



KAPITEL 1 / CHAPTER 1¹

DEVICES FOR MEASURING THE PARAMETERS OF THE MAGNETIC FIELD

ПРИЛАДИ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ

DOI: 10.30890/2709-2313.2022-09-01-008

Вступ

Враховуючи надзвичайну важливість природних та техногенних впливів магнітного поля, розробка високочутливих приладів вимірювання індукції магнітних полів є однією з пріоритетних задач науки.

Загальна стратегія в розробці вимірювальної техніки, в тому числі і для параметрів магнітних полів, передбачає збільшення вимог до чутливості приладів при одночасному вдосконаленні експлуатаційних умов. Таким чином, все це створює передумови для розробки та впровадження нових методів обробки та вимірювання, які б дозволили вирішити задачі вимірювання магнітної фізичної величини з підвищеною чутливістю.

Провідне місце у вимірювальній індустрії займають прилади вимірювання індукції магнітного поля, для яких постійно підвищуються вимоги щодо чутливості. Паралельно з вимогою до чутливості, підвищуються вимоги до ергономічності проєктованих приладів а також до їх економічних та фінансових складових реалізації.

1.1. Аналіз особливостей вимірювальних приладів магнітного поля

Вимірювання параметрів магнітних полів є одним із найважливіших завдань в області космічних і геофізичних досліджень [1], функціонування систем навігації, орієнтації і стабілізації [2, 3], в системах екранування квантових комп'ютерів [4, 5, 6], магнітної томографії, відображень функцій головного мозку, дефектоскопії і неруйнівного контролю виробів [7, 8, 9]. Засоби вимірювання параметрів магнітного поля високої чутливості використовуються при пошуку і виявленні магнітних аномалій, при дослідженні надслабких магнітних полів [10, 11] та ін.

Вимірювальний прилад - засіб вимірювань, в якому створюється візуаль-

¹ Authors: Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Prytula M.O., Osadchuk Ya.O.



ний сигнал вимірювальної інформації. Більшість сучасних вимірювальних приладів магнітного поля є цифровими.

Для вимірювання магнітних величин електричними методами їх необхідно спочатку перетворити в інші величини. Для цього застосовуються перетворювачі магнітних величин.

Вимірювальне перетворення фізичної величини - вимірювальна операція, під час якої вхідна фізична величина перетворюється у вихідну, функціонально з нею пов'язану.

Головна задача вимірювальних перетворень полягає в одержанні вихідних фізичних величин та залежностей між ними, зручних для порівняння і відтворення. До вимірювального перетворення фізичних величин у загальному випадку належать: лінійне (масштабне) та нелінійне перетворення фізичної величини без зміни її роду; лінійне та нелінійне перетворення фізичної величини зі зміною її роду [12].

До вимірювального перетворення залежності між величинами належать: модуляція та демодуляція; масштабно-числове перетворення сигналу; дискретизація; спектральне перетворення і ін. Вимірювальне перетворення багатьох величин є складним завданням, а вимірювальний перетворювач - часто основною за складністю ланкою всього засобу вимірювання.

Вимірювальні перетворювачі (ВП) класифікують за такими ознаками :

- за структурою побудови - на ВП прямого перетворення та ВП зрівноважувального перетворення;
- за зміною роду вихідної величини - на ВП без зміни роду та ВП зі зміною роду вихідної величини, які необхідні у тих випадках, коли для вимірюваної вхідної величини немає міри або компаратора;
- за характером реалізованої залежності - на лінійні та нелінійні;
- за кількістю каналів - на одно- та багатоканальні;
- за видом вихідного сигналу - на параметричні та генераторні;
- за родом використовуваних явищ - на термоелектричні, оптоелектричні, п'єзоелектричні, електромагнітні, магнітоелектричні та ін. [12].

Таким чином, з врахуванням вище сказаного, загальна структурна схема вимірювального приладу магнітного поля зображена на рис. 1.

Відзначимо, що в деяких випадках, сенсор може бути одночасно і перетворювачем. Або перетворювач може бути взагалі відсутній. Однією з найважливіших статичних метрологічних характеристик вимірювального



Рисунок 1 – Загальна структурна схема вимірювального приладу магнітного поля

приладу є функція перетворення - залежність між вихідною (y) та вхідною (x) величинами засобу вимірювальної техніки. Функція перетворення може бути подана у вигляді таблиці, графіка, формули. Аналітична залежність вимірювального перетворення, що входить до складу засобу вимірювань називається рівнянням перетворення [12].

Ще однією з метрологічних характеристики приладу є чутливість - відношення зміни вихідної величини засобу вимірювань до зміни вхідної величини, що її викликає: $S = \Delta y / \Delta x$.

Чутливість характеризує здатність засобу вимірювання реагувати на зміну вхідного сигналу. При лінійному рівнянні перетворення $S = \text{const}$. В даному випадку шкала засобу вимірювань рівномірна, що є досить суттєвою перевагою порівняно із засобами вимірювань із нерівномірною шкалою.

Досить важливою метрологічною характеристикою є діапазон вимірювань - інтервал значень вимірюваної величини, в межах якого пронормовані похибки засобу вимірювань.

Існують також і інші метрологічні характеристики, які наведені в [12]. Однією з характеристик магнітного поля є магнітна індукція. Магнітні поля зазвичай поділяють на надсильні (понад 100 Тл), сильні (від 4 до 100 Тл), середні (від 0,05 до 4 Тл), і слабкі (менше 0,05 Тл) [2]. Для вимірювання індукції магнітного поля, в приладах можуть використовуватись різні сенсори, від яких сильною мірою залежить чутливість всього приладу.

В залежності від значення індукції вимірюваного магнітного поля та від області застосування магнітометра, виникає проблема вибору того чи іншого первинного сенсора магнітного поля. У таких сферах дослідження як мікромагнітне сканування або неруйнівний контроль, єдиним критерієм вибору часто є розмір сенсора. При пошуку і визначенні магнітних аномалій на великих



відстанях найважливішим параметром є шумові характеристики і роздільна здатність сенсора [12]. В завданнях навігації, орієнтації в просторі і стабілізації, одними з головних характеристик сенсора є лінійність, температурні коефіцієнти і чутливість до поперечного магнітного поля [13]. При дослідженні магнітного поля квантового чіпа, дуже важливими є тепловиділення і працездатність сенсора при наднизьких температурах.

Таким чином, завдання вибору найкращого сенсора магнітного поля для магнітометра в кожній конкретній задачі не є тривіальною.

Сенсор магнітного поля є ключовим елементом будь-якого магнітометра і призначений для перетворення магнітної індукції B в електричний сигнал, найчастіше в напругу U . Сучасні сенсори магнітного поля використовують різноманітні фізичні ефекти, наприклад, Холла, Гаусса, Суля, та ін. [2].

В залежності від того, який ефект використовує сенсор магнітного поля, їх поділяють на наступні типи відповідно до рис. 2 [2, 12, 14, 15]. До основних характеристик сенсорів магнітного поля можна віднести наступні: діапазон вимірювань; лінійність характеристики; діаграма спрямованості; частотний діапазон вимірювань; гістерезис; похибка перетворення магнітної індукції (в тому числі залежність від температури); зміщення; довгострокова стабільність; шумові характеристики; чутливість до поперечного поля; геометричні розміри сенсора; споживана потужність; тепловиділення; діапазон робочих температур [1].

На рис. 3 показані типові діапазони вимірювань для різних типів сенсорів магнітного поля.

Аналізуючи дані рис. 3 можна зазначити, що для вимірювання слабких полів можуть застосовуватися вимірювальні котушки, перетворювачі Барнетта, віброзонди, ферозонди, магніторезистори, сенсори на ефекті ядерного магнітного резонансу (ЯМР), СКВІД-магнітометри (СКВІДи). Щодо частотного діапазону вимірювання, то вимірювальні котушки не дозволяють проводити вимірювання постійних магнітних полів. Перетворювачі Барнетта та віброзонди мають в своєму складі електромеханічний привід, що призводить до збільшення їх розмірів і ускладнення конструкції, тому в даний час вони широко не застосовуються.

Слід зазначити, що магнітна індукція може перетворюватися за допомогою сенсору з струмом, напругою, опором, частотою і т.п. Далі відбувається

