

РАДІОЕЛЕКТРОННІ КОЛА, ПРИСТРОЇ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.317.4

Ю. Я. Бобало, М. Д. Кіселичник, М. В. Мелень, Ф. Б. Павлов
Національний університет “Львівська політехніка”

МОДЕРНІЗАЦІЯ ФЕРОЗОНДОВОГО МАГНІТОМЕТРА

© Бобало Ю. Я., Кіселичник М. Д., Мелень М. В., Павлов Ф. Б., 2017

Запропоновано ферозондовий магнітометр, який відрізняється від класичного аналога спрощеною конструкцією датчика магнітного поля, виконаного на одному стрижні.

Здійснено теоретичний аналіз роботи такого датчика і подано результати його експериментальної перевірки. Розглянуто структурну схему модернізованого магнітометра.

Чутливість запропонованого пристрою 1 нТл.

Ключові слова: магнітометр ферозондовий, давач магнітного поля, струми Фуко.

Yu. Ya. Bobalo, M. Kiselychnyk, M. Melen, F. Pavlov
Lviv Polytechnic National University

MODERNIZATION OF FLUX-GATE MAGNETOMETER

© Bobalo Yu., Kiselychnyk M., Melen M., Pavlov F., 2017

Various types of magnetic field sensors, their advantages and disadvantages are considered.

Classic flux-gate magnetometer, the block diagram of which is driven, contains dual-core sensor with counter switching of primary magnetization coil and general output secondary coil for both cores. The disadvantage of this sensor – the complexity of manufacturing and the need for precise balancing of magnetization coil.

The single-core sensor is suggested. It differs from the counterpart by that the magnetizing coil are powered by amplitude modulated alternating current.

Theoretical analysis of the work of upgraded sensor. High-frequency components of the magnetic flux are destroyed due to Foucault currents, therefore on the secondary coil, which is part of the oscillating circuit, a signal with double modulating frequency is released. The block diagram of single-core magnetometer sensor and two generators is driven.

The construction of sensor is described and winding data, necessary for its implementation, is provided. The experimental voltage waveforms of the sensor output in measuring the Earth's magnetic field in the direction of north-south and east-west are driven.

The features of upgraded magnetometer are comparable with the characteristics of its analog.

The advantages of the new device is more simple sensor that does not require precise balancing and the use of high-frequency ferromagnetic materials.

Key words: flux-gate magnetometer, magnetic field sensor, Foucault.

Вступ

Сьогодні є доволі багато датчиків магнітного поля, оснований на різних фізичних принципах. Наприклад, відомі пристрої з механічною (акустичною) [1] або магнітною [2] модуляцією вимірюваного магнітного поля (ферозонди), датчики Холла, магнітодіодні й магніторезистивні

датчики [3], квантові датчики на основі ефекта Зеемана, датчики на основі ядерного магнітного резонансу [4], надпровідні квантові вимірювачі магнітного потоку (сквіди) [5] тощо. Всі вони мають специфічні переваги і недоліки, притаманні кожному конкретному типу. Наприклад, гранично прості, дешеві й мініатюрні датчики Холла або магнітодіодні та магніторезистивні, однак в області слабких полів у них недостатня чутливість і стабільність характеристик [6, 7]. У сквідів [5, 8] рекордна чутливість, але вони потребують охолодження до криогенних температур. Датчики на основі ядерного магнітного резонансу [2] високочутливі, стабільні й точні, але непрацездатні в неоднорідних магнітних полях, крім того, для них необхідна складна електроніка. Порівняно прості ферозондові датчики, в яких модуляція вимірюваного поля здійснюється накладанням на феромагнетик [7] значного за величиною модулюючого магнітного поля підмагнічення [2].

