

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ MODELING AND SIMULATION

doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-1-138-146

УДК 629.12. 053

Исследование эффективности работы системы коррекции магнитного компаса

Дмитрий Геннадиевич Грязин^{1,2}, Татьяна Владимировна Падерина^{1,2}✉

^{1,2} АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация

^{1,2} Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

¹ volnagdg@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3562-6815>

² paderinata@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0001-5293-6351>

Аннотация

Предмет исследования. В условиях плавания судна при воздействии качки появляются динамические погрешности компаса, обусловленные влиянием перераспределенных магнитных масс судна, а также воздействием центробежного и тангенциального ускорений. Влияние этих погрешностей может быть скомпенсировано введением в измерительную схему компаса системы коррекции, в которой используется один гироскопический датчик угловой скорости. **Метод.** Метод коррекции основан на применении в схеме гироскопического датчика угловой скорости с вертикально расположенной осью чувствительности. Формируемый сигнал представляет собой разность выходного показания магнитного компаса и проинтегрированного сигнала датчика угловой скорости, который не чувствителен к действию переносного ускорения и перераспределенных магнитных масс при крене судна. Полученная разность будет содержать погрешность компаса от воздействия качки, которая в дальнейшем компенсируется в выходном сигнале компаса. Выбор параметров динамических звеньев схемы для реализации системы коррекции и исследования ее работы выполнен методом имитационного моделирования с использованием предложенного аналитического выражения для погрешности магнитного компаса от воздействия качки. Выполнено сравнение результатов моделирования с результатами экспериментальных исследований компаса, проведенных с использованием специализированного стенда, который имитирует рыскание судна и позволяет изменять значение вектора напряженности магнитного поля Земли при воздействии на магнитную систему компаса. **Основные результаты.** Экспериментальные исследования компаса показали, что коэффициент коррекции погрешности от качки при изменении периодов угловых колебаний объекта от 6 до 28 с, который характеризует степень подавления качки, находится в диапазоне 0,16–0,48 (среднее значение 0,35), а при проведении моделирования среднее значение коэффициента — 0,21. Заниженная оценка коэффициента коррекции при моделировании обусловлена отсутствием учета динамических свойств картушки компаса и зависит от соотношения периодов собственных колебаний картушки и периодов возмущающих воздействий. **Практическая значимость.** Полученные результаты подтвердили высокую эффективность рассматриваемой системы коррекции компаса, а также требуемое качество разработанного специализированного стенда для оценки его работы. Результаты исследования могут найти применение при разработке современных магнитных компасов, для обеспечения высокой точности указания курса за счет использования предлагаемой системы коррекции.

Ключевые слова

магнитный компас, качка судна, система коррекции, гироскопический датчик угловой скорости

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-08-00265. Авторы выражают благодарность сотрудникам АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» К.С. Гороховскому и И.В. Сергачёву, участвовавшим в разработке стенда рыскания и проведении исследования характеристик системы коррекции магнитного компаса на этом стенде.

Ссылка для цитирования: Грязин Д.Г., Падерина Т.В. Исследование эффективности работы системы коррекции магнитного компаса // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22, № 1. С. 138–146. doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-1-138-146

A study of the efficiency of the magnetic compass correction system

Dmitriy G. Gryazin^{1,2}, Tatiana V. Paderina^{1,2}✉

^{1,2} Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation

^{1,2} ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

¹ volnagdg@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3562-6815>

² paderinata@gmail.com✉, <https://orcid.org/0000-0001-5293-6351>

Abstract

In sailing conditions under the rolling, dynamic compass errors may appear due to the influence of the redistributed magnetic masses of the ship, as well as of centripetal and tangential accelerations. The influence of these errors can be compensated by introducing a correction system into the measuring circuit of the compass, which uses one gyroscopic angular rate sensor. The correction method is based on the use of a gyroscopic angular rate sensor with a vertical axis of sensitivity in the circuit. The generated signal is the difference between the output reading of the magnetic compass and the integrated signal of the angular rate sensor, which is insensitive to the action of translational acceleration and redistributed magnetic masses during the ship's heel. The resulting difference will contain the compass error from the rolling effect, further compensated for in the compass output signal. The choice of the parameters of the dynamic links of the circuit for the implementation of the correction system and the study of its operation was carried out by simulation method using the proposed analytical expression for the error of the magnetic compass from the rolling effect. Comparison of the simulation results with the results of experimental studies of the compass was carried out using a specialized stand that simulates the yaw of a ship and allows one to change the value of the vector of the Earth's magnetic field, when exposed to the magnetic system of the compass. Experimental studies of the compass showed that the pitching error correction coefficient is in the range 0.16-0.48 (average value is 0.35), when the object's angular oscillation periods change from 6 to 28 s, which characterizes the degree of pitching suppression, and when modeling, the average value of the coefficient is 0.21. The underestimation of the correction factor in modeling is due to the lack of taking into account the dynamic properties of the compass rose and depends on the ratio of the periods of natural oscillations of the compass and the periods of disturbing influences. The results confirmed the high efficiency of the considered compass correction system and the required quality of the developed specialized stand for evaluating its work. The results of the study can be used in the development of modern magnetic compasses to ensure high accuracy of directional guidance through the use of the proposed correction system.

Keywords

magnetic compass, ship pitching, compass correction system, gyroscopic angular rate sensor

Acknowledgements

This work was supported by the RFBR grant No. 20-08-00265. The authors express their gratitude to the employees of State Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC, K.S. Gorokhovskiy and I.V. Sergachev, who participated in the development of the yaw stand and the study of the characteristics of the magnetic compass correction system on this stand.