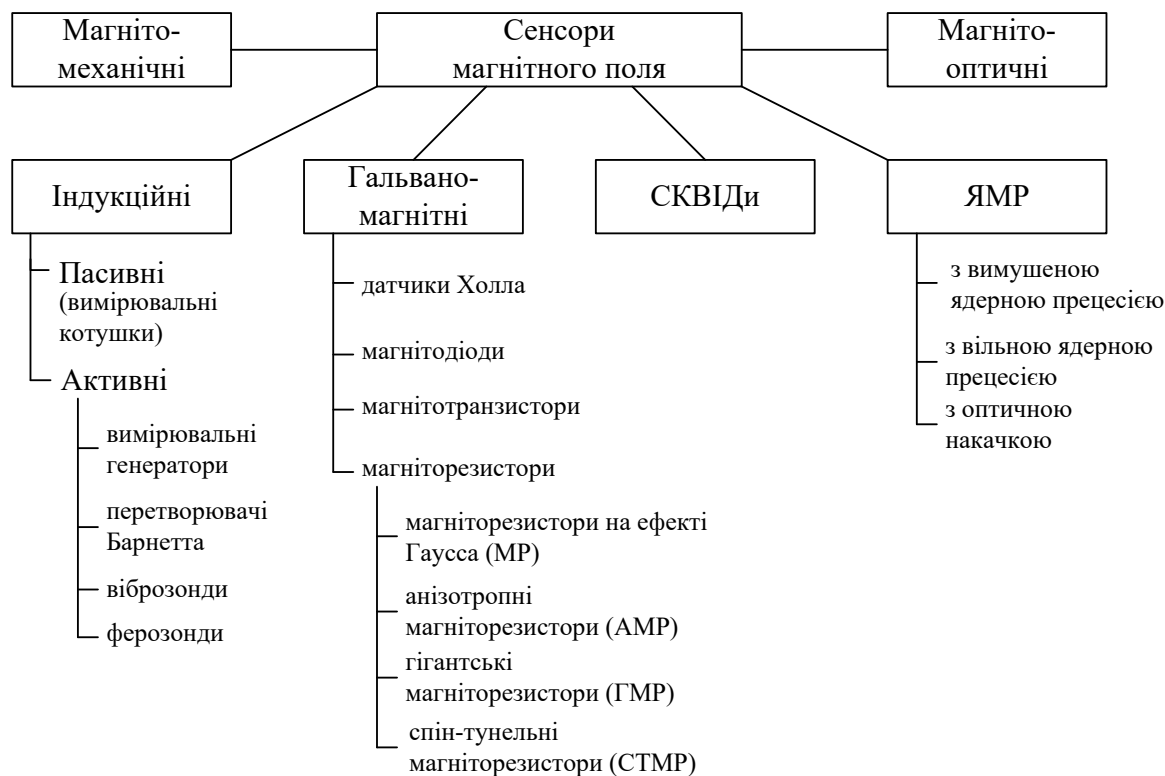


Рисунок 2 – Види сенсорів магнітного поля

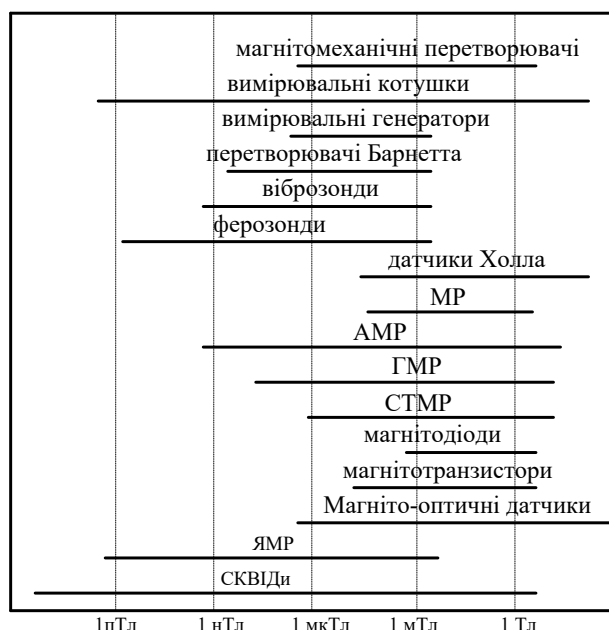


Рисунок 3 – Діапазони вимірювань сенсорів магнітного поля

аналогово-цифрове перетворення $R \rightarrow N$, $U \rightarrow N$, $I \rightarrow N$, $f \rightarrow N$. Але, з усіх таких перетворень, останнє дозволяє зменшити вплив завад на інформативний частотний вимірювальний сигнал, що дає значну перевагу аналогово-цифровому перетворенню такого типу.

Проведемо детальніший аналіз особливостей реалізації та характеристик



сучасних приладів з різними сенсорами для вимірювання слабких постійних і змінних магнітних полів відповідно до класифікації, наведеної на рис. 2.

1.2. Прилади з магніторезистивними сенсорами

Для вимірювання слабких магнітних полів в широкому діапазоні температур широкого поширення набули прилади з магніторезистивними сенсорами. Магніторезистивні сенсори використовують ефект зміни електричного опору матеріалу при впливі на нього магнітного поля. Однією з переваг магніторезистивних сенсорів є те, що вони можуть бути виготовлені із застосуванням сучасних інтегральних технологій, що сприяє суттєвому зменшенню їх розмірів і вартості [1].

Температурні характеристики магніторезисторів залежать від матеріалу легуючих домішок. Зокрема, зі збільшенням температури опір магніторезистора зменшується. Вплив магнітного поля також зменшує опір магніторезистора. Магніторезистори мають низький рівень шумів, малий вплив поверхневих ефектів на характеристики чутливості та характеризуються мінімальним старінням магніторезисторів [16].

В залежності від використовуваних фізичного ефекту і матеріалу, розрізняють такі магніторезистивні сенсори: магніторезистори на ефекті Гаусса; анізотропні магніторезистивні сенсори (АМР); магнітні сенсори на гігантському магніторезистивному ефекті (ГМР); спин-тунельні магніторезистивні сенсори (СТМР).

Прилади з магніторезисторами на ефекті Гаусса. Ефект Гаусса полягає в зміні електричного опору магніточутливого матеріалу внаслідок викривлення траєкторії руху носіїв заряду під дією зовнішнього магнітного поля [17]. При розміщенні магніточутливого матеріалу в магнітне поле його опір зростає.

Велика кількість магніторезисторів на ефекті Гаусса дозволяють вимірювати постійні та змінні магнітні поля в діапазоні від 1 мТл до 1 Тл та частотою до 1 МГц при потужності розсіювання до 1 Вт в діапазоні робочих температур від -40°C до 110°C . Температурний коефіцієнт чутливості типового сенсора на ефекті Гаусса змінюється від $2\%/^{\circ}\text{C}$ до $0,02\%/^{\circ}\text{C}$ [2].

До основних переваг вимірювальних приладів з магніторезисторами на ефекті Гаусса можна віднести їх малі габарити та низьку вартість. До основних



недоліків вимірювальних приладів з магніторезисторами на ефекті Гауса можна віднести низьку чутливість, нелінійність характеристики перетворення, висока залежність від температури, зміна чутливості магніторезистивного елементу при зміні кута між вектором магнітної індукції і площиною елементу, досить велика розсіювана потужність.

Анізотропні магніторезистивні сенсори. АМР сенсори засновані на анізотропному магніторезистивному ефекті, який є результатом спін-орбітальної взаємодії в феромагнітних провідниках [18] і полягає в зміні електричного опору феромагнітного провідника в залежності від зміни кута α між протікаючим струмом I і вектором намагніченості M . Загальний принцип анізотропного магніторезистивного ефекту показаний на рис. 4.

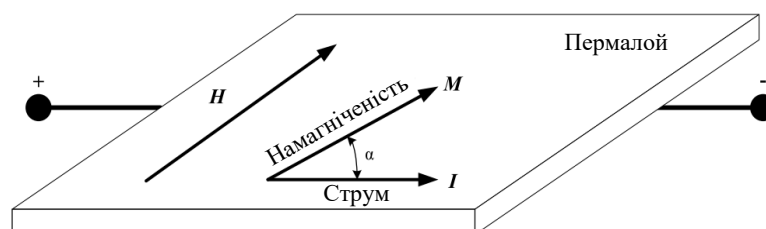


Рисунок 4 – Принцип анізотропного магніторезистивного ефекту

Зовнішнє магнітне поле H повертає вектор намагніченості M на кут α і змінює електричний опір відповідно до виразу:

$$R = R_0 + \Delta R \cos^2(\alpha) \quad (1)$$

де R_0 - базовий опір АМР сенсора, Ом; ΔR - максимальна зміна опору, Ом.

З формули (1) випливає, що куту $\alpha = 90^\circ$ відповідає мінімальний опір, а куту $\alpha = 0^\circ$ (у відсутності магнітного поля) - максимальне значення опору, яке дорівнює базовому опору R_0 , до якого додається максимальний опір ΔR , який становить від 2% до 3% від базового опору [19].

З виразу (1) слідує, що залежність опору від величини вимірюваного магнітного поля носить нелінійний характер. Для вирішення даної проблеми в АМР сенсорах використовують структуру, в якій алюмінієві смуги напилюють на пермалой під кутом 45° , тим самим змінюючи напрямлення струму на 45° і роблячи функцію перетворення близькою до лінійної. Більшість АМР сенсорів дозволяють вимірювати постійні і змінні магнітні поля до частот близько 10 МГц в діапазоні від 10 нТл до 1 мТл, рівень власних шумів на рівні 10 нТл



\sqrt{H} Гц, споживана потужність від 0,1 до 0,5 мВт, нелінійність функції перетворення на рівні 0,1%. АМР можуть працювати в діапазоні температур від -55°C до 200°C [15]. Температурний коефіцієнт чутливості типового АМР сенсора складає від 0,25%/ $^{\circ}\text{C}$ до 0,01%/ $^{\circ}\text{C}$. Температурний коефіцієнт зміщення складає близько 10 нТл/ $^{\circ}\text{C}$, і варіюється навіть між екземплярами сенсорів однієї партії [13].

Для підвищення чутливості вимірювання індукції магнітного поля, АМР сенсори включають по мостовій схемі [13] і застосовують зворотний зв'язок для компенсації магнітного поля, що вимірюється. Для цього в АМР сенсори вбудовують плоску котушку зворотного зв'язку. Це дозволяє підвищити лінійність та поріг чутливості, але в той же час, ми зменшуємо робочий частотний діапазон. Вихідна інформативна напруга U в АМР сенсорах залежить не тільки від вимірюваної компоненти вектора магнітної індукції B_x , але і від іншої компоненти B_y , перпендикулярній напрямку вимірювання. Для компенсації похибки від поперечного поля застосовують різні способи: магнітний зворотний зв'язок, одночасне вимірювання кількох компонентів вектора магнітної індукції з подальшою цифровою обробкою та ін. Для реалізації прецизійних вимірювальних приладів з АМР сенсорами необхідні складні аналого-цифрові схеми, які мають підвищені енергоспоживання та тепловиділення. Спрощення схемотехнічного рішення призводить до зниження чутливості сенсора і збільшення рівня шумів [13].

Розвитку АМР сенсорів сприяла необхідність замінити індуктивні головки зчитування інформації в жорстких дисках. На цій позиції використання пізніше вони були замінені ГМР і СТМР сенсорами, оскільки вони мають більш високу щільність зберігання інформації завдяки меншим розмірам.

До основних переваг вимірювальних приладів з АМР сенсорами необхідно віднести: наявність осі чутливості, довгий термін служби і незалежність від магнітного дрейфу [19]. В вимірювальному приладі, наприклад, можна використати сенсор компанії Honeywell HMC1021S з незначними розмірами 5x4x2 мм, що може працювати в широкому діапазоні температур та має мале енергоспоживання і є відносно дешевим.

