

УДК 623.7

Стасюк В. В., асп. (Нац. технічний унів-т України «КПІ»). vadym.stasiuk@gmail.com)

ОСНОВИ СТВОРЕННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛІ. ІСНУЮЧІ РІШЕННЯ

Стасюк В. В. Основи створення засобів вимірювання рівня магнітного поля Землі. Існуючі рішення. Здійснено опис характеристик та елементів магнітного поля Землі, вказано причини їх варіації та визначено необхідність їх моніторингу. Проведено огляд класичних та інноваційних методів та засобів для вимірювання характеристик магнітного поля Землі. Вказано на необхідність забезпечення якості магнітних вимірювань, зменшення похибок, покращення метрологічних характеристик та параметрів засобів вимірювання, а також забезпечення єдності метрологічних вимірювань у даній галузі.

Ключові слова: магнітне поле Землі, варіація елементів земного магнетизму, засіб вимірювання, напруженість магнітного поля, магнітна індукція, магнітний потік, магнітна проникність

Стасюк В. В. Основы создания средств измерения уровня магнитного поля Земли. Существующие решения. Осуществлено описание характеристик и элементов магнитного поля Земли, указаны причины их вариации и определена необходимость их мониторинга. Рассмотрены принципы работы средств измерения магнитного поля Земли, их основные метрологические характеристики и параметры. Проведено описание классических, а также инновационных методов и средств, для измерения характеристик магнитного поля Земли. Указано на необходимость обеспечения качества магнитных измерений, уменьшения погрешностей, улучшения метрологических характеристик и параметров средств измерения, обеспечение единства метрологических измерений в данной области.

Ключевые слова: магнитное поле Земли, вариация элементов земного магнетизма, средство измерения, напряженность магнитного поля, магнитная индукция, магнитный поток, магнитная проницаемость

Stasyuk V. V. Creation bases of measuring facilities of the Earth's magnetic field level. Existent decisions. Given description of Earth's magnetic field characteristics and elements, the reasons of their variations and identified necessity for monitoring them. Considered principles of measurement instruments of the magnetic field of the Earth, their main meteorological characteristics and parameters. Described classical and innovative methods and tools for measuring the characteristics of Earth's magnetic field. The need to ensure the quality of magnetic measurements, reduce errors, improve the metrological characteristics and parameters of measurement tools to ensure the unity of metrology in this field.

Keywords: Earth's magnetic field, the variation of the elements of terrestrial magnetism, measuring instruments, magnetic field, magnetic induction, magnetic flux, magnetic permeability

Вступ. Постановка завдання. Інформація про магнітне поле Землі та його варіаційну мінливість є достатньо важливою для багатьох галузей науки та техніки. На це вказує значна кількість обсерваторій по всьому світу, що виконують моніторинг магнітного поля Землі. Зокрема для виконання цієї функції понад 70 країн світу мають більше 200 обсерваторій [1] дані яких є основними при дослідженні магнітного поля Землі, його варіаційної мінливості, внутрішньої будови Землі і їх глобальному моделюванні.

Аналіз відомих джерел і публікацій [2-6] показав, що потреба у результатах магнітних спостережень визначає актуальність робіт по забезпеченню вимірювань параметрів магнітного поля Землі в різних галузях. Сьогодні магнітне поле Землі широко вивчається з метою його використання в навігації, для пошуку родовищ залізних руд та інших корисних копалин, що проявляють магнітні властивості, а також для вивчення внутрішньої будови Землі і встановлення геологічного віку гірських порід. Вказане стимулює енергійний розвиток засобів та методів вимірювання магнітного поля Землі, що безперечно базуються на класичних методах.

Земне магнітне поле, як унікальне явище природи використовувалося в людській практиці для вирішення ряду важливих практичних завдань ще з давніх часів. Наприклад, спостереження і використання магнітних явищ на практиці відомо ще з III ст. до н. е., коли в Китаї виготовлялися і використовувалися перші магнітні компаси, що являли собою круглі ложки з короткою ручкою, зробленою з магнітного залізняку, які розташовувалися на відполірованій мідній поверхні з нанесеними поділками для визначення напрямку магнітного поля Землі.

