

Czujniki pola magnetycznego – stan obecny i kierunki rozwoju

Streszczenie. Przedstawiono porównanie najczęściej obecnie używanych czujników pola magnetycznego. Opisano główne właściwości czujników: indukcyjnego, transduktorowego, rezonansowego, SQUID, czujników magnetorezystancyjnych typu AMR, GMR i MTJ oraz hallotronów.

Abstract. (Magnetic field sensors – the review). The review and comparison of various magnetic field sensors is presented. The performances of most important sensors are described. Following sensor are presented in more details: induction sensors, fluxgate sensors, resonance sensors, SQUIDS, magnetoresistive AMR, GMR and MTJ sensors, Hall sensors.

Słowa kluczowe: czujniki, pole magnetyczne, czujniki pola magnetycznego.

Key words: sensors, magnetic field, magnetic field sensors.

Wstęp

Czujniki pola magnetycznego przetwarzają sygnał proporcjonalny do indukcji lub natężenia pola magnetycznego w powietrzu na sygnał elektryczny: napięcie, zmianę rezystancji, częstotliwość. Ponieważ indukcja pola magnetycznego w powietrzu lub próżni jest ściśle powiązana z natężeniem tego pola:

$$(1) \quad B = \mu_0 H$$

(gdzie $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am), to jest w zasadzie obojętne w jakich jednostkach pole magnetyczne jest mierzone. Spotyka się magnetometry wyskalowane w jednostkach natężenia pola magnetycznego A/m, ale powszechniejsze jest skalowanie w jednostkach indukcji – pochodnych tesli, najczęściej w μT .

W Polsce obowiązuje układ SI (a więc A/m lub T) ale w literaturze amerykańskiej i w środowisku fizyków wciąż używane są stare jednostki: gauss G jako jednostka indukcji, i oersted Oe jako jednostka natężenia pola magnetycznego. Tabela 1 przedstawia konwersję między tymi jednostkami.

Tabela 1. Współczynniki konwersji między najczęściej używanymi jednostkami magnetycznymi

	tesla T	A/m	gauss G	oersted Oe
A/m	$1,256 \cdot 10^{-6}$	1	$12,56 \cdot 10^{-3}$	$12,56 \cdot 10^{-3}$
Oe	10^{-4}	79,6	1	1
T	1	$7,96 \cdot 10^5$	10^4	10^4
G	10^{-4}	79,6	1	1

Przy szybkich przeliczeniach podstawowych jednostek można stosować następującą regułę:

$$1 \text{ Oe} \rightarrow 1 \text{ Gs} \rightarrow 100 \mu T \rightarrow 79,6 \text{ A/m} \rightarrow 0,796 \text{ A/cm}$$

Tabela 2. Typowe zakresy pomiarowe głównych czujników pola magnetycznego

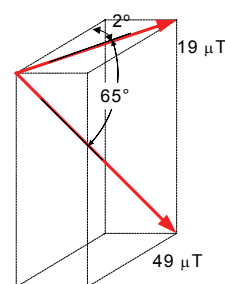
Czujnik	Mierzone pole magnetyczne			
	1nT	1 μ T	1 mT	1 T
SQUID	[red bar]			
SWIATŁOWÓD	[red bar]			
POMPOWANIE OPTYCZNE	[red bar]			
REZONANS PROTONOWY	[red bar]			
CZUJNIK INDUKCYJNY	[red bar]			
	POLE ZIEMSKIE			
AMR	[red bar]			
TRANSDUKTOR	[red bar]			
GMI	[red bar]			
TMI	[red bar]			
HALLOTRON	[red bar]			
GMR	[red bar]			

Wbrew nazwie czujniki pola magnetycznego tylko w niewielkim stopniu wykorzystywane są bezpośrednio do pomiaru parametrów pola magnetycznego. Podstawowe zastosowanie czujników pola magnetycznego (szczególnie hallotronów i magnetorezystorów) to bezstykowe pomiary przesunięć, prędkości obrotowej, kąta i prądu. Czujniki magnetorezystancyjne w praktyce zdominowały zastosowanie jako głowice odczytowe przy zapisie informacji, w pamięciach dyskowych i taśmowych. Tabela 2 przedstawia typowe zakresy pomiarowe głównych czujników pola magnetycznego [1-6].

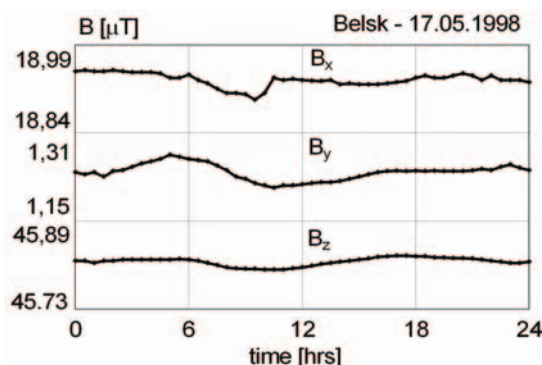
Pole magnetyczne środowiska

Z wyjątkiem pomiarów w specjalnych pomieszczeniach ekranowanych (stosowanych głównie w badaniach biomagnetycznych) większości pomiarów pola magnetycznego towarzyszy pole środowiska, naturalne – ziemskie oraz wytwarzane przez człowieka.

a)



