

УДК 621.317.44

doi:10.20998/2413-4295.2024.03.05

ФАЗОІМПУЛЬСНИЙ ФЕРРОЗОНД ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ**В. Р. КРИКУН, Ю. В. ХОМЯК, І. К. КОРНЄВ****КРСКД, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА
e-mail: ik0077ik25@gmail.com.

АНОТАЦІЯ Розглянуто перспективний напрямок розвитку вимірювальних приладів, заснованих на фазоімпульсному принципі. Представлені результати досліджень однострижневого ферозонда, що функціонує на основі фазоімпульсного принципу вимірювання магнітного поля. Основною метою було проведення математичних досліджень для оптимізації параметрів ферозонда та визначення його робочих характеристик в умовах різних магнітних полів. Застосовані математичні моделі дозволили глибоко проаналізувати процеси, які відбуваються всередині ферозонда під час вимірювань, забезпечуючи комплексний підхід до вивчення його роботи. Особливу увагу приділено впливу зовнішніх чинників, таких як температурні коливання, наявність сторонніх магнітних полів і інших завад, на точність вимірювань. Це дозволило виявити умови, за яких точність і стабільність роботи ферозонда залишаються на високому рівні. Експериментальні дослідження підтвердили ефективність фазоімпульсного принципу вимірювання, виявивши високу чутливість і швидкодію однострижневого ферозонда. Ці характеристики роблять його перспективним для застосування в різних наукових та технічних галузях, де необхідні точні вимірювання магнітного поля. Детально описані конструктивні особливості ферозонда, методологія проведення експериментальних досліджень, а також алгоритми обробки отриманих даних. Отримані результати відкривають нові можливості для подальшого розвитку високоточних вимірювальних приладів на основі фазоімпульсного підходу, що можуть використовуватися в широкому спектрі задач сучасної науки і техніки. Було виконано порівняння отриманих результатів з іншими методиками вимірювань, що дозволило визначити переваги та недоліки фазоімпульсного принципу. Виявлені перспективи для подальшого вдосконалення конструкції ферозондів з метою підвищення їх точності, надійності та зменшення впливу зовнішніх факторів.

Ключові слова: Фазоімпульсний ферозонд; вимірювання магнітного поля; однострижневий ферозонд; магнітні поля

PHASE-PULSE FERROELECTRIC PROBE FOR MAGNETIC FIELD MEASUREMENT**V. KRİKUN, Y. KHOMYAK, I. KORNEV****KRSKD, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE*

ABSTRACT The article deals with a promising direction of development of measuring devices based on the phase-pulse principle. The results of studies of a single-rod ferroelectric probe operating on the basis of the phase-pulse principle of magnetic field measurement are presented. The main purpose of the work was to conduct mathematical studies to optimize the parameters of the ferroelectric probe and determine its performance characteristics under different magnetic fields. The applied mathematical models made it possible to analyze in depth the processes that occur inside the ferroelectric probe during measurements, providing an integrated approach to studying its operation. Particular attention was paid to the influence of external factors, such as temperature fluctuations, the presence of extraneous magnetic fields and other interferences, on the measurement accuracy. This made it possible to identify the conditions under which the accuracy and stability of the ferroelectric probe remain at a high level. Experimental studies have confirmed the effectiveness of the phase-pulse measurement principle, revealing the high sensitivity and speed of the single-rod ferroelectric probe. These characteristics make it promising for use in various scientific and technical fields where accurate magnetic field measurements are required. The article also describes in detail the design features of the ferroelectric probe, the methodology for conducting experimental studies, and the algorithms for processing the data obtained. The obtained results open up new opportunities for the further development of high-precision measuring devices based on the phase-pulse approach, which can be used in a wide range of tasks of modern science and technology. A comparison of the obtained results with other measurement methods was made, which allowed to determine the advantages and disadvantages of the phase-pulse principle. Prospects for further improvement of the ferroprobes design with the aim of increasing their accuracy, reliability and reducing the influence of external factors have been identified.

Keywords: Phase-pulse ferroelectric probe; magnetic field measurement; single-rod ferroelectric probe; magnetic fields

Вступ

Феррозонди завжди привертали увагу технічних і наукових спільнот як практичний і зручний інструмент для векторних вимірювань магнітного поля в діапазоні мікротесел при кімнатній температурі. Вони знаходять застосування в таких важливих областях як космічна та геофізична розвідка, картографія, неруйнівний контроль, а також у різних військових застосуваннях. Наприклад, у космічній галузі феррозонди використовуються для вивчення магнітних полів планет і сонячного вітру, тоді як у геофізиці вони допомагають у виявленні та

аналізі магнітних аномалій земної кори. У картографії феррозонди сприяють створенню високоточних магнітних карт, а в неруйнівному контролі – діагностиці матеріалів і конструкцій без їх пошкодження.

