

УДК 620.179.143.5

ФЕРОЗОНДОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ В ЗАСОБАХ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ЗАГАЛЬНОЇ МІЦНОСТІ СУДНА**О. П. ЗАВАЛЬНЮК**

Кафедра експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики, Херсонська державна морська академія,
м. Херсон, УКРАЇНА
email: olga-zavalnjuk@mail.ru

АНОТАЦІЯ Розглянуто застосування ферозонду у засобах автоматичного контролю загальної міцності судна. Визначено розміри та особливості конструкції ферозондових перетворювачів для вимірювання залишкової намагніченості корпусів суден. Запропоновано використання ферозондів довжиною 100 мм з додатковими обмотками збудження по краях осердь напівелементів з метою досягнення їх максимальної чутливості. Визначено величину додаткових обмоток збудження. Для доведення максимальної чутливості ферозонду з додатковими обмотками збудження виконано чисельне моделювання його роботи.

Ключові слова: корпус судна, механічні напруження, залишкова намагніченість, ферозонд

АННОТАЦИЯ Рассмотрено применение феррозонда в средствах автоматического контроля общей прочности судна. Определены размеры и особенности конструкции феррозондовых преобразователей для измерения остаточной намагниченности корпусов судов. Предложено использование феррозонда длиной 100 мм с дополнительными обмотками возбуждения по краям сердечников полудуэлементов с целью достижения их максимальной чувствительности. Определена величина дополнительных обмоток возбуждения. Для доказательства максимальной чувствительности феррозонда с дополнительными обмотками возбуждения выполнено численное моделирование его работы.

Ключевые слова: корпус судна, механические напряжения, остаточная намагниченность, феррозонд

**FLUXGATE TRANSDUCERS IN MEANS OF GENERAL HULL STRENGTH
AUTOMATIC CONTROL****О. P. ZAVALNIUK**

Department of operation of marine electrical equipment and automation, Kherson state maritime academy, Kherson, UKRAINE

ABSTRACT The application of the flux-gate in the means of general hull strength automatic control is considered. Because of the special and difficult operating conditions of the ship's hulls dimensions and design used flux-gates must be such as to achieve their maximum sensitivity. The objective of this research is to determine the dimensions and design features of flux-gates to measure the ship's hulls residual magnetization. The use of flux-gate with length of 100 mm with additional windings on the cores edges of half-cell to achieve their maximum sensitivity is proposed. This allows to measure the integral value of the magnetic field intensity for the whole length of the core. The value of additional windings, which is 0.3 of the length of flux-gate core on its each edges is determined. To prove the maximum sensitivity of flux-gate with additional windings the numerical simulation his work is carry out. The diagrams of amplitudes of the second harmonic of flux-gate output signal with additional windings and without are demonstrated. Using additional excitation windings allows to receive inhomogeneity of the field excitation over core length not more than 8-9%. Frequency range exciting voltage for flux-gates with long cores, which is in the range 70-120 kHz, which provides the greatest conversion coefficient of flux-gates is defined. The conversion coefficient of flux-gate with additional excitation windings is in 4.52-6.56 times more than without additional windings. The proposed design provides high stability and noise immunity of flux-gate during work directly on the surface of the ship's hull. Continuous monitoring of the ship's hulls in real time using magnetometric method of control mechanical stresses able to give the most objective view of their technical condition.

Keywords: ship's hull, mechanical stresses, residual magnetization, the flux gate

Вступ

Морське судно в ході експлуатації має витримувати без руйнувань зовнішні силові впливи протягом встановленого терміну служби при певних експлуатаційних умовах, тобто володіти міцністю. Зазвичай експлуатація суднового корпусу супроводжується тривалою дією постійно змінюваних зовнішніх навантажень. Характер та величини механічних напружень, виникаючих при цьому у корпусі, різноманітні та залежать

здебільшого від коректності проведення вантажних і баластних операцій, умов плавання, а також багатьох інших факторів. Як правило, пошкодження окремих корпусних конструкцій суден викликане недостатньою загальною та місцевою міцністю, через те, що під час експлуатації судна не враховується величина та розподілення механічних напружень, діючих в несучих суднових конструкціях. Саме тому морські судна вимагають підвищеної уваги в процесі їх експлуатації.

Основною складовою засобів автоматичного контролю загальної міцності судна [1] являються давачі механічних напружень несучих судових корпусних конструкцій, які здебільшого будуються на явищі тензоефекту. Такі давачі через ряд причин [1] не знайшли широкого застосування на морських судах.

Контроль судових корпусів в режимі реального часу з використанням магнітометричного методу контролю механічних напружень здатний давати найбільш об'єктивну картину їх технічного стану [2]. Застосування цього методу контролю під час експлуатації морських суден можливе тільки в тому випадку, якщо величина магнітного поля, створюваного об'єктом контролю, достатня для його реєстрації існуючими магніточутливими елементами. При цьому полем, що намагнічує, є тільки магнітне поле Землі величиною 40-80 А/м. Така величина магнітного поля не може довести об'єкт контролю до стану, близького до насичення, тому контрольований об'єкт має залишкову намагніченість, завдяки якій на його поверхні формується магнітне поле розсіювання.