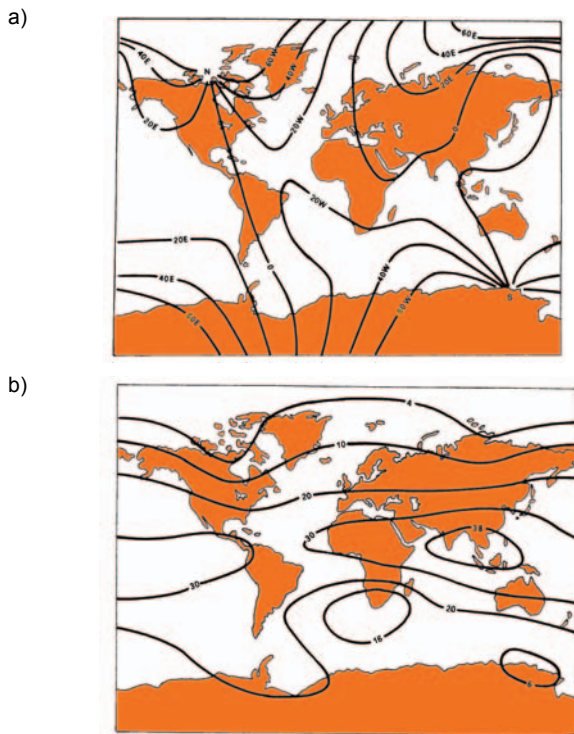
b)



Rys.2. Pole magnetyczne ziemskie w pobliżu Warszawy – a) składowe pola, b) zmiana pola w cyklu dobowym

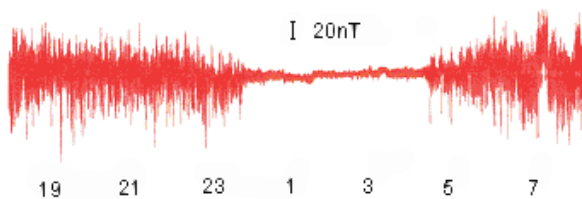
Na rysunku 2a przedstawiono pole magnetyczne ziemskie w pobliżu Warszawy. Pole to skierowane jest pod kątem około 65° do dołu – tak więc przy wartości tego pola

rzędu $49 \mu T$ składowa pozioma wynosi tylko $19 \mu T$. Polska jest w dosyć korzystnej sytuacji, gdyż kompas wskazuje rzeczywiście północ – pole magnetyczne odchylone jest tylko około 2° na wschód (dokładnie na północ pole magnetyczne skierowane jest w pobliżu naszej zachodniej granicy). Na rysunku 3a przedstawiono mapę ilustrującą kierunek pola magnetycznego (deklinację).



Rys.3. Kierunek pola magnetycznego ziemskiego – a) odchylenie od północy, b) wartość składowej poziomej

Rozkład pola magnetycznego nie jest jednorodny w skali globu (rys.3b), gdyż na jego wartość mają wpływ także złoża mineralne – podczas gdy w Polsce składowa pozioma jest około $20 \mu T$, to już w pobliżu Indonezji ma ona wartość blisko dwukrotnie większą. Jak to pokazuje rysunek 2b pole magnetyczne ziemskie zmienia się (około $2 \div 20$ nT w cyklu dobowym i około 30 nT rocznie). W czasie burzy magnetycznej zmiany chwilowe mogą być nawet rzędu pojedynczych μT .

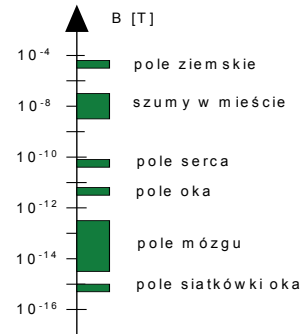


Rys.4. Pole magnetyczne wolnozmiennie mierzone na terenie Politechniki Warszawskiej

Obok pola magnetycznego ziemskiego cały czas towarzyszy nam pole magnetyczne wytwarzane przez człowieka – głównie o częstotliwości 50 Hz (i jej harmonicznym). Rysunek 4 przedstawia wyznaczone przez autora zmiany pola magnetycznego wolnozmiennego (do około 10 Hz) zmierzone magnetometrem transduktorowym na terenie Politechniki Warszawskiej. Jest ono o wartości około 50 nT przy czym maleje poniżej dziesięciu nT w

godzinach 24 – 4, a więc kiedy przestają kursować tramwaje. Warto zauważyć, że te tramwaje kursowały blisko kilometr od miejsca pomiaru.

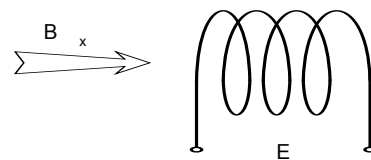
Także człowiek, przede wszystkim jego system nerwowy, wytwarza pola magnetyczne. Na rysunku 5 przedstawiono typowe zakresy tych pól. Współczesne metody pomiarowe umożliwiają pomiar pola mózgu (magnetoencefalografia) nawet poniżej pojedynczych fT (fentotesli – $10^{-15} T$). Jak niezmiernie czułe są nasze urządzenia niech świadczy proste obliczenie – pole rzędu 10 fentotesli powstaje w odległości 20 km od przewodu przez który przepływa prąd zaledwie 1 mA.