Феррозонди відомі своєю високою чутливістю та здатністю до точних вимірювань, що робить їх незамінними в багатьох наукових і промислових завданнях. Принцип роботи більшості сучасних феррозондів базується на вимірюванні другої гармоніки вихідної напруги, що забезпечує високу точність і стабільність вимірювань.

Історично ферозонди використовувалися в широкому спектрі додатків, від магнітометрів для наукових досліджень до приладів для військової розвідки. Розвиток технологій привів до вдосконалення конструкції та принципів роботи ферозондів, розширивши їх функціональні можливості та підвищивши ефективність. Сьогодні ці пристрої продовжують відігравати ключову роль у багатьох передових дослідженнях і технологічних розробках.

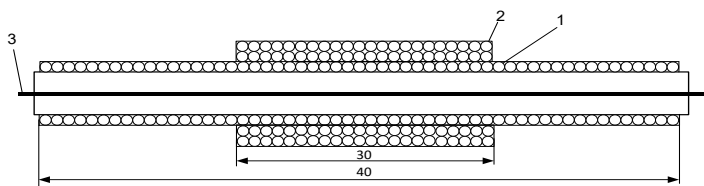
Мета роботи

Метою цієї статті є дослідження та аналіз однострижневого ферозонда з фазоімпульсним принципом вимірювання магнітного поля. Стаття спрямована на розробку та вдосконалення математичних моделей, що описують роботу ферозонда в різних умовах магнітних полів, а також на оптимізацію параметрів ферозонда для досягнення максимальної точності та стабільності вимірювань.

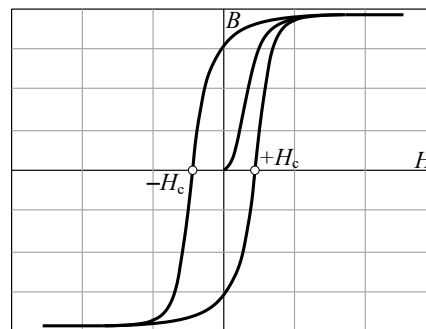
Основна частина

Фазоімпульсний ферозондовий перетворювач (рис. 1а) складається з двох котушок – первинної (котушка збудження 1) і вторинної котушки (вимірювальна котушка 2), з феромагнітним сердечником 3, який має гістерезисну магнітну характеристику (рис. 1б).

При протіканні гармонійного струму через первинну котушку в ній виникає магнітне поле, паралельне геометричній осі сердечника.



а



б

Рис. 1 – Однострижневий ферозонд: а – конструкція; б – магнітна характеристика сердечника

Коли вимірюване поле перевищує позитивні і негативні поля H_c і $-H_c$, намагніченість x розвивається між її стійкими станами насичення.

Принцип роботи однострижневого фазоімпульсного ферозонда пояснюється на рис. 2.

Обмотка збудження створює напруженість магнітного поля $H_e(t)$, яке змінюється за синусоїдальним законом. За відсутності зовнішнього магнітного поля (рис. 2а) різниця інтервалів часу $\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2$ дорівнює 0. При наявності зовнішнього поля (рис. 2б) – $\Delta\tau = f(H_x)$.

Динамічний відгук феромагнітного сердечника походить від бістабільної функції потенційної енергії $U(x)$. Потенційна енергія строго корелюється з мікромагнітними явищами і, як правило, залежить від колективного руху доменної стінки в межах кордонів середнього поля; зміна виражається через потенціал:

$$U(x) = \frac{x^2}{2} - \frac{1}{c} \ln \cosh[c(x + H_e(t) + H_x)], \quad (1)$$

де $x(t)$ – нормована намагніченість синусоїдального магнітного поля збудження H_e ; H_x – вимірюване постійне магнітне поле; c – нелінійний параметр, обернено пропорційний температурі [1,2].

Частинна похідна потенційної функції енергії по намагніченості x являє собою динамічну поведінку (нормованої) намагніченості $x(t)$ в феромагнітному осерді:

$$\tau \frac{dx}{dt} = -x + \tanh\left[\frac{x + H_e(t) + H_x}{K}\right] = -\frac{\partial U(x,t)}{\partial x}, \quad (2)$$

де τ – постійна часу системи; $K = 1/c$ – залежний від температури параметр.

За відсутності зовнішнього магнітного поля петля гістерезису і потенціал функції симетричні, однак наявність зовнішнього сигналу постійного поля H_x призводить до спотворення петлі гістерезису [3-5].

