

Fluxgate Magnetic Field Transducer with Rotation Magnetization Reversal of the Film Core

Lyubomyr Pavlyk, Sergii Ubizskii

Lviv Polytechnic National University,
12, Bandery St., Lviv, 79013, UKRAINE,
E-mail: crystal@polynet.lviv.ua

Fluxgate magnetometers are widely used for low frequency and weak magnetic field measurements in the range of 100 pT – 100 μ T. Having low threshold of sensitivity and being relatively unexpensive they are beyond the comparison to the other magnetometers [1]. On the other hand reduction of the threshold of sensitivity of fluxgates is limited by their sensitive elements inherent noise. The inherent noise nature is the domain walls motion [2] in the fluxgate core. As it can be seen from different scientific papers (see [3] for example) the fluxgate noise level can be reduced by holding the core in a single domain state during the whole cycle of magnetization reversal. This can be reached for example by magnetizing the disc-shaped core by the magnetic field rotating in the core plane and with amplitude large enough to saturate the core [4-7]. Between the others advantages of such a magnetization reversal method is possibility to measure at least two in-plane magnetic field components by a single sensitive element and to perform so called resonance regime that increases the fluxgate sensitivity [8].

The response model of the fluxgate with rotation magnetization reversal of isotropic disk core under harmonic voltage driving excitation has been developed at presence of target magnetic field in the core disk plane. The fluxgate sensing element is shown schematically at Fig. 1. Considering one of the excitation coils, one can build circuit like that at Fig. 2. Where $\varepsilon_e(t)$ is the harmonic excitation voltage source, $\varepsilon_n(t)$ – some EMF that appears only at presence of the target magnetic field, L and R are the inductance and resistance of the coil correspondingly. Information about the target field one can find from the second harmonic of the current in the circuit mentioned above. It can be found from the Kirchhoff's second law that results in the equation (4) when the core nonlinear properties are taken into consideration. This equation can be solved by perturbation method [9]. As a result expression for the fluxgate sensitivity was found (7). To verify theoretical calculation, the fluxgate prototype was built. The fluxgate sensing element consists of two coils placed perpendicularly one to the other (see Fig. 3). Epitaxial iron-garnet film with saturation magnetization of 0,175 T and saturation field of 400 A/m was used as a core. Results of experimental measurement of the fluxgate sensitivity dependences upon the excitation field amplitude at different frequencies are presented and they coincide well with calculated ones (see Fig. 5).

Ферозондовий перетворювач магнітного поля на основі обертового перемагнічування плівкового осердя

Любомир Павлик, Сергій Убізський

Національний університет "Львівська політехніка",
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, УКРАЇНА,
E-mail: crystal@polynet.lviv.ua

У роботі подано результати побудови моделі відгуку ферозонда з обертовим перемагнічуванням ізотропного дискового осердя при збудженні від джерела гармонічної напруги на дію магнітного поля у площині осердя. Підтверджено, що реєстрацію компонент вимірюваного поля можна здійснювати за гармонічним складом струму в котушці збудження. Наводяться результати вимірювання залежності чутливості для різних частот збудження від його амплітуди, які добре узгоджуються з розрахунковими.

Ключові слова – ферозонд, феромодуляційний відгук, обертове перемагнічування.

I. Вступ

Ферозондові перетворювачі широко використовуються для вимірювання сталих чи низькочастотних слабких магнітних полів в діапазоні від 100 пТл до 100 мкТл, залишаючись поза конкуренцією з поміж інших твердотільних магнітометрів за рівнем порогової чутливості [1]. У той же час порогова чутливість самих ферозондів обмежується знизу рівнем шуму їх чутливих елементів, основний вклад у який дає стрибкоподібний рух доменних стінок у магнітом'якому осерді [2]. Згідно з теоретичними і експериментальними оцінками, наведеними у [3], рівень шуму ферозонда можна зменшити, якщо осердя постійно знаходилося у монодомінному стані. Цього можна досягти, наприклад, якщо перемагнічувати осердя у формі диску магнітним полем, вектор якого обертається у площині диску [4-7]. При цьому амплітуда поля, що обертається, повинна бути достатньою для утримання осердя у намагніченому до насичення стані. Крім можливості зниження рівня шуму, до переваг такого способу збудження ферозонда варто віднести і можливість вимірювання щонайменше двох компонент магнітного поля, що знаходяться у площині осердя, одним чутливим елементом [4-7]. Іншою перевагою ферозонда з обертовим перемагнічуванням є можливість підвищення його чутливості в резонансному режимі [8], коли чутливість ферозонда досягає свого максимального значення за частоти збудження $\omega = \frac{1}{2}\omega_0$, де ω_0 – резонансна частота коливального контуру, утвореного котушкою збудження та послідовно включеною додатковою ємністю для управління частотою резонансу.

