

Горбачук М. Т., доц., Іванова А. Д., Клімуша В. С., студ.

Київський національний університет технологій та дизайну

МАГНІТНІ ПОЛЯ І СУЧАСНІ ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ ЇХ ВИМІРЮВАННЯ

Анотація. Проаналізована відома літературна інформація про природу магнітних полів та їх застосування в різних галузях народного господарства. Розглянуто існуючі сучасні засоби та методи вимірювання та контролю величин магнітних полів. Наведено деякі приклади методів вимірювання, наведено рівні чутливості того чи іншого засобу та методу вимірювання, основні галузі застосування. Досліджено основні характеристики датчиків магнітного поля на основі ефекту Холла, показано їх переваги для певних напрямів застосування.

Ключові слова: магнітні, поле, засоби, датчики, Холл, застосування, магнітометр.

Gorbachuk M. T., Ivanova A. D., Klimusha V. S.

Kyiv National University of Technologies and Design

MAGNETIC FIELDS AND MODERN DEVICES AND METHODS OF MEASURING THEM

Abstract. The known literary information on the nature of magnetic fields and their application in various sectors of the national economy is analyzed. The existing modern means and methods of measuring and controlling the magnitudes of magnetic fields are considered. Some examples of measurement methods are given, the sensitivity levels of a particular means and method of measurement, and the main areas of application are given. The main characteristics of magnetic field sensors based on the Hall effect are investigated, and their advantages for certain areas of application are shown.

Keywords: Magnetic, field, means, sensors, Hall, application, magnetometer.

Вступ. Магнітні поля мають важливе значення в багатьох сферах науки і практики: медицині, геології, астрономії, електротехніці, техніці надпровідних систем та інш. Вивчення магнітних полів стало однією з фундаментальних задач сучасної фізики та техніки. Зокрема, точне вимірювання магнітного поля дозволяє вивчати структуру земної кори, прогнозувати геофізичні явища, створювати сучасні пристрої з високою точністю вимірювання, діагностувати стан організму людини у медицині, діагностувати та керувати електротехнічними установками в тому числі і надпровідними.

Технології вимірювання магнітних полів постійно розвиваються і досягають нових успіхів. З появою нових високочутливих приладів стало можливим проводити точні вимірювання не лише на рівні земних, але й космічних магнітних полів. Застосування цих технологій відкриває нові можливості у створенні точних навігаційних систем, систем безпеки, а також діагностичних медичних приладів, таких як магнітно-резонансні томографи (МРТ) та інш. Сучасні засоби дозволяють проводити вимірювання в широкому діапазоні величин температур та магнітних полів [1–6].

Сучасні технології вимірювання магнітних полів реагують на запити науки, медицини, промисловості та інших галузей. Збільшення точності, мініатюризація, надійність, а також розширення можливостей для роботи в екстремальних умовах – це основні тенденції у вдосконаленні магнітних сенсорів та вимірювальних приладів.

Тенденція до зменшення розмірів магнітних сенсорів є актуальною в сучасній електроніці, зокрема для застосування в портативних пристроях та інтеграції в смартфони. Мініатюрні магнітометри дозволяють значно розширити можливості персональних пристроїв, наприклад, забезпечити навігацію, роботу з доповненою реальністю та навіть провести базові наукові дослідження. Також, мініатюрні магнітні

сенсори активно застосовуються в медицині, наприклад, у мікроскопічних пристроях для внутрішньотілових досліджень [9–15].

Нанотехнології відкривають нові перспективи у вимірюванні магнітних полів, дозволяючи створювати надмаленькі та надчутливі сенсори. Наприклад, нанопровідники та наночастинки з магніторезистивними властивостями можуть слугувати основою для інноваційних магнітних сенсорів у медицині, зокрема для вимірювання магнітних полів на молекулярному рівні. Це може значно підвищити точність досліджень у біології та хімії, дозволяючи працювати з надзвичайно малими об'єктами і реакціями, такими як біомолекули та клітини.

Постановка завдання. Виходячи з вищенаведеного, метою дослідження є огляд сучасних літературних відомостей в галузі природи магнітних полів, застосування їх в науці, техніці, промисловості, медицині та ознайомлення з сучасними засобами і методами вимірювання та контролю величин магнітних полів, а також власне дослідження деяких доступних сучасних засобів вимірювання магнітного поля.

