

**Цінг Жао**ТОВ «Шаосин вейхуа електронік сайнс & технолоджи Ко», [orcid.org/0000-0001-8518-9188](https://orcid.org/0000-0001-8518-9188)

КНР, Вейхуа

**ДАТЧИКИ СЛАБКИХ МАГНІТНИХ ПОЛІВ І MEMS-КОМУТАТОРИ**

***Анотація.** Проведено огляд сучасних датчиків для вимірювання слабких постійних і повільно змінних магнітних полів показує, що за сукупністю розглянутих характеристик ферозондові перетворювачі і магнітометри на їх основі є найбільш переважними для вимірювання слабких постійних магнітних полів і використання в складі систем орієнтації, стабілізації, навігації, в комплексах для пошуку феромагнітних об'єктів. Описано новий клас приладів – мікромеханічного комутаційного елемента, керованого зовнішнім магнітним полем, виготовленого за MEMS-технологією. Детально представлена конструкція приладу, принцип роботи, особливості управління та використання його в різних датчиках положення. Представлені дані показують, що магнітокерований MEMS-комутатор є малогабаритним перспективним приладом, який поєднує переваги функціональних аналогів – герконів і датчиків Холла.*

**Ключові слова:** датчики магнітних полів; MEMS-технології

**Актуальність теми**

Вимірювання магнітної індукції як характеристики магнітного поля є однією з найважливіших задач в області створення і забезпечення функціонування систем навігації, орієнтації і стабілізації; екранування квантових комп'ютерів, магнітної томографії, дефектоскопії і неруйнівного контролю виробів, а також реалізації систем безпеки і охорони різних об'єктів. Засоби вимірювання магнітного поля високої точності використовуються також при пошуку і виявленні магнітних аномалій в космосі, в повітряному, підводному, надводному та підземному середовищах, при геофізичному і геологічному моніторингу, вимірюванні великих струмів і т.д.

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). Залежно від області застосування магнітометра і величини вимірюваного магнітного поля виникає проблема вибору того чи іншого первинного вимірювального перетворювача магнітного поля (датчика магнітного поля).

Розвиток сучасних мобільних робототехнічних комплексів як наземного, так підводного і космічного призначення вимагає випереджаючої розробки магнітометрів з високою роздільною здатністю для вимірювання слабких магнітних полів і використання у складі систем навігації, орієнтації і стабілізації. У зв'язку з інтенсивним освоєнням шельфу актуальним завданням є проблема вимірювання слабких магнітних полів при пошуку і відстеженні магнітних аномалій, таких, як невибухнувші авіабомби і артилерійські снаряди, міни, підводні нафто- і газопроводи, броньовані

кабелі та інші об'єкти. При цьому пошук повинен проходити в умовах впливу, як нормального магнітного поля Землі, так і різного роду природних магнітних аномалій.

Для вимірювання слабких постійних і повільно змінних магнітних полів в даний час застосовуються магніторезистивні перетворювачі, на основі ядерно-магнітного резонансу, сквіди і ферозондові перетворювачі. Завдяки компактності, невисокій вартості, широкому робочому температурному діапазону, низькому рівню шумів, можливості вимірювання напряму магнітного поля ферозондові перетворювачі і магнітометри на їх основі є найбільш переважними.

**Виклад основного матеріалу****Датчики для вимірювання магнітних полів**

Вимірювання магнітних полів є найважливішим завданням в галузі космічних і геофізичних досліджень [1 – 4], функціонування систем навігації, орієнтації і стабілізації [5 – 9], в системах екранування квантових комп'ютерів [10 – 12], магнітної томографії, відображень функцій головного мозку, дефектоскопії та неруйнівного контролю виробів [13 – 16], а також в системах охорони периметра [17]. Засоби вимірювання магнітного поля високої точності використовуються під час пошуку і виявленні магнітних аномалій, вимірюванні струмів, в стільникових телефонах, ноутбуках і т.д. [18 – 19].

Силовою характеристикою магнітного поля є вектор магнітної індукції. А засіб вимірювань модуля вектора магнітної індукції або його складових відповідно ДСТУ 24284 називається магнітометром [20].

У таких сферах як мікромагнітне сканування або неруйнівний контроль, єдиним критерієм вибору часто є розмір датчика. При пошуку і виявленні магнітних аномалій на великих відстанях важливішим параметром є шум і роздільна здатність [22]. При вирішенні завдань навігації, орієнтації і стабілізації на перший план виходять лінійність, температурні коефіцієнти і чутливість до поперечного поля [23]. При вимірюванні магнітного поля квантового чіпа особливого значення набуває тепловиділення і працездатність датчика при наднизьких температурах.

Таким чином, завдання вибору підходящого датчика магнітного поля для магнітометра не є тривіальною.

Датчик магнітного поля є основним елементом будь-якого магнітометра і призначений для перетворення магнітної індукції  $B$  в електричний сигнал, найчастіше в напругу  $U$ . При створенні датчиків магнітного поля використовуються різні фізичні ефекти, наприклад, Холла, Гаусса, Обіцяючи, і ін. [24 – 27].