Для вимірювання величини залишкової намагніченості на поверхні судна найбільш перспективними є магнітотуляційні перетворювачі – ферозонди. Теорія ферозондів досить добре була розвинута Янусом Р.І., Табачником В.П., Афанасьєвим Ю.В., Яковенком В.В., серед зарубіжних вчених відомі: Ф. Фьорстер, М. Акуна, П. Ріпка, Гао Зу-Ченг та багато інших. Ферозонди широко використовуються в магнітній дефектоскопії для реєстрації полів розсіювання дефекту. Ферозондові перетворювачі є пристроями активного типу. Процеси, які відбуваються у ферозондах [3-5], пов'язані з дією двох полів: додаткового допоміжного поля збудження і зовнішнього вимірюваного поля. Причому поле збудження формується за рахунок струму, який протікає в одній з обмоток перетворювача. Загалом, ферозондові перетворювачі [6] – «це пристрої для вимірювання напруженості магнітного поля, для яких заснована на нелінійності кривих намагнічування осердь з магнітних матеріалів». Найбільш простою конструкцією ферозонду [6-7] є осердя з обмоткою збудження та індикаторною обмоткою. За допомогою першої обмотки формується поле збудження, в осерді виникає індукція, яка індукує магнітну електрорушійну силу (ЕРС).

У магнітних методах неруйнівного контролю найбільшого поширення набули диференціальні ферозонди з подовжнім збудженням, що являють собою два осердя, виготовлених з пермалою, з первинними обмотками збудження і вторинними вимірювальними обмотками на кожному осерді [8]. У ферозонді-полемірі первинні обмотки обох осердь живляться змінним струмом і сполучені диференціально, а вимірювальні – послідовно. У ферозонді-градієнтметрі, навпаки, первинні обмотки сполучені послідовно, а вторинні – зустрічно.

Ферозонди-полеміри вимірюють абсолютне значення напруженості магнітного поля, тоді як ферозонди-градієнтметри – приріст (градієнт) напруженості поля від однієї точки до іншої [6, 9]. Причому струм збудження в первинних обмотках ферозонду обирається таким чином, щоб ферозонд працював на лінійній частині своєї характеристики.

Мета роботи

Через особливі та складні умови експлуатації корпусів морських суден розміри та конструкція застосовуваних ферозондів має бути такою, щоб досягти їх максимальної чутливості. Метою даного дослідження є визначення розмірів та особливостей конструкції ферозондів для вимірювання залишкової намагніченості корпусів морських суден.

Викладення основного матеріалу

У роботі пропонується використовувати ферозондові перетворювачі довжиною 50-100 мм з додатковими обмотками збудження. На рис. 1 представлена схема конструктивного виконання ферозонду в режимі полеміра, де 1 – осердя; 2 – вихідна обмотка; 3 – обмотки збудження; 4.1, 4.2 – додаткові обмотки збудження; l – довжина обмотки збудження; l_0 – довжина додаткової обмотки збудження. На рис. 2 – електрична принципова схема ввімкнення обмоток ферозонду, де $W_{1,1}$; $W_{1,2}$ – обмотки збудження; $W'_{1,1}$; $W'_{1,2}$; $W''_{1,1}$; $W''_{1,2}$ – додаткові обмотки збудження; W_2 – вихідна обмотка.

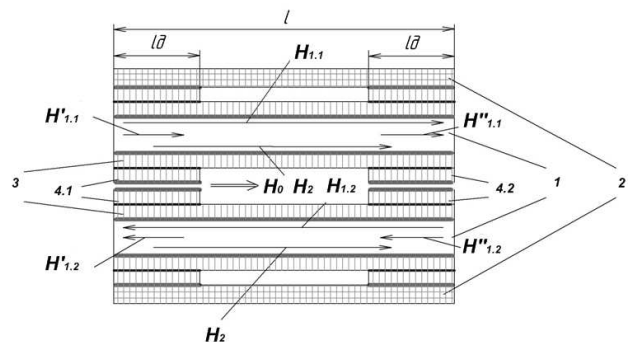


Рис. 1 – Ферозонд у режимі полеміра

Для осердь прямокутного перетину згідно з [10] величина намагніченості, а, відповідно, і коефіцієнт розмагнічування N (розмагнічувальний чинник) змінюються, тобто магнітне поле уздовж осердя розподіляється нерівномірно. Так для осердь, форма яких відрізняється від форми еліпсоїда [10], коефіцієнт розмагнічування залежить і від величини магнітної проникності речовини. Вказана магнітна характеристика спричиняє вплив на характер зміни величини індукції уздовж осердя.