For citation: Gryazin D.G., Paderina T.V. A study of the efficiency of the magnetic compass correction system. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 1, pp. 138–146 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2022-22-1-138-146

Введение

Развитие навигационного приборостроения привело к появлению на кораблях и судах значительного числа навигационных приборов, использующих новейшие технологии. К их числу следует отнести электронные картографические навигационные системы, спутниковые GPS-компасы и др. По требованиям международной конвенции по безопасности человеческой жизни на море — SOLAS, которые отражены в правилах по оборудованию морских судов Российского морского регистра судоходства¹, магнитным компасом (МК) должно быть оборудовано каждое судно. Аналогичные требования выдвигаются и к речным судам. Традиционно эксплуатация МК на судне сопровождается периодическими девиационными работами, направленными на компенсацию влияния намагниченности судовой стали на показания МК. Эти работы проводятся при условии влияния на чувствительный элемент МК конкретного

значения горизонтальной и вертикальной составляющих магнитного поля Земли, а их регулярность зависит от квалификации экипажа. Методика девиационных работ хорошо известна², а их результаты контролируются инспекторами регистров. Отметим, что работам по устранению девиации посвящено множество исследований, в частности [1–4], однако все они направлены на компенсацию статической погрешности МК. В условиях плавания судна происходит изменение значения составляющих магнитного поля Земли, приводящее к перемагничиванию магнитомягкого судового железа, кроме того, на качке, сопровождающей плавание судна, влияние судовых магнитных сил постоянно изменяется [5–7]. На величину динамической погрешности МК влияют центробежное и тангенциальное ускорения при воздействии качки, ускорения от поперечно горизонтальных колебаний судна, исследованием влияния которых в свое время занимался Н.Ю. Рыбалтовский [8]. Эту совокупность ускорений далее определим

¹ Правила по оборудованию морских судов. Часть V. Навигационное оборудование. Российский морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2020, 246 с.

² Правила штурманской службы №38. Девиационные работы на кораблях и судах военно-морского флота. Главное управление навигации и океанографии МО РФ. 1994.

как переносные, в основном обусловленные тем, что компас установлен на некотором плече относительно центра качания судна. Указанные погрешности при плавании судна в высоких широтах в условиях, когда горизонтальная составляющая магнитного поля много меньше вертикальной, могут приводить к значительной ошибке в измерении и индикации курса МК [9, 10]. В умеренных широтах динамические погрешности приводят к избыточному рысканию картушки на качке, которое не отражает действительного значения рыскания судна [11].

Если на крупнотоннажных судах главный судовой МК и остается резервным средством, используемым только в аварийных ситуациях, то на судах водоизмещением до 150 т он является основным курсоуказателем и встраивается в систему авторулевого [12–14]. Отметим, что активизация судоходства в арктической зоне¹ делает задачу снижения динамических погрешностей МК еще более актуальной.

Влияние динамических погрешностей может быть скомпенсировано с помощью введения в измерительную схему МК системы коррекции, в которой используется один гироскопический датчик угловой скорости. Цель работы — разработка системы коррекции магнитного компаса и оценка эффективности ее работы с использованием результатов имитационного моделирования и стендовых испытаний. Испытания проведены на специализированном стенде, имитирующем рыскание судна с заданной частотой, а также позволяющем изменить значение естественного вектора напряженности магнитного поля Земли, воздействующего на магнитную систему компаса.

Динамические погрешности магнитного компаса

Магнитная система компаса в общем случае представляет собой систему со сосредоточенными параметрами. Рассмотрим работу судового МК, в котором картушка помещена в котелок и покоится в вязкой жидкости [15, 16] (рис. 1).

Динамические характеристики МК при синусоидальном рыскании судна с частотой ω опишем следующим уравнением второго порядка:

$$(J_B + \lambda_B)\ddot{\phi} + W_B\dot{\phi} + (M\mu H_T + N)\sin\phi = A\sin(\omega_K + \phi_\Phi),$$

где ϕ — угол разворота картушки при рыскании; J_B — момент инерции картушки относительно вертикальной оси; λ_B — присоединенный момент инерции жидкости при развороте картушки относительно вертикальной оси; W_B — коэффициент гидродинамического сопротивления развороту картушки при ее развороте относительно вертикальной оси; M — магнитный момент картушки; μ — магнитная (постоянная) проницаемость в вакууме; H_T — горизонтальная составляющая маг-

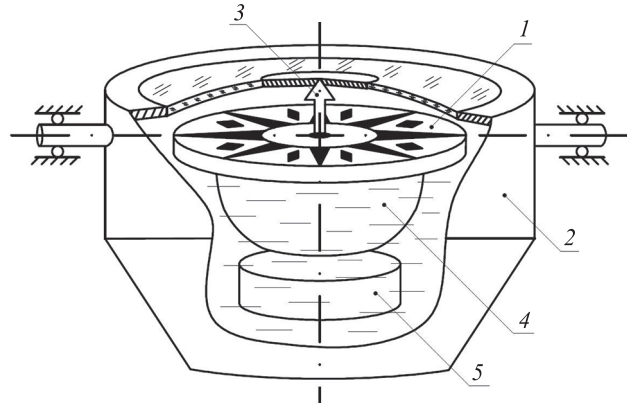


Рис. 1. Котелок судового магнитного компаса:
1 — картушка; 2 — котелок с жидкостью; 3 — игла;
4 — кольцевая магнитная система;
5 — магниторезистивный преобразователь

Fig. 1. Bowler of a ship's magnetic compass: 1 — card; 2 — pot with liquid; 3 — needle; 4 — ring magnetic system; 5 — magnetoresistive transducer

нитного поля Земли; N — момент сил сухого трения; A , $\omega = 2\pi/T$, T и ϕ_Φ — амплитуда, круговая частота, период и фаза вынужденных колебаний картушки под воздействием рыскания соответственно. Коэффициент W_B — функция от угловой скорости разворота картушки, однако в гидродинамике его принято обозначать одной переменной. Он определяет демпфирующую силу и всегда имеет знак, противоположный угловой скорости разворота картушки. Горизонтальная составляющая магнитного поля Земли, определяющая направляющую силу МК, изменяется в различных местах Земного шара от нуля на магнитных полюсах до значения 32 А/м у южной оконечности Азии.