Основними характеристиками датчиків магнітного поля є: діапазон вимірювань; лінійність; гістерезис; похибка перетворення магнітної індукції (в тому числі залежність від температури); зміщення; довготривала стабільність; шум; діаграма спрямованості; чутливість до поперечного поля; частотний діапазон вимірювань; геометричні розміри

датчика; споживана потужність; тепловиділення; діапазон робочих температур.

Залежно від використовуваного ефекту датчики магнітного поля поділяються на типи, показані на рис. 1.

Перетворювачі Барнетта і віброзонди вміщують електромеханічний привід, обертальні та коливальні частини, що збільшує їх розміри і ускладнює конструкцію, тому в даний час вони практично не застосовуються.

Розглянемо особливості реалізації та характеристики сучасних датчиків для вимірювання слабких постійних і повільно змінних магнітних полів, представлені на рис. 1.

*Магніторезистивні датчики.* Для вимірювання слабких магнітних полів в широкому діапазоні температур найбільшого поширення набули магніторезистивні датчики. Принцип дії магніторезистивних датчиків заснований на ефекті зміни електричного опору матеріалу в магнітному полі. Магніторезистивні датчики можуть бути виготовлені із застосуванням інтегральних технологій, що істотно зменшує їх розмір і вартість [1].

Температурний відгук магніторезисторів залежить від матеріалу легуючих домішок. Як правило, зі збільшенням температури опір зменшується, а після застосування магнітного поля зменшення відбувається швидше.

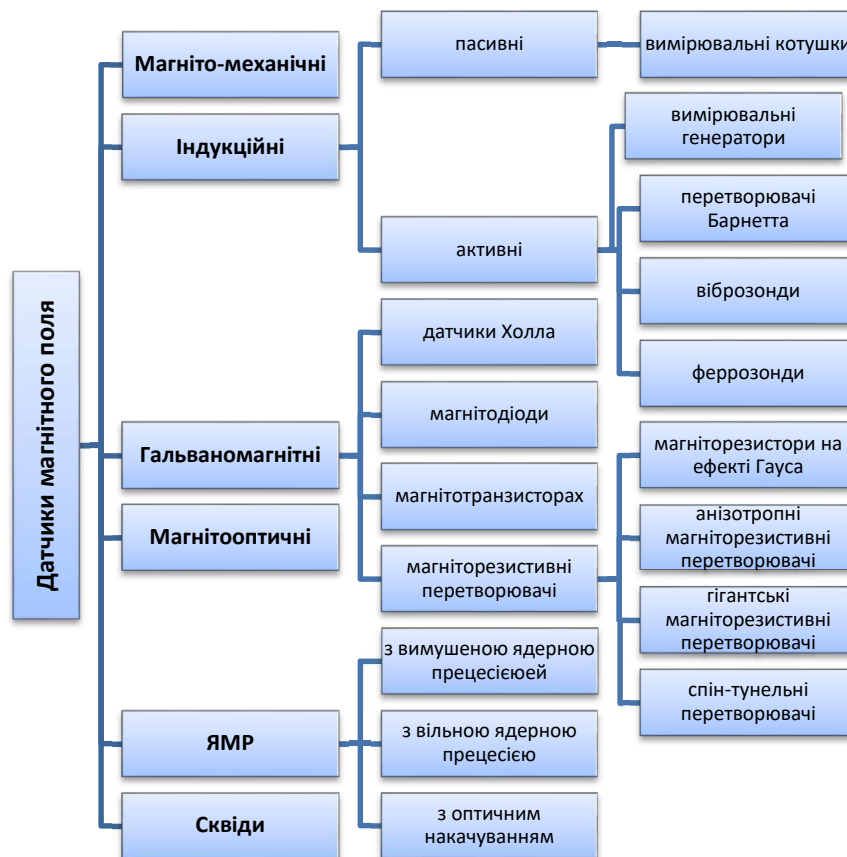


Рисунок 1 – Види датчиків магнітного поля

Магніторезистори мають низькі шуми, які не схильні до дії поверхневих ефектів і характеризуються дуже малим старінням.

Залежно від фізичного ефекту і матеріалу розрізняють такі магніторезистивні датчики:

- магніторезистори на ефекті Гауса;
- анізотропні магніторезистивні датчики (АМР);
- гігантські магніторезистивні датчики (ГМР);
- спин-тунельні магніторезистивні датчики (СТМР).

*Магніторезистори на ефекті Гауса.* Ефект Гауса полягає в зміні електричного опору магніточутливого матеріалу внаслідок викривлення траєкторії руху носіїв заряду під дією зовнішнього магнітного поля. При приміщенні магніточутливого матеріалу в магнітне поле його опір збільшиться.

Більшість магніторезисторів на ефекті Гауса дозволяють вимірювати постійні і змінні магнітні поля до 1 МГц в діапазоні від 1 мТл до 1 Тл при розсіюється до 1 Вт в діапазоні робочих температур від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+110^{\circ}\text{C}$ . Температурний коефіцієнт чутливості типового датчика на ефекті Гауса варіюється в межах  $2\% / ^{\circ}\text{C} - 0,02\% / ^{\circ}\text{C}$  [27].

*Перевагами* магніторезисторів на ефекті Гауса є малі габарити і низька вартість.