Оцінка інформації заснована на аналізі сигналу напруги u_2 , вторинної обмотки. Вихідна напруга пропорційна першій похідній намагніченості і, як правило, представляється у вигляді послідовності різких імпульсів.

Тобто, вимірювання магнітного поля при такому підході зводиться до виміру інтервалів часу на протилежність до фільтрації та вимірювання амплітуди парних гармонік [1,6,7].

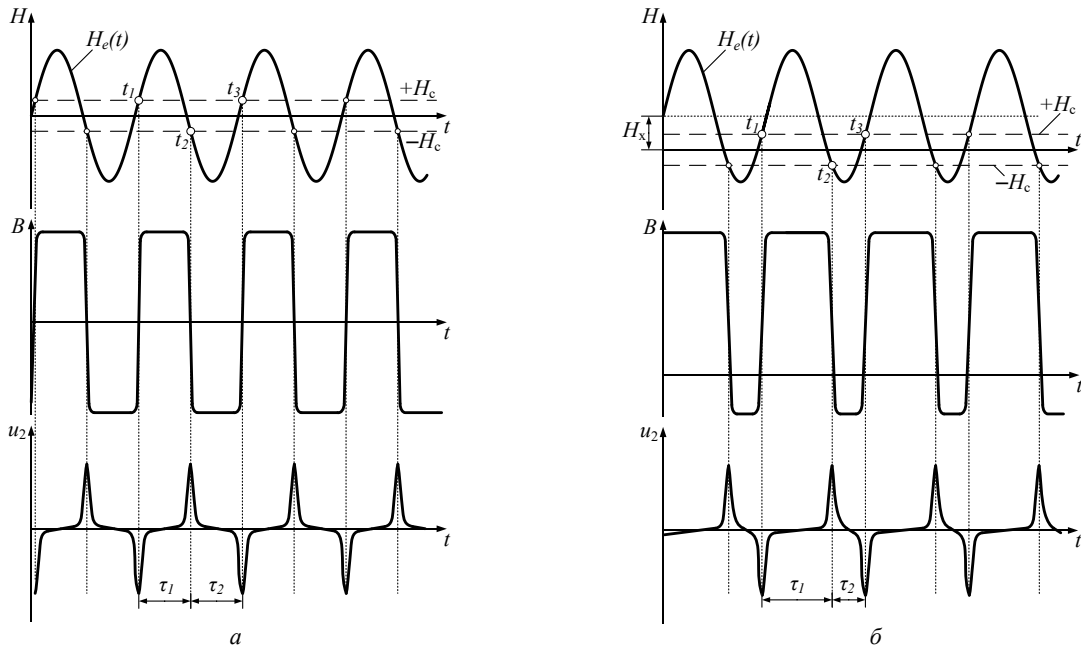


Рис. 2 – Енґри сигналів ферозонду: а – $H_x = 0$; б – $H_x \neq 0$

В якості попереднього розгляду для розрахунку аналітичних моделей фазоімпульсного ферозонду прийнемо допущення

$$-H_e + |H_x| < -H_c \Rightarrow |H_x| - H_c + H_e, \quad H_e(t) = \hat{H}_e \sin(\omega t). \quad (3)$$

Якщо ми розглянемо моменти часу: t_1, t_2, t_3 , то можна записати:

$$H_x + H_e(t_1) = H_c \Rightarrow H_x + \hat{H}_e \sin(\omega t_1) = H_c; \quad (4)$$

$$H_x + H_e(t_2) = -H_c \Rightarrow \Rightarrow H_x + \hat{H}_e \sin(\omega(t_2 - \frac{T}{2})) = -H_c; \quad (5)$$

$$t_3 = t_1 + T. \quad (6)$$

З рівнянь (3)-(6) знайдемо:

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \arcsin\left(\frac{H_c - H_x}{\hat{H}_e}\right); \quad (7)$$

$$t_2 = \frac{1}{\omega} \arcsin\left(\frac{H_c + H_x}{\hat{H}_e}\right) + \frac{T}{2}; \quad (8)$$

$$t_3 = \frac{1}{\omega} \arcsin\left(\frac{H_c - H_x}{\hat{H}_e}\right) + T. \quad (9)$$

Перейдемо до інтервалів часу:

$$\Delta\tau = \tau_1 - \tau_2 = t_2 - t_1 - (t_3 - t_2). \quad (10)$$

Тоді функція перетворення:

$$\Delta\tau = \frac{2}{\omega} \left[\arcsin\left(\frac{H_c + H_x}{\hat{H}_e}\right) - \arcsin\left(\frac{H_c - H_x}{\hat{H}_e}\right) \right]. \quad (11)$$

Функція чутливості може бути записана так:

$$S = \frac{\partial\tau}{\partial H_x} = \frac{2}{\omega} \frac{1/H_e}{\sqrt{1 - \left(\frac{H_c + H_x}{\hat{H}_e}\right)^2}} + \frac{2}{\omega} \frac{1/H_e}{\sqrt{1 - \left(\frac{H_c - H_x}{\hat{H}_e}\right)^2}}. \quad (12)$$

Виходячи з вигляду співвідношень (11), (12), функція перетворення має нелінійний вигляд і свідчить про те, що чутливість вимірювань при живленні напругою синусоїдальної форми залежить від вимірюваної величини [1,3].