На вхід смугового підсилювача $\Pi_{2\omega}$ (рис. 5), виконаного на RC-елементах, також подаються амплітудно-модульовані складові з першою, другою і третьою гармоніками частоти генератора Γ_ω (4). Необхідну напругу для роботи синхронного детектора СД, який відокремлює корисний сигнал, забезпечує подвоювач частоти $U_\omega/U_{2\omega}$.

Індикація амплітуди корисного сигналу здійснюється осцилографом або стрілковим пристроєм [9], а зміна частоти, зумовлена залежністю магнітної проникності від напруженості поля, – частотоміром-приставкою до ПК [10, 11].

Структурна схема аналога

Основними схемотехнічними елементами класичного ферозондового магнітометра [1] є датчик, гетеродин, підсилювач проміжної частоти і синхронний детектор (рис. 1).

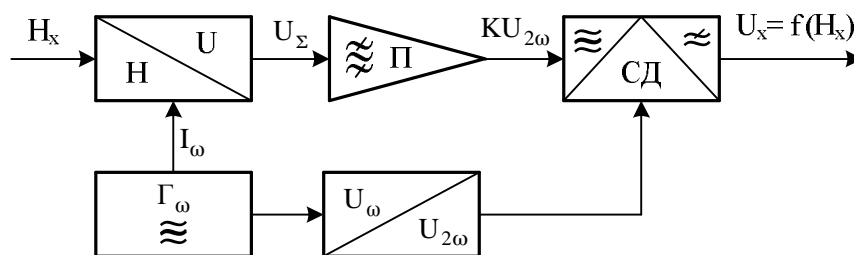


Рис. 1. Класичний магнітометр [1]: H/U – датчик магнітного поля; Γ_ω – генератор струму; Π – смуговий підсилювач; $U_\omega/U_{2\omega}$ – подвоювач частоти; СД – синхронний детектор

За наявності зовнішнього магнітного поля H_x у разі підмагнічення від генератора струму Γ_ω внаслідок нелінійної залежності магнітної індукції від напруженості поля на виході датчика H/U з'являється напруга з подвійною частотою генератора, яка після синхронного детектування СД подається на вихід пристрою.

Класичний ферозондовий магнітометр будують на основі датчика магнітного поля, виконаного з двох стрижнів (рис. 2). Первинні обмотки 2 живляться змінним струмом із частотою ω :

$$I_\omega = I_m \cos \omega t. \quad (1)$$

Вихідна напруга на вторинній обмотці U_Σ містить складову з подвійною частотою 2ω . Її амплітуда пропорційна до напруженості H_x зовнішнього магнітного поля.

Недоліком датчика, зображеного на рис. 1, є складність його виготовлення та необхідність точного балансування обмоток намагнічення 2. Мета цієї роботи – розроблення структурної схеми ферозондового магнітометра з простішим датчиком.

Теоретичний аналіз роботи модернізованого датчика

Схему запропонованого датчика подано на рис. 3.

Його відмінність від аналога в тому, що обмотки намагнічення 2 живляться змінним струмом, модульованим за амплітудою

$$I = I_m \cos \Omega t \cos \omega t. \quad (2)$$

Припускаючи, що крива намагнічення осердя апроксимується поліномом третього степеня:

$$B = aH + bH^3, \quad (3)$$

виконаємо подальший аналіз.

Завдяки зустрічному ввімкненню обмоток 2 і непарній залежності намагнічення, низькочастотні складові магнітного потоку, які відсутні у струмі живлення, виникнуть тільки у випадку, якщо в тому самому напрямку, що і змінні поля, буде прикладено додаткове зовнішнє магнітне поле з напруженістю H_x :

$$\begin{aligned} B &= aH_x + b(H_x \pm H_M \cos \Omega t \cos \omega t)^3 = aH_x + b(H_x^3 \pm 3H_x^2 H_M \cos \Omega t \cos \omega t + \\ &+ 3H_x H_M^2 \cos^2 \Omega t \cos^2 \omega t \pm H_M^3 \cos^3 \Omega t \cos^3 \omega t) = aH_x + b \left[H_x^3 \pm 3H_x^2 H_M \cos \Omega t \cos \omega t + \right. \\ &\left. + \frac{3}{4} H_x H_M^2 (1 + \cos 2\Omega t)(1 + \cos 2\omega t) \pm \frac{1}{16} H_M^3 (\cos 3\Omega t + 3 \cos \Omega t)(\cos 3\omega t + 3 \cos \omega t) \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