У даній роботі подано результати моделювання і експериментального вимірювання чутливості феро-

зонда з обертальним перемагнічуванням магнітом'якого осердя у формі диску.

II. Модель чутливості

Схематично розташування котушок ферозонда з обертальним перемагнічуванням показано на Рис. 1. Їх осі розташовані перпендикулярно одна до одної, у площині дискового осердя у напрямках x та y . Струми у двох котушках з відносним зсувом фази $\pi/2$ між ними створюють разом магнітне поле $\mathbf{H}_e(t)$, вектор якого обертається у площині осердя маючи сталу амплітуду, достатню для того, щоб намагнічувати осердя до насичення. Котушки живляться від джерела гармонічної напруги з відповідним зсувом фаз, для того, щоб забезпечити обертальне поле. В такому випадку для реєстрації феромодуляційного ефекту, який полягає в генерації другої гармоніки при наявності вимірюваного поля, зникає необхідність в додатковій вимірювальній котушці. При цьому корисний сигнал можна реєструвати за другою гармонікою струму в котушці збудження.

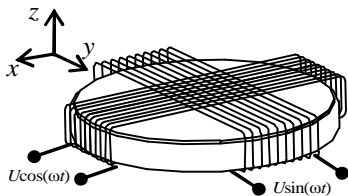


Рис. 1. Схематичне зображення котушок збудження ферозонда з обертальним перемагнічуванням дискового осердя.

Побудуємо модель сигналу відгуку такого ферозонда. Для спрощення вважатимемо, що в якості осердя використовується ізотропна магнітом'яка плівка. При не надто високих частотах обертання магнітного поля можна вважати, що перемагнічування відбувається рівноважно, тобто, що у кожний момент часу виконується умова мінімуму енергії взаємодії намагніченого осердя з зовнішнім магнітним полем $\mathbf{H} = \mathbf{H}_e(t) + \mathbf{h}$, яке окрім поля збудження містить також вимірюване магнітне поле \mathbf{h} , що вважається малим і сталим. Тоді з умови мінімуму енергії взаємодії компоненти вектора намагніченості \mathbf{M} осердя матимуть вигляд [8]:

$$M_x(t) = M_s \cos \left[\arctg \left(\frac{H_y(t) + h_y}{H_x(t) + h_x} \right) \right], \quad (1a)$$

$$M_y(t) = M_s \sin \left[\arctg \left(\frac{H_y(t) + h_y}{H_x(t) + h_x} \right) \right], \quad (1б)$$

де індексами x та y позначені компоненти складових магнітного поля, а M_s – намагніченість насичення осердя. За відсутності вимірюваного поля обертання вектора намагніченості \mathbf{M} відбувається синхронно (когерентно) з обертанням вектора магнітного поля $\mathbf{H}_e(t)$, а індукційний відгук осердя є лінійним. У колі окрім гармонічної ЕРС збудження буде присутня ЕРС самоіндукції котушки, що теж є гармонічним сигналом

з тією ж частотою. Оскільки струм у кожній котушці створюється завдяки джерелу регульованої напруги синусоїдальної форми, то мож-на вважати, що у стаціонарному стані за відсутності поля \mathbf{h} коло з котушкою містить лише джерело гармонічної електрорушійної сили $\varepsilon_e(t)$ і опір котушки, як активний так і реактивний (див. Рис. 2). Але, коли з'являється вимірюване поле \mathbf{h} , вектор намагніченості \mathbf{M} вже не є колінеарним вектору поля \mathbf{H} , і обертання вектора намагніченості виявляється промодульованим так, що кут між векторами залежить як від фази поля збудження, так і від значення вимірюваного поля \mathbf{h} . У результаті такої модуляції у колі котушки з'являється додатковий сигнал нелінійного індукційного відгуку, який слід трактувати як додаткову складову ЕРС самоіндукції $\varepsilon_n(t)$. Еквівалентна схема увімкнення однієї з котушок, індуктивність якої L , наведена на Рис. 2. Опір R подає активний опір котушки, а внутрішній опір джерела ЕРС вважатимемо несуттєвим. При цьому перемагнічування відбувається когерентним поворотом вектора намагніченості за напрямком магнітного поля.