При отклонении судна от горизонтального положения возникает креновая девиация, величина которой зависит от проекции вертикальной составляющей индукции (напряженности) магнитного поля судна H_{BC} и определяется величиной крена и дифферента на плоскость картушки МК. Таким образом, при крене судна на угол θ возникает добавочная сила [17]:

$$F_K = ((e - k)H_B - H_{BC})\theta,$$

где e и k — постоянные коэффициенты (параметры Пуассона), характеризующие тензор влияния индуктивной намагниченности, которая зависит от широты места и перемагничивания магнитомягкого железа; H_B и H_{BC} — проекции вертикальной составляющей вектора магнитного поля Земли и постоянной намагниченности корабельных конструкций в корабельной системе координат.

Добавочная сила F_K вызывает дополнительную погрешность ΔH_K в измерениях горизонтальной составляющей поля Земли [17]. В случае значительных углов бортовой качки и одновременного воздействия килевой, значения F_K и ΔH_K могут существенно увеличиться. Значение дополнительной погрешности зависит от знака угла крена и на качке имеет знакопеременный характер, в связи с этим погрешность проявляется в виде дополнительного угла рыскания показаний МК,

¹ 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]. Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74710556>, своб. яз. рус. (дата обращения: 08.09.2021).

пропорционального углу качки. На курсах 0 и 180° она максимальна, и может достигать 3° на каждый градус крена [18], а на курсах 90 и 270° равна нулю. При изменении магнитной широты места величина F_K будет изменяться. В работе [19] академика А.Н. Крылова креновая девиация пропорциональна тангенсу угла магнитного наклона в точке местоположения судна и компенсируется специальным магнитом, установленным в нактоузе. Для компенсации креновой девиации по мере изменения широты плавания должно изменяться и положение магнита, однако этой работой экипаж, как правило, не занимается. В случае выполнения текущих работ по компенсации креновой девиации с применением судового инклинометра, ее остаточное значение обязательно будет присутствовать в связи с изменением индуктивной намагниченности судового металла на текущей широте и намагниченности при перемещении груза на палубе.

Конструкция современных МК позволяет ослабить влияние ускорений качки на чувствительный элемент компаса, но не исключает его полностью [16]. Для исключения влияния ускорения котелок МК устанавливается в двусном кардановом подвесе и представляет собой короткопериодный маятник. В свою очередь картушка МК с магнитной системой, помещенная в котелок с жидкостью (рис. 1), также является маятником, период колебаний которого составляет несколько десятков секунд. Под воздействием переносного ускорения a картушка МК отклоняется от плоскости горизонта, и ее наклон вызывает появление проекции ΔB вертикальной составляющей индукции магнитного поля B , действующей на магнитную систему МК [18]:

$$\Delta B = B \sin(a/g) K_M,$$

где g — ускорение силы тяжести; K_M — магнитный курс.

Суммарная динамическая погрешность МК от качки δ_p , обусловленная действием креновой девиации и переносного ускорения, зависит от погрешностей ΔB и ΔH_K в измерении горизонтальной составляющей магнитного поля Земли.

Учитывая приведенную в [8] формулу для погрешности МК от влияния переносного ускорения, а также от действия ΔH_K , суммарную погрешность δ_p можно представить в виде:

$$\text{tg} \delta_p = \left(\frac{h}{l_0} + \frac{\Delta H_K}{H_T} \right) \text{tg} I \cos K_M \cdot \theta, \quad (1)$$

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; I — угол магнитного наклона.

Выражение (1) использовано при проведении имитационного моделирования работы системы коррекции.

Погрешность δ_p пропорциональна тангенсу магнитного наклона, значение которого резко возрастает с увеличением широты места. Рост погрешности δ_p в высоких широтах на фоне естественного снижения горизонтальной составляющей магнитного поля

Земли может привести к недопустимой погрешности компаса.

Влияние погрешности δ_p может быть скомпенсировано в случае измерения углов рыскания гироскопическим датчиком, не подверженным влиянию переносного ускорения и перераспределенных магнитных масс при крене судна.

Установку гироскопического датчика угловой скорости (ДУС) с вертикальной осью чувствительности по конструктивным соображениям целесообразно производить на котелке компаса. Погрешность измерения угловой скорости рыскания ДУС из-за наклона котелка составит $\Delta \dot{\gamma}_p = \dot{\gamma}_p (-\delta\theta_k \sin\theta_k \cos\psi_k - \delta\psi_k \sin\psi_k \cos\theta_k)$, где $\dot{\gamma}_p$ — угловая скорость рыскания; $\delta\theta_k$ и $\delta\psi_k$ — текущие значения углов наклона котелка по крену и дифференциалу. Поскольку конструкция МК обеспечивает наклоны котелка на углы $\theta_k = \psi_k = \pm 10^\circ$ [16], максимальное значение погрешности $\Delta \dot{\gamma}_p$ при условии $\delta\theta_k = \theta_k$ и $\delta\psi_k = \psi_k$ будет равно: $\Delta \dot{\gamma}_p = -\dot{\gamma}_p (\theta_k^2 + \psi_k^2)$, откуда следует, что эта погрешность не превышает 3 % от величины $\dot{\gamma}_p$. Погрешность $\Delta \dot{\gamma}_p$ является незначительной по сравнению с погрешностью δ_p , зависящей от тангенса угла магнитного наклона.

Система коррекции магнитного компаса

На рис. 2 приведена блок-схема системы коррекции МК [20], входными сигналами которой являются сигналы датчика магнитного курса (ДМК) и ДУС.

Идея комплексирования информации инерциальных датчиков и магнитометров встречается во многих современных публикациях, например [21, 22]. В этих публикациях магнитометры используются, как правило, для коррекции ряда выходных параметров объекта, в частности параметров ориентации, выработанных инерциальными датчиками и имеющих, в силу этого, накапливающиеся со временем погрешности.