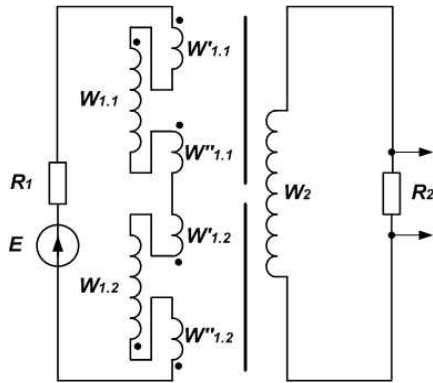


Рис. 2 – Схема ввімкнення обмоток ферозонду

Розподіл магнітної індукції уздовж ненасиченого стрижня, виготовленого з магнітом'якого матеріалу, при намагнічуванні в рівномірному магнітному полі згідно [10] описується формулою

$$B_x = B_0 \left(1 - C \frac{4x^2}{l^2} \right), \quad (1)$$

де B_0 – величина індукції у середньому перетині осердя; B_x – значення магнітної індукції у перетині, розташованому на відстані x від середнього перетину осердя (рис. 3). Для стрижнів прямокутного поперечного перетину відповідно [10] $C = 0,75$.

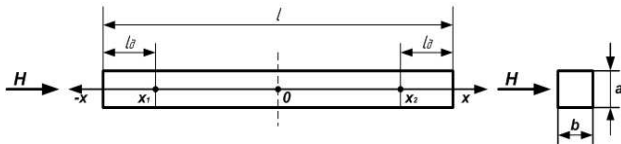


Рис. 3 – До визначення магнітних характеристик розімкнених осердь

Коефіцієнт розмагнічування розімкненого осердя визначається за формулою [10] $N = \frac{1}{m}$, де m – проникність форми розімкненого осердя. Разом з тим, проникність форми розімкненого осердя в його середньому перетині описується наступним виразом [10]:

$$m = \frac{\pi \cdot l^2}{4S \left(\ln \frac{kl}{a+b} - 1 \right)}, \quad (2)$$

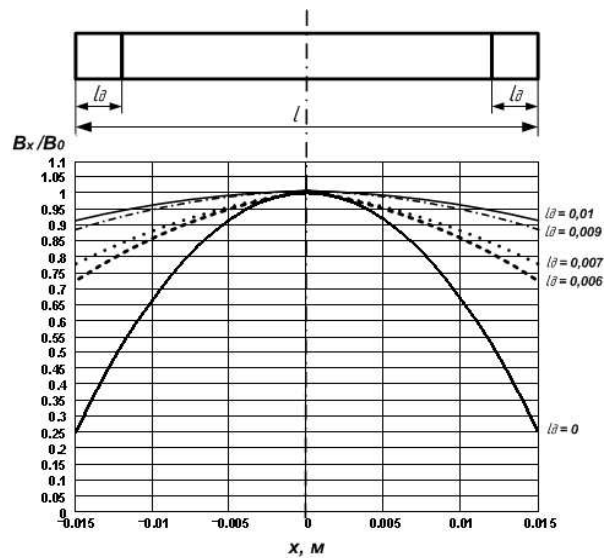
де S – площа поперечного перетину осердя; a, b – поперечні розміри осердя, $k = 3,6$ – коефіцієнт, що залежить від форми осердя.

Проникність форми розімкненого осердя в перетині, розташованому на деякій відстані x від його середнього перетину обчислюється за формулою [10]:

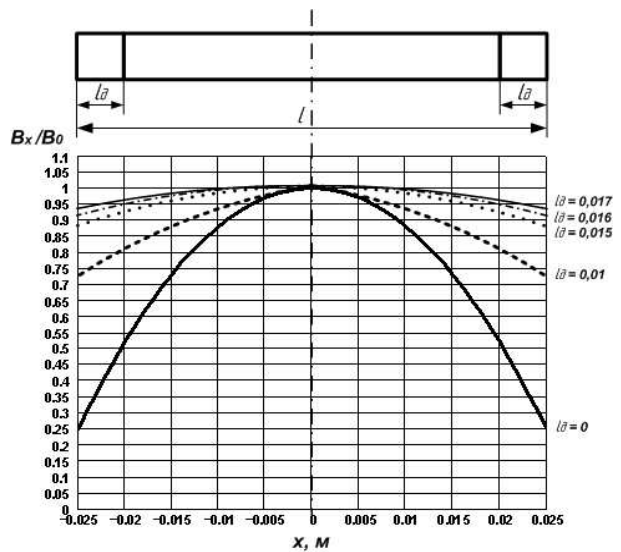
$$m = \frac{\pi \cdot l^2 \left[1 - \frac{4C}{3l^2} (x_1^2 + x_1 x_2 + x_2^2) \right]}{4S \left(\ln \frac{kl}{a+b} - 1 \right)}. \quad (3)$$

Таким чином, доцільно не змінюючи форму осердя, збільшити число витків по його краях, тобто ввести додаткові обмотки збудження, тим самим вирівнюючи магнітне поле уздовж осердя.