Магнітне поле Землі. Загальна характеристика

На сучасному етапі наукового розвитку магнітне поле на поверхні Землі вивчено досить добре [7, 8]. Його особливістю є подібність до диполя – двополюсника або магніту, що має два полюси які розташовані на малій відстані один від одного (Рис. 1,а). Величина магнітного поля Землі на полюсах приблизно в два рази більше, ніж на екваторі. Магнітні полюси Землі не співпадають з географічними. Магнітна вісь нахилена до осі обертання на $11,5^\circ$. Тому виникає розбіжність магнітних меридіанів з географічними. Магнітний полюс в Північній півкулі знаходиться біля берегів Північної Америки (71° півд. ш., 96° зах. д.), а магнітний полюс в Південній півкулі – близько берегів Антарктики, на довготі Австралії (70° півд. ш., 150° сх. д.). полюси не є діаметрально протилежними точками земної кулі. Магнітна вісь не тільки не збігається з віссю обертання за напрямком, але і не проходить через центр Землі; крім того, величина поля в Північній півкулі дещо більше, ніж у Південній.

Магнітне поле Землі є векторною величиною та характеризується положенням вектору T в просторі (Рис. 1, б), який можна розкласти на горизонтальну h та вертикальну z складові. Кут J між горизонтальною складовою h та повним вектором T називають *магнітним нахилом*, а кут D – між напрямками на магнітний (М.П.) та географічний (Г.П.) полюси – *магнітним схиленням* [9].

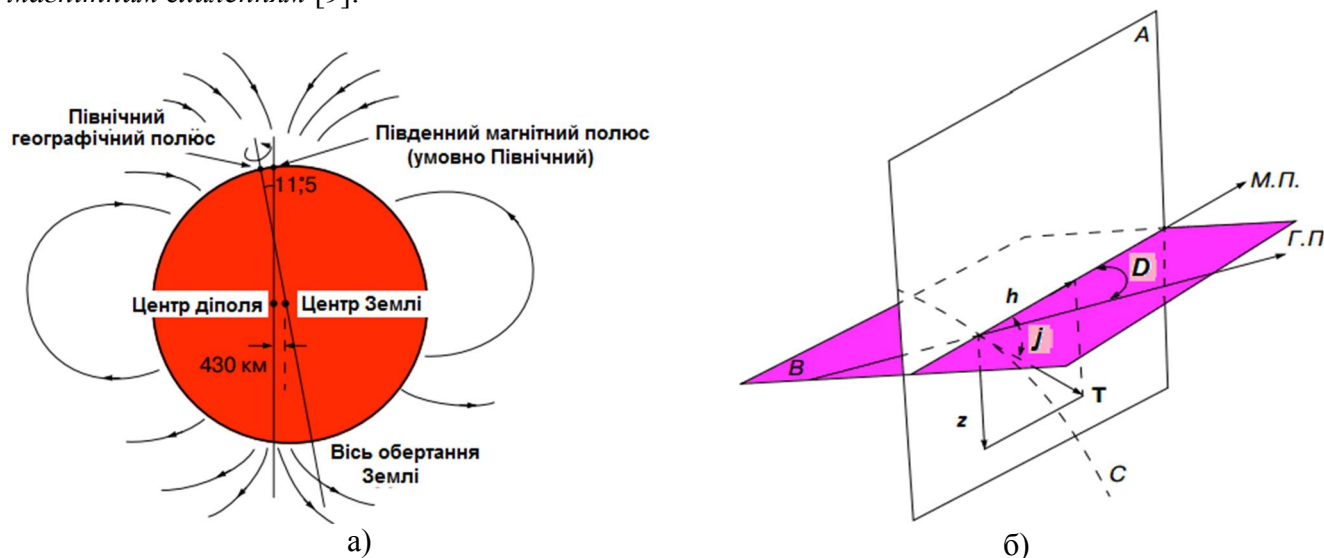


Рис. 1. Схематичне зображення магнітного поля Землі у вигляді магнітного диполя а) та його основних компонентів б) [0]:

