

Д.М. Шостачук

ФЕРОЗОНДОВІ МАГНІТОВИМІРЮВАЛЬНІ ПРИЛАДИ ДЛЯ ОРІЄНТАЦІЇ ШТУЧНИХ СУПУТНИКІВ ЗЕМЛІ

(Представлено доктором технічних наук, професором Самотокіним Б.Б.)

Дано стислу характеристику магнітного поля Землі, вказані переваги ферозондових приладів (ферозондів) для вимірювання напруженості магнітного поля в системах орієнтації штучних супутників, представлені основні типи осердь ферозондів та рекомендації щодо їх вибору для вимірювання трьох складових магнітного поля, визначено оптимальний спосіб збудження осердь, а також наведена класифікація основних методів вимірювання та конструювання цифрових ферозондів.

1. Магнітне поле земної кулі

Магнітне поле земної кулі є досить слабким магнітним полем, яке відчутно зменшується з висотою. Якщо на поверхні Землі в центрі Сибірської аномалії значення магнітної індукції дорівнює $0,62 \cdot 10^{-4}$ Тл, то на відстані 700 км. від поверхні воно складає $0,52 \cdot 10^{-4}$ Тл, тобто зменшилось на $0,1 \cdot 10^{-4}$ Тл або на 10000 Гам ($1 \text{ Гама} = 10^{-9}$ Тл). На орбітах, які використовуються для штучних супутників, вже не відчуваються ті локальні та регіональні аномалії, що обумовлюють складний характер магнітного поля Землі; вони швидко зменшуються із збільшенням відстані і тому відсутні в значеннях, які були отримані на супутниках [1]. На відстані 20–22 тис. км значення геомагнітного поля близько 800 гам, що складає 80 % напруженості нормального поля, тобто поля кулі, що має однорідну намагніченість.

2. Ферозондові прилади

2.1. Загальні визначення

Ферозондовими приладами (ферозондами) називаються пристрої, чутливі до проявів зовнішнього магнітного поля, які мають в своїй конструкції феромагнітні осердя та обмотки, що їх охоплюють, в одну з яких подають змінний струм, а з іншої знімають Е.Р.С., за якою роблять висновок про значення поля, яке вивчають. Ферозонди є різновидом фероіндукційних перетворювачів. Оскільки напруженість магнітного поля характеризується вектором, а намагніченість осердя залежить не тільки від поздовжніх, а й від поперечних розмірів, то ферозонди мають природну діаграму спрямованості, завдяки чому ферозондові прилади можуть використовуватися для вимірювання компонент поля. Крім цього, ферозондові магнітометри характеризуються досить високою точністю та надійністю, придатні для застосування в дуже слабких магнітних полях, в широкому температурному діапазоні та при наявності електромагнітних перешкод, довговічністю та низькою вартістю [2]. Структурна схема ферозонду зображена на рис. 2.1.

2.2. Осердя ферозондів

В залежності від осердя, що його використовують в ферозондах, розрізняють стержневі, кільцеві, трубчасті ферозонди (останнім часом намагаються застосовувати еліптичні, рамочні та ін.). Відповідно розрізняють ферозонди з розімкнутим (стержневі) та замкнутим осердям (кільцеві, еліптичні, рамочні та ін.) [3].

2.2.1. Ферозонди з розімкнутим осердям

Найбільш відомою та практично добре опанованим різновидом ферозондів цього типу є стержневі ферозонди, в яких реалізується спосіб поздовжнього збудження (рис. 2.2).

Для стержневого осердя рівень шуму на порядок вищий, ніж у кільцевого. Проведені дослідження доводять, що із збільшенням об'єму осердя магнітний шум зменшується. При цьому із збільшенням довжини осердя шум зменшується більше, ніж із збільшенням площини попереч-

ного перерізу. Як практично, так і теоретично доведено, що рівень магнітного шуму зменшується із збільшенням частоти поля збудження [4].