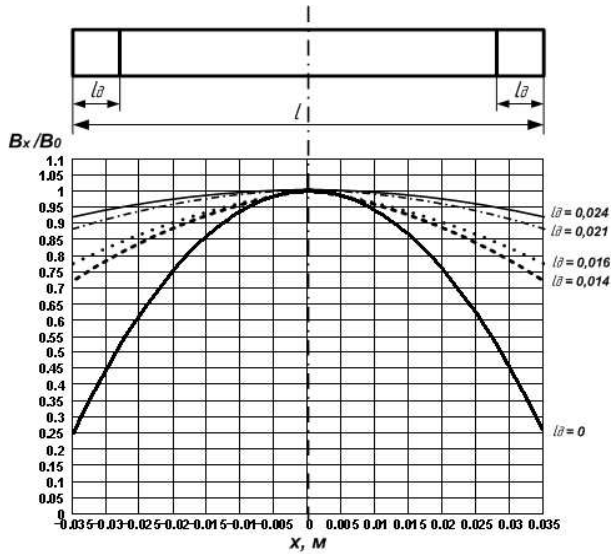
Результати розрахунків довжин ділянок додаткової обмотки збудження l_0 для різних довжин осердь ферозонду: $l = 0,03$ м, $l = 0,05$ м, $l = 0,07$ м, $l = 0,1$ м представлені у вигляді графіків (рис. 4).



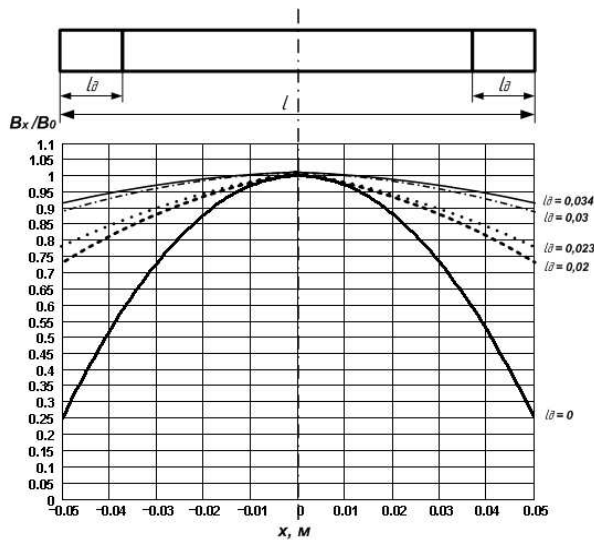
а) $l = 0,03$ м



б) $l = 0,05$ м



а) $l = 0,07 \text{ м}$



б) $l = 0,1 \text{ м}$

Рис. 4 – До визначення довжин ділянок додаткової обмотки збудження

Таким чином, ґрунтуючись на результатах приведених вище розрахунків, найбільш оптимальною величиною додаткових обмоток збудження є довжина, яка складає 0,3 від довжини осердя ферозонду з його кожного краю.

Для доведення максимальної чутливості ферозонду з додатковими обмотками збудження необхідно виконати чисельне моделювання його роботи. Функція перетворення ферозонду є його головною характеристикою, яка є відношенням одного з параметрів вихідної напруги ферозонду до величини напруженості або індукції магнітного поля, яке вимірюється [3]. Як правило, у якості параметру вихідної напруги використовується амплітуда другої гармоніки вихідного сигналу ферозонду. Може також

застосовуватися [9] амплітудне або діюче значення вихідної напруги. В ході розрахунку функції перетворення ферозонду $U_{\text{вих}} = f(H_0)$ розсіюванням магнітного потоку осердь, а також впливом вихрових струмів можна знехтувати. Разом з тим передбачається, що електромагнітні процеси в осердях ферозонду протікають без гістерезису. Закон зміни ЕРС збудження, яка не містить вищих гармонік, – синусоїдальний.

Петля гістерезису апроксимується функцією арктангенса згідно [11-12]:

$$B = \frac{2B_s}{\pi} \arctg\left(\frac{\pi H}{2H_s}\right), \quad (4)$$

де B_s, H_s – відповідно індукція та напруженість насичення матеріалу осердь. Для сплаву марки 79НМ (високонікельовий пермалой): $B_s = 0,75 \text{ Тл}$, $H_s = 2500 \text{ А/м}$.

Для вхідного кола ферозонда (рис. 2), відповідно до другого закону Кірхгофа, можна записати наступну систему рівнянь:

$$\frac{d}{dt}\psi_{1,1} + \frac{d}{dt}\psi'_{1,1} + \frac{d}{dt}\psi''_{1,1} + \frac{d}{dt}\psi_{1,2} + I_1 R_1 = E; \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt}\psi_{2,1} - \frac{d}{dt}\psi_{2,2} + I_2 R_2 = 0,$$

де $\psi_{1,1}, \psi'_{1,1}, \psi''_{1,1}$ – потокозчеплення напівелементу ферозонда первинної основної та додаткової обмоток відповідно; $\psi_{1,2}, \psi_{2,1}$ – коефіцієнти взаємного впливу обмоток; $\psi_{2,2}$ – потокозчеплення напівелементу ферозонда вторинної обмотки. Потокозчеплення обмоток представляються у вигляді:

$$\begin{aligned} \psi_{1,1} &= W_{1,1} \cdot S \cdot B(H_{1,1} + H'_{1,1} + H''_{1,1} + H_2 + H_0); \\ \psi'_{1,1} &= W'_{1,1} \cdot S \cdot B(H_{1,1} + H'_{1,1} + H''_{1,1} + H_2 + H_0); \\ \psi''_{1,1} &= W''_{1,1} \cdot S \cdot B(H_{1,1} + H'_{1,1} + H''_{1,1} + H_2 + H_0); \\ \psi_{1,2} &= (W_{1,1} + W'_{1,1} + W''_{1,1}) \cdot S \times \\ &\times B(H_{1,2} + H'_{1,2} + H''_{1,2} - H_2 - H_0); \\ \psi_{2,1} &= W_2 \cdot S \cdot B(H_{1,1} + H'_{1,1} + H''_{1,1} + H_2 + H_0); \\ \psi_{2,2} &= W_2 \cdot S \cdot B(H_{1,2} + H'_{1,2} + H''_{1,2} - H_2 - H_0), \end{aligned} \quad (6)$$

де S – площа поперечного перетину осердь ферозонду; I_1, R_1 – струм та активний опір в обмотці збудження, що дорівнює сумі вихідного опору генератора збудження та активного опору провідника обмотки збудження; H_0 – напруженість вимірюваного поля; $H_{1,1}, H'_{1,1}, H''_{1,1}$ – напруженість поля, створювана струмом відповідно основної та додаткової обмоток збудження першого напівелементу; $H_{1,2}, H'_{1,2}, H''_{1,2}$ – напруженість поля, створювана струмом відповідно основної та додаткової обмоток збудження другого напівелементу; H_2 – напруженість поля, створювана струмом вторинної обмотки ферозонду; $W'_{1,1} = W''_{1,1} = W_0$; I_2, R_2 – струм та опір вихідної

обмотки; $E = E_m \sin(\omega t)$ – ЕРС генератора, де E_m – амплітуда ЕРС генератора збудження.

Відповідно до закону повного струму для первинної та вторинної обмоток ферозонда справедливі наступні вирази:

$$I_1(W_{1.1} + W'_{1.1} + W''_{1.1}) = H_{1.1}l + H'_{1.1}l_0 + H''_{1.1}l_0; \quad (7)$$

$$I_2W_2 = H_2l,$$

звідки струми первинної та вторинної обмоток збудження дорівнюватимуть:

$$I_1 = \frac{H_{1.1}l + H'_{1.1}l_0 + H''_{1.1}l_0}{W_{1.1} + W'_{1.1} + W''_{1.1}}; \quad (8)$$

$$I_2 = \frac{H_2l}{W_2}.$$

Враховуючи функцію апроксимації кривої намагнічування осердя ферозонду (4), а також

$$\frac{d}{dt} \arctg(f(t)) = \frac{\frac{d}{dt} f(t)}{1 + f(t)^2} \quad \text{для зміни величини}$$

магнітної індукції в часі справедливі вирази:

$$\frac{d}{dt} B = \frac{d}{dt} \left(\frac{2B_s}{\pi} \arctg \left(\frac{\pi H}{2H_s} \right) \right) =$$

$$= \frac{B_s}{H_s} \cdot \frac{\frac{d}{dt} H}{1 + \left[\frac{\pi H}{2H_s} \right]^2},$$

$$\frac{d}{dt} B(H_{1.1} + H'_{1.1} + H''_{1.1} + H_2 + H_0) =$$

$$= \frac{B_s}{H_s} \cdot \frac{\frac{d}{dt} (H_{1.1} + H'_{1.1} + H''_{1.1} + H_2 + H_0)}{1 + \left[\frac{\pi(H_{1.1} + H'_{1.1} + H''_{1.1} + H_2 + H_0)}{2H_s} \right]^2}. \quad (9)$$

Використовуючи метод накладення з метою виключення громіздкості обчислень, система рівнянь (5) може бути представлена у вигляді трьох систем диференціальних рівнянь для основної і додаткових обмоток збудження відповідно:

а)

$$\frac{d}{dt} \psi_{1.1} + \frac{d}{dt} \psi_{1.2} + I_1 R_1 = E; \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt} \psi_{2.1} - \frac{d}{dt} \psi_{2.2} + I_2 R_2 = 0,$$

де $\psi_{1.1} = W_{1.1} \cdot S \cdot B(H_{1.1} + H_2 + H_0)$;

$\psi_{1.2} = W_{1.1} \cdot S \cdot B(H_{1.2} - H_2 - H_0)$;

$\psi_{2.1} = W_2 \cdot S \cdot B(H_{1.1} + H_2 + H_0)$;

$\psi_{2.2} = W_2 \cdot S \cdot B(H_{1.2} - H_2 - H_0)$;

$I_1 = \frac{H_{1.1}l}{W_{1.1}}; I_2 = \frac{H_2l}{W_2}.$

б)

$$\frac{d}{dt} \psi'_{1.1} + \frac{d}{dt} \psi'_{1.2} + I'_1 R'_1 = E; \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt} \psi'_{2.1} - \frac{d}{dt} \psi'_{2.2} + I'_2 R'_2 = 0,$$

де $\psi'_{1.1} = W'_0 \cdot S \cdot B(H'_{1.1} + H'_2 + H_0)$;