*Недоліками* магніторезисторів на ефекті Гауса є низька чутливість, нелінійність характеристики перетворення, висока залежність від температури, зміна чутливості магніторезистивного елемента при зміні кута між вектором магнітної індукції і площиною елемента, досить велика розсіювальна потужність.

*Анізотропні магніторезистивні датчики (АМР).* АМР датчики основані на анізотропному магніторезистивному ефекті, який є прямим наслідком спин-орбітальної взаємодії в феромагнітних провідниках і полягає в зміні електричного опору феромагнітного провідника залежно від зміни кута  $\alpha$  між струмом, що протікає  $I$  і вектором намагніченості  $M$ . Принцип анізотропного магніторезистивного ефекту показаний на рис. 2.

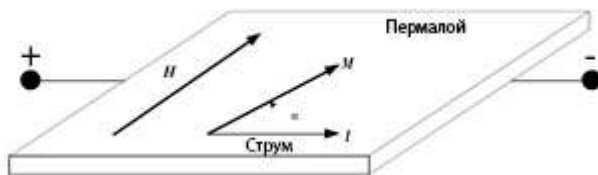


Рисунок 2 – Принцип анізотропного магніторезистивного ефекту

Зовнішнє магнітне поле  $H$  повертає вектор намагніченості  $M$  на кут  $\alpha$  і змінює електричний опір відповідно до вираження:

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

де  $R_0$  – базовий опір АМР-датчика, Ом;  
 $R$  – максимальна зміна опору, Ом.

З формули (1) випливає, що кутку  $\alpha=90^{\circ}$  відповідає мінімальний опір, а кутку  $\alpha=0^{\circ}$  (за відсутністю магнітного поля) – максимальне значення опору, що дорівнює базовому опору  $R_0$ , до якого додається максимальний опір  $R$ , що становить від 2% до 3% від базового.

З формули (1) випливає також, що залежність опору від величини вимірюваного магнітного поля носить нелінійний характер. Для вирішення цієї проблеми в АМР-датчиках використовують структуру, в якій алюмінієві смуги напилюють на пермалой під кутом  $45^{\circ}$ , тим самим змінюючи напрямок струму на  $45^{\circ}$  і наближаючи функцію перетворення до лінійної.

Більшість АМР-датчиків 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  $10 \text{ нТл}/\sqrt{\text{Гц}}$ , споживана потужність від 0,1 до 0,5 мВт, нелінійність функції перетворення на рівні 0,1%. АМР можуть працювати в діапазоні температур від  $-55^{\circ}\text{C}$  до  $+200^{\circ}\text{C}$ .

Температурний коефіцієнт чутливості типового АМР-датчика складає від  $0,25\%/^{\circ}\text{C}$  до  $0,01\%/^{\circ}\text{C}$ . Температурний коефіцієнт зміщення становить близько  $10 \text{ нТл}/^{\circ}\text{C}$ , і варіюється навіть між екземплярами датчиків однієї партії [23].

Для підвищення точності вимірювання магнітного поля АМР-датчика включають по мостовій схемі і застосовують зворотний зв'язок для компенсації вимірюваного магнітного поля. Для цього в АМР-датчики вбудовують плоску котушку зворотного зв'язку. Такий підхід дозволяє підвищити поріг чутливості і лінійність, але при цьому значно звужується частотний діапазон.

Вихідна напруга  $U$  в АМР-датчиках залежить не тільки від вимірюваної компоненти вектора магнітної індукції  $B_x$ , але і від компоненти  $B_y$ , перпендикулярної напрямку вимірювання. Для компенсації похибки від поперечного поля застосовують різні способи, наприклад, магнітну зворотний зв'язок, одночасне вимірювання двох або трьох компонент вектора магнітної індукції з подальшою цифровою обробкою і ін. Проте для реалізації прецизійних способів компенсації необхідні складні аналого-цифрові схеми, які мають як високе енергоспоживання, так і тепловиділення. Прості схемні рішення знижують чутливість датчиків і збільшити рівень шумів [23].

Розвитку АМР-датчиків сприяла необхідність замінити індуктивні головки зчитування інформації у жорстких дисках. В цій якості пізніше вони були замінені ГМР- і СТМР-датчиками, оскільки ті володіють більш високою щільністю зберігання інформації завдяки меншим розмірам.

Перевагами АМР-датчиків є наявність осі чутливості, довгий термін служби і незалежність від

магнітного дрейфу. Вони володіють невеликими розмірами, наприклад датчик компанії Honeywell HMC1021S має розміри 5×4×2 мм, можуть працювати в широкому діапазоні температур, мають низьке енергоспоживання і відносно дешеві.

До недоліків АМР-датчиків слід віднести низьку порогову чутливість і високий рівень шуму. Крім того, магніторезистивні датчики володіють великим виділенням тепла, пов'язаним з розсіюванням енергії в резистивному елементі.

Гігантські магніторезистивні датчики (ГМР). ГМР-датчики засновані на гігантському магніторезистивному ефекті (квантово-механічний ефект), що спостерігається в тонких металевих плівках та складаються із феромагнітних і провідних немагнітних шарів. Ефект полягає в істотній зміні електричного опору такої структури при зміні взаємного напрямку намагніченості сусідніх магнітних шарів, як показано на рис. 3.