В рассматриваемой системе коррекции компаса решается другая задача — с помощью ДУС корректируется сигнал МК, при этом для формирования разностного измерения по угловой информации выходной сигнал ДУС интегрируется. Полученное таким образом измерение, содержащее погрешность компаса δ_p , пропускается через входящий в систему коррекции фильтр высоких частот (ФВЧ) с целью устранения, прежде всего, постоянной погрешности ДУС. Результатом работы системы коррекции является определение погрешности и исключение ее из показаний компаса. Благодаря системе коррекции МК приобретает свойства гироскопического компаса, представляющего собой магнитный курсоуказатель с гироскопическим устройством, обеспечивающим так же, как и система коррекции в МК, сглаживание показаний магнитного чувствительного элемента [23].

Работа системы коррекции включает следующие действия (рис. 2).

1. Выработку с помощью ДМК сигнала о мгновенных значениях курса в горизонтальной системе координат, состоящего из магнитного курса K_M , угла рыскания γ_p и погрешности δ_p : $K_M + \gamma_p + \delta_p$, при этом

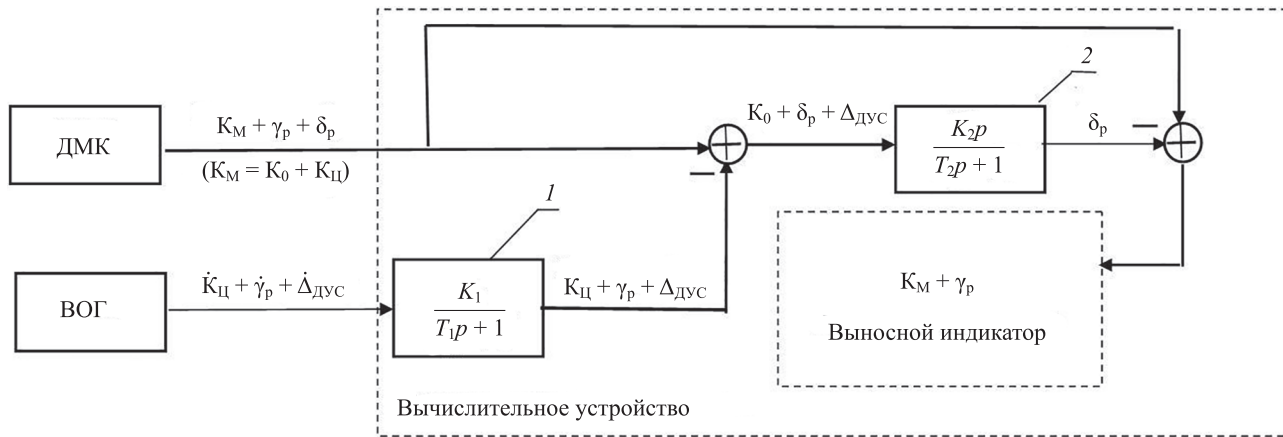


Рис. 2. Блок-схема системы коррекции магнитного компаса: 1 — интегратор $\frac{K_1}{T_1 p + 1}$; 2 — фильтр высоких частот $\frac{K_2 p}{T_2 p + 1}$ (где K_1, K_2 — коэффициенты усиления, T_1, T_2 — постоянные времени)

Fig. 2. Block diagram of the magnetic compass correction system: 1 — integrator $\frac{K_1}{T_1 p + 1}$; 2 — high-pass filter $\frac{K_2 p}{T_2 p + 1}$ (where K_1, K_2 — the gain, T_1, T_2 — the time constant)

- $K_M = K_0 + K_C$, где K_0 — постоянное значение угла магнитного курса, K_C — угол циркуляции объекта.
- Выработку с помощью ДУС сигнала угловой скорости, состоящего из угловых скоростей изменения курса \dot{K}_C , угла рыскания $\dot{\gamma}_p$, погрешности ДУС $\Delta_{ДУС}$, характеризуемой его дрейфом: $K_C + \dot{\gamma}_p + \Delta_{ДУС}$.
 - Интегрирование сигнала ДУС с помощью апериодического звена $\frac{K_1}{T_1 p + 1}$ при нулевом начальном условии и формирование на выходе интегратора сигнала $K_C + \gamma_p + \Delta_{ДУС}$.
 - Вычисление разности между выходными сигналами ДМК и интегратора с целью формирования сигнала $K_0 + \delta_p + \Delta_{ДУС}$.
 - Фильтрацию низкочастотной погрешности $\Delta_{ДУС}$ вместе с сигналом K_0 с помощью ФВЧ $\frac{K_2}{T_2 p + 1}$.
 - Исключение из значений магнитного курса погрешности δ_p путем вычисления разности между выходным сигналом ДМК и сигналом с выхода ФВЧ, пропорциональным погрешности δ_p .

Особенность системы коррекции — использование в качестве ДУС волоконно-оптического гироскопа (ВОГ), дрейф смещения нуля которого $\Delta_{ДУС}$ от пуска к пуску характеризуется случайной постоянной, в силу чего его влияние может быть устранено с помощью применения ФВЧ.

Параметры динамических звеньев схемы (рис. 2) имеют следующие численные значения:

- $T_1 = 7200$ с, что определяется необходимостью сокращения времени переходного процесса и величины перерегулирования при интегрировании сигналов ДУС, особенно при маневрировании судна; коэффициент усиления K_1 при таком значении T_1 равен 7200;
- $T_2 = 40$ с, что определяется необходимостью передачи без искажений сигнала δ_p , зависящего от периодов бортовой и килевой качек, значения которых

для большинства типов судов¹ находятся, соответственно, в диапазонах 6–28 с и 3–14 с; коэффициент усиления K_2 также равен 40.

Моделирование работы системы коррекции магнитного компаса

С целью оценки характеристик МК с системой коррекции выполнено моделирование ее работы в среде MATLAB (Simulink). Общая схема моделирования приведена на рис. 3.

При моделировании углы рысканья и крена судна задавались в виде гармонических колебаний [24]:

$$K = K_0 + \gamma_p, \gamma_p = A_p \sin[(2\pi/T_p)t + \psi_p],$$

$$\theta = A_\theta \sin[(2\pi/T_\theta)t + \psi_\theta],$$

где A_p и A_θ — амплитуды гармонических колебаний углов рысканья и крена судна; $T_p, T_\theta, \psi_p, \psi_\theta$ — периоды и фазы соответствующих колебаний (фазы $\psi_p, \psi_\theta = 0$).