$\psi'_{1.2} = W'_0 \cdot S \cdot B(H'_{1.2} - H'_2 - H_0)$;

$\psi'_{2.1} = W'_2 \cdot S \cdot B(H'_{1.1} + H'_2 + H_0)$;

$\psi'_{2.2} = W'_2 \cdot S \cdot B(H'_{1.2} - H'_2 - H_0)$;

$I'_1 = \frac{H'_{1.1}l_0}{W'_0}; I'_2 = \frac{H'_2l}{W'_2}.$

в)

$$\frac{d}{dt} \psi''_{1.1} + \frac{d}{dt} \psi''_{1.2} + I''_1 R''_1 = E; \quad (12)$$

$$\frac{d}{dt} \psi''_{2.1} - \frac{d}{dt} \psi''_{2.2} + I''_2 R''_2 = 0,$$

де $\psi''_{1.1} = W''_0 \cdot S \cdot B(H''_{1.1} + H''_2 + H_0)$;

$\psi''_{1.2} = W''_0 \cdot S \cdot B(H''_{1.2} - H''_2 - H_0)$;

$\psi''_{2.1} = W''_2 \cdot S \cdot B(H''_{1.1} + H''_2 + H_0)$;

$\psi''_{2.2} = W''_2 \cdot S \cdot B(H''_{1.2} - H''_2 - H_0)$;

$I''_1 = \frac{H''_{1.1}l_0}{W''_0}; I''_2 = \frac{H''_2l}{W''_2}.$

Враховуючи вираз (9), а також $\frac{d}{dt}(H_0) = 0$, для основної і додаткової обмоток збудження справедливі вирази:

а)

$$\frac{d}{dt} B(H_{1.1} + H_2 + H_0) =$$

$$= \frac{B_s}{H_s} \cdot \frac{\frac{d}{dt} (H_{1.1} + H_2)}{1 + \left[\frac{\pi(H_{1.1} + H_2 + H_0)}{2H_s} \right]^2};$$

$$\frac{d}{dt} B(H_{1.2} - H_2 - H_0) =$$

$$= \frac{B_s}{H_s} \cdot \frac{\frac{d}{dt} (H_{1.2} - H_2)}{1 + \left[\frac{\pi(H_{1.2} - H_2 - H_0)}{2H_s} \right]^2}. \quad (13)$$

б)

$$\frac{d}{dt} B(H'_{1.1} + H'_2 + H_0) =$$

$$= \frac{B_s}{H_s} \cdot \frac{\frac{d}{dt} (H'_{1.1} + H'_2)}{1 + \left[\frac{\pi(H'_{1.1} + H'_2 + H_0)}{2H_s} \right]^2};$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} B(H'_{1,2} - H'_2 - H_0) &= \\ &= \frac{B_S}{H_S} \cdot \frac{\frac{d}{dt} (H'_{1,2} - H'_2)}{1 + \left[\frac{\pi(H'_{1,2} - H'_2 - H_0)}{2H_S} \right]^2} \end{aligned} \quad (14)$$

в)

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} B(H''_{1,1} + H''_2 + H_0) &= \\ &= \frac{B_S}{H_S} \cdot \frac{\frac{d}{dt} (H''_{1,1} + H''_2)}{1 + \left[\frac{\pi(H''_{1,1} + H''_2 + H_0)}{2H_S} \right]^2} ; \\ \frac{d}{dt} B(H''_{1,2} - H''_2 - H_0) &= \\ &= \frac{B_S}{H_S} \cdot \frac{\frac{d}{dt} (H''_{1,2} - H''_2)}{1 + \left[\frac{\pi(H''_{1,2} - H''_2 - H_0)}{2H_S} \right]^2} \end{aligned} \quad (15)$$

Сигнал на виході ферозонду визначається за наступною формулою:

$$U_{вих} = -I_2 \cdot R_2 = -(H_2 + H'_2 + H''_2) \frac{IR_2}{W_2} \quad (16)$$

Розв'язання диференціальних рівнянь, а також визначення вихідного сигналу ферозонду виконане в програмному середовищі MATLAB (Free Trial Download version) з використанням підсистеми візуального математичного моделювання Simulink [13].

Отримані аналітичні залежності дозволяють провести чисельні розрахунки вихідних параметрів ферозондів. Розрахунок було проведено для ферозондів, осердя яких виконані із сплаву марки 79НМ, з довжиною осердя: $l = 0,03$ м, $l = 0,05$ м, $l = 0,07$ м, $l = 0,1$ м та довжинами додаткових обмоток, відповідно: $l_\delta = 0,01$ м, $l_\delta = 0,017$ м, $l_\delta = 0,024$ м, $l_\delta = 0,034$ м; площиною поперечного перетину: $S = 5 \cdot 10^{-8}$ м², амплітудою ЕРС генератора збудження $E = 20$ В.

