нТл}; \\ \sigma_{H} &= 60 \dots 180 \text{ нТл}; \\ \sigma_{\theta} &= 4' \dots 10'; \\ \sigma_{\psi} &= 12' \dots 30'.\end{aligned}\quad (18)$$

Отметим, что погрешности определения углов дифферента (тангажа) и крена магнитометра обусловлены не только погрешностями соответствующего измерителя аналогичных углов объекта, но и наличием неконтролируемых углов деформации конструкции самого объекта в случае, если магнитометр и измерители углов крена и дифферента (тангажа) объекта не располагаются в корпусе одного блока. Предлагаются методы борьбы с ними установкой симметрично расположенных магнитометров и использованием математических моделей изгибных и крутильных деформаций (колебаний) при дополнительном контроле скорости, перегрузки и массо-геометрических характеристик объекта. Однако радикальной мерой борьбы с этими погрешностями представляется мера, направленная на пространственное сближение блока магнитометра и чувствительных элементов системы воспроизведения вертикали. Здесь возможен как путь приближения магнитометра к центральному бортовому гиросtabilизатору, так и путь приближения блока инерциальных измерителей к магнитометру, вынесенному на периферию конструкции объекта или даже за пределы объекта в соответствующий буксируемый контейнер. При этом приближаемый к магнитометру блок инерциальных измерителей может корректироваться от центральной системы построения вертикали объекта или от измерителя скорости и GPS.

Выводы. В работе рассмотрены погрешности бесплатформенного способа измерения курса и компонент вектора напряженности геомагнитного поля, обусловленные погрешностями первичных компонентных измерений вектора напряженности магнитного поля, а также погрешности способа, обусловленные погрешностями воспроизведения вертикали в зоне установки магнитометра. Разработаны и проанализированы погрешности бесплатформенной магнитометрической системы, обусловленные погрешностями компонентных измерений и наличием собственного магнитного поля объекта. Показано, что при использовании современных магнитометров, даже без привлечения

инерциальных построителей вертикали, возможно снижение погрешности определения магнитного курса в процессе маневрирования объекта до уровня 1°. Результаты данной работы могут быть использованы при разработке алгоритмов работы магнитоинерциальных бесплатформенных систем ориентации и навигации, а также при исследовании их точностных характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Снигур А.К. Особенности построения интегрированных БИНС с магнитометрическими преобразователями // VI Международная научно-техническая конференция «Гиротехнологии, навигация, управление движением и конструирование авиационно – космической техники»: Сборник докладов. Часть 1/К.: НТУУ «КПИ», 2003. – С. 254–262.
2. Снигур А.К. Бесплатформенный подход к решению задач азимутальной ориентации и определения навигационных и разведываемых параметров геомагнитного поля с помощью магнитометра // Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. Наукові праці КДПУ. – Випуск 4/2007 (45). Частина 1, Кременчук: КДПУ, 2007. – С. 149–152.
3. Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы. – Л.: Энергоатомиздат, Ленинградское отделение, 1986. – 188 с.
4. Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В., Хорев В.Н., Чечурина Е.Н., Щелкин А.П. Средства измерений параметров магнитного поля. – Л.: Энергия, 1979. – 320 с.
5. Бабич О.А., Доброленский Ю.П., Козлов М.С., Монахов В.Г., Потапов М.Д. Авиационные приборы и навигационные системы. – М.: ВВИА Жуковского Н.Е., 1981. – 646 с.
6. Казакова Г.Ф., Кардашинский-Брауде Л.А., Фомкин Я.М. Судовые индукционные и гиромагнитные компасы, стрелочные магнитные компасы с индукционными датчиками. – Л.: ЦНИИ РУМБ, НПО Азимут, 1991. – 60 с.
7. Боднер В.А., Алферов А.В. Измерительные приборы, в 2 – х томах. Том 1. Теория измерительных приборов, измерительные преобразователи. – М.: Издательство стандартов, 1986 - 390 с.
8. Кардашинский-Брауде Л.А. Современные судовые магнитные компасы. – СПб.: ФГПУ ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 1999. – 138 с.

Стаття надійшла 7.05.2008 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Родькіним Д.Й.