Основним механізмом виникнення ГМР-ефекту є спин-залежне розсіювання електронів провідності. У ферромагнетичі електрони з одним напрямком спина 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 опору, 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 відчують сильне розсіювання в одних шарах і слабке в інших. Отже, при паралельній намагніченості шарів опір, як правило, низький, а при антипаралельній – висока.

В якості елемента на основі ефекту ГМР як правило використовується структура, що отримала назву спіновий клапан (spinvalve). У ній один з магнітних шарів нанесений на шар антиферомагнетика. Завдяки обмінній взаємодії між електронами феромагнетика і антиферомагнетика спини в цих двох шарах стають жорстко пов'язаними між собою.

ГМР-датчики характеризуються малими розмірами і великою зміною опору під впливом магнітної індукції, ніж АМР-датчики. У той час як зміна опору АМР-датчика не перевищує 3%, ГМР-матеріали забезпечують зміну від 10% до 20%. Крім цього, ГМР-датчики виготовляються за технологією, розробленою для виробництва напівпровідників, що зменшує собівартість датчиків. Сьогодні кращі ГМР-датчики здатні вимірювати поля від 10 нТл до 0,1 Тл.

Фірма Hitachi розробила ГМР-датчики з поліпшеною температурною стабільністю. У цих датчиків в діапазоні температур від -40° С до +120°С чутливість змінюється всього на 20%, крім того, вони здатні працювати при температурі 250°С протягом 30 хвилин [23].

Перевагами ГМР-датчиків 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.

До недоліків можна віднести те, що діаграма спрямованості має деформацію, при цьому сильні магнітні поля, особливо при високих температурах, здатні зруйнувати спину клапан через зміни в намагніченості з'єднувального шару. Така небезпека не загрожує АМР-датчикам [23].

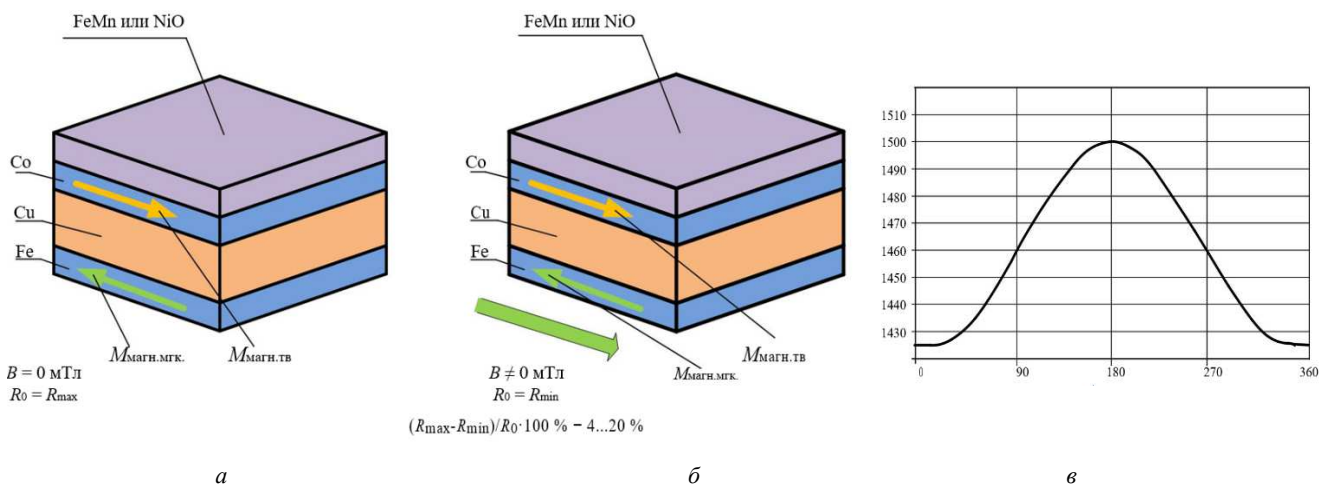


Рисунок 3 – Принцип гігантського магніторезистивного ефекту:

- а – антипаралельними напрямком векторів намагніченості приколоти і регульованого шарів (кут  $\alpha \geq 180^\circ$ ) – стан з максимальним опором;
- б – паралельне стан шарів (кут  $\alpha \geq 0$ ) – стан з мінімальним опором;
- в – графік залежності опору від напрямку прикладеного поля (кута  $\alpha$  між рухомим і рухливим шарами)

Спін-тунельні магніторезистивні датчики (СТМР). СТМР-датчики засновані на спін-тунельному магніторезистивному ефекті, який аналогічний гігантському магніторезистивному ефекту, де замість немагнітного металу феромагнітні шари розділені шаром діелектрика. Якщо шар діелектрика досить тонкий, проявляється тунельний ефект. Імовірність тунелювання електрона через потенційний бар'єр сильно залежить від взаємної орієнтації намагніченностей шарів, тому в англомовній літературі цей ефект називається «spin-dependent tunneling» (SDT).