Нелінійність функції $\Delta\tau(H_x)$ може бути зменшена, застосовуючи сигнал збудження трикутної форми. Для трикутного сигналу з нахилом β і періодом T :

$$H_e(t) = \left\{ \begin{array}{l} \beta t \leftarrow -\frac{T}{4} \leq t \leq \frac{T}{4} + NT \\ -\beta \left(t - \frac{T}{2}\right) \leftarrow NT + \frac{T}{4} \leq t \leq \frac{3T}{4} + N \end{array} \right\}. \quad (13)$$

На рис. 3 показана часова діаграма трикутного поля збудження [2,8,9].

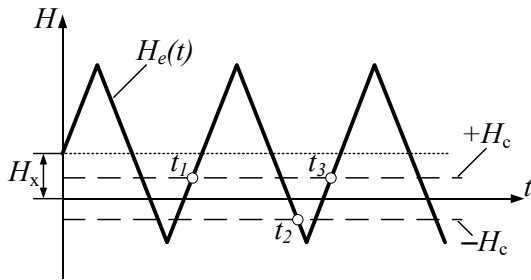


Рис. 3 – Часова діаграма трикутного поля збудження

У цьому випадку для моментів часу t_1, t_2, t_3 :

$$H_x + \beta t_1 = H_c; \quad (14)$$

$$H_x - \beta t_1 \left(t_2 - \frac{T}{2} \right) = -H_c; \quad (15)$$

$$t_3 = t_1 + \tau. \quad (16)$$

Або

$$t_1 = \frac{H_c - H_x}{\beta}; \quad (14)$$

$$t_2 = \frac{H_c + H_x + \beta \frac{T}{2}}{\beta}; \quad (15)$$

$$t_3 = \frac{H_c - H_x}{\beta} + \tau. \quad (16)$$

З рівнянь (13)-(16) різниця часу ($\Delta\tau$) може бути виражена як:

$$\begin{aligned} \Delta\tau &= t_2 - t_1 - t_3 + t_2 = 2t_2 - t_1 - t_3 = \\ &= \frac{2H_x}{\beta} + \frac{T}{2} + \frac{2H_x}{\beta} - \frac{T}{2}; \quad (17) \end{aligned}$$

$$\Delta\tau = \frac{4H_x}{\beta}. \quad (18)$$

Функція чутливості при трикутному струмі збудження ферозонду:

$$S = \frac{\partial}{\partial H_x} \Delta\tau = \frac{4}{\beta} = \frac{4T}{4H_e} = \frac{1}{H_e f}. \quad (19)$$

З (19) видно, що чутливість обернено пропорційна частоті і амплітуді сигналу збудження, до того ж функція чутливості не залежить від зовнішнього магнітного поля H_x (як у випадку синусоїдального збудження) [10,11].

Дослідження фазоімпульсного ферозонда

Досліджено однострижневий ферозонд з фазоімпульсним принципом вимірювання магнітного поля, зовнішній вид якого показано на рис. 4.



Рис. 4 – Зовнішній вигляд ферозонду

Довжина обмотки збудження - 40 мм, яка має 360 витків з діаметром намотуваного дроту $d_1 = 0.1$ мм, довжина вимірювальної обмотки складає 30 мм, яка має 1800 витків з діаметром намотуваного дроту $d_2 = 0.07$ мм. У роботі було проведено декілька досліджень із різними видами сердечників, з пермалою та μ -металу.

Для експериментів було розроблено схему включення фазоімпульсного ферозонда, яку показано на рис 5.

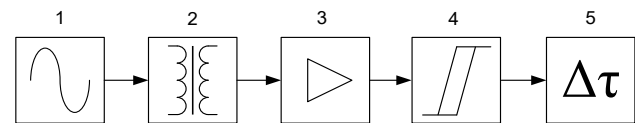


Рис. 5 – Структурна схема досліджень

Генератор 1 виробляє збуджувальний струм із заданими амплітудою та частотою. До вимірювальної обмотки ферозонда 2 підключено підсилювач сигналу 3 та компаратор 4. Різниця часу $\Delta\tau$ вимірюється за допомогою пристрою на мікроконтролері 5. На рис. 6 показані осцилограми сигналів на виходах компаратора (зверху) та підсилювача (знизу) [12].