Rys.5. Pola magnetyczne generowane przez człowieka

Czujniki indukcyjne

Z danych przedstawionych w tabeli 2 wynika, że najbardziej uniwersalnym jest czujnik indukcyjny. I rzeczywiście czujnik ten (ang. *search coil, pick-up coil, B-coil, induction sensor*) charakteryzuje się wieloma zaletami. Najważniejszą jest prostota działania i konstrukcji. Jest to w zasadzie jedyny czujnik, który łatwo można wykonać we własnym zakresie – wystarczy nawinąć cewkę.



Rys.6. Czujnik indukcyjny

Czujnik indukcyjny wykorzystuje prawo Faraday'a. Napięcie indukowane w cewce zależy od indukcji zmiennego pola magnetycznego $B_m \sin \omega t$

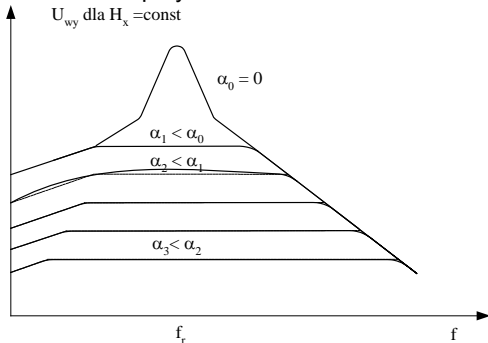
$$(2) \quad e = z \frac{d\phi}{dt} = 2\pi f z s B_m \cos \omega t$$

Warto zwrócić uwagę, że we wzorze (2) nie występują parametry materiałowe (na ogół będące źródłem błędów temperaturowych) – stała przetwarzania zależy jedynie od wymiarów (powierzchni s), liczby zwojów z oraz częstotliwości f . Parametry te można ustalić z dużą dokładnością, a więc czujnik indukcyjny jest dokładny – szczególnie w przypadku badania pól stałych kiedy częstotliwość f jest częstotliwością wymuszonego ruchu czujnika (np. prędkość obrotowa silniczka czy częstotliwość drgań podłoża kwarcowego).

Inne ważne zalety czujnika indukcyjnego to brak prądu wzbudzenia i elementów ferromagnetycznych co pozwala na badania pola magnetycznego praktycznie bezinwazyjnie. Wady czujnika indukcyjnego to, relatywnie mała czułość (w porównaniu z innymi czujnikami), pomiar tylko sygnałów przemiennych oraz zależność sygnału wyjściowego od

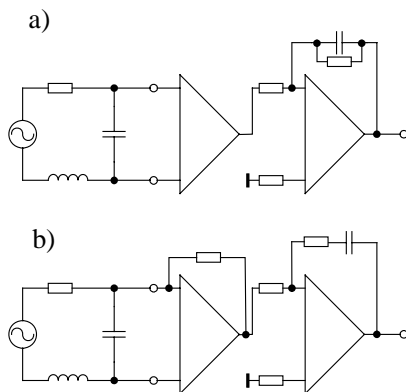
częstotliwości indukcji, co stwarza istotne problemy przy analizie przebiegów odkształconych. Sygnał wyjściowy czujnika nie zależy wprost od indukcji B , ale od jej pochodnej dB/dt . Konieczne jest więc stosowanie układu całkującego na wyjściu czujnika – układy takie mogą być źródłem dodatkowych błędów.

W celu otrzymania dużej czułości należy zwiększać wymiary czujnika i liczbę zwojów. Tak na przykład pierwszy udany eksperyment z przeprowadzeniem magnetokardiogramu przeprowadzono wykorzystując czujnik indukcyjny, w którym cewka liczyła blisko milion zwojów. Oczywiście liczby zwojów nie można zwiększać bez ograniczeń – rozdzielczość czujnika jest bowiem limitowana szumami cieplnymi zależnymi od rezystancji cewki. Możliwe jest przeprowadzenie optymalizacji konstrukcji czujnika [4]. Szumy czujników indukcyjnych mogą osiągać wartości nawet poniżej 5 pT/√Hz. Czułość zależy od częstotliwości – typowa czułość optymalizowanego czujnika wynosi 10 V/mT przy $f = 0.01$ Hz oraz 500 mV/nT przy $f = 200$ Hz.



Rys.7. Zależność czułości czujnika indukcyjnego od częstotliwości sygnału i rezystancji obciążenia R_0 ($\alpha = R_c/R_c, R_c$ – rezystancja czujnika)

Generalnie przyjmuje się, że czujnik indukcyjny nieruchomy pozwala na detekcję tylko pól przemiennych. Stosowane obecnie czułe wzmacniacze pozwalają na wykorzystywanie czujników indukcyjnych nawet przy częstotliwości 0,01 Hz, a więc do pomiaru pól quasi-stałych.



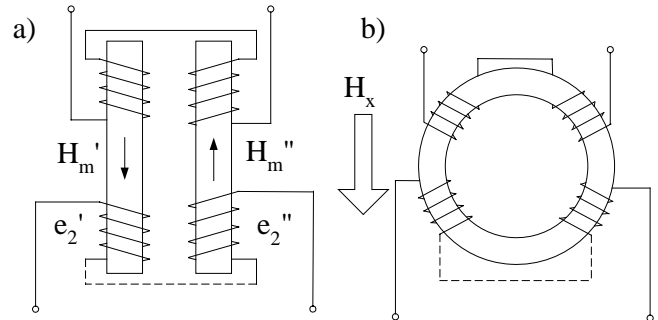
Rys.8. Czujnik indukcyjny; a) z korektorem całkującym, b) obciążony małą rezystancją.