Основна частина. Як відомо, магнітне поле – це вид фізичного поля, яке створюється електричними зарядами, що рухаються, та магнітними моментами елементарних частинок. Воно описується характеристиками, такими як: напруженість магнітного поля H , індукція магнітного поля B , магнітний потік Φ .

Основними джерелами магнітних полів є природні і штучні джерела. Природним є магнітне поле Землі, яке створюється за рахунок процесів у ядрі планети, а також магнітні поля зірок і космічних тіл.

До штучних відносяться магнітні поля, які створюються в результаті існування електричного струму або роботи електромагнітів. Вони широко використовуються в промисловості, науці, медицині, транспорті та інших галузях.

Для вимірювання магнітних полів використовуються різні методи, які можна розділити на дві основні групи: прямі та непрямі. Прямі методи забезпечують вимірювання магнітних величин безпосередньо, в той час як непрямі методи передбачають отримання параметрів, пов'язаних з магнітним полем, які згодом використовують для визначення величини індукції чи напруженості магнітного поля.

Розглянемо деякі з основних методів та засобів вимірювання.

Гальванометри – це прилади, що дозволяють вимірювати силу магнітного поля через взаємодію магнітного поля з електричним струмом, який проходить через провідник. Принцип дії гальванометрів заснований на ефекті Ампера, коли провідник з електричним струмом взаємодіє з магнітним полем, створюючи силу, що відхиляє стрілку приладу. Гальванометри широко використовуються в лабораторіях, однак мають обмежену чутливість для вимірювання слабких полів.

Одними з найпоширеніших типів пристроїв для вимірювання магнітних полів є магнітометри. До них належать різні види приладів.

Протонний магнітометр: базується на явищі ядерного магнітного резонансу і використовується для вимірювання слабких полів, таких як магнітне поле Землі. Принцип роботи полягає у вимірюванні частоти резонансу протонів в магнітному полі.

Квантовий магнітометр використовує квантові властивості атомів для вимірювання магнітних полів з високою точністю. Ці прилади мають високу чутливість та можуть виявляти слабкі магнітні поля, наприклад, у дослідженнях біомагнітних полів людини.

Феромагнітні зонди. Вони використовуються для визначення напруженості магнітного поля у феромагнітних матеріалах. Феромагнітні зонди розміщуються в полі, і, залежно від змін у намагніченості, визначають характеристики поля. Цей метод часто застосовується для виявлення та аналізу локальних магнітних аномалій.

До непрямих методів вимірювання відносять індукційні методи. Основою індукційних методів є закон електромагнітної індукції Фарадея, згідно з яким у провіднику виникає електричний струм під дією змінного магнітного поля. Індукційні котушки є класичним прикладом такого підходу, і вони використовуються для вимірювання змінних магнітних полів. У високочастотних полях цей метод є особливо зручним та ефективним.

Існують також методи вимірювання з використанням магніторезистивного ефекту:

$$M = \Delta\rho/(\rho_0 \cdot \Delta B), \quad (1)$$

де $\Delta\rho$ – зміна питомого електричного опору при зміні магнітного поля на величину ΔB ; ρ_0 – початковий питомий опір.

Зміна електричного опору матеріалів під впливом магнітного поля використовується у багатьох сучасних приладах. Це явище, відоме як магніторезистивний ефект і є основою роботи таких пристроїв, як гігантські магніторезистивні датчики (GMR), спин-клапанні магніторезистори. Вони використовуються для вимірювання слабких магнітних полів у високоточній електроніці та сенсорах.

Широке застосування для вимірювання магнітних полів в широкому діапазоні температур (від криогенних до кліматичного інтервалу) знайшли датчики на основі ефекту Холла. Сучасні датчики Холла в основному виготовляються на основі напівпровідникових плівок на ізолюючих підкладках. Основними перевагами таких датчиків є їх малі розміри, які досягаються застосуванням сучасних технологій мікроелектроніки. Такі датчики також мають досить високу чутливість (до 1000 мВ/Т), малу температурну залежність основних параметрів та інш. [6–9].