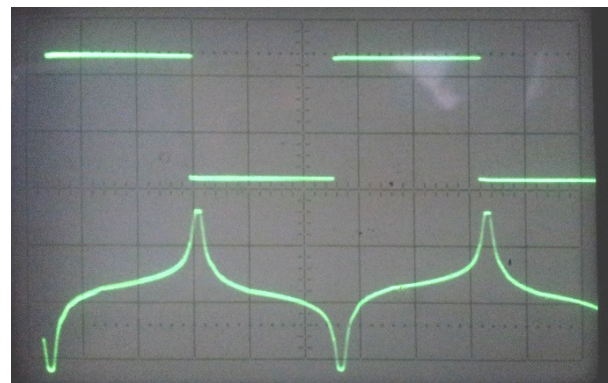


Рис. 6 – Осцилограми сигналів фазоімпульсного ферозонда

Для дослідження ферозонда використовувалася котушка (соленоїд), за допомогою якої створювалось постійне магнітне поле. Ферозонд поміщався у середину котушки, в якості джерела живлення якої використовувався лабораторний блок живлення.

Для збудження ферозондового датчика використовувався генератор ГЗ-109. Напруга на генераторі встановлювалась таким чином, що через ферозонд протікав струм 25мА, а частота змінювалась від 100 Гц до 1кГц, та на частоті 320 Гц, змінюючи напругу генератора таким чином, що через ферозонд протікав струм від 5мА до 100мА, отримали залежності вихідного сигналу та чутливості від зміни частоти та струму збудження ферозонда.

За допомогою лабораторного блока живлення задавали такі значення струмів, які проходили на обмотку котушки, та створювали напруженість поля в котушці від 25А/м до 500А/м.

У результаті досліджень були отримані залежності Δt від зміни напруженості магнітного поля вихідного сигналу для сердечника з пермалою на частоті 320 Гц та струмі збудження 20 мА та 25 мА, які показано відповідно на рис. 7 – 8 [1,9].

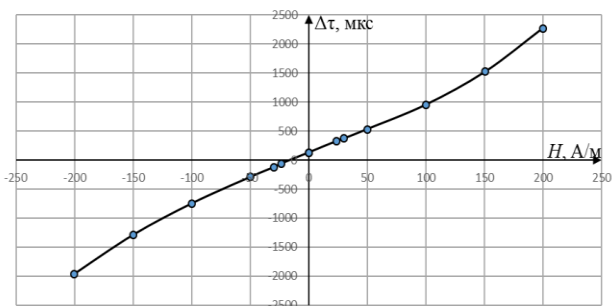


Рис. 7 – Залежність вихідного сигналу від вимірюваного поля при збуджувальному струмі 20 мА

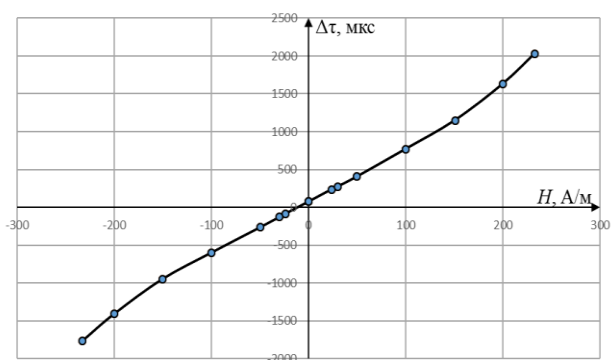


Рис. 8 – Залежність вихідного сигналу від вимірюваного поля при збуджувальному струмі 25 мА

Залежність вихідного сигналу від вимірюваного поля на частоті 500 Гц та струмі збудження 50 мА для сердечника з μ -металу показано на рис. 9.

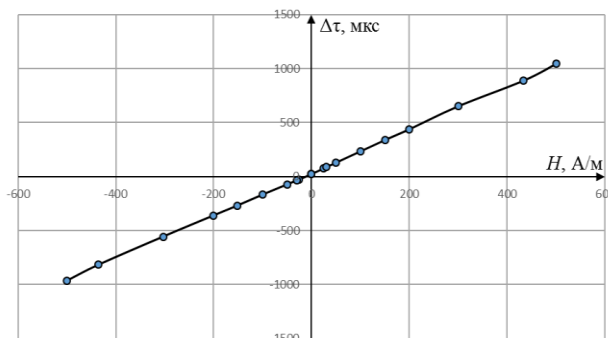


Рис. 9 – Залежність вихідного сигналу від вимірюваного поля при збуджувальному струмі 50 мА

Використовуючи сердечник з пермалою при струмі збудження 25мА, змінюючи частоту від 50 Гц до 700 Гц, отримано залежність чутливості від частоти, яка показана на рис. 10 [3,5].