Вимірний опір обернено пропорційний ймовірності тунелювання через тонкий ізолюючий бар'єр [1]. 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 опір до 600% при кімнатній температурі. Завдяки високому опору СТМР-датчики мають менше енергоспоживання, ніж ГМР-датчики. Однак проблемою СТМР-датчиків залишається висока коерцитивна сила і нелінійність. Так цифровий магнітометр з СТМР-датчиком, має розширення 1 мкТл і лінійний діапазон вище 1 мТл [23].

Перевагами СТМР-датчиків є малі габарити і, отже, висока просторова роздільна здатність, низьке енергоспоживання, можливість роботи в широкому діапазоні температур, довговічність, низька вартість [23].

До недоліків СТМР-датчиків відносяться невисока чутливість, нелінійність в широкому діапазоні вимірювань, високий рівень шуму і тепловиділення.

**Конструкція MEMS-перемикача MS1.** Магнітоуправляемий мікроперемикач, виготовлений на основі MEMS-технології, має всі переваги MEMS-пристроїв: мініатюрність, простота виготовлення, можливість інтеграції в мікроелектронні схеми і невисока вартість при великосерійному виробництві.

Мікроперемикач MS1 складається з виконавчого механізму і електричних контактів, укладених в герметичний кремнієвий корпус (рис. 4). Кремнієвий корпус приладу включає в себе кремнієву підкладку, на якій розташований виконавчий механізм і кремнієвий ковпачок. Виконавчий механізм складається з рухомої феромагнітної пластини (якоря) з магнітомягкого гальванічного сплаву FeNi (Ni 80%, Fe 20%) товщиною 8 мікрон, прикріпленою за допомогою гнучких торсіонних важелів до кремнієвої підкладки, попередньо вкритої ізолюючим шаром. Феромагнітна пластинка містить рухливий електричний контакт 1, покритий шаром рутенію, який має товщину близько 100 нм. Використання нанорозмірного рутенієвого покриття дозволяє істотно збільшити ресурс роботи комутатора

(за критерієм залипання контактів) в порівнянні з золотими контактами без покриття. На ізоляційній підкладці також розташовані нерухомий електричний контакт 2 з аналогічним рутенієвим нанопокриттям і провідники із золота товщиною 1 мкм. Підкладка і ковпачок з'єднані герметизуючим кільцем. У кремнієвому SMD-корпусі (для поверхневого монтажу) виконані наскрізні струмопровідні канали (TSV), що з'єднуються з контактними майданчиками для поверхневого монтажу (SMT), виконаними з евтектичного сплаву AuSnCu.

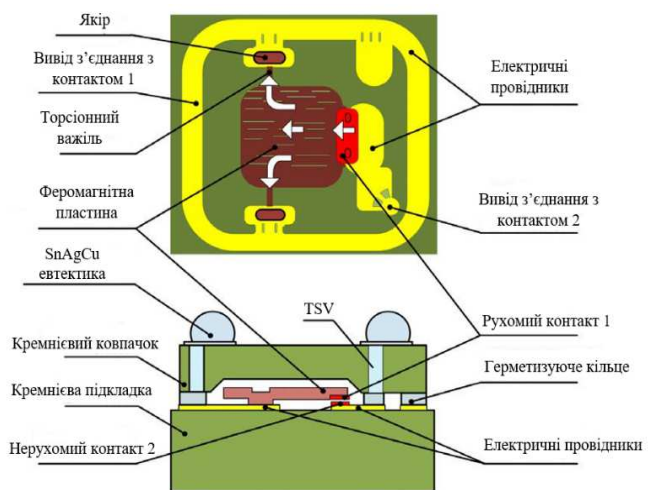


Рисунок 4 – Конструкція MEMS-перемикача MS1

### Принцип роботи

Принцип роботи MEMS-перемикача MS1 істотно відрізняється від принципу роботи герконів і датчиків Холла. Замикання і розмикання контактів MS1 відбувається за рахунок переорієнтації феромагнітної пластини датчика уздовж ліній зовнішнього магнітного поля. Отже, стан перемикача визначається лінією орієнтації магнітного поля, а не тільки його силою, як у випадку з герконом або датчиком Холла. Тому для стабільної роботи перемикач повинен завжди перебувати під впливом магнітного поля. На рис. 5 представлена схематична ілюстрація роботи приладу.

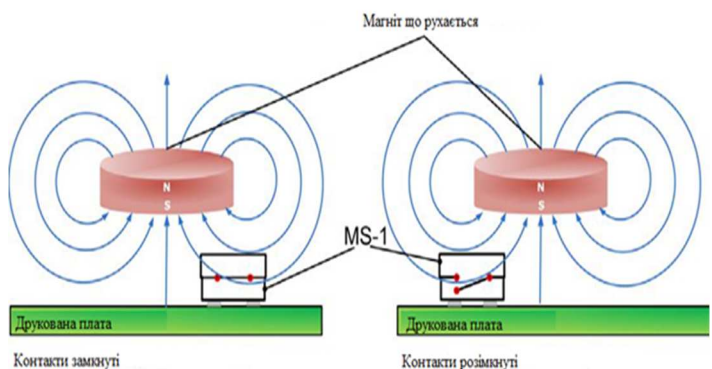


Рисунок 5 – Схематична ілюстрація роботи мікроперемикача

Видно, що при переміщенні постійного магніту щодо перемикача змінюється напрямок ліній магнітного поля всередині датчика, і контактна феромагнітна пластина, закріплена на гнучких торсіонних важелях, повертається, замикаючи або розмикаючи контакти. Комутація контактів відбувається в точці перетину медіаною магніта центру перемикача.