До основних недоліків вимірювальних приладів з АМР сенсорами слід віднести низьку порогову чутливість та великий рівень шумів. Крім того, магніторезистивні сенсори виділяють багато тепла, що пов'язано з



розсіюванням енергії в резистивному елементі.

Огляд патентів за останні 10 років для вимірювальних приладів з АМР сенсорами показав, що ефект АМР використовується в складі таких приладів: "Устройство для измерения крутящего момента и осевого усилия во вращающихся валах" [20], "Anisotropic magneto-resistance gradiometer /magnetometer to read a magnetic track" [21], "Magnetoresistive sensor for determining an angle or a position" [22] та ін.

Прилади з магнітними сенсорами на гігантському магніто-резистивному ефекті. ГМР сенсори засновані на гігантському магніторезистивному ефекті, який має місце в тонких металевих плівках з феромагнітними та провідними немагнітними шарами. Ефект полягає в значній зміні електричного опору такої структури при зміні взаємного напрямку намагніченості сусідніх магнітних шарів, як показано на рис. 5.

Основним механізмом виникнення ГМР ефекту є спін-залежне розсіювання електронів провідності. У феромагнетику електрони з одним напрямком спіну розсіюються набагато сильніше, ніж електрони з протилежним напрямком (виділений напрям задає намагніченість зразка). Виходячи з одного феромагнітного шару, електрони потрапляють в інший, зберігаючи свою поляризацію. Таким чином, в разі паралельної намагніченості шарів, ті з носіїв, які розсіюються менше, проходять всю структуру без розсіювання; а носії протилежної поляризації відчують сильне розсіювання в кожному з магнітних шарів. У разі ж антипаралельної намагніченості шарів, носії обох поляризацій сильно розсіюються в одних шарах і слабо в інших. Отже, при паралельній намагніченості шарів опір, як правило, низький, а при антипаралельній - високий [23].

В якості елемента на основі ефекту ГМР як правило використовується структура, в якій один з магнітних шарів напилений на шар антиферомагнетика. Завдяки обмінній взаємодії між електронами феромагнетика і антиферомагнетика спіни в цих двох шарах стають жорстко зв'язаними між собою [23].

До переваг вимірювальних приладів з ГМР сенсорами слід віднести малі розміри і більшу зміну опору сенсору при впливі магнітної індукції, ніж у АМР сенсора. У той час як зміна опору АМР сенсора не перевищує 3%, ГМР-матеріали забезпечують зміну від 10% до 20% [15]. Крім цього, ГМР сенсори виготовляються за технологією, розробленою для виробництва напів-



провідників, що зменшує собівартість сенсорів та приладів в цілому. Сучасні ГМР сенсори здатні вимірювати магнітні поля від 10 нТл до 0,1 Тл [23].

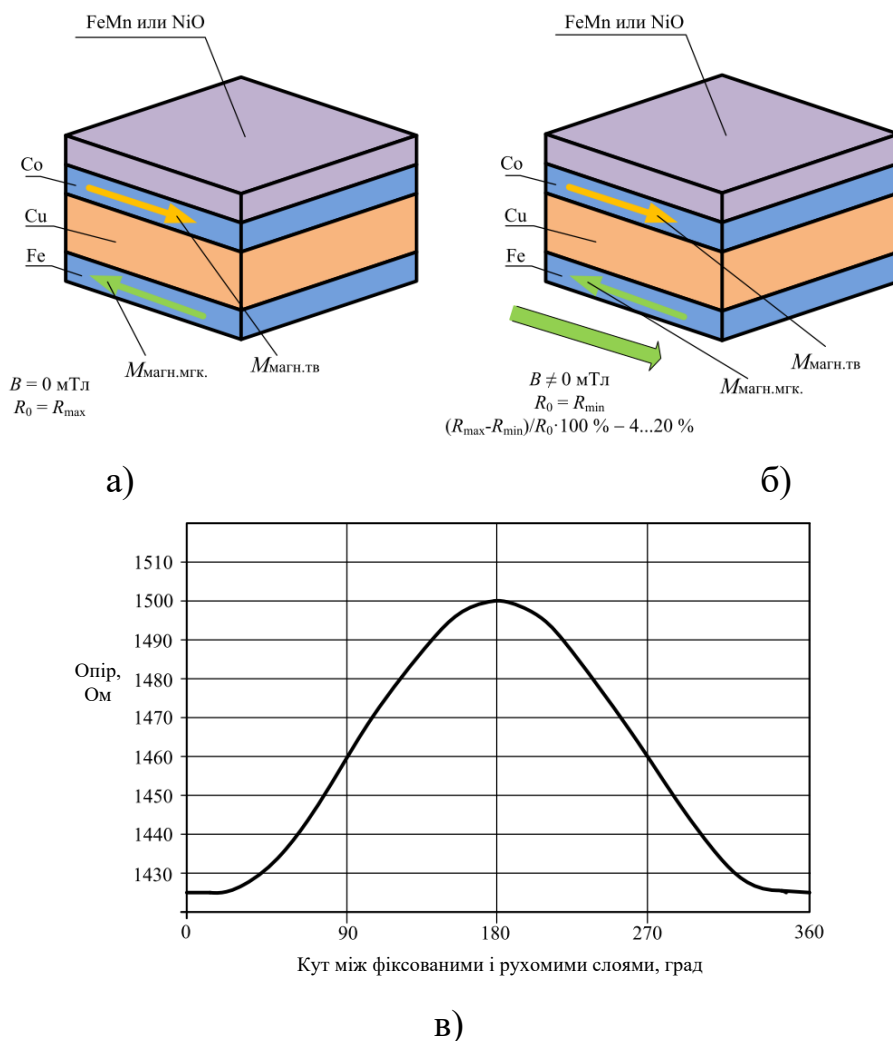


Рисунок 5 – Принцип роботи ГМР ефекту: а) - антипаралельний напрям векторів намагніченості фіксованого і рухомого шарів (кут $\alpha \geq 180^\circ$) - стан з максимальним опором; б) - паралельний стан шарів (кут $\alpha \geq 0^\circ$) - стан з мінімальним опором; в) - графік залежності опору від напрямку прикладеного поля (кута α)

Фірма Hitachi розробила ГМР сенсори з покращеною температурною стабільністю. У цих сенсорів в діапазоні температур від -40°C до 120°C чутливість змінюється всього 20%, крім того, вони здатні працювати при температурі 250°C протягом 30 хвилин [13].

Патентний пошук показав, що в напрямку розробки ГМР сенсорів в світі працюють багато розробників з Китаю, США та інших країн. Причому всі винаходи ГМР сенсорів одразу адаптовані під сучасні інтегральні технології



виробництва [24-27].

Основними перевагами ГМР [28] сенсорів є велика щільність інтеграції, внаслідок чого досягається висока роздільна здатність при розпізнаванні близько розташованих один до одного магнітних мікрооб'єктів (зокрема, бітів на магнітних носіях), високу швидкодію і низьке енергоспоживання.

Основними недоліками вимірювальних приладів з такими сенсорами є те, що діаграма спрямованості цих сенсорів має деформацію, при цьому сильні магнітні поля, особливо при високих температурах, здатні зруйнувати спіновий клапан через зміни в намагніченості з'єднувального шару. Така небезпека не загрожує АМР сенсорам [29].

Прилади зі спін-тунельними магніторезистивними (СТМР) сенсорами.

СТМР сенсори використовують спін-тунельний магніторезистивний ефект, який аналогічний гігантському магніторезистивному ефекту, тільки замість немагнітного металу феромагнітні шари розділені шаром діелектрика. Якщо шар діелектрика досить тонкий, проявляється тунельний ефект. Ймовірність тунелювання електрону через потенційний бар'єр сильно залежить від взаємної орієнтації намагніченостей шарів, тому в англомовній літературі цей ефект називається "spin-dependent tunneling" (SDT).

Вимірюваний опір обернено пропорційно ймовірності тунелювання через тонкий ізолюючий бар'єр [21]. Для аморфного ізолюючого шару Al_2O_3 відносна зміна опору досягає 70% при кімнатній температурі. Ще більш перспективним є бар'єр у вигляді монокристалічного шару MgO , який дозволяє досягти значень зміни опору до 600% при кімнатній температурі. Завдяки високому опору СТМР сенсори мають менше енергоспоживання, ніж ГМР сенсори [29]. Однак недоліком СТМР сенсорів залишається висока коерцитивна сила і нелінійність. Так цифровий магнітометр з СТМР сенсором, що згадується в роботі [30], має розширення 1 мкТл і лінійний діапазон вище 1 мТл [13].

Але в напрямку розробки та вдосконалення СТМР сенсорів для вимірювальних приладів в даний момент займаються багато відомих міжнародних фірм, зокрема Multidimension Technology, Qualcomm Incorporated, Bluecircle Therapeutics та ін. Свої позитивні результати по покращенню характеристик СТМР сенсорів вони наводять у відповідних патентах [31, 32].

Отже, основними перевагами вимірювальних приладів з СТМР сенсорами є малі габарити і висока просторова роздільна здатність, низьке



енергоспоживання, можливість роботи в широкому діапазоні температур, довговічність, низька вартість [13]. До основних недоліків вимірювальних приладів з СТМР сенсорами відноситься: невисока чутливість, нелінійність в широкому діапазоні вимірювань, високий рівень шуму і тепловиділення.

1.3. Прилади з сенсорами на основі ЯМР

Ще один різновид магніточутливих приладів використовують сенсори на ефекті ядерного магнітного резонансу, ефекті Зеємана і Оверхаузера [33].

Ядерний магнітний резонанс виникає внаслідок поглинання або випромінювання електромагнітної енергії речовиною, яка поміщена у зовнішнє магнітне поле і містить ядра з ненульовим спіном, обумовлено переорієнтацією магнітних моментів ядер відносно напрямку магнітної індукції. Оскільки орієнтації магнітних моментів ядер носить дискретний характер, то зміна орієнтації, а отже, і зміна енергії відбувається стрибкоподібно [33]. Для виникнення резонансу необхідно створити надлишок частинок на одному з енергетичних рівнів. Цього можна домогтися опроміненням речовини електромагнітним полем або світлом резонансної частоти, або впливом сильного магнітного поля [33].