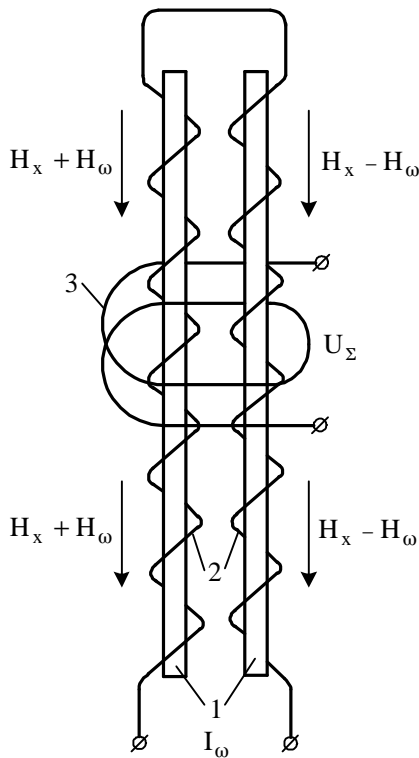


Рис. 2. Схема двострижневого датчика: 1 – пермалоеві осердя; 2 – первинні обмотки; 3 – вторинна обмотка

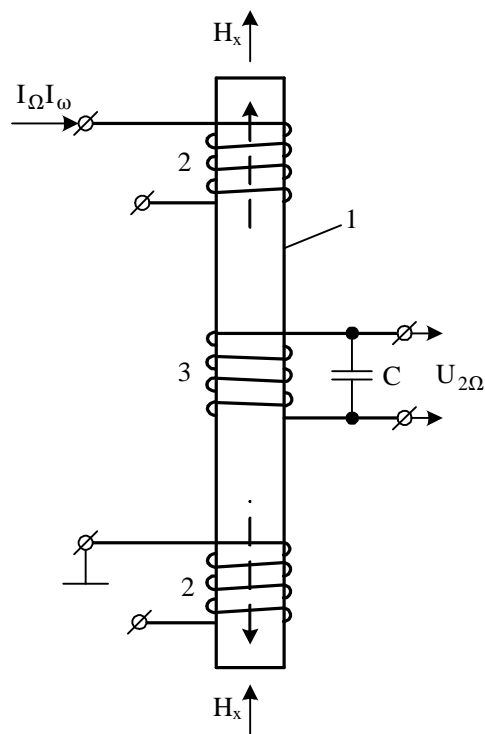


Рис. 3. Схема однострижневого датчика: 1 – пермалоеві осердя; 2 – первинні обмотки; 3 – вторинна обмотка

У виразі (4) знак плюс відповідає котушці 2, розташованій вгорі, а знак мінус – розміщеній внизу. Складові з подвійним знаком взаємно компенсуються як протифазні, а модульовані високочастотні складові магнітного потоку в котушках 2 знищуються завдяки струмам Фуко [2], тому посередині осердя вони не впливають на нелінійні ефекти намагнічення. Отже, обмотка 3 реагує лише на суму низькочастотних магнітних полів, які виникають під двома обмотками намагнічення:

$$U_3 \sim \frac{3}{2} b H_x H_M^2 \left(\cos 2\Omega t + \frac{1}{2} \cos 2\omega t \right) \quad (5)$$

Коливальний контур, утворений обмоткою 3 і конденсатором С, виділяє складову із частотою 2Ω . Значення цієї складової пропорційне до напруженості зовнішнього магнітного поля H_x .