Використовують також оптичні ефекти. Використання оптичних методів для вимірювання магнітних полів базується на ефекті Фарадея – зміні поляризації світла, що проходить через матеріал, під впливом магнітного поля. Оптичні магнітometri мають високу чутливість та використовуються в системах, де потрібно уникати електричних перешкод, наприклад, у біомедичних дослідженнях.

Протонний магнітометр. Протонний магнітометр базується на явищі ядерного магнітного резонансу (ЯМР) протонів в магнітному полі. Протони атомів водню починають прецесувати (обертатися) навколо магнітних силових ліній з певною частотою, що пропорційна величині магнітного поля. За виміряною частотою резонансу можна точно обчислити індукцію поля. Протонні магнітometri мають високу точність і стабільність, що робить їх корисними для вимірювання слабких полів, наприклад, земного магнітного поля. Проте вони менш чутливі до швидких змін поля, тому не підходять для високочастотних вимірювань.

Найчастіше використовуються в геофізичних дослідженнях і археології для вивчення магнітних аномалій Землі, а також в навігаційних системах.

Квантовий магнітометр. Квантові магнітometri використовують квантові ефекти, наприклад, резонансні властивості атомів цезію або рубідію, які взаємодіють з магнітним полем. У присутності магнітного поля атоми змінюють свій стан, що можна виявити за допомогою спеціальних оптичних або радіочастотних систем. Вони надзвичайно чутливі до слабких магнітних полів, що дозволяє застосовувати їх у найскладніших наукових дослідженнях, таких як дослідження біомагнітних полів, астрономія і квантова фізика. Використовуються в медицині для магнітокардіографії (МКГ) та магнітоенцефалографії (МЕГ), де потрібно реєструвати магнітні поля мозку та серця, а також в аерокосмічній галузі та фундаментальній фізиці.

SQUID-магнітометр та принцип дії: SQUID (сверхпровідний квантовий інтерференційний детектор) магнітометри працюють на основі властивостей надпровідників. У SQUID-магнітометрах використовується квантовий інтерференційний ефект, що дозволяє фіксувати малі зміни магнітного поля навіть на рівні пікотесл (10^{-12} Т). Це один з найчутливіших типів магнітометрів, здатний реєструвати найменші зміни магнітного поля. Для роботи SQUID-магнітометри вимагають охолодження до криогенних температур (рідкий гелій або азот), що обмежує їх застосування. Використовуються в біомедичних дослідженнях для детекції нейромагнітних полів, у фізичних лабораторіях для дослідження магнітних властивостей матеріалів, а також у пошуках мінеральних ресурсів і в геофізичних дослідженнях.

Векторний магнітометр. Векторні магнітометри вимірюють одночасно всі три компоненти вектора магнітного поля (по осях x , y , z). Для цього використовуються різні види сенсорів, які можуть точно визначити напрямок і величину кожної складової поля. Забезпечують повну картину магнітного поля, що дозволяє проводити більш точні дослідження і вимірювання. Їхня основна перевага – здатність вимірювати як амплітуду, так і напрямок поля. Використовуються в космічних дослідженнях для вивчення магнітних полів планет та Сонця, а також у навігаційних системах і приладобудуванні.

Магнітометри для смартфонів. У більшості сучасних смартфонів використовуються мініатюрні магніторезистивні або Холл-сенсори, які можуть визначати магнітне поле і орієнтацію пристрою в просторі. Хоча такі магнітометри не є надточними і мають обмежену чутливість, вони забезпечують достатню точність для орієнтації в просторі, навігації та роботи з компасом у повсякденному житті. Використовуються у повсякденних навігаційних програмах, доповненій реальності (AR), а також у деяких наукових дослідженнях, де мобільність і компактність мають вирішальне значення.

Сфери застосування вимірювальних приладів. Вимірювання магнітних полів є невід'ємною частиною багатьох наукових і прикладних досліджень. Завдяки різноманіттю доступних магнітометрів і методів, магнітні вимірювання знайшли широке застосування в геофізиці, медицині, космічній галузі, промисловості та екології.

Розглянемо основні напрями використання магнітних вимірювальних приладів.