Na rysunku 7 przedstawiono typową charakterystykę częstotliwościową czujnika indukcyjnego. W stanie jałowym ($\alpha = 0$) czułość wzrasta w przybliżeniu liniowo aż do częstotliwości rezonansowej f_r . Powszechnie stosowaną metodą uniezależnienia się od zmian częstotliwości jest dołączenie na wyjściu czujnika układu całkującego (rys.8a). Jak wynika w charakterystyk przedstawionych na rysunku 7 inną (mniej znaną) metodą uniezależniania się od wpływu częstotliwości na czułość czujnika jest obciążenie czujnika

relatywnie małą rezystancją. Na rysunku 8b przedstawiono przykład przetwornika prąd/napięcie stanowiącego obciążenie czujnika małą rezystancją.

Czujnik transduktorowy

Czujnika transduktorowy (ang. *flux-gate sensor*) był opatentowany w 1931 roku i do dziś jest podstawowym czujnikiem słabych pól magnetycznych. W czasie drugiej wojny światowej był używany do wykrywania łodzi podwodnych, a w 1958 roku znalazł się w kosmosie (na pokładzie Sputnika 3) jako czujnik pola magnetycznego.



Rys.9. Rozwiązania układowe czujnika transduktorowego

Rdzeń ferromagnetyczny (w postaci paska – rys.9a lub pierścienia – rys.9b) jest magnesowany do nasycenia (pole H_m). Jeśli zewnętrzne pole magnetyczne jest równe zero ($H_x = 0$) to obie połówki okresu napięcia wtórnego e_2 są dokładnie takie same. Napięcie wtórne składa się więc tylko ze składowych nieparzystych. Przy założeniu, że napięcie magnesujące ma kształt trójkąta napięcie wtórne dla $H_x = 0$ opisuje równanie [6]:

$$e_2' = e_2'' = \frac{16}{\pi} zfs\mu H_m \sin \frac{H_s}{H_m} \frac{\pi}{2} \cos \left(\omega t - \frac{H_c}{H_m} \frac{\pi}{2} \right) + \frac{16}{3\pi} zfs\mu H_m \sin \frac{H_s}{H_m} \frac{3\pi}{2} \cos \left(3\omega t - \frac{H_c}{H_m} \frac{3\pi}{2} \right) + \dots \quad (3)$$

gdzie: f, z, s – jak we wzorze (2), a H_s, H_c – parametry pętli histerozy – odpowiednio natężenie nasycenia, tzw. „kolano”, oraz natężenie koercji.

Jeśli teraz pojawi się zewnętrzne pole magnetyczne H_x to punkt pracy na charakterystyce magnesowania ulegnie przesunięciu o wartość H_x . Obie połówki okresu napięcia wtórnego będą różne, co spowoduje pojawienie się w sygnale e_2 harmonicznych parzystych. Napięcia wyjściowe będą teraz opisywane równaniami

$$e_2' = \frac{16}{\pi} zfs\mu H_m \sin \frac{H_s}{H_m} \frac{\pi}{2} \cos \left(\omega t - \frac{H_c}{H_m} \frac{\pi}{2} \right) + 8zfs\mu H_x \sin \frac{H_s}{H_m} \pi \sin \left(2\omega t - \frac{H_c}{H_m} \pi \right) + \dots \quad (4)$$

$$e_2'' = -\frac{16}{\pi} zfs\mu H_m \sin \frac{H_s}{H_m} \frac{\pi}{2} \cos \left(\omega t - \frac{H_c}{H_m} \frac{\pi}{2} \right) + 8zfs\mu H_x \sin \frac{H_s}{H_m} \pi \sin \left(2\omega t - \frac{H_c}{H_m} \pi \right) + \dots$$

Druga harmoniczna sygnału wtórnego może być więc miarą pola H_x . Jeśli połączyć uzwojenia wtórne przeciwsobnie (jak na rysunku 9) to składowe harmoniczne nieparzyste skompensują się i na wyjściu pozostaną tylko składowe parzyste. Amplituda drugiej harmonicznej będzie opisana równaniem:

$$(5) \quad E_2 = 16zfs\mu \sin \frac{H_s}{H_m} \pi \cdot H_x$$

Wprowadzając do równania (5) współczynnik odmagnesowania N otrzymujemy:

$$(6) \quad E_2 = 16zsf\mu_0 \frac{\mu}{1+N\mu} \sin \frac{H_s}{H_m} \pi \cdot H_x$$

Z równania (6) wynika ważny praktycznie wniosek. Jeśli tylko przenikalność materiału rdzenia będzie dostatecznie duża to równanie to przyjmie postać:

$$(7) \quad E_2 = 16zsf\mu_0 \frac{1}{N} \sin \frac{H_s}{H_m} \pi \cdot H_x$$

Tak więc sygnał wyjściowy nie zależy od właściwości materiału, w tym jego zmian temperaturowych. Podstawiając do równania przybliżoną zależność na N rdzenia w kształcie paska ($N \approx 5s/l^2$ gdzie l jest długością paska) oraz typowa wartość $H_m = 2 H_s$ otrzymujemy

$$(8) \quad E_2 \approx 1,5zf\mu_0 l^2 \cdot H_x$$

Z równania (8) wynika, że chcąc otrzymać dostatecznie dużą czułość należy zwiększać liczbę zwojów z , ale przede wszystkim zwiększać długość rdzenia l . W literaturze można znaleźć opis sondy o długości 0,5 m, liczbie zwojów $z = 4000$ i częstotliwości pracy $f = 10$ kHz która charakteryzowała się czułością 10 mV/nT. Typowe parametry sondy to: $z_1 = z_2 = 1000$, $l = 6$ cm, $s = 3 \times 0,1$ mm, $f = 3$ kHz, $I_{zas} = 10$ mA. Taka sonda umożliwia otrzymanie czułości 10 μ V/nT.