Сенсори магнітного поля, засновані на ядерному магнітному резонансі (ЯМР), поділяються на: сенсори з примусовою ядерною прецесією; сенсори з вільною ядерною прецесією; сенсори з оптичним накачуванням.

Вдосконалення вимірювальних приладів з сенсорами на ядерному магнітному резонансі здійснюється і в наш час. Це підтверджують винаходи провідних розробників в цьому напрямку [31 - 33].

Прилади з сенсорами з примусовою ядерною прецесією. Сенсори з примусовою ядерною прецесією працюють наступним чином [1]: зразок з резонуючими ядрами міститься всередині котушки, яка живиться від зовнішнього генератора. Умова резонансу настає при співпаданні частоти зовнішнього збуджуючого генератора з частотою прецесії ядер у вимірюваному магнітному полі. Тому частота генератора змінюється до тих пір, поки не співпаде з частотою прецесії ядер. Високочастотна енергія, яка створюється котушкою, переводить ядра в збуджений стан. Частина енергії котушки поглинається зразком, що призводить до виникнення напруги на її кінцях.



Вимірювальні прилади з сенсорами з примусовою ядерною прецесією застосовуються для вимірювання полів з індукцією 0,025 Тл і вище. При цьому вимірюване поле служить одночасно і поляризує, тобто створює початкову намагніченість. У випадках вимірювання в слабших полях, амплітуда сигналу стає недостатньою і для збільшення сигналу ядерної індукції застосовують попередню поляризацію речовини сильним магнітним полем.

Прилади з сенсорами з вільною ядерною прецесією. В сенсорах з вільною ядерною прецесією робоча речовина поміщається в приймальну котушку, яка включена в перестроюваний по частоті коливальний контур. Допоміжне постійне магнітне поле, більш сильніше ніж вимірюване, поляризує робочу речовину в перпендикулярному робочому полю напряму. Після швидкого відключення допоміжного магнітного поля моменти атомних ядер вільно прецесують відносно напряму вимірюваного поля з експоненціально затухаючою протягом 2-3 с амплітудою. При цьому в приймальній котушці наводиться ЕРС з частотою прецесії (частота Лармора), яка вимірюється частотоміром. Чутливість протонних ЯМР сенсорів з вільною прецесією в слабких однорідних полях досягає 1 нТл [31-33].

В сучасних сенсорах з вільною ядерною прецесією для створення ядерної намагніченості застосовують динамічну поляризацію ядер (ефект Оверхаузера). Як зразок, використовують речовини, що містять частинки як з ядерним, так і з електронним магнітним моментом. Динамічна поляризація ядер призводить до намагніченості, приблизно в 500 разів більшою статичної ядерної намагніченості, і досягається накладенням на зразок змінного поля з частотою прецесії електронів. Сенсори з динамічною поляризацією мають перевагу з точки зору їх швидкодії, так як вони дозволяють спостерігати прецесію ядер (протонів) одночасно з процесом поляризації. Це виявляється можливим внаслідок незалежного утворення поздовжньої складової ядерної намагніченості і прецесійного руху поперечної складової навколо вимірюваної магнітної індукції. Вимірювальні прилади з сенсорами на ефекті Оверхаузера досягають чутливості до 0,01 нТл. Особливістю цих приладів також є дискретний характер вимірювань. Найбільш швидкодіючі прилади дозволяють здійснювати один вимір за 0,2 с [30-33].

Прилади з сенсорами з оптичним накачуванням. Квантові сенсори з оптичним накачуванням використовують зміну оптичних властивостей речовин під дією магнітного поля. Промінь світла певної поляризації і напрямку,



проходячи через пари лужного металу (цезій, калій, рубідій), викликає поляризацію. Робоча речовина перестає поглинати світло і стає більш прозорою. Після цього відбувається процес деполяризації, при цьому частота деполяризуючого поля прямо пропорційна магнітному полю. Чутливість квантових сенсорів тим вище, чим вузча спектральна лінія поглинання. Найвузчу спектральну лінію поглинання (менше 1,0 нТл) мають калієві квантові сенсорі. Коефіцієнт перетворення ларморової частоти у сенсорів даного типу становить 7 Гц/нТл, а чутливість досягає 10 фТл [33].

Однією з головних переваг вимірювальних приладів з сенсорами з ЯМР є висока роздільна здатність. До недоліків магнітометрів на основі ЯМР відносяться: великі розміри, висока вартість, чутливість до механічних впливів, висока споживана потужність. Крім того, магнітометри з сенсорами на основі ЯМР мають низьку швидкодію і обмежений температурний діапазон.

Слід зазначити, що сенсорі на основі ЯМР не мають осі чутливості, тому не можуть давати інформацію про направлення магнітного поля.

1.4. Прилади зі СКВІДами

Розвиток фізики надпровідності сприяв створенню нового вимірювального сенсору, що отримав назву "СКВІД" (SQUID, Superconducting Quantum Interference Device). Принцип дії сенсору СКВІД заснований на використанні таких квантових явищ як ефекту Джозефсона і інтерференції хвильової функції електронних пар в надпровідному кільці, що містить джозефсонівський перехід. СКВІД-магнітометр застосовуються для вимірювання магнітного нуля і інших фізичних величин. Чутливість таких сенсорів в 1000 разів вища, ніж у кращих ненадпровідникових магнітометрів [2].

Принцип роботи приладу наступний: для підтримки надпровідного стану, який можливий при дуже низькій температурі, СКВІД поміщають в посудину Дюара з рідким гелієм. Якщо стінки посудини металеві, то виникаючі у них струми спотворюють магнітні поля від зовнішніх джерел. Останнім часом розроблені спеціальні діелектричні посудини Дюара зі склопластику. У них СКВІД розміщений лише в сантиметрі від зовнішньої стінки посудини і може без спотворень сприймати магнітне поле від зовнішнього джерела при кімнатній температурі. Одна із розробок таких приладів описані в [2-6].



Існують два типи СКВІДів: СКВІД на постійному струмі і високочастотний СКВІД. СКВІД, що складається з двох джозефсонівських контактів, включених паралельно в замкнутий надпровідний контур і працюють при постійному струмі зміщення, називається СКВІДом на постійному струмі. Високочастотний СКВІД працює на змінному струмі і має тільки один джозефсонівський контакт.

Зовнішній вигляд сквіду на постійному струмі зображений на рис. 6. Прикладений постійний струм в надпровідному кільці СКВІДу розділяється на два рівних по амплітуді струми, кожен з яких проходить через відповідний джозефсонівський контакт, після чого струми підсумовуються. Якщо зовнішнє магнітне поле відсутнє, то обидва струми будуть рівними. При наявності магнітного поля в контурі буде наводитися циркулюючий надпровідний струм. Цей струм в одному з джозефсонівських контактів буде відніматися з постійного зовнішнього струму, а в другому підсумовуватися з ним. Таким чином, дві гілки матимуть різні струми, і між джозефсонівськими контактами виникне різниця фаз [2-7].

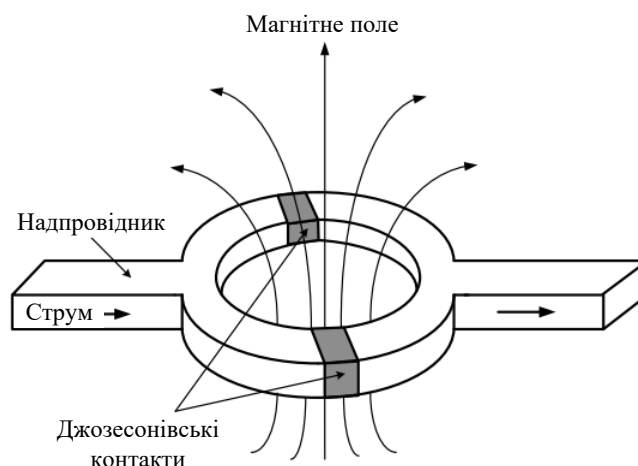


Рисунок 6 – Зовнішній вигляд СКВІДа

Робота СКВІДу на змінному струмі заснована на нестационарному ефекті Джозефсона і використовує тільки один джозефсонівський контакт. Кільце СКВІДу індуктивно зв'язано з коливальним контуром, який живиться від зовнішнього генератора струму. При наявності магнітного поля в СКВІДі виникає екрануючий струм, який створює власний магнітний потік, що частково компенсує зовнішнє магнітне поле. Вимірюється падіння напруги на коливальному контурі, яке прямо пропорційне зміні магнітного поля [2]. Високочастотний СКВІД менш чутливий порівняно з СКВІДом на постійному



струмі, та має більш високий рівень шуму, але дешевший і простіший в виготовленні [2].

На сьогодні, в електроніці набули найбільшого поширення СКВІДи, які виготовлені за тонкоплівковою технологією. Схема такого СКВІДу являє собою замкнутий контур з надпровідника (в який включені два джозефсонівських переходи) з чотирма виводами, які використовуються для подачі струму і зняття напруги [2]. В більшості використовуваних системах на базі низькотемпературних СКВІДів, самі сенсори розташовані всередині малих циліндричних надпровідних магнітних екранів. Багато фірм, які виготовляють низькотемпературні СКВІДи, поширюють не просто кремнієві чіпи, а сенсори закапсульовані в твердий пластиковий матеріал з виведеними на корпус металевими контактами. Такі прилади легко монтуються всередину суперізолюваних гелійових кріостатів із оргскла. Також, паралельно розвивається технологія виготовлення високотемпературних СКВІДів [5-7]. Вони з'явилися порівняно недавно і мають більш високий рівень шуму в порівнянні з низькотемпературними СКВІДами. Але не дивлячись на це, високотемпературні СКВІДи постійно вдосконалюються. Приклади таких СКВІДів виготовляються в Юліхському технологічному центрі в Германії [2]. Одним із відомих виробників СКВІД-сенсорів на ринку є американська компанія Tristan Technologies та англійська компанія Cryogenic [2]. Приклади СКВІД сенсорів компанії Tristan Technologies наведено на рис. 7. Параметри СКВІДа високої температури НТМ-8 [2]: розмах сигнальної характеристики 50 мкВ; крутість $\partial V_{SQUID} / \partial \Phi = 150$ мкВ/ Φ_0 (Φ_0 - квант магнітного потоку); коефіцієнт перетворення індукції магнітного поля в магнітний потік $\partial B / \partial \Phi = 2,8$ нТ/ Φ_0 ; чутливість по магнітному полю 50 фТл/Гц^{1/2}; власний шум 18 мк Φ_0 /Гц^{1/2}; ефективна площа 0,7 мм²; коефіцієнт зв'язку котушки зворотного зв'язку 2,5 мкА/ Φ_0 .