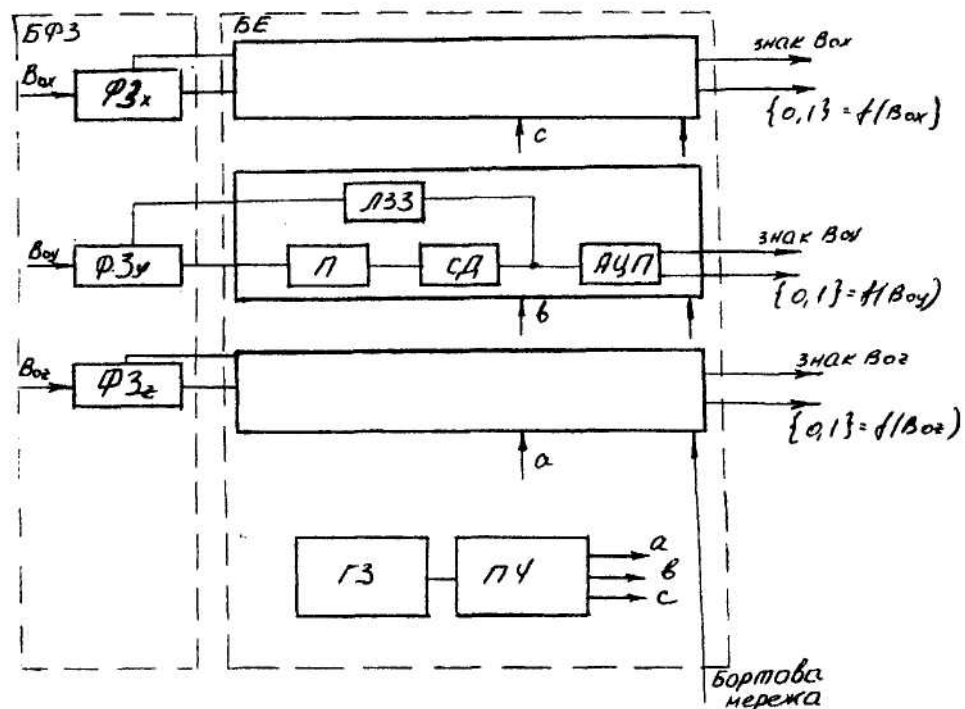


Рис. 2.1. Структурна схема трискладового ферозондового магнітометра: БФЗ – блок ферозондів; БЕ – блок електроніки; ФЗ_і – ферозонди; П – підсилювач; СД – синхронний детектор; ГВ – генератор збудження; ПЧ – подвоювач частоти; АЦП – аналого-цифровий перетворювач; ЛЗЗ – ланцюг зворотного зв'язку.

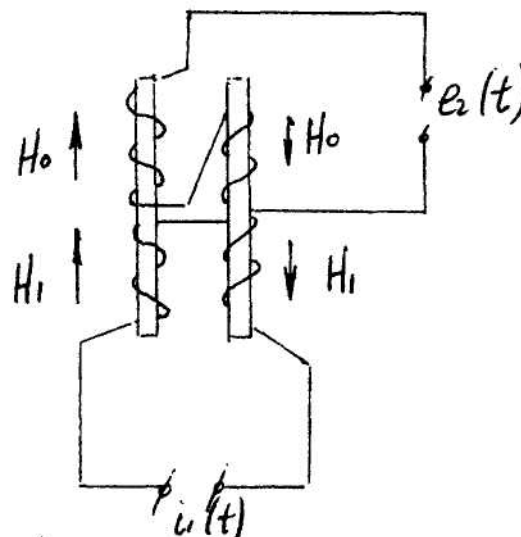


Рис. 2.2. Ферозонд з розімкнутим осердям

2.2.2. Ферозонди із замкнутим осердям

Найкращим чином нелінійний характер кривої намагнічення, прямокутна петля гістерезису, магнітна проникливість феромагнітних матеріалів можуть бути відтворені в осерді тороїдальної (кільцевої) форми, у яких практично вдається повністю усунути шкідливий вплив повітряних зазорів на шляху магнітного потоку. Іншою перевагою тороїдального осердя є відносно низька чутливість до впливу сторонніх зовнішніх полів, відсутність розсіяння у зовнішній простір

власного магнітного потоку при рівномірному розташуванні обмоток уздовж осердя та простота захисту осердя від механічних пошкоджень [5]. Тому для вимірювання напруженості слабких магнітних полів доцільно використовувати ферозонди із замкнутим осердям, які в порівнянні з ферозондами із розімкнутим осердям володіють низкою переваг:

- малий рівень шуму та більш висока стабільність нульового сигналу;
- малий рівень полів розсіяння і, як наслідок, менший рівень Е.Р.С. небалансу;
- мала потужність споживання за рахунок меншого об'єму осердя, яке виготовляють із тонкої пермалоевої стрічки, а також за рахунок можливості ферорезонансного режиму збудження;
- можливість простого балансування ферозонду за рахунок повороту осердя відносно нерухомої вимірювальної котушки, центр якої сполучений з центром кільця;
- можливість одночасного вимірювання двох складових при наявності одного осердя та трьох складових - при наявності двох осердь.

Ферозонди із замкнутим осердям для вимірювання однієї, двох та трьох складових магнітного поля зображені на рис. 2.3.