Експериментальні дослідження

Практично осердя 1 однострижневого датчика являє собою смужку з молібденового пермалюю, довжина якої 240 мм, ширина 20 мм і товщина 0,35 мм. Дві первинні обмотки намагнічення 2 містять по 20 витків, розташованих на відстані 120 мм один від другого. Приймальна обмотка 3 має 6000 витків. Вибрані частоти: модулююча $\Omega = 2\pi \cdot 180$ (рад/с); несуча $\omega = 2\pi \cdot 2 \cdot 10^3$ (рад/с).

На рис. 4 подано результати вимірювання магнітного поля Землі, одержані із використанням запропонованого датчика й осцилографа.

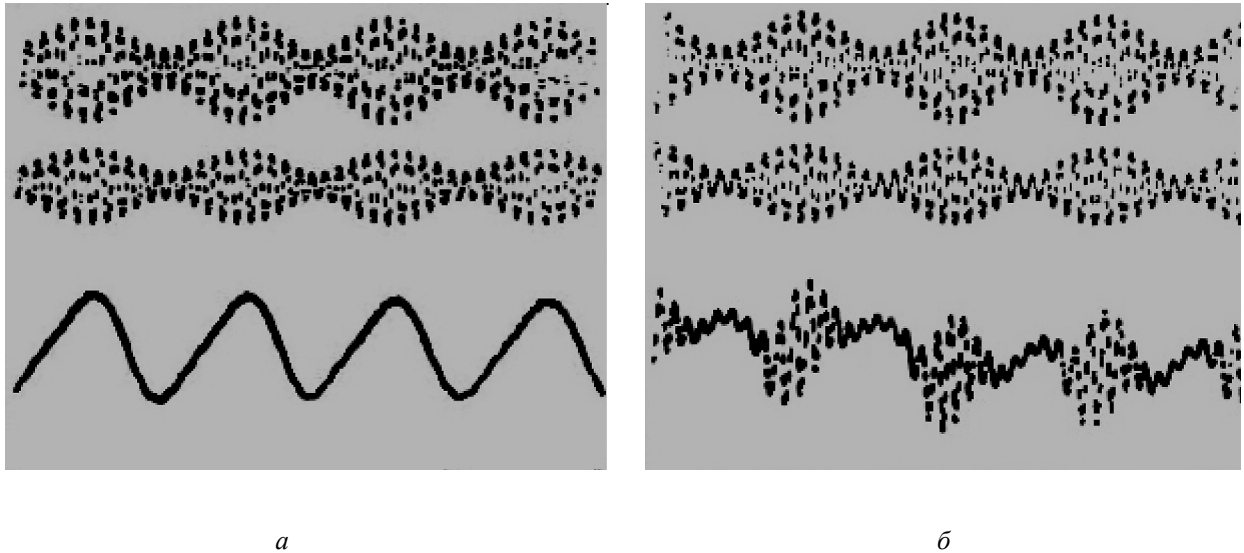


Рис. 4. Вихідна напруга датчика: а – напрям південь–північ ($H \approx 30$ а/м); б – напрям схід–захід

Верхня осцилограма відповідає струму намагнічення; середня – магнітному потоку під обмотками 2; нижня – вихідному сигналу.

Енергія магнітного поля в напрямку схід–захід у декілька разів менша, ніж у напрямку південь–північ, тому на рис. 4, б корисний сигнал $U_{2\Omega}$ маскується гармоніками високочастотного генератора Γ_ω .

Структурна схема модернізованого магнітометра

Повну структурну схему модернізованого ферозондового магнітометра з однострижневим давачем наведено на рис. 5.