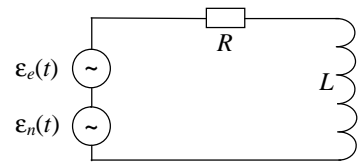


Рис. 2. Еквівалентна схема кола котушки збудження ферозонда при її живленні від джерела ЕРС.

У [8] показано, що часові зміни намагніченості осердя, а тому й відгуку ферозонда на наявність вимірюваного поля, можуть бути виражені через струм у котушках збудження, який при гармонічній напрузі живлення буде мати складнішу форму, викликану модуляцією обертання намагніченості. Вираз для нелінійної складової індукованої ЕРС в x -орієнтованій котушці, отриманий у [8], має вигляд:

$$\varepsilon_n(t) = 2n_x n_y V_c \frac{M_s}{H_0^3} (n_y h_x - n_x h_y) I(t) \frac{dI(t)}{dt}, \quad (2)$$

де H_0 – амплітуда магнітного поля збудження, n_x – кількість витків на одиницю довжини у котушці x , V_c – об'єм осердя, $n_x = n$, $n_y = n \cdot e^{j\pi/2}$, n – кількість витків котушки на одиницю її довжини, а фазовий множник $e^{j\pi/2}$ враховує зсув фази струму в y -орієнтованій котушці по відношенню до струму в x -орієнтованій котушці. Вираз для іншої котушки відрізнятиметься лише заміною індексів x на y . З (2) видно, що сигнал нелінійного відгуку в кожній котушці є чутливим до обох складових вимірюваного поля у площині чутливого елемента, а розділити компоненти поля можна за квадратурними компонентами нелінійного відгуку. Повна індукована ЕРС може бути подана:

$$e_i(t) = -n_x^2 \frac{dI}{dt} \left(\mu_0 V + V_c \frac{M_s}{H_0} \right) - K_h I \frac{dI}{dt} \quad (3)$$

де V – внутрішній об'єм котушки, а $K_h = 2n_x n_y V_c \frac{M_s}{H_0^3} (n_y h_x - n_x h_y)$. Перший доданок

у (3) – це частина повної індукованої змінним збудженням ЕРС, що не залежить від вимірюваного поля, а другий доданок – це частина індукованої ЕРС, що виникає тільки при наявності вимірюваного поля \mathbf{h} . У такому разі рівняння Кірхгофа для кола виглядає:

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + R \frac{dI}{dt} = j\omega \varepsilon_e(t) + K_h \left(\left(\frac{dI}{dt} \right)^2 + I \frac{d^2 I}{dt^2} \right) \quad (4)$$

де $\varepsilon_e(t) = Ue^{j\omega t}$ лінійна ЕРС в колі, а другий доданок у правій частині подає нелінійну ЕРС $\varepsilon_n(t)$. Нелінійне неоднорідне рівняння (4) описує часову функцію струму в колі котушки ферозонда в залежності від умов збудження, характеристик осердя, параметрів конструкції чутливого елемента. За відсутності вимірюваного поля ($\mathbf{h} = 0$) другий доданок у правій частині зникає і рівняння перетворюється у лінійне. Розв'язок рівняння (4) знаходиться асимптотичним методом [9], розкладаючи шукану функцію струму $I(t, K_h)$ за параметром K_h , який слід вважати малим, оскільки малим є вимірюване поле \mathbf{h} . Відкидаючи вищі степені K_h , як величини вищого порядку малості, розклад функції струму в ряд Тейлора матиме вигляд:

$$I(t, K_h) = I(t, 0) + \frac{\partial I(t, 0)}{\partial K_h} K_h + \dots = I_1(t) + I_2(t)K_h + \dots \quad (5)$$

Тут $I_1(t)$ – це амплітуда першої гармонік струму в котушці збудження, а $I_2(t)$ має зміст струмової чутливості ферозонда до поля, яку знаходимо з розв'язку рівняння (4) у вигляді:

$$|I_2| = \frac{\omega U^2}{\sqrt{9\omega^4 L^4 R^2 + 6\omega^2 L^2 R^4 + 4\omega^6 L^6 + R^6}} \quad (6)$$