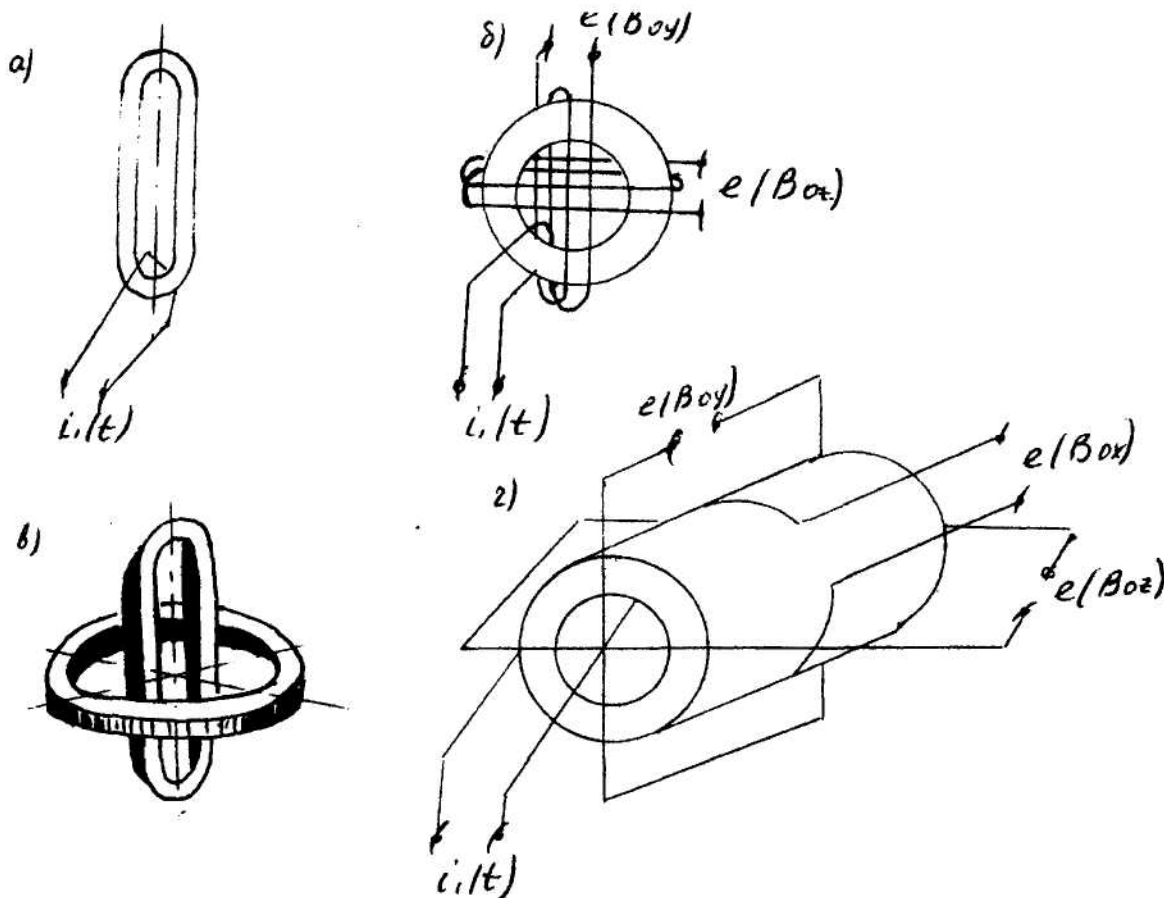


Рис. 2.3. Ферозонди із замкнутим осердям

На рис. 2.3,а зображений ферозонд, що має осердя у вигляді сплющеного еліпсу, у якого є дві прямолинійні ділянки в напрямку великої осі. Через істотну відміну довжин великої та малої осей еліптичного осердя він набуває намагніченості у зовнішньому полі переважно в напрямку великої осі, що у підсумку визначає використання його в односкладових ферозондах.

На рис. 2.3,б зображений ферозонд, який використовується для одночасного вимірювання двох складових поля. З огляду на ізотропність кільцевого осердя коефіцієнти перетворення при однаковій кількості витків також будуть однаковими.

На рис. 2.3,в зображений трискладовий ферозонд, що має кільцеве та еліптичне осердя, площини яких розташовані взаємно перпендикулярно, та систему з трьох взаємно перпендикулярних котушок (на рис. 2.3,в не зображені), які охоплюють осердя таким чином, що осі котушок та осі симетрії осердя перетинаються в одній точці, утворюючи єдиний магнітний центр. Ферозонди такої побудови забезпечують високу точність вимірювань як в однорідних, так і в неоднорідних магнітних полях [6].