*Нанорозмірне покриття контактів MEMS-комутатора MS-1.* Ресурс роботи і експлуатаційні характеристики (перш за все, опір в замкнутому стані) будь-яких комутаційних приладів, включаючи MEMS-комутатори, в основі конструкції яких лежить «сухий контакт», визначаються властивостями контактного покриття. З метою підвищення ресурсу роботи і зниження контактного опору в MEMS-комутаторах MS-1, в якості контактної покриття використовується шар рутенію товщиною 100 нм, що формується з використанням PVD-технології, що дозволяє отримати високу ступінь хімічної чистоти і гладкості покриття. Обрана товщина рутенієвого покриття рівна 100 нанометрів, виходячи з вимог досягнення балансу між ерозійною стійкістю (зростає зі збільшенням товщини) і напругою покриття (чим тонше, тим менше внутрішньої напруги, велика товщина контактної покриття може стати причиною виходу MEMS-комутатора з ладу через відшарування покриття при комутації великих струмів).

Перед початком випробувань всі MEMS-комутатори мали електричний опір в замкнутому

стані менше 1 Ом. Використовувався режим гарячої комутації (напруга, що комутується 3 В, струм 10  $\mu$ А, резистивне навантаження, частота комутації 100 Гц). Випробування завершувалися після 100 млн циклів комутацій. Всі випробувані MEMS-комутатори (20 штук) в ланцюг включалися однаково чиним, при якому на рухливий контакт підводився позитивний потенціал, а на нерухомий – негативний.

## Висновки

Проведений огляд сучасних датчиків для вимірювання слабких постійних і повільно змінних магнітних полів показує, що за сукупністю розглянутих характеристик ферозондові перетворювачі і магнітометри на їх основі є найкращими для вимірювання слабких постійних магнітних полів і використання в складі систем орієнтації, стабілізації, навігації, в комплексах для пошуку феромагнітних об'єктів. У публікаціях відсутні аналітичні вирази, що описують роботу ферозондів незалежно від форми сигналу збудження і способу апроксимації середньої кривої намагнічування сердечника для аналізу чутливості на будь-який з гармонік. Одне з основних напрямів вдосконалення ферозондових магнітометрів є підвищення чутливості, яке може здійснюватися за рахунок вибору оптимальних амплітуди, частоти, форми сигналу збудження і алгоритмів обробки вимірювальної інформації з виходу датчика.

## Список літератури

1. Ripka, P. *Magnetic Sensors and Magnetometers* / P. Ripka. – Boston: Artech house, 2000. – 494 p.
2. Афанасьев, Ю.В. *Средства измерений параметров магнитного поля* / Ю.В. Афанасьев, Н.В. Студенцов, В.Н. Хорев, Е.Н. Чечурина, А.П. Щелкин. – Л.: Энергия. Ленингр. Отделение, 1979. – 320 с.
3. Петрукович, А.А. *Первые советские космические эксперименты в 1957– 1959 гг.: история и результаты* / А.А. Петрукович, Т.М. Мулярчик, С.В. Васюков, М.И. Веригин, Г.А. Котова, В.А. Стяжкин // *История наук о Земле*. – 2009, Т.2, № 4. – С. 5-24.
4. Carr, C. *The Double Star magnetic field investigation* // *Ann. Geophys.* – 2005.– № 23. – P. 2713-2732.
5. Бараночников, М.Л. *Микромагнитозлектроника* / М.Л. Бараночников. – М.: ДМК Пресс, 2001. – Т. 1, – 544 с.
6. Nava Can, *Uğur Topal Design of Ring Core Fluxgate Magnetometer as Attitude Control Sensor for Low and High Orbit Satellites* // *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism March*. – 2015. – Vol. 28, № 3. – P.1093-1096.
7. Гормаков А.Н., Ульянов И.А., Федулов А.В. *Комплекс для проверки магнитометров скважинных инклинометров в полевых условиях* // *НТВ «Каротажник»*. – Тверь: АИС, 2014. – Вып. 239. – С. 61-67.
8. *Скважинный магнитометр-инклинометр МИ-3803М [Электронный ресурс]* / Ю.Г. Астраханцев. – Режим доступа: <http://www.igeoph.net/Documents/Well/MI-3803.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
9. Казаков, А.В. *Магнитогирскопическая система – достойный соперник гравитационной системы ориентации на малых спутниках [Электронный ресурс]* / А.В. Казаков – Режим доступа: <http://jurnal.vniiem.ru/text/100/13.pdf>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
10. Johnson M.W., Amin M.H.S., Gildert S., et al., *Quantum annealing with manu-factured spins* // *Nature*. – 2011. – Vol. 473, № 7346. – P. 194-198.121
11. Uchaikin S., Likhachev A., Cioata F. *Sample 3D magnetometer for a dilution re-frigerator* // *Proc. of the 26th Intern. Conf. on Low Temperature Physics (LT26)*. – Bei-jing, 2011.
12. Uchaikin S.V. *Fluxgate Magnetometer for Cryogenics* // *In Proc. of the 21st International Conference on Low Temperature Physics (LT21), Czechoslovak Journal of Physics*, 1996, P. 2809.