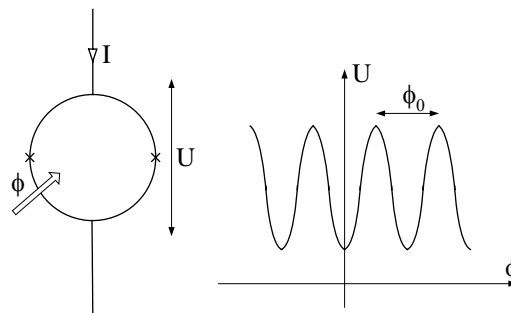
Najważniejszą zaletą sondy transduktorowej jest fakt, że sygnał wyjściowy jest sygnałem przemiennym o określonej częstotliwości. Można więc go łatwo oddzielić od sygnałów temperaturowego pełzania zera, jak i szumów. Umożliwia to pomiar pól magnetycznych w zakresie 10 nT – 100 μ T z błędem nie większym niż 2%. Przy pozornej prostocie konstrukcji czujnika i zasady działania czułość i błędy pomiaru bardzo zależą od jakości materiału magnetycznego (szumy magnetyczne) i precyzji wykonania.

Czujnik nadprzewodnikowy SQUID

SQUID (*Superconducting Quantum Interference Device*) tworzy pierścień nadprzewodzący z jednym lub dwoma złączami Josephsona (złączami dwóch nadprzewodników przedzielonych bardzo cienką warstwą izolacji). Jako materiał nadprzewodnika najczęściej wykorzystuje się niob umieszczony w ciekłym helu.

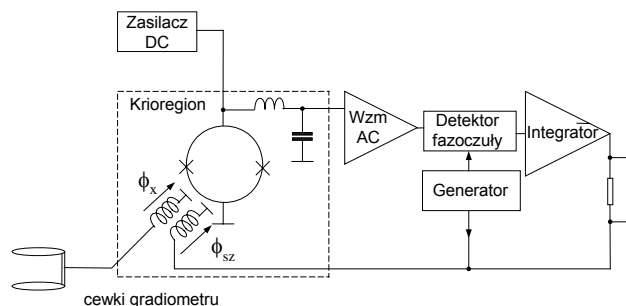
Jeśli przez SQUID przepływa prąd o odpowiedniej wartości to napięcie na tym elemencie zależy od strumienia magnetycznego objętego pierścieniem w przybliżeniu sinusoidalnie, z okresem równym kwantowi strumienia (rys.10). Kwant strumienia (fluxon) jest równy $\Phi_0 = h/2e = 2,07 \cdot 10^{-15}$ Wb. Przy powierzchni SQUIDu rzędu kilku mm^2 okres zmian napięcia wyjściowego odpowiada indukcji 0,1 ÷

1 T. Wykorzystując tylko zbocze charakterystyki okresowej $U = f(\Phi)$ uzyskuje się czułości rzędu kilkudziesięciu μ V/nT.



Rys.11. Zasada działania SQUIDu dc

Mierzony strumień magnetyczny dostarczany jest do złącza za pośrednictwem transformatora strumienia, którego cewka pierwotna są dwie (lub więcej) cewki w układzie gradiometru. Stosowane są dwie konstrukcje – SQUID rf (z jednym złączem Josephsona) i SQUID dc z dwoma złączami. Napięcie z pierścienia nadprzewodzącego dołączane jest do wzmacniacza. Aby eliminować szumy i polepszyć rozdzielczość stosuje się wzmacniacz homodynowy z detektorem fazoczułym wzmacniającym jedynie sygnał o częstotliwości generatora modulującego. Wyjściowy sygnał prądowy wytwarza pole magnetyczne sprzężenia zwrotnego H_{sz} (rys.11) – czujnik SQUIDowy działa więc jak detektor zera. Schemat blokowy typowego magnetometru ze SQUIDem DC przedstawiony jest na rysunku 11.



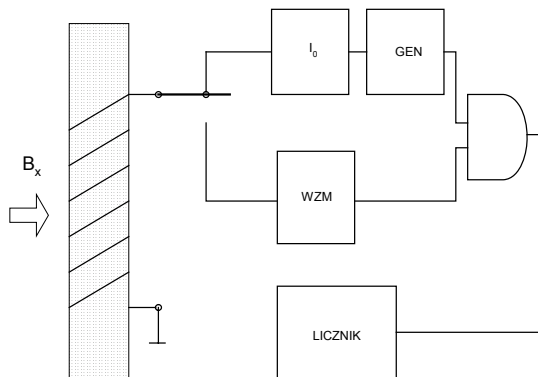
Rys.11. Schemat blokowy magnetometru ze SQUIDem dc

O rozdzielczości czujnika decydują szumy. W dobrych konstrukcjach są one rzędu 10 fT/√Hz. Pozwala to na pomiar pól magnetycznych o wartościach nawet mniejszych niż 1 fT.