Обговорення результатів

Проведений розрахунок вихідного сигналу дозволив отримати відповідні залежності для трьох частот збудження 50 кГц, 100 кГц (рис. 5), 200 кГц. Також був проведений розрахунок вихідного сигналу ферозонду без додаткових обмоток при частоті збудження 100 кГц (рис. 6). На рис. 5 представлено амплітуду другої гармоніки вихідного сигналу ферозонда (U_{2m} , мВ) з додатковими обмотками збудження: частота збудження 100 кГц. На рис. 6 зображено амплітуду другої гармоніки вихідного

сигналу ферозонда (U_{2m} , мВ) без додаткових обмоток збудження при частоті збудження 100 кГц. На рис. 5, 6 позначено наступні криві: 1 – $l = 0,03$ м; 2 – $l = 0,05$ м; 3 – $l = 0,07$ м; 4 – $l = 0,1$ м.

Знайдені (рис. 6) значення вихідного сигналу ферозонда без додаткових обмоток збудження відповідають з точністю 3-5% значенням, отриманим в [3, 5], що підтверджує достовірність запропонованої математичної моделі. Згідно з отриманими результатами, вихідний сигнал ферозонду з додатковими обмотками збудження у 7,1 – 13,3 разів більший, ніж без цих обмоток. Також розширена лінійна ділянка вихідного сигналу до 1500 – 2000 А/м. Частотний діапазон збудження 70 – 120 кГц забезпечує стабільне значення вихідного сигналу ферозондів різної довжини при максимальному значенні крутизни лінійної ділянки вихідного сигналу.

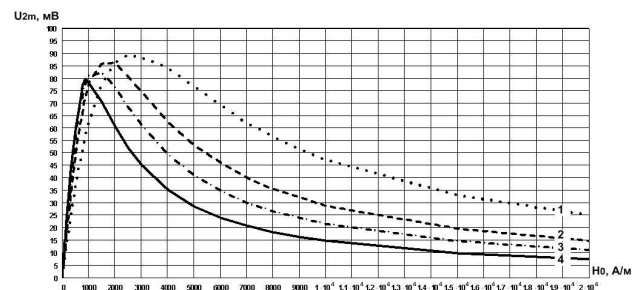


Рис. 5 – Амплітуда другої гармоніки вихідного сигналу ферозонду з додатковими обмотками збудження

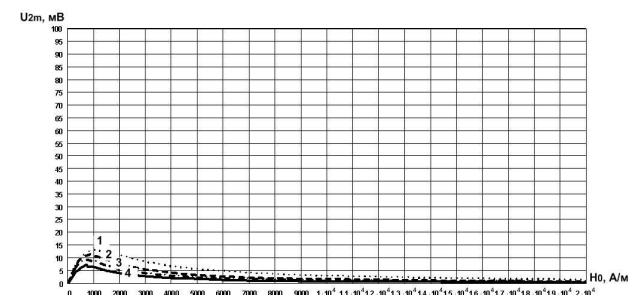


Рис. 6 – Амплітуда другої гармоніки вихідного сигналу ферозонду без додаткових обмоток збудження

Для даних довжин ферозондів діапазон зміни максимального значення функції перетворення без додаткових обмоток складає від 0,017 мВ/(А/м) до 0,025 мВ/(А/м), а для ферозонду з додатковими обмотками – від 0,077 мВ/(А/м) до 0,164 мВ/(А/м).

Висновки

При вимірюванні залишкової намагніченості корпусів морських суден запропоновано використовувати ферозонд завдовжки 100 мм, що дозволяє вимірювати інтегральне значення напруженості магнітного поля за всією довжиною

осердя. Для забезпечення достовірності інформації про магнітне поле суднового корпусу, отримуваної ферозондом, необхідно забезпечити рівномірне значення магнітної проникності осердя ферозонду по всій його довжині. Введення додаткових обмоток збудження по краях осердь напівелементів ферозондів дозволяє отримати неоднорідність поля збудження за довжиною осердя не більше 8-9%. Ферозонд з додатковими обмотками збудження дозволяє отримати амплітуду вихідного сигналу другої гармоніки на рівні 80-89 мВ, що в 7,1-13,3 разів більше, ніж амплітуда такого ж ферозонду без додаткових обмоток. Визначено діапазон частоти збуджуючої напруги для ферозондів з довгими осердями, який знаходиться в межах 70-120 кГц, що забезпечує найбільший коефіцієнт перетворення ферозонду. Коефіцієнт перетворення ферозонду з додатковими обмотками збудження в 4,52-6,56 разів більше, ніж без додаткових обмоток, що забезпечує ферозонду підвищену стабільність і перешкодостійкість при роботі безпосередньо на поверхні об'єкту контролю.