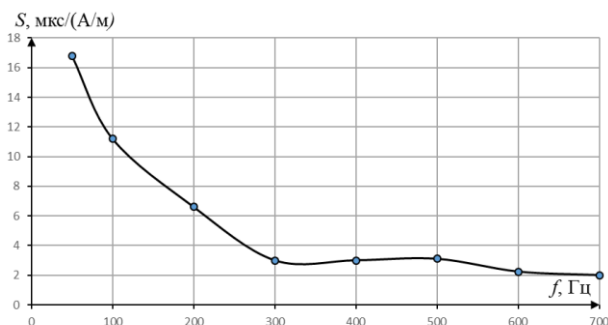


Рис. 10 – Залежність чутливості від частоти

При частоті 320 Гц, змінюючи струм збудження від 10 мА до 100 мА, отримано залежність чутливості від струму збудження, яка показана на рис.11.

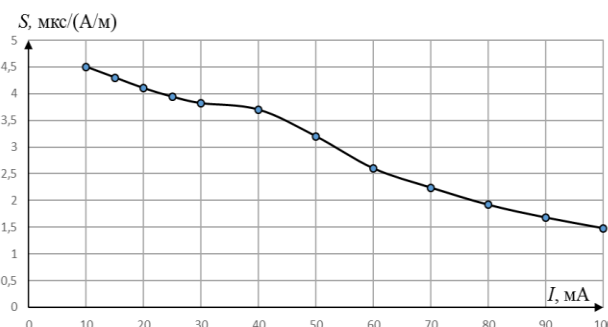


Рис. 11 – Залежність чутливості від струму збудження

Експерименти дозволили у першому наближенні оцінити роботу фазоімпульсного ферозонду та з'ясувати калібрувальні характеристики при вимірюванні слабких (співставних до магнітного поля землі) полів, про що свідчать залежності на

рис. 7-9. Видно що чутливість та лінійність характеристик детерміновано струмом та частотою збудження ферозонду (рис. 10-11). З цього випливає можливість використання таких ферозондів з можливістю встановлення його чутливості та діапазонів вимірювання магнітних полів за допомогою налаштування параметрів струму збудження. Також, вочевидь, для підвищення чутливості фази імпульсного ферозонду необхідно обирати режими роботи з малим током збудження та низькою частотою.

Висновки

Проведено комплексне дослідження однострижневого ферозонда, що використовує фази імпульсний принцип вимірювання магнітного поля. На основі розроблених математичних моделей здійснено аналіз поведінки ферозонда в умовах різних магнітних полів, а також розглянуто вплив факторів, таких як струм та частота збудження, на точність і стабільність вимірювань.

Експериментальні дослідження підтвердили високу ефективність фази імпульсного принципу вимірювання, що дозволяє досягти значних переваг у порівнянні з традиційними методами. Ферозонд продемонстрував високу чутливість та швидкодію, що робить його перспективним для використання у широкому спектрі наукових та технічних завдань.

Отримані результати вказують на можливість подальшої оптимізації параметрів ферозонда для досягнення ще більшої точності вимірювань. Це відкриває нові перспективи для застосування фази імпульсних ферозондів у різних галузях науки та техніки, включаючи космічну та геофізичну розвідку, неруйнівний контроль і військові технології.

Таким чином, дослідження однострижневого ферозонда з фази імпульсним принципом вимірювання магнітного поля підтвердило його ефективність і перспективність, що сприятиме розвитку нових високоточних вимірювальних приладів та розширенню їх застосувань.

Список літератури

1. Zaporozhets Yu. M. The novel mathematical model and methodology for computer simulation of magnetic field in a nonlinear medium. *Science and Innovation*. 2024. 20(1). P. 15–34. doi:10.15407/scine20.01.015.
2. Xiabin Ding, Yi-Sheng Chai, Fedor Balakirev, Marcelo Jaime, Hee Taek Yi, Sang-Wook Cheong, Young Sun, Vivien Zapf. Measurement of the angle dependence of magnetostriction in pulsed magnetic fields using a piezoelectric strain gauge. *Review of scientific instruments*. 2018. 89. P. 085109. doi: 10.1063/1.5038741.
3. Kai-Mei C. Fu, Geoffrey Z. Iwata, Arne Wickenbrock, Dmitry Budker. Sensitive magnetometry in challenging environment. *Quantum Sensing and Metrology: From Industrial Implementations for Market to Their Applications in Fundamental Science*. *AVS Quantum Sci*. 2020. 2. P. 3-14. doi: 10.1116/5.0025186.