B – поверхня Землі на деякій обмеженій ділянці; A – вертикальна площина; C – магнітна силова лінія; T – повний вектор магнітного поля; h – горизонтальна складова вектору T ; z – вертикальна складова вектору T ; j – магнітний нахил; D – магнітне схилення; $М.П.$ – напрямок на магнітний полюс Землі; $Г.П.$ – напрямок на географічний полюс Землі

Напрямок магнітного поля Землі визначається щодо географічних координат Землі і задається двома кутами: схиланням і нахилом. Схилання – це кут D між географічним і магнітним меридіанами, тобто між істинним напрямком на північ і тим, яке вказує магнітна стрілка компаса. Нахил – кут J між напрямком магнітної стрілки компаса, що обертається навколо горизонтальної осі, і горизонтальною площиною (див. Рис. 1, б) [8]. Схилання γ , нахил α , горизонтальна складова h , вертикальна складова z носять назву *елементів земного магнетизму* [10] та є динамічними величинами, які разом з іншими його фізичними характеристиками постійно змінюються і в просторі і в часі [7, 8, 10, 12].

Варіації елементів земного магнетизму пов'язані з джерелами, які знаходяться всередині земної кулі, і викликаються тими ж причинами, що і саме магнітне поле Землі, а також електричними струмами у високих шарах атмосфери [10].

Фізичними характеристиками магнітного поля Землі, як і будь якого іншого магнітного поля, є магнітна індукція B , магнітний потік Φ , магнітна проникність μ і напруженість

магнітного поля H . одиницями вимірювання напруженості H магнітного поля Землі в системі СІ є ампер на метр (А/м), також застосовується Ерстед (Е) або гамма γ , яка дорівнює 10^{-5} Е ($1 \text{ А/м} = 4\pi \cdot 10^{-3}$ Е). Напруженість магнітного поля H Землі біля магнітних полюсів становить близько 55,7 А/м (0,70 Е), на магнітному екваторі – близько 33,4 А/м (0,42 Е), в районах магнітних аномалій – 158, 4 А/м (2 Е). Напруженість H магнітного поля Землі змінюється із зміною висоти (Рис. 2).

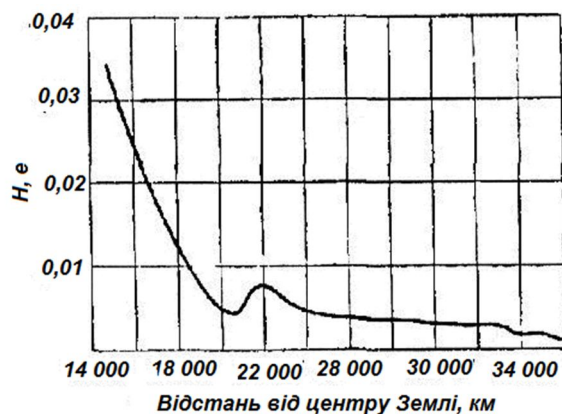


Рис. 2. Графік зміни напруженості магнітного поля Землі на великих висотах в ерстедах

Величиною магнітного поля землі, що практично вимірюється є магнітна індукція B , яка визначається за виразом (1) та вимірюється в системі СІ в теслах (Тл). Також використовується менша одиниця вимірювання – нанотесла (нТл), яка становить 10^{-9} Тл.

$$B = \mu \cdot H, \quad (1)$$

де: μ – магнітна проникність середовища, Гн/м.

Так як для більшості середовищ, в яких вивчається магнітне поле (повітря, вода, більшість немагнітних осадових порід), магнітна проникність μ є величиною постійною, то кількісно магнітне поле Землі можна вимірювати або в одиницях магнітної індукції B (в нТл), або у відповідній їй напруженості поля – гамма (γ).