Дослідження магнітного поля Землі є важливим для розуміння її внутрішньої будови та динамічних процесів у надрах. За допомогою вимірювань магнітного поля можна досліджувати структуру земної кори, виявляти аномалії, які вказують на наявність корисних копалин, таких як залізо, мідь, нікель, та інші метали. Протонні магнітометри широко використовуються в геофізичних експедиціях для пошуку корисних копалин і дослідження магнітних аномалій. Магнітні методи є ефективними, особливо у важкодоступних районах, де застосування інших методів обмежене.

Медицина. Магнітно-резонансна томографія (МРТ). МРТ є одним з найважливіших методів візуалізації внутрішніх органів, що дозволяє отримувати високоточні зображення тканин тіла. Цей метод базується на принципах ядерного магнітного резонансу і дозволяє діагностувати хвороби, новоутворення та інші патологічні зміни. МРТ широко застосовується в онкології, неврології, кардіології та ортопедії.

Магнітокардіографія (МКГ). МКГ дозволяє відслідковувати магнітні поля, які створюються електричною активністю серця. Використовується для діагностики різних серцевих захворювань і порушень ритму серця. Магнітокардіографія надає можливість неінвазивно отримати інформацію про роботу серця.

Дослідження космічного простору. Вимірювання магнітного поля в космосі допомагає вивчати магнітні властивості планет, зірок та інших небесних тіл. Наприклад,

космічні зонди, оснащені магнітометрами, досліджують магнітосферу Землі та інших планет Сонячної системи, визначають магнітні поля в міжзоряному середовищі. Навігація у космосі. Магнітометри можуть бути використані для орієнтації космічних апаратів у просторі, оскільки вони допомагають визначати їхнє положення відносно магнітних полів небесних тіл, таких як Земля чи Марс. Це значно покращує точність космічної навігації та дозволяє успішно здійснювати складні місії.

Промисловість. Контроль якості та дефектоскопія. У промисловості вимірювання магнітних полів дозволяє виявляти дефекти у металах та інших матеріалах. Методи магнітної дефектоскопії допомагають визначати тріщини, порожнини та інші аномалії у матеріалах без пошкодження їхньої структури, що важливо для забезпечення якості продукції. Магнітні сенсори широко застосовуються у виробничих лініях для контролю процесів, вимірювання швидкості, положення та обертання об'єктів. Це дозволяє автоматизувати процеси та підвищити їх точність [2, 5, 12].

В таблиці 1 показано порівняльний аналіз деяких сучасних методів та засобів вимірювання магнітних полів, складений на основі використаної літератури.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз сучасних методів та засобів вимірювання магнітних полів

Тип магнітометра	Принцип дії	Точність / Чутливість	Особливості	Сфера застосування
Протонний магнітометр	Ядерний магнітний резонанс	Висока	Вимірювання слабких полів	Геофізика, археологія
Квантовий магнітометр	Квантові ефекти атомів	Дуже висока	Чутливий до найменших змін	Медицина, фундаментальна фізика
SQUID-магнітометр	Надпровідні властивості	Надзвичайно висока	Вимагає криогенного охолодження	Біомедичні дослідження, геофізика
Індукційні котушки	Електромагніт на індукція	Середня	Для змінних полів	Промисловість, контроль якості
Магніторезистивні датчики	Магніторезистивний ефект	Висока	Компактні, інтеграція в електроніку	Електроніка, мобільні пристрої
Оптичні магнітометри	Ефект Фарадея	Дуже висока	Відсутність електричних перешкод	Біомедицина, дослідження мозку

Джерело: складено і узагальнено авторами на основі [1–5, 7, 10–15].

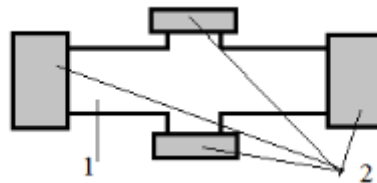
Експериментальні дослідження. Нами проведено експериментальні дослідження основних технічних характеристик експериментальних напівпровідникових датчиків магнітного поля на основі ефекту Холла. Датчики виготовлені на основі тонких плівок арсеніду галію (GaAs). Плівки нанесені на напівізолюючий арсенід галію і за допомогою технологій фотолітографії з них сформовані чутливі елементи датчиків. Дякуючи високій рухливості носіїв струму в арсеніді галію в них виникають відносно великі величини електрорушійної сили (ЕРС) Холла E_x .