4. Albahri T. et al. (The Muon $g-2$ Collaboration). Magnetic-field measurement and analysis for the Muon $g-2$ Experiment at Fermilab. *Phys. Rev. A*. 2021. 103. 4. P. 042208. doi: 10.1103/PhysRevA.103.042208.
5. Zhou B., Yang Y. Y., Zhang Y. T., Gou X. C., Cheng B. J., Wang J. D., and Li L. Magnetic field data processing methods of the China Seismo-Electromagnetic Satellite. *Earth Planet. Phys.* 2018. 2(6). P. 455–461. doi: 10.26464/epp2018043.
6. Chunxia Yue, Hui Ding, Xiaofeng Liu. Magnetic-Field Measurement Based on Multicore Fiber Taper and Magnetic Fluid. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2019. 68. 3. P. 688-692. doi: 10.1109/TIM.2018.2857058.
7. Ayako Matsuoka, Mariko Teramoto, Reiko Nomura, Masahito Nosé, Akiko Fujimoto, Yoshimasa Tanaka, Manabu Shinohara, Tsutomu Nagatsuma, Kazuo Shiokawa, Yuki Obana, Yoshizumi Miyoshi, Makoto Mita, Takeshi Takashima & Iku Shinohara. The ARASE (ERG) magnetic field investigation. *Earth Planets Space*. 2018. 70. 43. doi: 10.1186/s40623-018-0800-1.
8. Sara Casalbuoni, Nicole Glamann, Andreas Grau, Tomas Holubek. Magnetic Field Measurements of Full-Scale Conduction-Cooled Superconducting-Undulator-Coils. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2018. 28. 3. P. 1-4. doi: 10.1109/TASC.2018.2791953.
9. Jianxin Zhou, Wen Kang, Shuai Li, Yudong Liu, Yiqin Liu, Shouyan Xu, Xiaoling Guo, Xi Wu, Changdong Deng, Li Li, Yuwen Wu, Sheng Wang. AC magnetic field measurement using a small flip coil system for rapid cycling AC magnets at the China Spallation Neutron Source (CSNS). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 2018. 880. P. 80-86. doi: 10.1016/j.nima.2017.10.040.
10. Zhou B., Cheng B., Gou X. et al. First in-orbit results of the vector magnetic field measurement of the High Precision Magnetometer onboard the China Seismo-Electromagnetic Satellite. *Earth Planets Space*. 2019. 71. 119. doi: 10.1186/s40623-019-1098-3.
11. Rui Ma, Wentao Zhang, Wenzhu Huang, Fang Li. DFB fiber laser sensor for simultaneous measurement of acoustic and magnetic fields. *Chinese Optics Letters*. 2018. 16. 6. P. 060602. doi: 10.3788/COL201816.060602.
12. Wonbae Bang, Jinho Lim, Jonathan Trossman, Dovran Amanov, Matthias B. Jungfleisch, Axel Hoffmann, John B. Ketterson. Measurements of long-wavelength spin waves for the magnetic field in the Damon-Eshbach, backward-volume and forward-volume geometries of an yttrium iron garnet film. *Journal of Applied Physics*. 2018. 123. P. 123902. doi: 10.1063/1.5019752.

References (transliterated)

1. Zaporozhets Yu. M. The novel mathematical model and methodology for computer simulation of magnetic field in a nonlinear medium. *Science and Innovation*, 2024, 20(1). pp. 15–34, doi:10.15407/scine20.01.015.
2. Xiabin Ding, Yi-Sheng Chai, Fedor Balakirev, Marcelo Jaime, Hee Taek Yi, Sang-Wook Cheong, Young Sun, Vivien Zapf. Measurement of the angle dependence of magnetostriction in pulsed magnetic fields using a piezoelectric strain gauge. *Review of scientific instruments*, 2018, 89, pp. 085109, doi: 10.1063/1.5038741.
3. Kai-Mei C. Fu, Geoffrey Z. Iwata, Arne Wickenbrock, Dmitry Budker. Sensitive magnetometry in challenging