Вимірювання фізичних характеристик магнітного поля Землі

Зусиллями провідних світових вчених, наприклад, таких як Ш.О. Кулон, К.Ф. Гаусс та ін. було встановлено однозначний зв'язок магнітних явищ з силовими явищами, що виникають при русі електричних зарядів [11]. Тому магнітні вимірювання як частина загального електромагнітного процесу тісно пов'язані з електричними вимірюваннями. У більшості випадків при визначенні тієї чи іншої магнітної величини вимірюється практично електрична величина, значення якої є функцією виміру магнітної величини. Сама ж магнітна величина визначається шляхом обчислення співвідношень, що зв'язують магнітні та електричні величини. Як правило для вимірювання магнітних вимірювань використовують електромеханічні вимірювальні прилади в яких енергія вимірювальної величини перетворюється в енергію переміщення рухомої частини. Це перетворення здійснюється вимірювальним механізмом приладу. За положенням рухомої частини (відлікового пристрою) засобу вимірювання можна судити про значення вимірювальної величини. Узагальнена структурна схема електромеханічного приладу показана на Рис. 3.

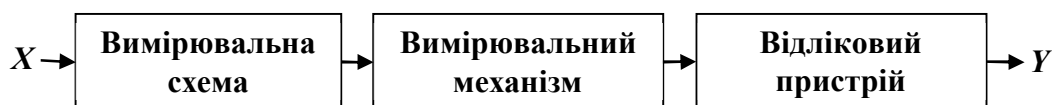


Рис. 3. Загальна структурна схема електромеханічного вимірювального приладу

Вимірювальна схема перетворює вимірювальну величину X у іншу величину Y , яка безпосередньо впливає на вимірювальний механізм. Вихідна величина Y пов'язана із вхідною величиною X функціональною залежністю:

$$Y = f(X). \quad (2)$$

У вимірювальному механізмі, як правило, під дією електромагнітних сил створюється обертальний момент $M_{об}$, що викладає поворот рухомої частини на кут β . Величина обертального момент $M_{об}$ залежить від вимірювальної величини:

$$M_{об} = f(X). \quad (3)$$

У деяких випадках обертовий момент $M_{об}$ пропорційний вимірювальній величині:

$$M_{об} = K \cdot X, \quad \text{де } K - \text{коефіцієнт пропорційності.} \quad (4)$$

Рівняння шкали ЗВ:
$$\beta = f(X)/D = F(x) = \frac{K}{D} \cdot X = S \cdot x, \quad (5)$$

де D – протидіючий момент, що врівноважує обертовий момент $M_{об} = D$;

S – коефіцієнт пропорційності, що називають чутливістю ЗВ.

Важливою метрологічною характеристикою, яка визначає якість ЗВ є чутливість S – здатність ЗВ реагувати на зміну вхідної величини X . Чутливість визначається як відношення зміни вихідної величини до зміни вхідної та дорівнює куту відхилення рухомої частини, що відповідає одиниці вимірювальної величини:

$$S = \frac{\partial Y}{\partial X}. \quad (6)$$

При рівномірній шкалі ЗВ його чутливість S постійна. Для нерівномірної шкали чутливість у різних точках шкали різна.

Крім чутливості для визначення якості ЗВ використовують такий метрологічний параметр, як роздільна здатність C , що є величиною, зворотною чутливості S , при рівномірній шкалі і визначає ту мінімальну зміну вимірювальної величини, яку можливо зареєструвати ЗВ:

$$C = \frac{1}{S} = \frac{x}{\beta}. \quad (7)$$

Роздільну здатність C також називають ціною поділки шкали.

Принципи, що лежать в основі роботи ЗВ для вимірювання магнітного поля Землі досить різноманітні. Відповідно до цього можна виділити наступні перетворювачі, що використовуються в ЗВ магнітного поля [9, 11].

Механічні перетворювачі містять в якості чутливого елемента магніти і контури з струмом. Поділяються на пасивні і активні. Пасивні механічні перетворювачі являють собою стрілки, що вільно повертаються і використовуються або для визначення напрямку вектора магнітної індукції B , або для оцінки її величини за обертовим механічним моментом $M_{об}$ стрілки, що врівноважується відомим моментом, за виразом (4). Активні механічні перетворювачі засновані на вільних коливаннях стрілки у вимірюваному полі і визначають величину вектора B за періодом або частотою коливань стрілки.