Вираз для амплітуди поля в котушці має вигляд:

$$H_0 = nI = n \frac{U}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}. \quad \text{Підставивши його, а}$$

також вираз для щільності намотування витків у (6), з врахуванням розкладу (5), чутливість амплітуди другої гармоніки струмового відгуку до кожної з компонент вимірюваного поля, знаходимо у вигляді:

$$S_{I_2} = \frac{2\omega(R^2 + \omega^2 L^2) n V_c \frac{M_s}{H_0}}{\sqrt{9\omega^4 L^4 R^2 + 6\omega^2 L^2 R^4 + 4\omega^6 L^6 + R^6}} \quad (7)$$

III. Сигнал відгуку ферозонда

Для експериментальних досліджень струмового відгуку та перевірки побудованої моделі було розроблено ферозонд з перемагнічуванням дискового осердя обертальним магнітним полем. Чутливий елемент ферозонда складається з двох плоских котушок – соленоїдів з прямокутним перерізом та осердя (див. рис. 3).

Котушки сконструйовані так, що одна розміщується в іншій, а кут між їхніми осями становить 90° . Для обмоток використано дріт діаметром 0,2 мм, кількість витків на одиницю довжини для кожної з котушок

однакова і становить 109 см^{-1} . Інші параметри котушок подані у таблиці.

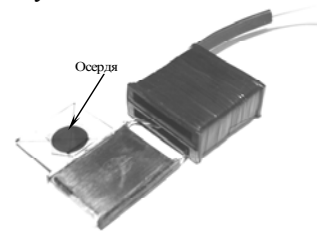


Рис. 3. Чутливий елемент ферозонда

ПАРАМЕТРИ КОТУШОК ФЕРОЗОНДА

Котушка	зовнішня	внутрішня
Об'єм, см^3	17,5	6,48
Активний опір R , Ом	29,5	20,7
Індуктивність L , мГн	2,86	1,04

Як осердя використано епітаксійну ферогранатову плівку орієнтації (111) складу $Y_3(\text{FeSc})_5\text{O}_{12}$ діаметром 18 мм та товщиною близько 10 мкм з намагніченістю насичення $M_s = 0,175 \text{ Тл}$ і полем насичення близько 400 А/м.

Блок-схему приладу показано на Рис. 4. Цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП) 1 служить джерелом напруги для обох котушок збудження. Амплітуду напруги для кожної з котушок, а також зсув фаз між ними можна змінювати за допомогою блоку регулювання 2. Після підсилення потужності підсилювачем 3, сформований сигнал збудження подається в котушки 4. Сигнал відгуку, пропорційний струму в котушці, сумується у протифазі з опорним сигналом, який відповідає першій гармоніці сигналу збудження за допомогою суматора 7. Перед суматором амплітуди двох сигналів масштабуються за допомогою блоків регулювання 2 і 5. Вимірний сигнал з частково скомпенсованою першою гармонікою через аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) 8, буфер 11 та інтерфейс USB 11 потрапляє в комп'ютер, де вся подальша обробка здійснюється програмними засобами. Увесь пристрій керується за допомогою програмованих матриць 9, які разом з ЦАП і АЦП, а також контролером USB синхронізуються від генератора синхроімпульсів 10. У макеті також передбачено можливість змінювати амплітуду напруги у кожній з котушок окремо, зсув фаз між ними і контроль за формою обертального поля збудження за третьою гармонікою [10].

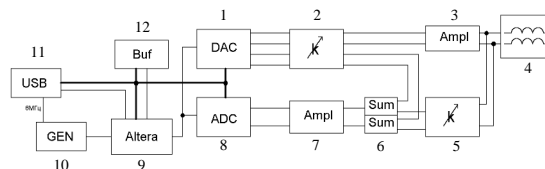


Рис. 4. Блок-схема обертального ферозонда: 1 – ЦАП; 2 – блок регулювання амплітуди та фази сигналу збудження; 3 – підсилювач потужності; 4 – котушки збудження; 5 – блок регулювання коефіцієнта підсилення підсилювача 7; 6 – суматор; 7 – підсилювач сигналу; 8 – АЦП; 9 – програмовані логічні матриці “Altera”; 10 – генератор синхроімпульсів; 11 – інтерфейс USB; 12 – буферна пам'ять.