Заданные при формировании пропорциональной углам крена погрешности δ_p , значения коэффициентов $\frac{\Delta H_K}{H_\Gamma}$ и $\frac{h}{l_0}$ соответственно составляют 0,05 и 1, $\text{tg} l = 3$ (для широты 60°).

Проведенное моделирование системы коррекции для различных условий углового движения судна подтвердило ее эффективность при использовании ВОГ тактического класса точности с характеристикой смещения нуля от пуска к пуску, заданного случайной постоянной со среднеквадратическим отклонением $\sigma = 3^\circ/\text{ч}$.

Характеристикой эффективности системы коррекции является коэффициент подавления погрешности

¹ Благовещенский С.Н., Холодилилин А.Н. Справочник по статике и динамике корабля. Т. 2. Динамика (качка) корабля. Л.: Судостроение, 1976. 178 с.



Рис. 3. Общая схема моделирования работы системы коррекции магнитного компаса
 Fig. 3. General scheme for modeling the operation of the magnetic compass correction system

от качки K_{Π} , который рассчитывается следующим образом:

$$K_{\Pi} = \max|DK_M|/\max|\delta_p|,$$

где $\max|DK_M|$ — максимальное значение абсолютной величины погрешности системы коррекции DK_M , рассчитанное на интервале времени, составляющем 3–5 периодов колебаний углов крена; DK_M — разность выходного сигнала МК с системой коррекции и истинного значения магнитного курса; $\max|\delta_p|$ — максимальное значение абсолютной величины погрешности δ_p , рассчитанное на интервале времени, составляющем 3–5 периодов колебаний углов крена.

При моделировании задавалось постоянное значение курса $K_0 = 0^\circ$, рыскание судна с периодом 5–10 с и амплитудой — 5° , бортовая качка с периодами 6–28 с и амплитудой — 20° .

Как показывают результаты моделирования, коэффициент подавления погрешности от качки K_{Π} зависит от численных значений периодов крена и имеет детерминированное значение для каждого заданного периода крена. В таблице приведены значения коэффициента K_{Π} для различных численных значений периодов крена.

Таблица. Зависимость коэффициента подавления погрешности от качки K_{Π} от значений периодов крена

Table. Dependence of the coefficient of suppression of error from pitching on the values K_s for the roll periods

Период крена, с	Коэффициент K_{Π}
28,0	0,25
20,0	0,24
15,0	0,22
12,0	0,20
10,0	0,18
9,0	0,17
8,0	0,15
7,0	0,13
6,0	0,12

Видно, что значения коэффициентов подавления погрешности, приведенные в таблице, показывают хорошее качество предложенной системы коррекции.

Моделирование работы МК с системой коррекции проведено и в условиях циркуляции судна. Выполнен анализ результатов моделирования работы МК при следующих условиях: в отсутствие качки при повороте судна с начального значения курса 0° до значения курса 90° с постоянной угловой скоростью от 3 до $6^\circ/\text{с}$. В результате следует, что погрешность работы МК с системой коррекции составляет $\pm 0^\circ 22' 12''$, при этом время переходного процесса не превышает 140 с.

Стенд рыскания для оценки эффективности работы системы коррекции магнитного компаса

Эффективность работы системы коррекции МК, позволяющей снизить влияние динамических погрешностей в условиях качки судна, может быть экспериментально оценена с помощью специализированного стенда. Этот 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 и внешний вид стенда представлены на рис. 4.

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 МК на ограниченный угол, на картушку МК наводится дополнительное магнитное поле, имитирующее изменяющуюся погрешность δ_p . Таким образом, при воспроизведении рыскания картушка компаса отклонится от значения физического рыскания на дополнительный угол. Система коррекции при этом компенсирует воздействие дополнительной креновой погрешности.

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

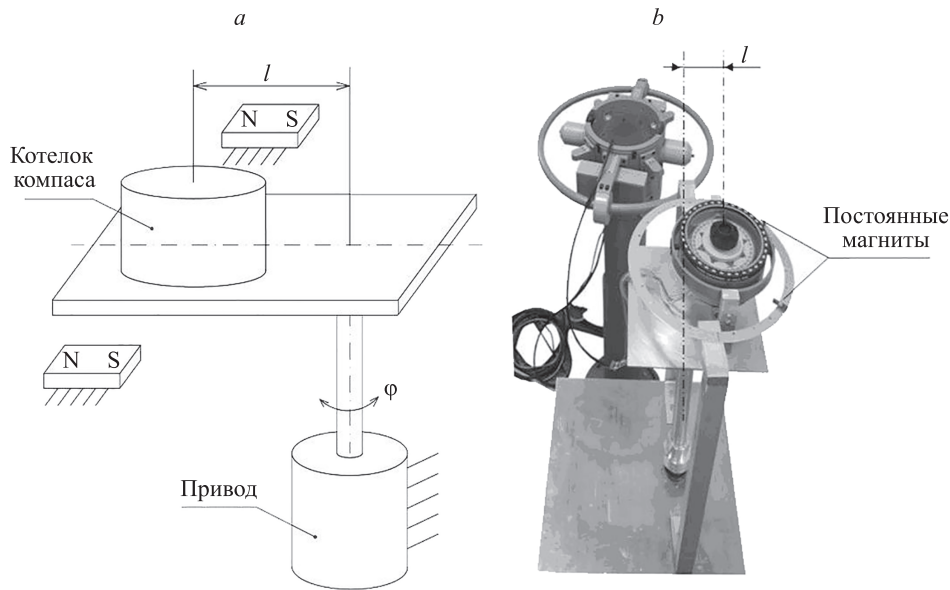


Рис. 4. Кинематическая схема (а) и внешний вид (б) стенда рыскания
 Fig. 4. Kinematic diagram (a) and configuration (b) of the yaw stand

Выполненное на разработанном стенде исследование макета МК с системой коррекции показало эффективность его применения для оценки работы МК.