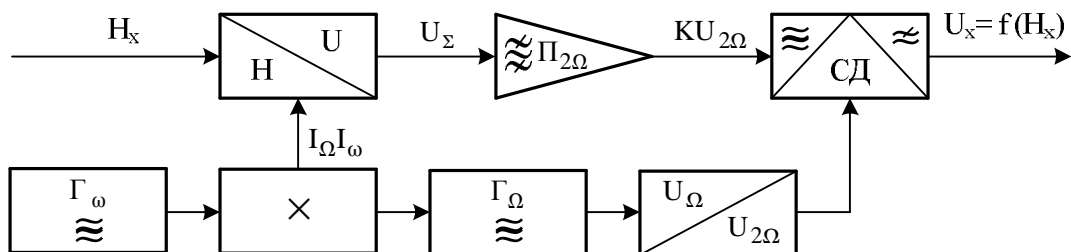


Рис 5. Модернізований магнітометр: H/U – датчик магнітного поля; Γ_w – генератор високочастотний;

Γ_w – генератор низькочастотний; \times – перемножувач-модулятор; $\Pi_{2\Omega}$ – смуговий підсилювач;

U_w/U_{2w} – подвоювач частоти; CD – синхронний детектор

Висновки

Характеристики модернізованого магнітометра співмірні з характеристиками аналога:

границі вимірювання	± 50 нТл;
чутливість	$0,12$ В/нТл;
поріг чутливості (середньоквадратичне значення) під час коротких спостережень	$0,1$ нТл;
за багатодобових спостережень	$1 \div 2$ нТл;
поправка на дрейф нуля	≤ 5 нТл;
температурний коефіцієнт	$\leq 0,1$ % на 1°C ;
споживана потужність	27 мВт

Переваги нового пристрою – простіший датчик, який не потребує точного балансування і використання високочастотних феромагнітних матеріалів.

1. Казанцев С. И., Коблик Ю. Н., Сотниченко В. П. Высокочувствительный датчик постоянного и низкочастотного магнитного поля с акустической накачкой // Приборы и техника эксперимента. – 2005. – № 3. – С. 142–146. 2. Большакова И., Гладун М., Голяка Р., Готра З. Мікроелектронні сенсорні пристрої магнітного поля. – Львів: Видавництво Нац. ун-ту “Львівська політехніка”, 2001. – 412 с. 3. Яворский Б. М. Справочник по физике / Яворский Б. М., Детлаф А. А. – М.: Оникс, Мир и образование, 2006. – 1056 с. 4. Афанасьев Ю. В. Феррозонды. – Л.: Энергия, 1968. – 168 с. 5. Бурмистров Е. В., Масленников Ю. В., Слободчиков В. Ю. и др. Высокочувствительный градиентометр на базе трёх СКВИД-магнитометров из высокотемпературных сверхпроводников // Радиотехника и электроника. – 2010. – № 9. – С. 1140 – 1146. 6. Осадчук В. С. Сенсори тиску і магнітного поля. – Вінниця: Універсум, 2005. – 207 с. 7. Осадчук О. В. Мікроелектронні частотні перетворювачі на основі транзисторних структур з від’ємним опором. – Вінниця: Універсум, 2000. – 303 с. 8. Закорчений О. В. Розробка біомедичних систем на основі надчутливої біомагнітометрії / Закорчений О. В., Будник М. М. // Електроніка і зв’язь. – 2011. – № 2(61). – С. 135–139. 9. Павлов Б. О., Мелень М. В. Пристрій для визначення флуктуації частоти високостабільних генераторів // Вісник Нац. ун-ту “Львів. політехніка” “Радіоелектроніка та телекомунікації”. – Вип. № 680. – Львів, 2010. – С. 85–89. 10. Павлик В. Частотомер-приставка к компьютеру // Радио. – 2009. – № 3. – С. 19–22. 11. Шмелев О. Компьютерный измерительный комплекс // Радио. – 2007. – № 3. – С. 24–27; № 4. – С. 21–25; № 5. – С. 17–20; № 6. – С. 27–29; № 7. – С. 23–25.