Параметри СКВІД-магнетометрів S700X та CF-S700X [2]: індукція магнітного поля $\pm 7,5$ Т; однорідність магнітного поля 0,01 %; стабільність магнітного поля 0,1% ppm/ч; роздільна здатність встановлення магнітного поля: 0,11 мТ (стандартно), 10⁻⁷ Т (опція); максимальний розмір зразка 9 мм; діапазон температур зразка: 1,6 – 300К (стандартно), до 700К (опція); стабільність температури: 2 мК / 10 К, 3 мК / 100 К, 10 мК / 300 К; діапазон вимірювань: 10⁻⁸ – 10⁻² ему (стандартно), до 5 ему (опція); чутливість 10⁻⁸ ему.

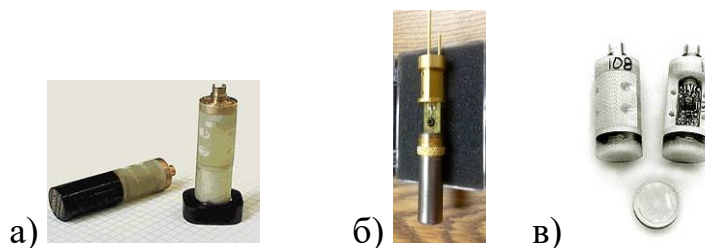


Рисунок 7 – Приклади СКВІД сенсорів компанії Tristan Technologies
a – СКВІД високої температури HTM-8; б – СКВІД низької температури LSQ/20LTS; в – СКВІД низької температури LSQ/20M LTS

На основі низькотемпературних (гелієвих) СКВІДів створені найчутливіші вольтметри і підсилювачі, шуми яких наближаються до квантової границі. Сам СКВІД може бути невеликих розмірів, але потреба в криогенній установці робить всю конструкцію магнітометра громіздкою і важкою. Споживана потужність СКВІДу майже повністю обумовлена наявністю електроніки зчитування вимірювальної інформації і становить кілька ват [2]. Отже, основними перевагами вимірювальних приладів зі СКВІДами є висока чутливість і низький рівень шумів. До основних недоліків таких приладів відноситься: необхідність в спеціальному обладнанні та додатковому екрануванні, обмежені розміри вимірювального об'єму, висока вартість.

Представники інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова запропонували винахід, який належить до вимірювальної техніки, призначеної для реєстрації низькочастотних надслабких магнітних полів за допомогою надпровідникових квантових інтерференційних детекторів (СКВІДів) і може бути використаний для реєстрації як власних, так і зовнішніх магнітних полів біологічного походження, в першу чергу таких органів людини, як серце, кров та печінка.

Відомо, що життєдіяльність біологічних організмів супроводжується випромінюванням магнітних полів. Ці біомагнітні поля дуже слабкі і їх стало можливим вимірювати тільки після відкриття СКВІДів, чутливість яких сягає діапазону фемтоТесла (10^{-15}). Магнітне поле Землі приблизно дорівнює 50 мкТл, техногенні магнітні завади лежать в діапазоні нТл. В той же час біомагнітні поля лежать в діапазоні фемто- і пікоТесла. Тому реалізація вимірювань за допомогою СКВІДів становить значну технічну проблему. Особливо це стосується біомагнітометрів, які призначені для вимірювання магнітних полів біологічного походження. Такі прилади повинні мати одночасно як велику чутливість, так і широкий динамічний діапазон, високу



швидкодію, завадозахищеність, стабільність характеристик.

Це спонукає розробників вдосконалювати сенсори магнітного поля на основі СКВІДів. На сьогодні більш поширені так звані СКВІДи постійного струму, які використовуються для вимірювання слабких квазіпостійних магнітних полів. В їх основу поставлена задача вдосконалення конструкції релаксаційних коливань СКВІДу, в якому шляхом застосування нового обладнання, нових конструктивних та схемних рішень підвищується чутливість сенсору до корисного магнітного сигналу, а також завадозахищеність і стабільність його роботи в умовах відсутності магнітного екранування.

Конструкція такого сенсору передбачає використання: спеціального фільтра низьких частот між антеною та вхідною котушкою для зменшення високочастотних завад, проникаючих з антени в СКВІД; спеціального концентратора потоку, виготовленого із свинцю, для збільшення магнітного зв'язку між вхідною котушкою і отвором СКВІДа; RL шунта з характерним часом близько 1 мс для додаткового послаблення шумів генерованих коливань; надпровідного екрану для захисту СКВІДу від магнітних завад; подвійного радіочастотного екрану для екранування вихідних проводів, що йдуть до зондової електроніки; термічних екранів в криогенному зонді для зменшення випаровування рідкого гелію; антени покращеної конструкції; свинцевої магнітоекрануючої трубочки для проводів, що йдуть від антени; фільтр низьких частот у вихідних колах та колах нагрівача для зменшення високочастотних завад, що проникають з зондової електроніки; двох резисторів в колах зворотного зв'язку та живлення СКВІДу, які разом з розподіленою ємністю звітої пари проводів утворюють ФНЧ, та зменшують завади, що проникають по живленню; спіральної вхідної котушки, намотаної в два ряди; капсули із ніобію, в яку поміщується сенсор магнітного поля для захисту від завад; нагрівача для випуску замороженого потоку, проникаючого в СКВІД; механізму для механічного балансу антени.

Основна ідея цього винаходу полягає в тому, щоб за допомогою зазначених вдосконалень покращити чутливість сенсора до магнітного поля та підвищити його завадозахищеність від дії сильних зовнішніх, як імпульсних, так і гармонічних магнітних завад техногенного характеру [2].

Розвитком та вдосконаленням вимірювальних приладів зі СКВІДами також займаються науковці інших країн. Деякі результати їх наукових розробок викладені в [5-9].



Таким чином, після проведеного аналізу, можна зазначити, що СКВІДи займають у фізиці низьких температур особливе місце і в даний час використовуються в багатьох практичних областях науки і техніки. Чутливість таких приладів в діапазоні від сотих часток герца до десятків гігагерц знаходиться поза конкуренцією. Тому використання СКВІДів в більшості випадків дозволяє отримати прилади з якісно новим рівнем параметрів. Зокрема, на основі низькотемпературних СКВІДів були створені магнітометри і градієнтметри, які дозволили реєструвати магнітні поля мозку і серця людини. Після відкриття високотемпературної надпровідності були випробувані перші зразки СКВІДів на основі високотемпературних надпровідників. Вони продемонстрували можливість створення вимірювальних систем, що працюють при температурі рідкого азоту і мають параметри, які близькі до їх низькотемпературних аналогів [9, 2].

1.5. Прилади з ферозондовими сенсорами

Ферозондові перетворювачі (ферозонди) є різновидом фероіндукційних перетворювачів [6, 8, 12]. Чутливим елементом в фероіндукційних перетворювачах є осердя з феромагнітного матеріалу. Поширення отримали три типи фероіндукційних перетворювачів, які відрізняються способом збудження: механічним, тепловим і магнітним (рис. 8).

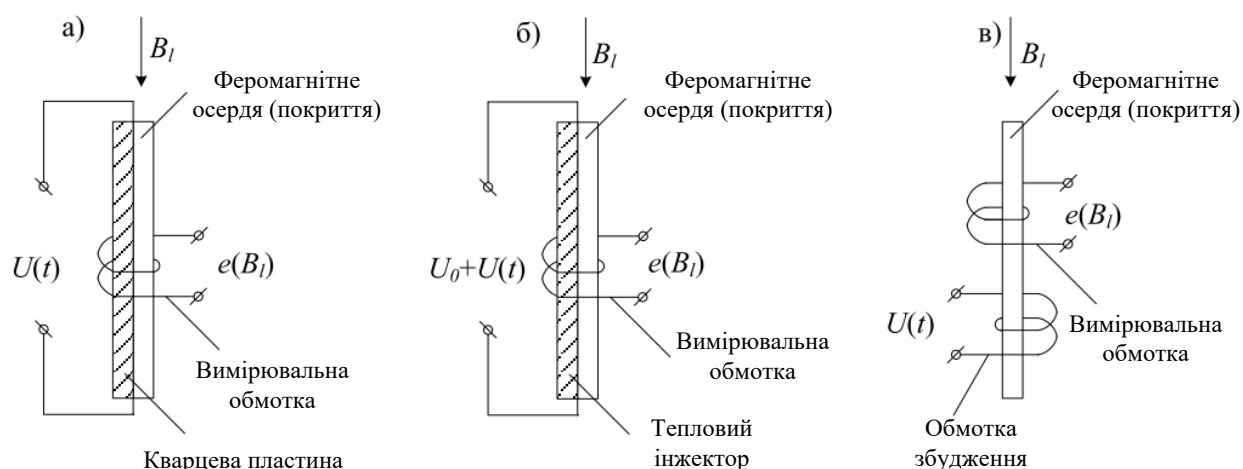


Рисунок 8 – Фероіндукційні перетворювачі з механічним (а), тепловим (б) і магнітним (в) збудженням



Перетворювач з механічним збудженням (рис. 8.а) являє собою кварцову пластинку з феромагнітним покриттям (наприклад, у вигляді тонкої пермалоєвої плівки), поверх якого розміщена вимірювальна котушка. Кварцова пластинка при впливі на неї електричної напруги резонансної частоти періодично подовжується, механічно впливаючи на плівку. В результаті, магнітна проникність плівки змінюється в часі, що призводить до виникнення електрорушійної сили (ЕРС) у вимірювальній котушці. Ця ЕРС пропорційна компонентіві вектора магнітної індукції B , що збігається з поздовжньою віссю пластинки і котушки. Такий перетворювач має порівняно низьку чутливість через незначну зміну магнітної проникності.