- environment. *Quantum Sensing and Metrology: From Industrial Implementations for Market to Their Applications in Fundamental Science*. *AVS Quantum Sci*, 2020, 2, pp. 3-14, doi: 10.1116/5.0025186.
4. Albahri T. et al. (The Muon $g-2$ Collaboration). Magnetic-field measurement and analysis for the Muon $g-2$ Experiment at Fermilab. *Phys. Rev. A*, 2021, 103, 4, pp. 042208, doi: 10.1103/PhysRevA.103.042208.
 5. Zhou B., Yang Y. Y., Zhang Y. T., Gou X. C., Cheng B. J., Wang J. D., and Li L. Magnetic field data processing methods of the China Seismo-Electromagnetic Satellite. *Earth Planet. Phys.*, 2018, 2(6), pp. 455–461, doi: 10.26464/epp2018043.
 6. Chunxia Yue, Hui Ding, Xiaofeng Liu. Magnetic-Field Measurement Based on Multicore Fiber Taper and Magnetic Fluid. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, 68, 3, pp. 688-692, doi: 10.1109/TIM.2018.2857058.
 7. Ayako Matsuoka, Mariko Teramoto, Reiko Nomura, Masahito Nosé, Akiko Fujimoto, Yoshimasa Tanaka, Manabu Shinohara, Tsutomu Nagatsuma, Kazuo Shiokawa, Yuki Obana, Yoshizumi Miyoshi, Makoto Mita, Takeshi Takashima & Iku Shinohara. The ARASE (ERG) magnetic field investigation. *Earth Planets Space*, 2018, 70, 43, doi: 10.1186/s40623-018-0800-1.
 8. Sara Casalbuoni, Nicole Glamann, Andreas Grau, Tomas Holubek. Magnetic Field Measurements of Full-Scale Conduction-Cooled Superconducting-Undulator-Coils. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2018, 28, 3, pp. 1-4, doi: 10.1109/TASC.2018.2791953.
 9. Jianxin Zhou, Wen Kang, Shuai Li, Yudong Liu, Yiqin Liu, Shouyan Xu, Xiaoling Guo, Xi Wu, Changdong Deng, Li Li, Yuwen Wu, Sheng Wang. AC magnetic field measurement using a small flip coil system for rapid cycling AC magnets at the China Spallation Neutron Source (CSNS). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, 880, pp. 80-86, doi: 10.1016/j.nima.2017.10.040.
 10. Zhou B., Cheng B., Gou X. et al. First in-orbit results of the vector magnetic field measurement of the High Precision Magnetometer onboard the China Seismo-Electromagnetic Satellite. *Earth Planets Space*, 2019, 71, 119, doi: 10.1186/s40623-019-1098-3.
 11. Rui Ma, Wentao Zhang, Wenzhu Huang, Fang Li. DFB fiber laser sensor for simultaneous measurement of acoustic and magnetic fields. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16, 6, pp. 060602, doi: 10.3788/COL201816.060602.
 12. Wonbae Bang, Jinho Lim, Jonathan Trossman, Dovran Amanov, Matthias B. Jungfleisch, Axel Hoffmann, John B. Ketterson. Measurements of long-wavelength spin waves for the magnetic field in the Damon-Eshbach, backward-volume and forward-volume geometries of an yttrium iron garnet film. *Journal of Applied Physics*, 2018, 123, pp. 123902, doi: 10.1063/1.5019752.

Відомості про авторів (About authors)

Крикун Вадим Романович – аспірант кафедри «Комп’ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; ORCID: 0009-0001-8197-2877; e-mail: vadymkrykun8@gmail.com.

Крыкун Вадим - PhD student of the Department “Computer and Radio-Electronic Control and Diagnostic Systems”, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv; ORCID: 0009-0001-8197-2877; e-mail: vadymkrykun8@gmail.com.

Хомяк Юрій Валентинович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри «Комп’ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; ORCID: 0000-0001-6998-8393; e-mail: homyak.yv@gmail.com.

Khomyak Yuri – candidate of technical sciences, associate professor, Head of Department of the Department “Computer and Radio-Electronic Control and Diagnostic Systems”, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv; ORCID: 0000-0001-6998-8393; e-mail: homyak.yv@gmail.com.

Корнев Іван Костянтинович – аспірант кафедри «Комп’ютерні та радіоелектронні системи контролю та діагностики», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; ORCID: 0009-0005-8106-1757; e-mail: ik0077ik25@gmail.com.

Korniev Ivan – PhD student of the Department “Computer and Radio-Electronic Control and Diagnostic Systems”, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv; ORCID: 0009-0005-8106-1757; e-mail: ik0077ik25@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Крикун В. Р., Хомяк Ю. В., Корнев І. К. Фазоімпульсний ферозонд для вимірювання магнітного поля. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2024. № 3 (21). С. 32-38. doi:10.20998/2413-4295.2024.03.05.

Please cite this article as:

Krykun V., Khomyak Y., Kornev I. Phase-pulse ferroelectric probe for magnetic field measurement. *Bulletin of the National Technical University "KhPI"*. Series: New solutions in modern technology. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2024, no. 3(21), pp. 32–38, doi:10.20998/2413-4295.2024.03.05.

Надійшла (received) 09.08.2024

Прийнята (accepted) 16.09.2024