Квантові перетворювачі використовують явище прецесії електронних або ядерних моментів атомів, що є складовими речовини, навколо напрямку магнітного поля. Принцип дії таких ЗВ заснований на резонансному збільшенні поглинання енергії зовнішнього високочастотного або зверх високочастотного поля на частотах, що відповідають різниці енергій дискретних рівнів в атомі. Іншим квантовим ефектом, пов'язаним з наявністю магнітних полів, є ефект Зеемана – розщеплення спектральних ліній атомів на ряд додаткових ліній. При цьому величина розщеплення однозначно пов'язана з величиною магнітного поля. Про величину електричного поля, що оточує атоми, судять по розширенню контурів спектральних ліній – так зване розширення Штарка.

Магнітометричні індукційні перетворювачі засновані на явищі електромагнітної індукції, в якості чутливого елемента містять котушку індуктивності. При цьому вихідним сигналом є електрорушійна сила (ЕРС), що, наводиться в цій котушці. Якщо поле постійно, то котушку потрібно рухати або обертати в полі, тому, що ЕРС залежить від похідної ds/dt .

Ферроіндукційні перетворювачі в якості чутливого елемента містять ферромагнітне осердя, що переміщається в просторі і створює ЕРС індукції за рахунок зміни параметрів магнітного кола.

Надпровідникові магнітні перетворювачі використовують різні ефекти надпровідності. Одним з таких ефектів є ефект Мейснера – витіснення магнітного поля з об'єму надпровідника при досягненні критичної температури. Магнітне поле не може проникнути всередину надпровідника, оскільки у нього немає опору і носії заряду, вільно переміщаючись всередині надпровідників, компенсують зовнішнє магнітне поле. Іншим ефектом надпровідності є ефект Джозефсона, сутність якого полягає в появі змінного електричного струму в колі із двох напровідників, що розділені тонким шаром діелектрика. Частота струму залежить від різниці потенціалів та атомних констант.

Гальваноманетні та магнетронні перетворювачі це перетворювачі принцип роботи яких з одного боку близький до індукційних явищ, а з другого – пов'язаний з силовими взаємодіями, що проявляються у викривленні траєкторії руху вільних зарядів. Принципово можна погодитись з тими авторами, які вважають, що сили, які діють в магнітному полі на рухомі заряди в нерухомих тілах (силові взаємодії) та сили, що діють на вільні заряди в рухомих тілах (явище електромагнітної індукції), мають одну природу.

Методи, що використовуються для вимірювання магнітного поля Землі можна розділити на методи із прямими та непрямими вимірюваними перетвореннями [9, 11].

При *прямих вимірювальних перетвореннях* фізична величина, що визначає магнітні силові взаємодії, визначається або вимірюванням сили, або механічного моменту, або вимірюванням електрорушійної сили, що наводиться в контурі вимірювального механізму. При *прямих перетвореннях* проводяться прямі вимірювання, тобто без перетворення роду та виду, магнітної індукції B або магнітного потоку Φ шляхом вимірювання іншої фізичної величини – сили, моменту, заряду, різниці потенціалів, що однозначно пов'язана з магнітною індукцією B фундаментальними фізичними законами.

При *непрямих вимірювальних перетвореннях* фізична величина, зокрема магнітна індукція B або напруженість H відтворюється зміною електричного струму I і параметрів протяжності l та r за законом Біо-Савара-Лапласа, та описується виразом (8) [11].

$$H = \frac{I}{4\pi L} \oint \frac{[d\vec{l} \times \vec{r}^0]}{r^2}, \quad (8)$$

де I – струм, що протікає по провіднику; Idl – елемент струму; r – відстань від елемента струму до точки, в якій визначається магнітна взаємодія.

Забезпечення магнітних вимірювань в основному здійснюється сукупністю приладів [9]:

- для вимірювання модуля напруженості H або індукції B магнітного поля (тесламетри);
- для вимірювання напрямку вектора T магнітного поля;
- для вимірювання величини магнітного потоку Φ (веберметри);
- для вимірювання магнітних постійних речовин і матеріалів;
- для вимірювання неоднорідностей магнітного поля (градієнтметри);
- для вимірювання магнітного моменту.