У перетворювачі з тепловим збудженням (рис. 8.б) в вимірювальну котушку поміщений малоінерційний тепловий інжектор, що знаходиться в безпосередньому контакті з тонкою феромагнітною плівкою, виконаний з матеріалу з низькою точкою Кюрі. При подачі на інжектор постійного струму, сердечник нагрівається до температури, близької до точки Кюрі. При цьому його магнітна проникність різко зростає відповідно до ефекту Гопкінсона. Після подачі на інжектор змінного струму, магнітна проникність сердечника змінюється з подвоєною частотою, сприяючи виникненню в вимірювальній котушці ЕРС, яка пропорційна вимірюваній компоненті вектора магнітної індукції B . Такий перетворювач має досить високу чутливість, але вимагає наявності матеріалу з малою тепловою інерційністю.

Перетворювач з магнітним збудженням (рис. 8.в) являє собою так званий ферозонд - це прилад, чутливий до зовнішніх магнітних полів, головним чином постійних і повільно змінних, що містить один або два феромагнітних сердечника і обмотки, розподілені по їх довжині [37]. Слід зазначити, що в даний час існують ферозонди для вимірювання магнітної індукції високої частоти [6]. Інформативний сигнал ферозонда містить дані про амплітуду, частоту і напрямок дії вектора вимірюваного магнітного поля [29].

Принцип дії ферозонда заснований на зміні магнітного стану феромагнетика під впливом двох магнітних полів різних частот [60]. Найпростіший ферозонд (рис. 8.в) являє собою феромагнітний стержень з розташованими на ньому котушкою збудження, що живиться змінним струмом, і вимірювальною котушкою. За відсутності вимірюваного магнітного поля сердечник під дією змінного магнітного поля, що створюється струмом в котушці збудження, перемагнічується по симетричному циклу (рис. 9.а).



Зміна магнітного потоку, викликана перемагнічуванням сердечника по симетричній кривій, індукує в сигнальній котушці ЕРС, що змінюється за гармонійним законом. При впливі на сердечник вимірюваного (постійного або змінного) магнітного поля, крива перемагнічування змінює свої розміри і форму, стає несиметричною, що призводить до зміни значення ЕРС в вимірювальній котушці (рис. 9.б). Зокрема, з'являються парні гармонійні складові ЕРС, величина яких прямо пропорційна індукції вимірюваного поля.

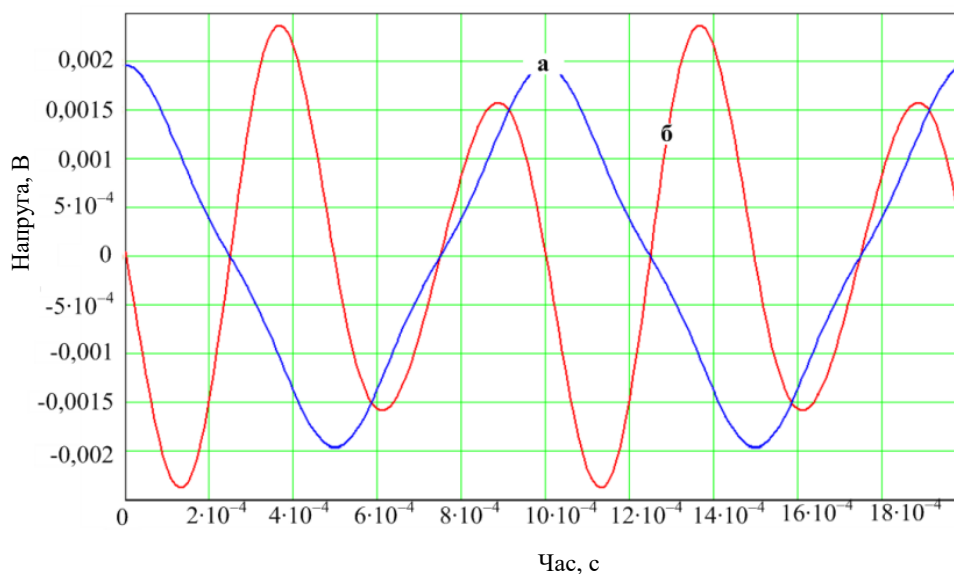


Рисунок 9 – Напруги на обмотці збудження (а) та у вимірювальній обмотці ферозонда (б)

За принципом роботи ферозонд схожий з принципом роботи магнітного підсилювача, але на відміну від останнього, ферозонд містить некероване електричне коло, а магнітне - у вигляді сердечника з феромагнітного матеріалу, намагнічуваного вимірюваним полем. Індукція магнітного поля є векторною величиною, причому намагніченість сердечників залежить не тільки від їх орієнтації, а й від співвідношення поздовжніх і поперечних розмірів. Тому ферозонд характеризується діаграмою направленості, завдяки чому він може бути використаний для вимірювання компонентів вектора магнітної індукції і кутів.

На рис. 10 представлена типова структурна схема магнітометра на основі ферозондового перетворювача [16]. Для збудження перетворювача сигнал синусоїдальної форми подається з генератора струму на обмотку збудження ферозонда, з виходу вимірювальної обмотки ферозонда інформативний сигнал



підсилюється і подається на вибіркового підсилювач або синхронний детектор, налаштований на частоту другої гармоніки сигналу збудження. Виділений сигнал фільтрується фільтром нижніх частот і надходить на реєструючий прилад, якій вимірює постійну напругу і проградуєований в одиницях виміру магнітної індукції. Наявність природної діаграми направленості відрізняє ферозонди від ядерно-прецесійних і квантових сенсорів, які забезпечують більш високу чутливість, але безпосередньо вимірюють модуль вектора магнітної індукції. Вони можуть набувати діаграми спрямованості тільки за рахунок накладення допоміжного поля заздалегідь певного напрямку і величини, що призводить до додаткових похибок, зниження надійності і збільшення габаритів.

Серед відомих вчених, що зробили значний вклад в розробку і створення ферозондів слід відзначити М.А. Розенблат, Ю.В. Афанасьєв, Р.І. Янус, Ю.Ф. Понаморьов, G. Goubau, H. Aschenbrener, F. Forster, P. Ripka і ін.

Ферозондові сенсори використовуються для різних магнітних вимірювань з кінця 30-х років 20-го сторіччя [16-22]. Перші сенсори представляли собою громіздкі прилади, намотані на осерді з відпаленого заліза [37]. У міру вдосконалення ферозондів змінювалися матеріали сердечників і удосконалювалися конструкції і схеми сенсорів.

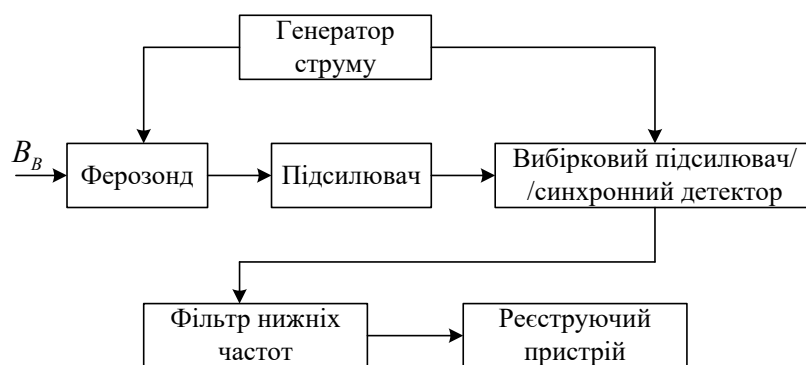


Рисунок 10 – Типова структурна схема ферозондового магніметра

На рис. 11 типові сучасні ферозондові перетворювачі FGM-3 компанії Speake & Co, їх розмір становить 62*16 мм. Дані перетворювачі використовуються, наприклад, в магніметрах для пошуку прихованих феромагнітних об'єктів під землею [37].



Рисунок 11 – Ферозондові перетворювачі FGM-3

Сучасні вимірювальні прилади з ферозондовими перетворювачами дозволяють вимірювати магнітну індукцію в діапазоні від 100 пТл до 1 мТл на частотах до 20 МГц, мають рівень власних шумів до 9 пТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ і нелінійність функції перетворення на рівні до 0,001%. Діапазон робочих температур може досягати від мінус 180°C до 220°C [38]. До недоліків вимірювальних приладів з ферозондами можна віднести великі габарити, велику споживану потужність і тепловиділення. Для мінімізації недоліків ферозондового сенсора у вимірювальних приладах, застосовують такі технології: КМОП-сенсори; сенсори з мікросоленоїдами; прилади на друкованій платі з котушками, виготовленими за допомогою доріжок і міжшарових отворів (так звані планарні ферозонди). КМОП-ферозонди виготовляються за технологією інтегральних схем. Такий підхід веде до зниження споживаної потужності до рівня АМР сенсорів і зменшення вартості сенсора. Ферозонд, виконаний за інтегральною технологією, показаний на рис. 12 [37, 38]. Використання інтегральної технології дозволяє створювати ферозондові сенсори з цифровим виходом за рахунок заміни аналогового синхронного детектора і фільтра нижніх частот на їх цифрові аналоги і використання аналого-цифрового перетворювача (АЦП).

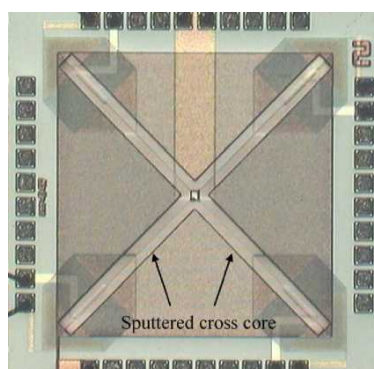


Рисунок 12 – КМОП-ферозонд



Однак, при виготовленні ферозондових сенсорів за цією технологією потрібно наплення феромагнітного матеріалу сердечника. Процес створення феромагнітних плівок з високою магнітною проникністю складний і вимагає спеціального дорогого обладнання. Матеріал сердечника повинен розташовуватися в одному з внутрішніх шарів, що знижує надійність подібних структур. Неоднорідність структури напленого сердечника призводить до зростання власних шумів і погіршення лінійності перетворення.