Результати вимірювання чутливості за струмами в обох котушках збудження та розраховані залежності від амплітуди поля збудження для кількох частот збудження показано на Рис. 5.

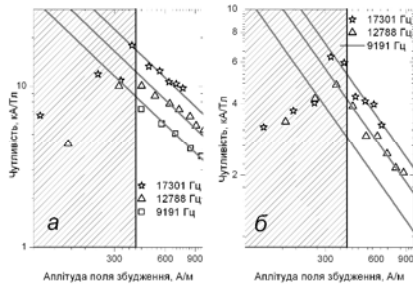


Рис. 5. Експериментальні (точки) і теоретичні (лінії) залежності чутливості ферозонда від амплітуди поля збудження, виміряні на різних частотах для внутрішньої (а) і зовнішньої (б) котушок. Заштрихована область, в якій порушується умова намагніченості осердя до насичення.

Розбіжність експериментальної і теоретичної залежності чутливості при амплітуді поля збудження нижче 400 А/м пояснюється тим, що у цій області осердя знаходиться у ненасиченому стані, а отже не описується розглянутою моделлю. Чутливість відгуку у внутрішній котушці вища за визначену у зовнішній котушці, оскільки заповнення об'єму котушки осердям у цьому випадку є значно вищим.

ВИСНОВКИ

У роботі побудовано феноменологічну модель відгуку ферозонда з обертальним перемагнічуванням дискового осердя з магнітом'якого матеріалу при його збудженні від джерела гармонічної напруги та реєстрації вимірюваного поля за амплітудою другої гармоніки сигналу струму, що протікає в котушці збудження, та отримано вираз для чутливості ферозонда у такому режимі роботи. Побудовано макет ферозондового магнітометра та проведено експериментальне дослідження залежності його чутливості від амплітуди та частоти поля збудження. Результати експерименту якісно і кількісно добре співпадають з передбаченнями моделі в інтервалі полів збудження, що перевищують поле насичення осердя.

Література

- [1] Ripka P., Janosek M. Advances in magnetic field sensors // IEEE Sensors Journal – 2010. – V. 10. – №. 6 – P. 1108–1116.
- [2] Deak J., Miklich A.H., Slonczewski J., Koch R.H. A low-noise single-domain fluxgate sensor // Appl. Phys. Lett. – 1996. – V. 69. – № 8. – P. 1157–1159.
- [3] Koch R. H., Deak J. G. and Grinstein G. Fundamental limits to magnetic-field sensitivity of flux-gate magnetic-field sensors // Appl. Phys. Lett. – 1999. – V. 75. – № 24. – P. 3862–3864.
- [4] Garcia A., Moron C., Mora M. Theoretical calculation for a two-axis magnetometer based on magnetization rotation // Sensors and Actuators – 2000. – V. 81. – P. 204–207.
- [5] Garcia A., Moron C. Biaxial magnetometer sensor // IEEE Trans. Magn. – 2002. – V. 38. – № 5. P. 3312–3314.
- [6] Убізький С.Б. Феромодуляційний перетворювач магнітного поля на основі епітаксійної плівки ферогранату // Вісник ДУ “Львівська політехніка”, Сер. Електроніка. – 2001, № 423. – С. 59–65.
- [7] Vetoshko P.M., Valeiko M.V., Nikitin P.I. Epitaxial yttrium iron garnet film as an active medium of an even-harmonic magnetic field transducer // Sensors and Actuators. – 2003. – V. A106 – P.270–273.
- [8] Павлик Л.П., Убізький С.Б., Лозинський А.Б., Савицький Г.В. Аналіз реактивного кола збудження ферозонда з обертальним перемагнічуванням дискового осердя // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”, Серія Електроніка. – 2009. – № 646. – С. 202-211.
- [9] Nayfeh A.H. Perturbation methods.– John Wiley & Sons, Inc., 1973.– 425 p.
- [10] Убізький С.Б., Павлик Л.П., Климович Є.М. Вплив різних факторів на вимірювання магнітного поля парногармонічним перетворювачем з обертальним перемагнічуванням монокристалічної плівки ферогранату // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”, Серія Електроніка. – 2006. – № 558. – С. 133-138.