Особливої актуальності і затребуваності у багатьох галузях, що динамічно розвиваються набувають інноваційні, науково-технічні та інженерні рішення магнітних вимірювань [5]. Наприклад, представлені в [4, 5] пристрої призначені для вимірювання компонент і повного вектора індукції магнітного поля Землі, а також навігації на транспортних засобах містять магнітометри, акселерометри, котушки індуктивності, та обчислювальні пристрої. Технічним результатом винаходів є підвищення точності магнітних вимірювань.

Висновки. Сучасні ЗВ, що використовуються при вимірюванні магнітного поля Землі представляються класичними методами та інноваційними науково-технічними та інженерними рішеннями у галузях метрології і засобів вимірювань магнітних величин. Очевидно, що якісне забезпечення магнітних вимірювань передбачає проведення робіт із забезпечення єдності метрологічних вимірювань, точності та достовірності отриманих результатів, шляхом зменшення похибок методів та засобів вимірювання, покращення їх метрологічних характеристик та параметрів, розробки відповідної сучасної нормативної метрологічної бази з даної галузі.

Література

1. Геомагнитные вариации. Мировой центр данных по солнечно-земной физике. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.wdcb.ru/stp/stp.ru/data.ru.html>
2. Каршаков Е. В. Применение измерений параметров градиента магнитного поля Земли в задаче навигации летательного аппарата / Е. В. Каршаков // Управление большими системами. – 2011. – № 35. – С. 265-282. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://ubs.mtas.ru/bitrix/components/bitrix/forum.interface/show_file.php?fid=5474
3. Минлигареев В. Т. Обеспечение единства магнитных измерений на государственной наблюдательной сети / В. Т. Минлигареев, В. Н. Заболотнов, В. И. Денисова, В. Б. Лапшин, Е. А. Паньшин, А. Ю. Штырков // Гелиогеофизические исследования. – 2013. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://vestnik.geospace.ru>
4. Патент на изобретение: RU 2285931. Устройство для определения углового положения подвижного объекта / Б.М. Смирнов
5. Патент на изобретение: RU 2368872. Бортовое устройство для измерения параметров магнитного поля земли / Ю. Р. Линко, Г. И. Соборов, А. Н. Схоменко
6. Петров В. Г. Магнитное поле Земли и проблемы его использования для навигации и ориентации / В. Г. Петров, Ю. А. Амиантов, Ю. А. Бурцев // Научная конференция «Базы данных, инструменты и информационные основы полярных геофизических исследований» (ИЗМИРАН, 22-26 мая 2012 г.) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.izmiran.ru/POLAR2012/REPORTS/POLAR_2012_Petrov2.pdf
7. Короновский Н. В. Магнитное поле геологического прошлого Земли / Н. В. Короновский // Науки о Земле. Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 6. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ocean.phys.msu.ru/courses/geo/lectures-addons/15/1996%D0%9A%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9%2c%D0%9C%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B5%20%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%B5%20%D0%B3%D0%B5%D0%BE%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D1%88%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D0%97%D0%B5%D0%BC%D0%BB%D0%B8.pdf>
8. Магнитное поле Земли. Универсальная научно-популярная онлайн-энциклопедия. [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.krugosvet.ru/enc/nauka_i_tehnika/fizika/MAGNITNOE_POLE_ZEMLI.html
9. Заболотнов В. Н. Средства измерений магнитных величин: аналитический обзор / В. Н. Заболотнов, В. Т. Минлигареев // Мир измерений. – 2013. – № 4. – 63 с.
10. Элементы магнитного поля Земли. Мировой центр данных по физике твердой Земли. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.wdcb.ru/sep/magnetic_measurements/magn_elements.ru.html
11. Козлов М. Г. Принципы, лежащие в основе магнитных измерений. Метрология и стандартизация / М. Г. Козлов. – М., СПб.: изд. «Петербургский ин-т печати», 2001. – 372 с.
12. Хмелевской В. К. Геофизические методы исследования земной коры. Международный университет природы, общества и человека "Дубна", 1997. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.astronet.ru/db/msg/1173309/page11.html#3>