13. Щербаков Г.Н., Анцелевич М.А., Удинцев Д.Н., Шлыков Ю.А., Бровин А.В. Применение магнитной томографии в проходных металлодетекторах // *Специальная Техника*. – 2007. – № 6. – С. 20-25.
14. Суханов, Д.Я. Магнитная интроскопия с использованием решетки датчиков магнитного поля / Д. Я. Суханов, Е. С. Берзина // *Известия высших учебных заведений. Физика*. – 2013. – Т. 56, № 8/2. – С. 23-26.
15. Винокуров, Б.Б. Измерение неэлектрических величин: учебное пособие / Б.Б. Винокуров, Г.В. Вавилова, И.Л. Клубович. – Томск: Томский политехнический университет, 2008. – 290 с.
16. Марусина М.Я. Современные виды томографии: учебное пособие / М.Я. Марусина, А.О.Казначеева. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. – 132 с
17. Магнитомерические датчики для охраны периметров [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.infotel-sec.ru/news/magnetic-sensors-for-the-protection-of-the-perimeter/>, свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.
18. Baschiroto, A.A. 2D-micro-fluxgate earth magnetic field measurement systems with fully automated acquisition setup // *Measurement*. – 2010. – Vol.43. – P. 46–53.
19. Butta M., Ripka P. Model for coil-less fluxgate // *Sensors and Actuators*. – 2009. – Vol.156, № 11. – P. 269-273.
20. ГОСТ 24284– 80 Гравиразведка и магниторазведка. Термины и определения. – М.: Издательство стандартов, 1980. – 18 с.
21. Магнитное поле [Электронный ресурс]. – Физическая энциклопедия. – Режим доступа: [http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_physics/1564/МАГНИТНОЕ](http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_physics/1564/МАГНИТНОЕ), свободный. – Загл. с экрана. – Яз. рус.122
22. Щербаков Г.Н., Анцелевич М.А., Удинцев Д.Н. Пути повышения помехоустойчивости магнитомерических средств поиска и их практическая реализация // *Специальная техника*. – 2005.– № 3.– С.19-24.
23. Ripka, P. *Advances in Magnetic Field Sensors* // *IEEE Sensors journal*. – 2010. – Vol. 10, N 6. – P.1108-1116.
24. Викулин И.М. Гальваномагнитные приборы / И.М. Викулин, Л.Ф. Викулина, В.И. Стафеев. – М.: Радио и связь, 1983. – 104 с.
25. Хомерики, О. К. Полупроводниковые преобразователи магнитного поля /О.К. Хомерики. – М.: Энергоиздат, 1986. – 136 с.
26. Егиазарян, Г.А., Магнитодиоды, магниторезисторы и их применение / Г.А. Егиазарян, В.И. Стафеев. – М.: Радио и связь, 1987. – 88 с.
27. Бараночников, М.Л. Микромагнитоэлектроника / М.Л. Бараночников. – М.: ДМК Пресс, 2002. – Т. 2. – 691 с.

Стаття надійшла до редакції 07.02.2019

## Qing Zhao

Shaoxing weihua electronic science & technology Co., Ltd, [orcid.org/0000-0001-8518-9188](http://orcid.org/0000-0001-8518-9188)  
China, Weihua

### SENSORS OF WEAK MAGNETIC POLES AND MEMS-COMMUTATORS

**Abstract.** This article provides an overview of modern sensors for measuring weak constant and slowly changing magnetic fields. The main characteristics of magnetic field sensors are highlighted. Magneto resistive transducers, transducers based on nuclear magnetic resonance and squids are described. Particular attention is paid to the flux-gate converter. The review of modern sensors for measuring weak constant and slowly varying magnetic fields shows that, in terms of the characteristics considered, flux-gate transducers and magnetometers based on them are most preferable for measuring weak constant magnetic fields and using as part of orientation, stabilization, navigation systems, complexes for the search for ferromagnetic objects. Considered one of the main directions of improvement of fluxgate magnetometers is to increase the sensitivity, which can be carried out by choosing the optimal amplitude, frequency, waveform of the excitation signal and algorithms for processing the measurement information from the sensor output. A description of a new class of devices – a micromechanical switching element controlled by an external magnetic field, manufactured using MEMS technology – is also given. The design of the device, the principle of operation, the features of control and use in various position sensors are presented in detail. The presented data show that the magnetically controlled MEMS switch is a small-sized promising device combining the advantages of functional analogs – reed switches and Hall sensors.

**Keywords:** magnetic field sensors; MEMS technologies

#### References

1. Ripka, P., (2000). *Magnetic Sensors and Magnetometers*. Boston: Artech house, 2000. – 494 p.
2. Afanasev, Yu.V., Studentsov, N.V., Horev, V.N., Chechurina, E.N., & Schelkin, A.P., (1979). *Means of measurement of magnetic field parameters*. Leningrad: Energy. Leningrad, Branch, 320 p.
3. Petrukovich, A.A. other. (2009). *The first Soviet space experiments in 1957–1959: history and results*. *History of Earth Science*. Vol.2, 4, 5-24.
4. Carr, C. (2005). *The Double Star magnetic field investigation* // *Ann. Geophys*, 23, 2713-2732.
5. Baranochnikov, M.L. (2001). *Micromagnet electronics*. Moscow: DMK Press, Vol. 1, 544 p.