Список літератури

- 1 **Мирошников, В. В.** Контроль прочности корпуса судна / **В. В. Мирошников, О. П. Завальнюк, В. Б. Нестеренко.** – Херсон: Гринь Д. С., 2015. – 108 с.
- 2 **Завальнюк, О. П.** Магнитный контроль корпусов морских судов в процессе грузовых и балластных операций / **О. П. Завальнюк, В. В. Мирошников** // *Вісник СХУ ім. В. Даля: Науковий журнал.* – Луганськ: Видавництво СХУ ім. В. Даля. – 2012. – № 18 (189). – С. 76 - 82.
- 3 **Афанасьев, Ю. В.** Феррозондовые приборы / **Юрий Васильевич Афанасьев.** – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 188 с.
- 4 **Bonavolontà, C.** Detection of Magnetomechanical Effect in Structural Steel Using SQUIDS and Flux-gate Sensors / **C. Bonavolontà, G. Peluso, M. Valentino, A. De Iorio, F. Penta** // *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism.* – Springer US, 2009. – № 22 (8). – P. 833 - 839.
- 5 **Bornhöfft, W.** Sensors Set: A Comprehensive Survey. Magnetic Field Sensors: Flux Gate Sensors / **Wolfgang Bornhöfft, Gerhard Trenkler** // *Tübingen, FRG: Institut für Physikalische und Theoretische Chemie der Universität.* – 2008. – P. 153-203.
- 6 **Клюев, В. В.** Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / **В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, А. В. Ковалев** и др.; Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение. – 2003. – 656 с.
- 7 **Ripka, P.** Advances in Magnetic Field Sensors / **P. Ripka, M. Janosek** // *IEEE Sensors Journal.* – Manchester: IEEE Sensors Council. – 2010. – Vol. 10(6). – P. 1108 - 1116.
- 8 **Leong, C. S.** The development of fluxgate magnetometer for non-destructive measurement / **Chew Soon Leong, Rashdi Shah Ahmad, Rosly Jaafar** // *Journal Technology.* – Skudai: University Technology Malaysia. – 2001. – № 34(C). – P. 9 - 16.
- 9 **Романов, И. О.** Физические основы неразрушающих методов контроля / **И. О. Романов, Д. В. Строителев,**

- В. М. Макиенко** – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. – 126 с.
- 10 **Розенблат, М. А.** Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники / **Моисей Аронович Розенблат.** – М.: Наука, 1966. – 720 с.
- 11 **Мельгуй, М. А.** Формулы для описания нелинейных и гистерезисных свойств ферромагнетиков / **М. А. Мельгуй** // *Дефектоскопия.* – Екатеринбург: Изд-во «Наука», 1987. – № 11. – С. 3 - 10.
- 12 **Harrison, R. G.** Positive-Feedback Theory of Hysteretic Recoil Loops in Hard Ferromagnetic Materials / **Robert G. Harrison** // *IEEE Transactions on Magnetism.* – Boulder (USA): National Institute of Standards and Technology. – 2011. – № 47(1). – P. 175 - 191.
- 13 **Giordano, A. A.** Getting Started with Simulink, in Modeling of Digital Communication Systems Using Simulink / **Giordano A. A., Levesque A. H.** – Hoboken: John Wiley & Sons, 2015. – 260 p.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Miroshnikov, V. V., Zavalniuk, O. P., Nesterenko, V. B.** Control of the general hull's strength. – Kherson: Grin' D. S., 2015, 108 p.
- 2 **Zavalniuk, O. P., Miroshnikov, V. V.** Magnetic control of ship hulls during cargo and ballast operations. *Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University*, 2012, 18(189), 76-82.
- 3 **Afanas'ev, Yu. V.** Ferroprobe devices. – Leningrad, USSR: Energoatomizdat, 1986, 188 p.
- 4 **Bonavolontà, C.** Detection of Magnetomechanical Effect in Structural Steel Using SQUIDS and Flux-gate Sensors. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 2009, 22(8), 833 - 839.
- 5 **Bornhöfft, W., Trenkler, G.** Sensors Set: A Comprehensive Survey. Magnetic Field Sensors: Flux Gate Sensors. – Tübingen, FRG: Institut für Physikalische und Theoretische Chemie der Universität, 2008, 153-203.
- 6 **Klyuyev, V. V., Sosnin, F. R., Kovalev, A. V.** Non-destructive testing and diagnostics: Handbook. – Moscow: Mashinostroyeniye, 2003, 656 p.
- 7 **Ripka, P., Janosek, M.** Advances in Magnetic Field Sensors. *IEEE Sensors Journal*, 2010, 10(6), 1108 - 1116.
- 8 **Leong, C. S., Rashdi, S. A., Rosly, J.** The development of fluxgate magnetometer for non-destructive measurement. *Journal Technology*, 2001, 34(C), 9 - 16.
- 9 **Romanov, I. O., Stroitelev, D. V., Makiyenko, V. M.** Physical basis of non-destructive methods of control. – Khabarovsk: Izd-vo DVGUPS, 2008, 126 p.
- 10 **Rozenblat, M. A.** Magnetic elements of automation and computer technology. – Moscow: Nauka, 1966, 720 p.
- 11 **Mel'guy, M. A.** The formulas for describing of nonlinear and hysteresis properties of ferromagnetic materials. *Defektoskopiya*, 1987, 11, 3 - 10.
- 12 **Harrison, R. G.** Positive-Feedback Theory of Hysteretic Recoil Loops in Hard Ferromagnetic Materials. *IEEE Transactions on Magnetism*, 2011, 47(1), 175 - 191.
- 13 **Giordano, A. A.** Getting Started with Simulink, in Modeling of Digital Communication Systems Using Simulink. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2015, 260 p.

Надійшла (received) 22.09.2015