В роботі [13] наводиться опис КМОП-ферозонда який має коефіцієнт перетворення 92 В/Тл, рівень власних шумів 15 нТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ і споживану потужність 10мВт. В роботі [66] наводиться КМОП-ферозонд з коефіцієнтом перетворення 450В/Тл, рівнем власних шумів 7,4 нТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ і нелінійністю перетворення 1,15% в діапазоні ± 50 мкТл, споживана потужність 13,7 мВт. Котушки в КМОП-ферозондах мають принципово великий опір, сотні і тисячі Ом [13], і отже, велике тепловиділення. Сенсори з мікросолоїдами позбавлені такого недоліку. Вони виготовляються за технологією мікроелектромеханічних систем (МЕМС) з використанням ультрафіолетової фотолітографії для створення котушок і електроосадження для створення осердя. На рис. 13 представлений МЕМС-ферозонд описаний в роботі [38].

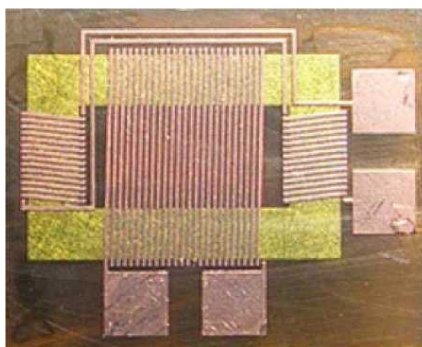


Рисунок 13 – МЕМС-ферозонд

В роботі [13] наводяться характеристики створеного МЕМС-ферозонду коефіцієнт перетворення 650 В/Тл, рівень власних шумів 32 нТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$, споживана потужність 14 мВт. Котушка збудження містить 56 витків і має опір 2 Ом, вимірвальна котушка складається з 11 витків. Досягнута роздільна здатність 1мкТл, яка є меншою ніж в АМР сенсорів. Виготовлення КМОП- і МЕМС-ферозондів вимагає наявності дорогого спеціалізованого обладнання та високої кваліфікації фахівців. Іншою перспективною технологією для



виробництва ферозондових сенсорів є технологія друкованих плат, по ній виготовляють так звані планарні ферозонди. Технологія друкованих плат давно використовується для створення тензосенсорів, акселерометрів та ін. Топологія сердечника формується аналогічно топології котушок за допомогою фотолітографії і травлення. Так як при такому підході не відбувається напилення, механічної або термічної обробки матеріалу сердечника, він зберігає свої характеристики. Сучасна технологія виробництва друкованих плат дозволяє виготовляти провідники шириною 25 мкм і з такими ж відстанями між провідниками. Планарні ферозонди характеризуються низьким рівнем власних шумів, високою температурною стабільністю і досить високою роздільною здатністю [6, 13].

На рис. 14 показаний зовнішній вигляд прототипу планарного ферозонду [6, 13, 37]. Даний планарний ферозонд має наступні характеристики: коефіцієнт перетворення 241 В/Тл, рівень власних шумів 0,71 нТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ і нелінійністю перетворення 0,17% в діапазоні ± 100 мкТл, споживана потужність менше 5 мВт. Котушка збудження містить 30 витків і має опір 0,86 Ом, вимірювальна котушка складається з 54 витків і має опір 1,28 Ом. Роздільна здатність близько 100 нТл. У порівнянні з іншими технологіями (намотувальні, інтегральні схеми, і МЕМС) технологія друкованих плат дозволяє створювати мініатюрні сенсори потрібної топології високої якості. Вимірювальні прилади з планарними ферозондами мають меншу чутливість в порівнянні з приладами з традиційними намотувальними ферозондовими перетворювачами, але мають набагато менші енергоспоживання і тепловиділення, є мініатюрними, більш технологічні і прості у виготовленні.

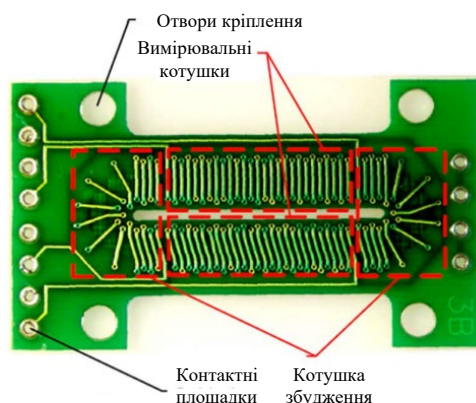


Рисунок 14 – Планарний ферозонд



1.6. Прилади з напівпровідниковими сенсорами

Одним із найпоширеніших напівпровідникових перетворювачів магнітного поля, який використовується у вимірвальних приладах, є елемент Холла (ЕХ), який являє собою пластину з напівпровідникового матеріалу, з чотирьох сторін якої розташовані контакти. Конструктивно перетворювачі Холла можуть бути виконані як у вигляді напівпровідникових структур, так і у вигляді дискретних елементів, розташованих в кристалі напівпровідникового матеріалу (рис.15), в тому числі і разом з електронною схемою обробки сигналу ЕХ [34-36].

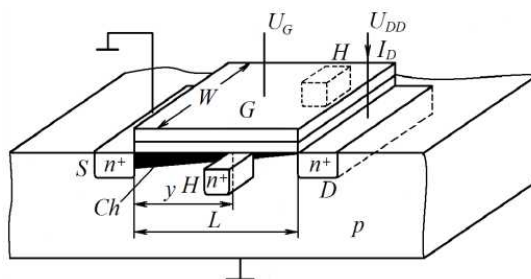


Рисунок 15 – Принципова структура польового елемента Холла [4]

Польовий елемент Холла (рис. 15) відрізняється від звичайного тим, що у звичайному ЕХ носії заряду забезпечуються самим матеріалом, а у польовому вони генеруються завдяки поверхневому ефекту поля. Напряга Холла в польовому елементі значно залежить від місця розташування холлівських контактів. Це пояснюється тим, що поле Холла при зменшенні концентрації носіїв заряду збільшується. На практиці оптимальне положення холлівських контактів визначається з умови $0,7 < y / L < 0,8$. Розрахована абсолютна чутливість такого ЕХ складає $280 \text{ V}/(\text{A}\cdot\text{T})$ [4]. Значним недоліком польового ЕХ є вплив поверхневої рекомбінації на напрягу Холла. Перетворювачі на основі ефекту Холла використовуються для вимірювання параметрів постійних, змінних та імпульсних магнітних полів, а також для визначення характеристик феромагнітних матеріалів. Суттєвим недоліком таких сенсорів є значна температурна залежність ЕРС Холла, висока залишкова напряга.

Іншим напівпровідниковим перетворювачем магнітного поля є магнітодіод (МД). Відмінність від звичайних напівпровідникових діодів полягає в тому, що МД (рис. 16, а, б, в) виготовляється з високоомного напівпровідникового матеріалу, провідність якого близька до власної, ширина бази d у кілька разів більша за дифузійну довжину пробігу носіїв L [4]. Перевагою МД є висока



питома магнітна чутливість при низьких напругах джерела живлення. Таким чином, ефект магнітоопору за рахунок зміни рівня інжекції підсилюється в сотні разів.

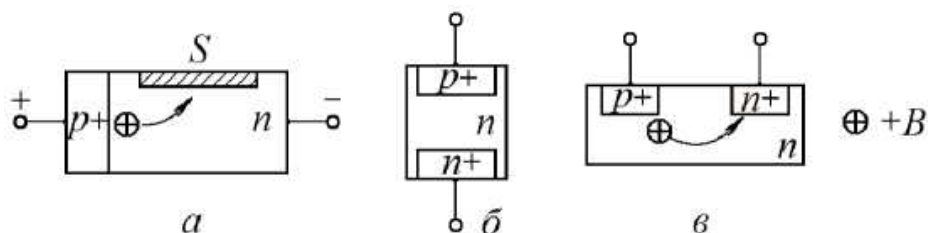


Рисунок 16 – Принципова структура магніодіодів: а - з областю високої швидкості рекомбінації, б - торцева структура, в - планарна структура

Наступним напівпровідниковим сенсором вимірювальних приладів є магнітотранзистор (МТ) - це транзистор, структура та параметри якого оптимізовані для отримання магнітної чутливості їх колекторних струмів. Дія магнітного поля на звичайні біполярні транзистори виявляється у викривленні траєкторії інжектованих із емітера носіїв заряду, що приводить до збільшення ефективної довжини бази та відхилення частини носіїв від колектора [4]. Роль останнього ефекту збільшується зі зменшенням ширини емітера та колектора, що забезпечує збільшення магніточутливості. Тому латеральна конструкція виявляє найбільшу магніточутливість. На рис. 16 зображена структура такого магнітотранзистора; пунктиром показана область об'ємного заряду колекторного р-п переходу.

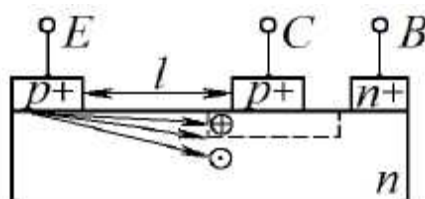


Рисунок 17 – Структура біполярного магнітотранзистора

На рис.17 лінії із стрілками вказують напрямок руху носіїв заряду: верхня - в магнітному полі $\oplus B$, нижня - в полі $\ominus B$, середня лінія - при $B = 0$. Двоколекторні магнітотранзистори (ДКМТ) характеризуються лінійною залежністю вихідного сигналу від індукції магнітного поля в широкому діапазоні значень магнітної індукції, чутливістю до напрямку магнітного поля і високою чутливістю, оскільки ДКМТ. При однакових робочих струмах, чутливість двоколекторних магнітотранзисторів на два-три порядки вища ніж



чутливість сенсорів Холла. Висока чутливість і лінійність характеристики при малих магнітних полях дозволяють використовувати магнітотранзистори як сенсори слабких магнітних полів (відтворюючі магнітних голівок, електронні компаси та ін.). При дії сильних магнітних полів чутливість зменшується за рахунок того, що всі носії вже перерозподілені. Біполярні магнітотранзистори мають великі значення керуючих струмів, високий рівень шумів [3].