Czujnik rezonansowy

Czujnik magnetometru rezonansu protonowego stanowi naczynie wypełnione cieczą o dużej zawartości atomów wodoru, na przykład woda. Naczynie umieszczone jest wewnątrz cewki o osi skierowanej prostopadle do mierzonego pola magnetycznego. W pierwszym cyklu pomiaru przez cewkę przepuszcza się prąd stały polaryzujący ciecz polem o natężeniu rzędu kilku kA/m. Następnie po wyłączeniu prądu cewkę podłącza się do wzmacniacza (rys.12). Moment magnetyczny protonów wraca do położenia wyjściowego (zgodnie z kierunkiem mierzonego pola magnetycznego) co objawia się indukowaniem w cewce napięcia o malejącej amplitudzie i stałej częstotliwości. Częstotliwość ta zależy od wartości mierzonego pola przy czym współczynnikiem proporcjonalności jest współczynnik żyromagnetyczny równy dla rezonansu protonowego $\gamma = 42,576375$ MHz/T.

Przy pomiarze pola magnetycznego ziemskiego częstotliwość precesji jest równa zaledwie kilka kHz. Wystarcza to jednak do pomiaru indukcji pola magnetycznego z rozdzielczością lepszą niż 1 nT. Ponadto dzięki dokładnej znajomości wartości współczynnika żyromagnetycznego możliwy jest pomiar indukcji z bardzo dobrą dokładnością, nawet lepszą niż 0,002%. Typowe magnetometry protonowe umożliwiają odczyt sześciu cyfr z ostatnią cyfrą 1nT lub 0,1 nT.



Rys.12. Zasada działania magnetometru protonowego

Magnetometry protonowe są powszechnie stosowane w geofizyce oraz przy wykonywaniu map rozkładu pola (np. przy wykrywaniu złóż lub łodzi podwodnych). Ich wada jest stosunkowo duży rozmiar czujnika (naczynie o pojemności 0,5 l lub 1 l). Inną wadą jest, że w metodzie tej mierzy się tylko moduł wektora indukcji pola magnetycznego.

Nieco bardziej złożone konstrukcyjnie, ale i czulsze są czujniki wykorzystujące zjawisko Zeemana, tzw. czujniki z pompowaniem optycznym. Spolaryzowane kołowo światło jest przepuszczane przez naczynie wypełnione parami izotopu cezu, rubidu lub helu. Częstotliwość zwiększonej absorpcji tego światła zależy od wartości zewnętrznego pola magnetycznego. Tak na przykład współczynnik żyromagnetyczny dla Rb⁸⁷ wynosi $\gamma = 6996 \text{ MHz/T}$.

Czujniki magnetorezystancyjne AMR

Anizotropowe zjawisko magnetorezystancyjne (AMR) zostało odkryte w 1857 roku przez Thomsona (lorda Kelvina), ale zastosowanie w konstrukcji czujników znalazło dopiero w latach sześćdziesiątych XX wieku w wyniku rozwoju technologii cienkowarstwowych. Opracowano wiele różnych konstrukcji czujników cienkowarstwowych [3]. Dziś praktycznie tylko konstrukcja typu Barber-pole (rys.13) jest wykorzystywana.

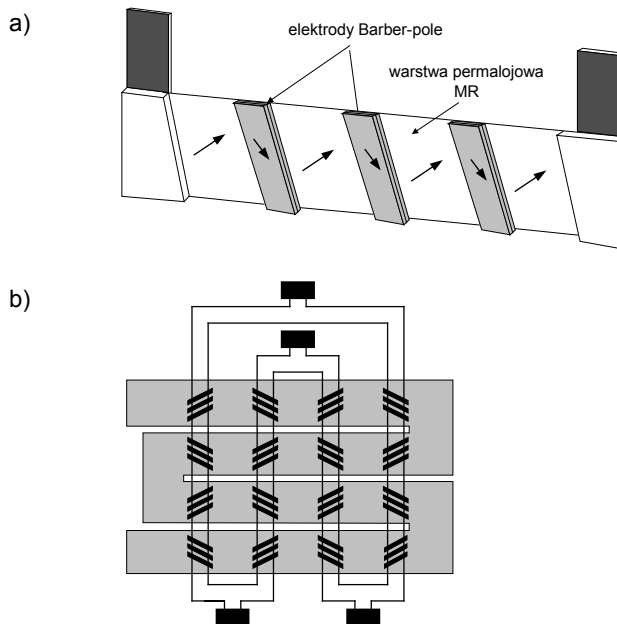
Zasada działania czujnika AMR Barber-pole jest następująca. Jeśli pole zewnętrzne $H_x = 0$ cienka warstwa jest namagnesowana w kierunku paska (na skutek wpływu anizotropii indukowanej w procesie wytwarzania warstwy). Mierzone pole H_x jest skierowane prostopadle do osi paska (w płaszczyźnie warstwy) i powoduje obrót wektora namagnesowania. Zmiana rezystancji $\Delta R/R$ zależy od kąta ϑ między kierunkiem wektora namagnesowania a kierunkiem przepływu prądu:

$$(9) \quad \frac{\Delta R}{R} = -\frac{\Delta\rho}{\rho} \sin^2 \vartheta$$

Współczynnik magnetorezystywności $\Delta\rho/\rho$ dla typowej cienkiej warstwy permalojowej (81/19 NiFe) jest równy ok. 2%. Kierunek wektora namagnesowania zależy od wartości pola magnetycznego H_x .

$$(10) \quad \sin \vartheta = \frac{H_x}{H_y + H_k}$$

gdzie: H_x – składowa pola prostopadła do osi paska, H_y – składowa pola wzdłuż osi paska, H_k – pole anizotropii ($H_k = H_{ko} + Mt/w$), H_{ko} – pole anizotropii materiału warstwy (dla permaloju ok. 250 A/m), t – grubość warstwy, w – szerokość paska, M – magnetyzacja.