Лабораторные исследования режимов функционирования системы коррекции магнитного компаса

Экспериментальные исследования работы системы коррекции проведены при использовании опытного образца котелка МК «Азимут КМ05Д»¹, установленного на стенде рыскания. При этом на котелке был размещен ВОГ ВГ071ТС².

Исследования выполнены на широте 60° с.ш. с горизонтальной составляющей напряженности магнитного поля 15 ± 1 мкТл в условиях действия нескомпенсированного значения погрешности от качки, составляющего не менее 10°. Задаваемые значения постоянных времени динамических звеньев системы коррекции варьировались: T_1 от 9200 до 7200 с, T_2 от 40 до 60 с. Измерения выполнялись при воспроизведении рыскания в диапазоне углов ±10° с периодами от 5 до 40 с.

На рис. 5 показаны графики результатов моделирования и стендовых испытаний. При моделировании значения коэффициента подавления погрешности от качки K_{Π} получены в зависимости от периодов возмущающих воздействий (углов крена), а при стендовых испытаниях — от заданных при проведении экспериментальных

исследований периодов возмущающих воздействий (углов рыскания).

Результаты стендовых испытаний показали, что значения K_{Π} находятся в диапазоне от 0,16 до 0,48 со средним значением 0,35 при изменении периодов рыскания от 6 до 28 с. Для аналогичного диапазона изменения периодов крена среднее значение K_{Π} , полученное по результатам моделирования, составляет 0,21. Заниженная оценка значений K_{Π} при моделировании обусловлена тем, что не учтены динамические свойства картушки МК, зависящие от соотношения периода собственных колебаний картушки и периода возмущающих воздействий. Резкое увеличение значения K_{Π} при приближении периода возмущающих воздействий к значению 40 с связано с близостью этого значения к постоянной времени ФВЧ (рис. 2).

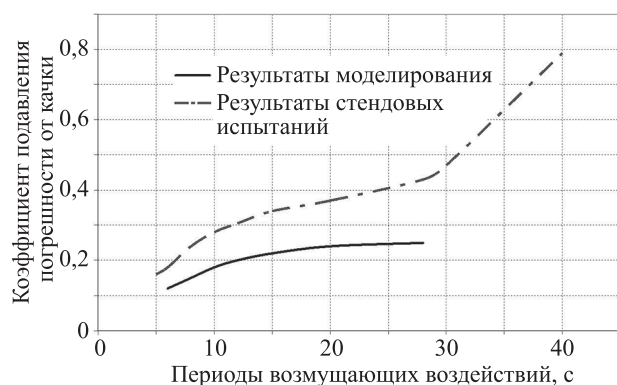


Рис. 5. Зависимость коэффициента подавления погрешности от качки от значений периодов возмущающих воздействий

по результатам моделирования и стендовых испытаний
 Fig. 5. Dependence of the coefficient of suppression of the error from the pitching on the values for the periods of disturbing influences according to the results of modeling and bench tests

¹ Азимут КМ05Д. Магнитный компас [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.elektroprbor.spb.ru/katalog/navigatsionnye-pribory/azimut-km05d-vseshirotnyy-magnitnyy-kompas>, своб. яз. рус. (дата обращения: 08.09.2021).

² Группа ВГ071. Волоконно-оптические гироскопы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.fizoptika.ru/catalog/gruppa-vg-071>, своб. яз. рус. (дата обращения: 08.09.2021).

Экспериментальные исследования работы МК с системой коррекции на стенде проведены также в режиме циркуляции, т. е. при развороте стенда с МК с постоянной угловой скоростью. Результаты экспериментальных исследований показали, что при развороте судна с угловой скоростью циркуляции 3 °/с и больше, МК с системой коррекции обеспечивает снижение погрешности курсоуказания более чем в два раза по сравнению с МК без системы коррекции. При этом время переходного процесса составляет не более 100–140 с, что хорошо согласуется с результатами проведенного моделирования.

Заключение

Конструкция и тактико-технические характеристики магнитных компасов все время совершенствуются. Как показывает практика судовождения, магнитный компас на многих судах остается резервным средством курсоуказания, к использованию которого прибегают лишь в чрезвычайных ситуациях, связанных, например, с выходом из строя судовых генераторов энергии, с отказом гирокомпаса и в других случаях. Несмотря на все попытки избежать подобных ситуаций, они, к сожалению, еще часто встречаются. Опрос судоводителей на эту

тему, проходящих курсы повышения квалификации в Центре дополнительного образования при ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова, показал, что 87,8 % штурманов применяли в своей практике магнитные компасы. Повсеместная экономия судовладельцев на судовом оборудовании также способствует активному использованию магнитных компасов, которыми должно быть оборудовано каждое судно.

Предложенная система коррекции позволяет придать магнитному компасу свойства гиромагнитного компаса, а при установке компаса в систему авто-рулевого улучшить характеристики этой системы и расширить ее функциональность за счет более точного удержания судна на заданном курсе. Применение данной системы коррекции наиболее эффективно при плавании в высоких широтах, однако и в умеренных широтах она позволяет снизить погрешность от качки не менее, чем в четыре раза. Ее применение обеспечивает также повышение стабильности текущего показания курса на цифровом индикаторе рулевого при воздействии качки, что делает управление судном более эффективным.

Закончим настоящую работу словами академика А.Н. Крылова: «Компас инструмент малый, но, если бы его не было, Америка не была бы открыта».