Ще одним із напівпровідникових сенсорів магнітного поля вимірювальних приладів є магніточутливі польові транзистори (МПТ). Топологія двостокового магніточутливого польового транзистора зображена на рис. 18 [4]. Транзистор має два стоки, D1 та D2, які розташовані один біля одного та розділені ізолятором, тому струм витоку S розподіляється між обома стоками рівномірно. При дії зовнішнього магнітного поля перпендикулярно до поверхні транзистора носії заряду під дією сили Лоренца відхиляються в бік одного зі стоків (залежно від напрямку складової індукції B_z), внаслідок чого струм одного стоку збільшується, а іншого - зменшується.

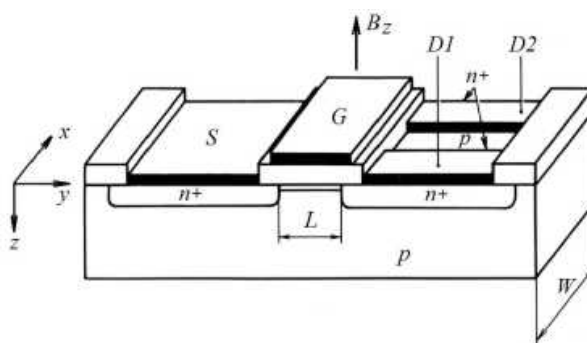


Рисунок 18 – Принципова структура двостокового магнітотранзистора

Відносна чутливість багатостокових магнітних сенсорів при малих значеннях магнітної індукції визначається як похідна відносного розбалансу струмів по магнітній індукції, взята при нульовій індукції. Через низьку холлівську рухливість носіїв в області каналу чутливість виявляється низькою (2...3%/Тл). Проте можна одержати високі значення абсолютної чутливості, якщо транзистор працює в режимі насичення з підключеними до стокових елементів високоомними резисторами навантаження. У такому випадку корисний сигнал є різницею напруг між двома стоками. До основних недоліків польових магнітотранзисторів відносять температурну залежність опору каналу. Проте такі вимірювачі характеризуються також низьким рівнем шумів, низькими керуючими струмами, високою швидкодією.



Ще одним класом гальваномагнітних сенсорів є магніотиристори. Будь-який тиристор можна розглядати як з'єднання транзистора з транзистором, причому колектор кожного із них з'єднаний із базою другого. На відміну від інших існуючих магнітних сенсорів, магніточутливі тиристори можуть бути використані і як магнітокеровані перемикачі, і як вимірювачі магнітного поля, забезпечуючи при цьому струми від десятків міліампер до сотень [3]. Магніточутливі симістори можуть виконувати ту ж роль, причому в обох напрямках провідності. Через невисоку абсолютну чутливість дискретні магніотиристори не знайшли широкого застосування і їх використовують переважно в інтегральних магнітних сенсорах [4].

При пошуку та аналізі сучасних досягнень було встановлено, що вдосконалення та розробкою таких вимірювальних приладів займаються в усіх розвинених країнах Європи, в Китаї, в США. Слід зазначити, що і українські науковці вносять свій вагомий вклад в даний напрямок [33-36].

1.7. Прилади з частотними перетворювачами

Одним із вдосконалень конструкції напівпровідникових сенсорів є використання напівпровідникового магніточутливого елемента в сенсорі з частотним виходом.

У сенсорах з частотним виходом (СЧВ), зміна частоти електричного інформативного сигналу на виході пропорційна інтенсивності зовнішньому впливу. Інтерес до розробки таких сенсорів зумовлений низкою особливостей і переваг перед традиційними сенсорами, що представляють вихідний сигнал у вигляді струму або напруги. Частотна форма вихідного сигналу забезпечує можливість організації заводо захищеного зв'язку з функціональними блоками апаратури. Це може бути дуже корисно для широкого ряду застосувань [3]. Прилади, які використовують такий метод перетворення, можуть мати порівняно невелику вартість, і при цьому бути високоточними передавачами даних. Крім того, метод перетворення значення фізичної величини в інформативну частоту дозволяє підвищити робочу частоту, підвищити роздільну здатність сенсорів, дозволяє спростити перетворення аналогового сигналу в цифровий, оскільки в деяких випадках це дає можливість відмовитися від використання блоків підсилення. Перетворення



інформативного сигналу в частоту дозволяє підвищити захищеність від завад та підвищити точність вимірювального приладу. Для застосування в реальних приладах та вимірювальних системах дуже важливим є форма вихідного сигналу СЧВ, оскільки сигнал, який передається у вигляді частоти, після квантування подається у вигляді двійкового коду [4]. Інформація, закодована в частоту, може бути передана на мікроконтролер, який реєструє цифрові імпульси та вимірює їх частоту через один із своїх вхідних портів. Ця особливість дає можливість використовувати мікроконтролери з обмеженою кількістю цифрових входів.

Найчастіше мікроелектронні сенсори з частотним виходом створюються з використанням напівпровідникових автогенераторних приладів або на використанні спеціальних коливальних схем, що входять до їх складу з чутливим елементом певного типу.

Дослідження в області створення вимірювальних перетворювачів магнітного поля спрямовані на покращення їх основних параметрів: підвищення чутливості, лінійності, стабільності, економічності, зменшення часу спрацювання, габаритів, ефективності інтеграції з мікропроцесорними засобами обробки вимірювальної інформації. Такі характеристики можна отримати на основі транзисторних структур з диференційним опором, в яких відбувається перетворення значення індукції магнітного поля у інформативну частоту [34, 35]. Проте такий напрямок створення вимірювальних перетворювачів магнітного поля не досить досліджений, це стосується як самих схемотехнічних рішень, так і дослідження характеристик первинних перетворювачів магнітного поля.

У літературі описуються сенсори з частотним виходом на основі осциляторного ефекту. Осцилятор - напівпровідниковий зразок, який генерує близькі до синусоїдальних коливання змінного струму при приміщенні його в магнітне поле, вектор індукції якого паралельний протікаючому струму [34]. Виникнення коливань пов'язано з явищем гвинтової нестійкості електронно-діркової плазми в напівпровідниках, поміщених в магнітне поле, вектор якого збігається з напрямком протікаючого струму. Частота і амплітуда коливань змінюються відповідно до зміни вимірюваної величини. На частоту генерації впливають такі чинники як: температура, магнітне поле, електричне поле в зразку, кут між векторами електричного і магнітного поля [35].

Таким чином, сенсори з частотним виходом на основі осциляторів можуть



мати високу чутливість, однак режими високої чутливості досягаються при високих напругах живлення осциляторів, або низьких робочих температурах. Крім того, при вимірюваннях виникають похибки, пов'язані з флуктуаціями температур. Ще одним недоліком є те, що осциляторний режим досягається тільки при впливі на чутливий елемент поздовжнього магнітного поля, що обумовлює необхідність використання в конструкції сенсорів спеціальних магнітних систем. Перераховані вище недоліки обмежують широке використання сенсорів з частотним виходом на основі осциляторів

У роботі [35] розглянуті приклади сенсорів зовнішнього впливу з частотним виходом на основі різних схем автогенераторів. Частота електричних імпульсів на виході автогенераторних схем змінюється пропорційно інтенсивності зовнішнього впливу на частину елементів або окремих елементів схеми. В основі функціонування описаних сенсорів з частотним виходом лежать ефекти зміни електрофізичних параметрів, що входять до складу схеми біполярних, польових транзисторів і інших елементів під впливом магнітного поля.

Прилади з сенсорами на основі автогенераторних схем характеризуються простотою конструкцій, мають високу чутливість, можуть бути виконані в інтегральному виконанні. На відміну від приладів з сенсорами на основі осциляторів вони не вимагають вбудованої магнітної системи, яка забезпечує генерацію коливань. Оскільки такий метод побудови вимірювальних приладів має очевидні переваги, то в даній роботі досліджується його застосування.

Окремої уваги заслуговують сенсори, які використовують схеми транзисторних аналогів негатронів. Перспективи цього напряму викладено в [34, 35]. Транзисторні аналоги негатронів не вимагають застосування зовнішніх елементів в колі позитивного зворотного зв'язку, ці зв'язки є внутрішніми [36]. Крім того, генератори, реалізовані на аналогах негатронів, вимагають мінімального використання реактивних елементів (конденсаторів, котушок), що робить зручним їх застосування в мікроелектроніці. Як чутливі елементи в схемах сенсорів на аналогах негатронів можуть бути використані різні чутливі елементи від терморезисторів до елементів Холла, включені безпосередньо в схему генератора і визначають його вихідну частоту в залежності від амплітуди прикладеного зовнішнього впливу [34-36].

Таким чином, вимірювальні прилади з сенсорами з частотним виходом на основі схем аналогів негатронів характеризуються високою чутливістю і



простотою виконання. Незважаючи на очевидні переваги зазначених приладів з сенсорами зовнішніх впливів з частотним виходом на основі схем аналогів негатронів, слід відзначити, що для зміни основної частоти генерації електричних імпульсів на виході сенсора необхідно змінювати номінали компонентів, що входять до складу схеми, що спричиняє складність практичної реалізації.

Висновки

Аналіз публікацій та патентів, присвячених приладам вимірювання параметрів магнітного поля показує, що розробка приладів з радіовимірювальними частотними перетворювачами, які реалізують принцип перетворення "індукція магнітного поля-частота", є перспективним напрямком, оскільки в цьому випадку реалізуються високі економічні та метрологічні показники приладів та можлива технологічна сумісність з мікроелектронними приладами обробки інформації. Використання від'ємного опору напівпровідникових частотних перетворювачів компенсує втрати енергії в коливальному контурі, що значно підвищує чутливість таких сенсорів, що дозволяє використовувати їх при малих значеннях індукції магнітного поля та забезпечувати високу чутливість. Ще однією перевагою таких вимірювальних приладів є можливість зменшення абсолютної похибки за рахунок математичного корегування розрахункової формули в процесі вимірювання.