ЕРС Холла (напряга Холла U_x) визначається виразом:

$$E_x \approx U_x = R \cdot IB/b, \quad (2)$$

де $R = 1/ne$ – стала Холла, яка для напівпровідників може мати величину від 10 до $10^5 \text{ см}^3/\text{Кл}$; I – величина струму живлення; B – величина індукції магнітного поля; b – товщина чутливого елемента датчика Холла.

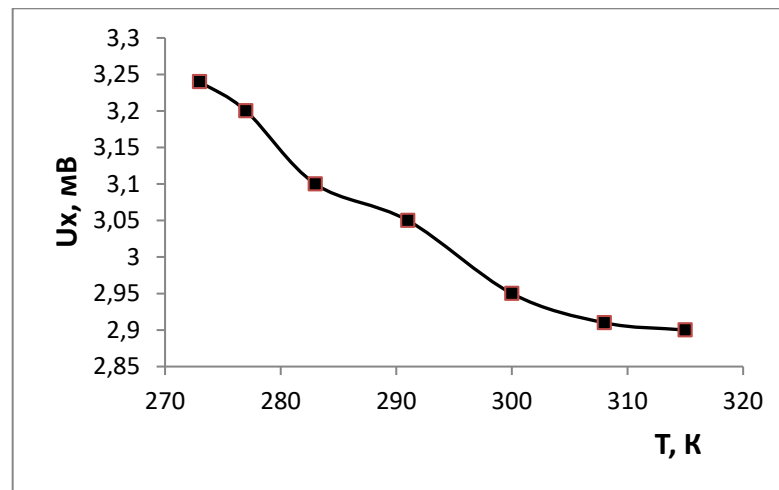
Ескіз форми чутливого елемента досліджуваного датчика показана на рис. 1. Розміри датчика без зовнішнього корпусу складають величину $1,0 \times 1,0 \times 0,3 \text{ мм}^3$, хоча сучасні технології мікроелектроніки дозволяють виготовляти і менших розмірів.



Джерело: побудовано авторами.

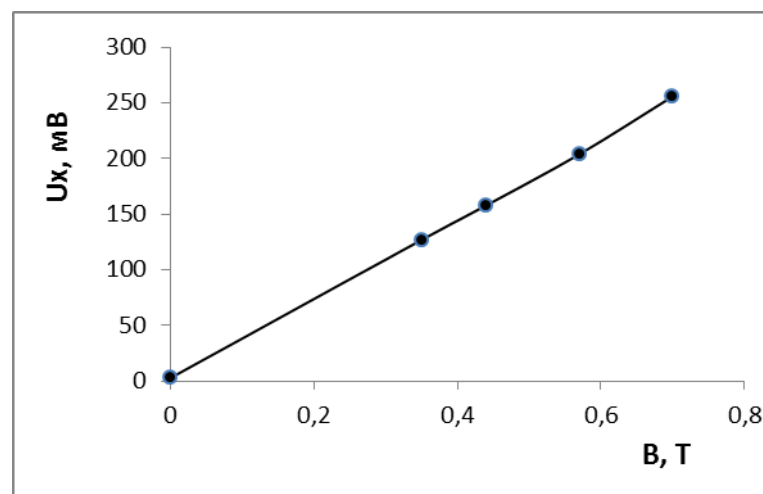
Легенда: 1 – напівпровідникова плівка, 2 – контактні площадки.

Рис. 1. Форма чутливого елемента датчика Холла



Джерело: побудовано авторами на основі отриманих експериментальних результатів.

Рис. 2. Залежність початкового вихідного сигналу датчика Холла U_x від температури в області кімнатних температур. Струм живлення $I = 5 \text{ мА}$



Джерело: побудовано авторами на основі отриманих експериментальних результатів.

Рис. 3. Залежність вихідного сигналу датчика Холла U_x від величини індукції магнітного поля B . Вектор індукції перпендикулярний до площини датчика

Досліджено температурну залежність вихідного сигналу U_x датчика в області кімнатних температур (рис. 2), та залежність вихідного сигналу від величини магнітного поля B (рис. 3) і визначено чутливість до магнітного поля. При вимірюваннях використано еталонний датчик Холла для встановлення величин магнітних полів, а для дослідження температурної залежності спеціальний керамічний термостат з електронагрівачем. Результати представлено на відповідних рисунках. Аналіз експериментальних результатів свідчить про незначну температурну залежність вихідного сигналу (приблизно не більше 10 мкВ/К) в порівнянні з залежністю сигналу від величини магнітного поля. Відхилення від лінійності залежності вихідного сигналу від магнітного поля не перевищує 1%. Датчики перспективні для застосування з метою вимірювання та контролю магнітних полів в широкому діапазоні температур в різних електромагнітних пристроях та системах.