На рис. 2.4,г зображений трискладовий ферозонд, що має трубчасте осердя, яке намагнічується під дією трьох складових зовнішнього поля [7]. Струм збудження подається в тороїдальну обмотку, яка нанесена рівномірно по колу трубки. Понад обмоткою збудження розташовані взаємно ортогонально три вимірювальні обмотки, в яких наводяться Е.Р.С., пропорційні відповідним складовим поля, що вимірюється. В даному випадку для двох складових реалізується спосіб поздовжнього збудження, тоді як для третьої – спосіб поперечного збудження. Ця обставина є небажаною, тому що коефіцієнти перетворення ферозондів з поздовжнім та поперечним збудженням відмінні (див. п. 2.3). Крім цього, при поперечному збудженні ферозонд має вищий рівень шуму, ніж при поздовжньому.

2.3. Способи збудження осердя ферозондів

Спосіб збудження для всіх осердь повинен бути однаковим, щоб забезпечувати однакові функції перетворення ферозондів. Найбільш поширені такі способи збудження:

- 1) спосіб поздовжнього збудження ($H_0 \parallel H_1$);
- 2) спосіб поперечного збудження ($H_0 \perp H_1$);
- 3) спосіб збудження полем, що обертається ($H_1 = f(t)$, $|H_1| = \text{const} \neq 0$).

За чутливістю ферозонди з полем, що обертається, посідають проміжне місце між ферозондами з поздовжнім та поперечним збудженням. За наявності рівних умов для коефіцієнтів перетворення за другою гармонікою для поздовжнього, поперечного та поля, що обертається, має місце співвідношення 3:2:1, тобто ферозонди з поздовжнім полем мають найвищі коефіцієнти перетворення та найменші витрати потужності поля збудження. До того ж ферозонди з поперечним полем збудження володіють більшою залишковою намагніченістю [3].

2.4. Парногармонічні та непарногармонічні перетворювачі

Ферозонди є активними індукційними перетворювачами, тобто такими, у яких один з параметрів (у ферозондів – μ) змінюється примусово. Поряд з перевагами (модуляція та посилення потужності сигналу) таким перетворювачам властивий досить важливий недолік: процес перекачування енергії супроводжується виникненням помилкового вихідного сигналу (перешкоди). При частотному розподілі корисного сигналу та перешкоди механізм перетворення такий, що сигнал та перешкода характеризуються різним спектральним складом [6].

Із загального спектру вихідної Е.Р.С. непарногармонічних перетворювачів звичайно відокремлюють першу гармоніку, тому що чутливість перетворювача за вищими гармоніками значно менша.

$$e = 12\omega b s w_2 H_0 H_m H_2 \cos \omega t,$$

де b – коефіцієнт апроксимації $B(H)$ поліномом третього степеня, $b > 0$;

H_m – амплітуда змінної складової поля збудження;

H_2 – незмінна складова поля збудження;

H_0 – поле, що вимірюється;

s – сумарна площа поперечного розрізу осердя ферозонда;

w – кількість витків у вимірювальній обмотці;

ω – частота поля збудження.

Із загального спектру вихідної Е.Р.С. парногармонічних перетворювачів найчастіше виділяють другу гармоніку. Оскільки спектр перешкоди містить у собі непарні гармоніки, то для вихідної Е.Р.С. отримуємо:

$$e = 6\omega b s w_2 H_0 H_m^2 \sin 2\omega t.$$

Таким чином, на виході парногармонічних перетворювачів перешкода з частотою другої гармоніки відсутня. Тому парногармонічні перетворювачі менше зазнають зміщення нуля та мають значно нижчий поріг чутливості, ніж непарногармонічні.

2.5. Методи вимірювань

Існує два методи вимірювань:

- метод безпосередньої оцінки;
- метод порівняння (компенсаційний метод).

Перший метод означає, що відлік величини, що вимірюється, ведеться за відліковим пристроєм вимірювального приладу. Цей метод відзначається простотою та невеликою точністю.

Другий метод обумовлює операцію порівняння величини, що вимірюється, з мірою в кожному з актів порівняння. Цей метод можна умовно поділити ще на 3 методи:

- 1) нульовий метод, де кінцевий результат дії величини, що вимірюється, та відомої величини (міри) на пристрій порівняння доводять до 0;
- 2) диференціальний метод, де на вимірювальний пристрій діє різниця між величиною, що вимірюється та відомою величиною;
- 3) метод заміщення, де величина, що вимірюється, заміщається відомою величиною, яку відтворює міра.

Перевага методу порівняння – висока точність, недолік – складність.