Литература

1. Кардашинский-Брауде Л.А. Девиация магнитных компасов. Л.: ЦНИИ «Румб», 1986. 81 с.
2. Воронов В.В., Кардашинский-Брауде Л.А. Универсальный широтный компенсатор девиации магнитного компаса // Навигация и гироскопия. 1990. № 2.
3. Arribalzaga J., Martinez A.T., Vila J.A. Analysis and calculation of the magnetic moment of a magnet compensation for type A magnetic needle // *Journal of Maritime Research*. 2013. V. 10. N 2. P. 80–81.
4. Androjna A., Belev B., Pavic I., Perkovič M. Determining residual deviation and analysis of the current use of the magnetic compass // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2021. V. 9. N 2. P. 1–15. <https://doi.org/10.3390/jmse9020204>
5. Van Suong Nguyen. Calculation of the deviation coefficients for marine magnetic compass // *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs and Shipping*. 2019. V. 2. N 2. P. 112–115. <https://doi.org/10.1080/25725084.2019.1569336>
6. Meleshko V.V., Lakoza S.L., Sharov S.A. Method of identifying and eliminating magnetic compass deviation // *Proc. of the IEEE 1st Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON 2017)*. 2017. P. 288–291. <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100494>
7. Iribar I.B., Munoz J.A.V., Labajos C.A.P. Latitude error in compass deviation: Mathematical method to determine the latitude error in magnetic compass deviation // *Polish Maritime Research*. 2014. V. 21. N 3. P. 25–31. <https://doi.org/10.2478/pomr-2014-0026>
8. Рыбалтовский Н.Ю. Магнитно-компасное дело. Л.: Водтрансиздат, 1954. 492 с.
9. Грязин Д.Г., Сергачев И.В. Влияние внешних факторов на переходные процессы магнитных компасов в высоких широтах // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2020. Т. 63. № 10. С. 921–929. <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2020-63-10-921-929>
10. Грязин Д.Г., Падерина Т.В., Сергачев И.В. О возможности использования судовых магнитных компасов в высоких широтах // *Материалы XXXII конференции памяти выдающегося конструктора гироскопических приборов Н.Н. Острякова*. СПб.: АО «Концерн» ЦНИИ «Электроприбор», 2020. С. 122–125.
11. Грязин Д.Г., Падерина Т.В. Мехатронные устройства управления современным судовым магнитным компасом // *Мехатроника,*

References

1. Kardashinskii-Braude L.A. *Deviations of Magnetic Compasses*. Leningrad, CNII Rumb, 1986, 81 p. (in Russian)
2. Voronov V.V., Kardashinskii-Braude L.A. *Universal latitude compensator for magnetic compass deviation*. Navigation and Gyroscopy, 1990, no. 2. (in Russian)
3. Arribalzaga J., Martinez A.T., Vila J.A. Analysis and calculation of the magnetic moment of a magnet compensation for type A magnetic needle. *Journal of Maritime Research*, 2013, vol. 10, no. 2, pp. 80–81.
4. Androjna A., Belev B., Pavic I., Perkovič M. Determining residual deviation and analysis of the current use of the magnetic compass. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, vol. 9, no. 2, pp. 1–15. <https://doi.org/10.3390/jmse9020204>
5. Van Suong Nguyen. Calculation of the deviation coefficients for marine magnetic compass. *Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs and Shipping*, 2019, vol. 2, no. 2, pp. 112–115. <https://doi.org/10.1080/25725084.2019.1569336>
6. Meleshko V.V., Lakoza S.L., Sharov S.A. Method of identifying and eliminating magnetic compass deviation. *Proc. of the IEEE 1st Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON 2017)*, 2017, pp. 288–291. <https://doi.org/10.1109/UKRCON.2017.8100494>
7. Iribar I.B., Munoz J.A.V., Labajos C.A.P. Latitude error in compass deviation: Mathematical method to determine the latitude error in magnetic compass deviation. *Polish Maritime Research*, 2014, vol. 21, no. 3, pp. 25–31. <https://doi.org/10.2478/pomr-2014-0026>
8. Rybalovskii N.Iu. *Magnetic Compass*. Leningrad, Vodtransizdat Publ., 1954, 492 c. (in Russian)
9. Gryazin D.G., Sergachev I.V. Influence of external factors on transient processes of magnetic compass at high latitudes. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, vol. 63, no. 10, pp. 921–929. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/0021-3454-2020-63-10-921-929>
10. Gryazin D.G., Paderina T.V., Sergachev I.V. On the possibility of using ship's magnetic compasses at high latitudes. *Proc. of the 32nd conference in memory of N.N. Ostryakov*, St. Petersburg, Concern CSRI Elektropribor, 2020, pp. 122–125. (in Russian)
11. Gryazin D.G., Paderina T.V. Mechatronic control devices for a modern ship's magnetic compass. *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2021, vol. 22, no. 8, pp. 425–432. (in Russian). <https://doi.org/10.17587/mau.22.425-432>