Rys.13. Magnetorezystory typu AMR – a) czujnik Barber-pole, b) czujnik w układzie mostkowym

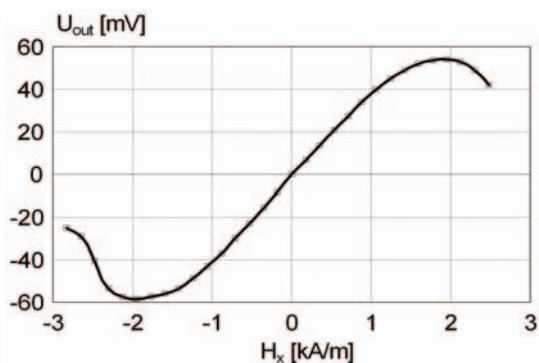
Na podstawie równań (9) i (10) zależność zmiany rezystancji od pola H_x można napisać w postaci:

$$(11) \quad \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta\rho}{\rho} \left[\cos^2 \varepsilon - \cos 2\varepsilon \frac{H_x^2}{(H_y + H_k)^2} + \sin 2\varepsilon \frac{H_x}{H_y + H_k} \sqrt{1 - \left(\frac{H_x}{H_y + H_k} \right)^2} \right]$$

gdzie ε jest kątem między kierunkiem wektora namagnesowania a kierunkiem prądu dla $H_x = 0$. Czujnik jest więc liniowy jeśli $\varepsilon = 45^\circ$, gdyż równanie (11) przyjmuje wtedy postać:

$$(12) \quad \frac{\Delta R}{R} \cong \frac{\Delta\rho}{\rho} \frac{H_x}{H_y + H_k} \text{ dla } H_x < (H_y + H_k)$$

Konstrukcja Barber-pole spełnia warunek $\varepsilon = 45^\circ$, gdyż dodatkowe elektrody z materiału dobrze przewodzącego (złoto lub aluminium) wymuszają kierunek prądu jak to pokazano na rysunku 13a. Prąd przepływający przez elektrody spełnia dodatkową rolę, wytwarzając pole magnetyczne H_{yo} wstępnie podmagnesowujące warstwę i zabezpieczające ją przed rozmagnesowaniem. Zwykle cztery magnetorezystory łączy się w układ mostkowy (rys.13b), i wówczas sygnałem wyjściowym czujnika jest zmiana napięcia (rys.14).

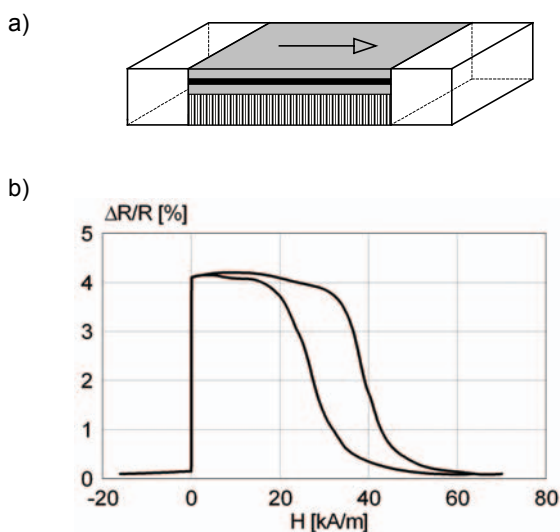


Rys.14. Charakterystyka przetwarzania typowego czujnika typu Barber-pole (czujnik KMZ10B prod. Philips)

Czujniki magnetorezystancyjne GMR – zawory spinowe

Gigantyczny magnetoopór (GMR – giant magnetoresistance) występuje w czujniku złożonym z dwóch cienkich warstw przedzielonych bardzo cienką przekładką (warstwą) z materiału przewodzącego. W stanie początkowym (dla $H_x = 0$) obie warstwy namagnesowane są antyrównolegle. Umieszczenie czujnika w polu magnetycznym powoduje, że obie warstwy są namagnesowane równolegle. Przejściu od stanu antyrównoległego namagnesowania do równoległego namagnesowania towarzyszy duża zmiana rezystancji – nawet rzędu kilkuset %.

Stan początkowego namagnesowania antyrównoległego można uzyskać w sposób „naturalny” w magnetorezystorach w których przekładka jest bardzo cienka – o grubości kilku atomów. Wówczas na skutek sprzężenia między dwoma warstwami magnesują się one antyrównolegle. W tego typu konstrukcjach wykryte zjawisko GMR po raz pierwszy. Ale warstw silnie sprzężone wymagają znacznych wartości pola magnetycznego do pokonania tego sprzężenia. Czujniki takie były więc o małej czułości. Dlatego w innej konstrukcji, zawór spinowy (spin valve) zwiększono grubość przekładki a namagnesowanie antyrównoległe uzyskuje się w sposób sztuczny „artificial” nanosząc na jedną z warstw dodatkową warstwę podmagnesowującą z antyferromagnetyka (najczęściej FeMn).