2.6. Конструювання цифрових ферозондів

Цифровими вимірювальними приладами є прилади, які в процесі вимірювання здійснюють автоматичне перетворення безперервної величини, що вимірюється, в дискретну. В порівнянні з аналоговими цифрові мають такі переваги, як високі точність та швидкодія, отримання результатів вимірювань у зручному для обчислення вигляді, та, що дуже важливо, можливість цифрового перетворення та введення цифрової інформації в ЕОМ, автоматизації процесу вимірювання [8].

Цифрові магнітометри розрізняють на прилади з:

1. АЦП часо-імпульсної дії;
2. АЦП частотно-імпульсної дії;
3. АЦП кодо-імпульсної дії;
4. вихідними АЦП незмінного струму.

В приладах часо-імпульсної дії відбувається перетворення величини, що вимірюється, в проміжок часу, який згодом заповнюється імпульсами зі стабільною частотою надходження (лічильні імпульси). АЦП, в яких використовують цей метод, застосовують для перетворення часового проміжку, напруги, частоти, різниці фаз та інших величин. Сумарна похибка цього АЦП визначається такими причинами: нестабільність частоти надходження лічильних імпульсів, похибка перетворення часового проміжку, що вимірюється, в тривалість прямокутного імпульсу, який відкриває часовий селектор, похибкою дискретності.

В частотно-імпульсних АЦП аналогова величина спочатку перетворюється в частоту надходження імпульсів. Цифровий код формується через заповнення цими імпульсами часового проміжку точно визначеної тривалості. Частотно-імпульсні АЦП менш чутливі до перешкод, які складають соті частки відсотка.

В основі побудови цифрових магнітометрів кодо-імпульсної дії використовується метод порівняння величини, що вимірюється, із зразковим кодованим сигналом. На виході кодоімпульсного магнітометру утворюється числовий еквівалент магнітного поля H_0 , яке вимірюється безпосередньо без проміжного перетворення в зручний для кодування параметр електричного сигналу. В кодо-імпульсному методі використовується метод порівняння величини, що вимірюється, з набором дискретних опорних рівнів міри, розподілених за задалегідь відомим законом. Результат порівняння фіксується в момент врівноваження величини, що вимірюється, та зразкового сигналу, який формується в ланцюгу зворотного зв'язку магнітометра.

Перетворення магнітного поля в пропорційний електричний сигнал, яке відбувається в аналоговому ферозондовому магнітометрі, дає можливість для отримання цифрової інформації використовувати АЦП електричних сигналів незмінного струму. Сучасні подібні АЦП мають досить високі метрологічні характеристики, які задовольняють більшість вимог за точністю та швидкодією. Вони доволі складні та мають високу вартість, тому їх намагаються застосовувати в складних системах багаторазового контролю магнітного поля для обслуговування групи аналогових магнітометрів, які по черзі підключаються до входу АЦП.

2.7. Висновки

Виходячи з вищенаведеного, для вимірювання магнітного поля в системах орієнтації штучних супутників Землі доцільно застосовувати ферозонди з двома тороїдальними осердями (для вимірювання трьох складових поля) з поздовжнім способом збудження та виходом корисного сигналу на другій гармоніці. Вимірювання складових магнітного поля – компенсаційним методом. Перетворення з аналогової в дискретну величини, що вимірюється, – через використання вихідних АЦП незмінного струму.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Почтарев В.И. Земля – большой магнит. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 160 с.
2. Афанасьев Ю.В. , Студенцов Н.В. Магнитометрические преобразователи, приборы и установки. – Л.: Энергия, 1972. – 272 с.
3. Средства измерений параметров магнитного поля / Ю.В. Афанасьев, Н.В. Студенцов, В.Н. Хорев, Е.Н. Чечурина, А.П. Щелкин. – Л.: Энергия, 1979. – 320 с.
4. Афанасьев Ю.В. Феррозонды. – Л.: Энергия, 1969. – 168 с.
5. Розенблат М.А. Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники. – М.: Наука, 1966. – 720 с.
6. Афанасьев Ю.В. Феррозондовые приборы. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 186 с.
7. Афанасьев Ю.В., Бушуев Л.Я. Трехкомпонентный феррозонд // Приборы и системы управления. – 1978. – № 1. – С. 29-31.
8. Семенов Н.М., Яковлев Н.И. Цифровые феррозондовые магнитометры. – Л.: 1978. – 168 с.

ШОСТАЧУК Дмитро Миколайович – аспірант Житомирського інженерно-технологічного інституту.

Наукові інтереси:

- магнітом'які ферромагнітні матеріали;
- вимірювання магнітного поля космічного простору;
- магнітометричні системи;
- орієнтація штучних супутників.