Висновки. Сучасні засоби і методи вимірювання магнітних полів досягли значного розвитку, що дозволяє вирішувати складні наукові, медичні та інженерні завдання. Основні напрями вдосконалення – це підвищення точності, мініатюризація, розширення можливостей для роботи в екстремальних умовах та інтеграція з цифровими технологіями, такими як, наприклад, штучний інтелект. Магнітні вимірювання сьогодні важливі не лише для науки, але й для промисловості, медицини, екології та навігаційних систем, що підтверджує актуальність та перспективність подальших досліджень у цій галузі. Досліджені датчики магнітного поля на основі ефекту Холла показують свою перспективність для застосування як в наукових дослідженнях, так і в різних галузях промисловості, пов'язаної з електротехнікою, де потрібно вимірювати та контролювати магнітні поля.

Список використаної літератури

1. Moe Akimitsu, Yasushi Ono, Qinghong Cao, Ryota Masuki, Hiroshi Tanabe (2018). Development of High-resolution Two-dimensional Magnetic Field Measurement System by Use of Printed-circuit Technology. *IEEE Transactions on Fundamentals and Materials*, Vol 138 (9), P. 480–481.
2. Macintyre, S. A. (2000). Magnetic Field Measurement. CRC Press LLC. URL: <http://www.engnetbase.com>.
3. Ebeling, K. J., Mähnß, J. (2006). Elektromagnetische Felder und Wellen, notes, Uni Ulm.
4. Robbes, D. (2006). Highly sensitive magnetometers – a review. *Sens. Actuat. A.*, Vol. 129, P. 89–93.
5. Lenssen, K.-M. H., van Kesteren, H. W., Rijk, Th. G. S. M. et al. (1997). Giant magnetoresistance and its application in recording heads. *Sens. Actua. A.*, Vol. 60, P. 90–97.
6. Gorbachuk, N. et al. (2014). Semiconductor Sensors for a Wide Temperature Range. *Sensors & Transducers Journal and Magazine*, Vol. 162, Issue 1, P. 1–4.
7. Gorbachuk, N. T. (2024). Measuring Transducers and Sensors: monograph. LAP LAMBERT Academic Publishing. 120 High Road, East Finchley, London, N2 9ED, United Kingdom, 2024. 141 p.
8. Gorbachuk, N. T., Mitin, V. V., Thorik, Yu. A., Schwartz, Yu. M. (1980). Piezo-Hall effect in p-germanium. *Phys. Stat. Sol.(c)*, 100, P. 309.
9. Горбачук Н. Т., Диденко П. И. Измерительные преобразователи на основе GaAs, поликремния и дисперсного германия и перспективы их использования. *Перспективные материалы*. 2004. No. 5. С. 93–97.
10. Henrichsen, K. N. (1992). Classification of magnetic measurement methods. *CERN acceleration school. Magnetic measurement and alignment*. Montreux. Switzerland. March, 1992. P. 70–83.
11. Wellstood, F., Heiden, C., Clark, J. (1984). Integrated dc SQUID magnetometer with high slew rate. *Rev. Sci. Instrum.*, 66: 952–957.
12. Ebeling, K. J., Mähnß, J. (2006). Elektromagnetische Felder und Wellen, notes, Uni Ulm.
13. Long, M., Romanova, M. M., Lovelace, R. V. E. (2008). Three-dimensional simulations of accretion to stars with complex magnetic fields. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol. 386, Iss. 3, P. 1274–1284.
14. Liu, C.-P., de Vries, J., Mereghetti, E., Timmermans, R. G. E., van Kolck, U. (2012). Deuteron magnetic quadrupole moment from chiral effective field theory. *Physics Letters B*, 713(4–5): 447–452. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.06.024>.
15. Purcell, E. M. (1971). *Elektryczność i Magnetyzm*. PWN Warszawa.