6. Hava Can, Uğur Topal Design of Ring Core Fluxgate Magnetometer as Attitude Control Sensor for Low and High Orbit Satellites // *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism March*. – 2015. – Vol. 28, № 3. – P.1093-1096.
7. Gormakov, A.N., Ulyanov, I.A., & Fedulov, A.V., (2014). Complex for testing borehole inclinometers magnetometers in field conditions // *NTV “Karotazhnik”*. Tver: AIS, 2014. – Vol. 239, 61-67.
8. Borehole magnetometer-inclinometer MI-Z803M [Electronic resource] / Yu.G. Astrahantsev. – Access mode: <http://www.igeoph.net/Documents/Well/MI-3803.pdf>
9. Kazakov, A.V. The magnetoscopic system is a worthy opponent of the gravitational orientation system on small satellites. [Electronic resource] – Access Mode: <http://jurnal.vniim.ru/text/100/13.pdf>.
10. Johnson M.W., Amin M.H.S., Gildert S., et al., (2011). Quantum annealing with manu-factured spins. *Nature*. Vol. 473, 7346, 194-198.
11. Uchaikin S., Likhachev A., Cioata F. Sample 3D magnetometer for a dilution re-frigerator // *Proc. of the 26th Intern. Conf. on Low Temperature Physics (LT26)*. – Bei-jing, 2011.
12. Uchaikin S.V. Fluxgate Magnetometer for Cryogenics // *In Proc. of the 21st In-ternational Conference on Low Temperature Physics (LT21), Czechoslovak Journal of Physics*, 1996, P. 2809.
13. Scherbakov G.N., Antselevich M.A., Udintsev D.N., Shlyikov Yu.A., & Brovin A.V., (2007). The use of magnetic tomography in walk-through metal detectors // *Special Technique*, 6, 20-25.
14. Suhanov, D.Ya., & Berzina, E.S., (2013). Magnetic introscopy using a lattice of magnetic field sensors // *News of higher educational institutions. Physics*. Vol. 56, 8/2, 23-26.
15. Vinokurov, B.B., Vavilova, G.V., & Klubovich, I.L., (2008). Measurement of non-electrical quantities: a tutorial. Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 290 p.
16. Marusina, M.Ya., Kaznacheeva, A.O. (2006). Modern types of tomography: a textbook. – St. Petersburg: SPSU ITMO, 132 p.
17. Magnetometric sensors to protect the perimeters [Electronic resource] – Access Mode: <http://www.infotel-sec.ru/news/magnetic-sensors-for-the-protection-of-the-perimeter>
18. Baschiroto, A.A., (2010). 2D-micro-fluxgate earth magnetic field measurement systems with fully automated acquisition setup // *Measurement*. – Vol.43. – P. 46–53.
19. Butta M., Ripka P. Model for coil-less fluxgate // *Sensors and Actuators*. – 2009. – Vol.156, № 11. – P. 269-273.
20. GOST 24284–80 Gravity and magnetic prospecting. Terms and Definitions. Moscow: Publishing house of standards, 1980. – 18 p.
21. Magnetic field [Electronic resource]. – Physical encyclopedia. – Access mode: [http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc\\_physics/1564/МАГНИТНОЕ](http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_physics/1564/МАГНИТНОЕ)
22. Scherbakov, G.N., Antselevich, M.A., Udintsev, D.N., (2005). Ways to improve the noise immunity of magnetometric search tools and their practical implementation // *Special equipment*, 3, 19-24.
23. Ripka, P. Advances in Magnetic Field Sensors // *IEEE Sensors journal*. – 2010. – Vol. 10, N 6. – P.1108-1116.
24. Vikulin, I.M., Vikulina, J.I.F., & Stafeev, V.I., (1983). Galvanomagnetic devices. Moscow: Radio and communications, 104 p.
25. Homeriki, O.K. (1986). Semiconductor magnetic field converters. Moscow: Energy Publishing, 136 p.
26. Egiazaryan G.A., & Stafeev V.I. (1987). Magnetodiodes, magnetoresistors and their application. Moscow: Radio and communications, 88 p.
27. Baranochnikov, M.L. (2002). Micromagnet electronics. Moscow: DMK Press, Vol. 2, 691 p.

---

#### Посилання на публікацію

- APA Qing, Zhao, (2019). Sensors of weak magnetic poles and MEMS-Commutators. Management of development of complex systems, 37, 219 – 226, [dx.doi.org\10.6084/m9.figshare.9783290](https://doi.org/10.6084/m9.figshare.9783290).
- ДСТУ Цінг Жао. Датчики слабких магнітних полів і MEMS-комутатори [Текст] / Цінг Жао // Управління розвитком складних систем. – 2019. – № 37. – С. 219 – 226, [dx.doi.org\10.6084/m9.figshare.9783290](https://doi.org/10.6084/m9.figshare.9783290).