- автоматизация, управление. 2021. Т. 22. № 8. С. 425–432. <https://doi.org/10.17587/mau.22.425-432>
12. Lushnikov E. Magnetic compass in modern maritime navigation // *TransNav. International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2015. V. 9. N 4. P. 539–543. <https://doi.org/10.12716/1001.09.04.10>
 13. Lushnikov E. The reliability of compass information at navigational safety // *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*. 2012. N 29. P. 117–121.
 14. Basterretxea-Iribal I., Sotés I., Uriarte J.I. Towards an improvement of magnetic compass accuracy and adjustment // *Journal of Navigation*. 2016. V. 69. N 6. P. 1325–1340. <https://doi.org/10.1017/S0373463316000138>
 15. Казакова Г.Ф., Кардашинский-Брауде Л.А., Фомкин Я.И. Судовые индукционные и гидромагнитные компасы, стрелочные магнитные компасы с индукционными датчиками. Л.: НПО «Азимут», 1991. 62 с.
 16. Кардашинский-Брауде Л.А. Современные судовые магнитные компасы. СПб.: ФГУП ГНЦ РФ — ЦНИИ «Электроприбор», 1999. 137 с.
 17. Нечаев П.А., Григорьев В.В. Магнитно-компасное дело. 4-е изд. М.: Транспорт, 1983. 240 с.
 18. Кардашинский-Брауде Л.А. Повышение динамической устойчивости показаний судовых магнитных компасов при горизонтальных ускорениях [Электронный ресурс]. URL: <http://www.navydevices.ru/informations/section-publications/publications/85-2002-09-21-13-29-52>, свободный. Яз. рус. (дата обращения: 23.07.2020).
 19. Крылов А.Н. О возмущениях показаний компасов, происходящих на качке корабля на волнении // *Избранные труды академика А.Н. Крылова*. М.: Изд. АН СССР, 1958. С. 115–170.
 20. Зиненко В.М., Грязин Д.Г., Молочников А.А., Сергачев И.В., Матвеев Ю.В., Короленко И.В. Способ измерения магнитного курса судна в высоких широтах и устройство для его реализации. Патент RU2688900C1. Бюл. 2019. № 15.
 21. Бороначин А.М., Лукомский Ю.А., Шпекторов А.Г., Ха Мань Тханг, Чан Танг Дык. Курсовертикаль для задач управления движением скоростного судна // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2012. № 4. С. 75–80.
 22. Бороначин А.М., Лукомский Ю.А., Шпекторов А.Г., Ха Мань Тханг, Чан Танг Дык. Обоснование требований к системам навигации и ориентации при решении задач управления движением подвижных объектов // *Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2012. № 2. С. 77–80.
 23. Кожухов В.П., Воронов В.В., Григорьев В.В. Магнитные компасы. М.: Транспорт, 1981. 212 с.
 24. Бородай И.К., Мореншильдт В.А., Виленский Г.В. Прикладные задачи динамики судов на волнении. Л.: Судостроение, 1989. 258 с.
 25. Lushnikov E. Magnetic compass in modern maritime navigation. *TransNav. International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2015, vol. 9, no. 4, pp. 539–543. <https://doi.org/10.12716/1001.09.04.10>
 26. Lushnikov E. The reliability of compass information at navigational safety. *Scientific Journals of the Maritime University of Szczecin*, 2012, no. 29, pp. 117–121.
 27. Basterretxea-Iribal I., Sotés I., Uriarte J.I. Towards an improvement of magnetic compass accuracy and adjustment. *Journal of Navigation*, 2016, vol. 69, no. 6, pp. 1325–1340. <https://doi.org/10.1017/S0373463316000138>
 28. Kazakova G.F., Kardashinskii-Braude L.A., Fomkin Ia.I. *Ship Induction and Hydromagnetic Compasses, Needle Magnetic Compasses with Inductive Sensors*. Leningrad, NPO “Azimut”, 1991, 62 c. (in Russian)
 29. Kardashinskii-Braude L.A. *Modern Marine Magnetic Compasses*. St. Petersburg, Concern CSRI Elektropribor, 1999, 137 p. (in Russian)
 30. Nechaev P.A., Grigorev V.V. *Magnetic Compass*. Moscow, Transport Publ., 1983, 240 p. (in Russian)
 31. Kardashinskii-Braude L.A. *Increasing the dynamic stability of ship's magnetic compass readings at horizontal accelerations*. Available at: <http://www.navydevices.ru/informations/section-publications/publications/85-2002-09-21-13-29-52> (accessed: 23.07.2020). (in Russian)
 32. Krylov A.N. On perturbations of compass readings that occur on the rolling of a ship in waves. *Izbrannye trudy akademika A.N. Krylova*. Moscow, Academy of Sciences of the Soviet Union, 1958, pp. 115–170. (in Russian)
 33. Zinenko V.M., Gryazin D.G., Molochnikov A.A., Sergachev I.V., Matveev Y.V., Korolenko I.V. Method for measuring ship magnetic course in high latitudes and device for its implementation. *Patent RU2688900C1*, 2019. (in Russian)
 34. Boronachin A.M., Lukomski Y.A., Shpektorov A.G., Ha Manh Thang, Tran Tang Duc. Yaw-and-vertical gyro unit for high-speed marine vehicle motion control. *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*, 2012, no. 4, pp. 75–80. (in Russian)
 35. Boronachin A.M., Lukomski Y.A., Shpektorov A.G., Ha Manh Thang, Tran Tang Duc. The basis of navigation system requirements for solving a problem of marine vehicles motion control. *Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*, 2012, no. 2, pp. 77–80. (in Russian)
 36. Kozhukhov V.P., Voronov V.V., Grigorev V.V. *Magnetic Compasses*. Moscow, Transport Publ., 1981, 212 p. (in Russian)
 37. Borodai I.K., Morenshildt V.A., Vilenskii G.V. *Applied Problems of Ship Dynamics in Waves*. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1989, 258 p. (in Russian)

Авторы

Грязин Дмитрий Геннадиевич — доктор технических наук, профессор, главный метролог – начальник отдела, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация; профессор, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc](https://orcid.org/0000-0003-3562-6815) 25638150600, [https://orcid.org/0000-0003-3562-6815, volnagdg@yandex.ru](mailto:volnagdg@yandex.ru)

Падерина Татьяна Владимировна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, 197046, Российская Федерация; доцент, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc](https://orcid.org/0000-0001-5293-6351) 8602442700, [https://orcid.org/0000-0001-5293-6351, paderinata@gmail.com](mailto:paderinata@gmail.com)

Authors

Dmitriy G. Gryazin — D.Sc., Professor, Chief Metrologist, Head of the Department, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation; Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc](https://orcid.org/0000-0003-3562-6815) 25638150600, [https://orcid.org/0000-0003-3562-6815, volnagdg@yandex.ru](mailto:volnagdg@yandex.ru)

Tatiana V. Paderina — PhD, Senior Researcher, Concern CSRI Elektropribor, JSC, Saint Petersburg, 197046, Russian Federation; Associate Professor, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc](https://orcid.org/0000-0001-5293-6351) 8602442700, [https://orcid.org/0000-0001-5293-6351, paderinata@gmail.com](mailto:paderinata@gmail.com)

Статья поступила в редакцию 20.09.2021
Одобрена после рецензирования 24.11.2021
Принята к печати 27.01.2022

Received 20.09.2021
Approved after reviewing 24.11.2021
Accepted 27.01.2022



Работа доступна по лицензии
Creative Commons
«Attribution-NonCommercial»