Rys.15. Konstrukcja i charakterystyka przetwarzania typowego czujnika typu zawór spinowy

Na rysunku 15 przedstawiono konstrukcję i charakterystykę typowego czujnika typu zawór spinowy.

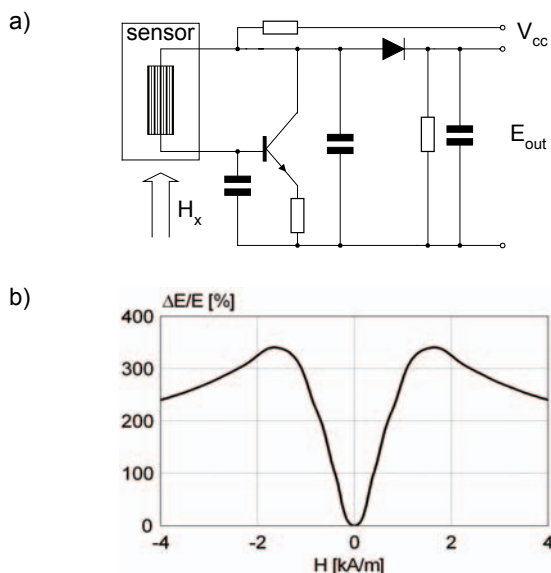
Czujniki te są obecnie najczęściej stosowanymi czujnikami typu GMR. Nie wykazują one tak znacznej zmiany rezystancji jak „klasyczne - naturalne” czujniki GMR. Zmian rezystancji jest rzędu kilku do kilkunastu %, ale występuje ona przy pola blisko dziesięć razy mniejszych niż w przypadku czujników klasycznych GMR. Kilkanaście procent to i tak kilkakrotnie więcej w porównaniu z czujnikami AMR.

Obecnie duże nadzieje wiąże się z pewną nową odmianą czujnika typu zawór spinowy – z czujnikami typu TMJ (tunnel magnetic junction). W czujnikach tych przekładkę z materiału przewodzącego zastępuje się przekładką z izolatora (najczęściej utlenionego aluminium Al_2O_3). W magnetycznych złączach tunelowych zmiana rezystancji jest rzędu kilkanaście procent, ale do jej uzyskania potrzebne jest pole magnetyczne znacznie mniejsze niż w przypadku zaworów spinowych. Czujniki typu TMJ osiągają czułości konkurencyjne w porównaniu z czujnikami AMR. Wciąż jednak koszty produkcji czujników TMJ są znaczne – uzyskanie warstwy izolatora o grubości kilku atomów nie jest bowiem łatwe.

Pewne nadzieje wiążano z czujnikami CMR – colossal magnetoresistance. Zjawisko kolosalnego magnetooporu występuje w materiałach z grupy ziem rzadkich (lantanowcach). Jest ono rzeczywiście kolosalne – zmiana rezystancji w praktyce od stanu izolacji do stanu przewodzenia. Niestety zjawisko to efektywnie występuje tylko w niskich temperaturach i przy silnych polach magnetycznych.

Czujniki typu GMI – gigantyczna magnetoimpedancja

W czujnikach typu GMI (giant magnetoimpedance) wykorzystuje się zmianę impedancji cienkiej warstw lub cienkiego drutu zasilanego prądem o częstotliwości kilkadziesiąt – kilkaset MHz. Ta zmiana impedancji wynika ze zmiany głębokości efektu naskórkowego i zmiany przenikalności materiału magnetycznego wraz ze zmianą zewnętrznego pola magnetycznego.



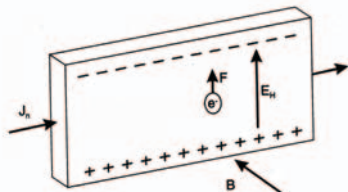
Rys.16. Czujnik GMI w układzie generatora (a) oraz charakterystyka wyjściowa układu (b)

Czujnik GMI można bezpośrednio włączać w układ generatora Colpittsa (rys.16a). Zmiana indukcyjności czujnika powoduje zmianę napięcia wyjściowego rzędu kilkuset % (rys.16b). Ponadto do uzyskania tej zmiany wystarczy niewielkie pole zewnętrzne. Dzięki temu czujniki GMI pozwalają uzyskać czułości porównywalne z

czujnikami transduktorowymi przy znacznie tańszej i prostszej konstrukcji.

Hallotrony

Nazwa hallotron pochodzi od nazwiska odkrywcy zjawiska E. H. Halla, który opisał je po raz pierwszy w 1879 roku. Hallotrony są czujnikami pola magnetycznego produkowanymi w ilości milionów sztuk – chociaż większość tej produkcji, to tanie elementy sygnałowe, a nie czujniki pomiarowe. Najważniejsze zalet hallotronów to małe wymiary, w praktyce nieinwazyjny charakter pomiaru (sam element jest niemagnetyczny), względna prostota konstrukcji. Przy relatywnie prostej produkcji nie udaje się jednak uzyskać odpowiedniej powtarzalności charakterystyk i eliminacji błędów temperaturowych – dlatego dobre hallotronowe czujniki pomiarowe są wciąż drogimi.



Rys.17. Zasada działania hallotronu

Mechanizm zjawiska Halla polega na wykorzystaniu zmiany drogi przepływu prądu w elemencie na skutek oddziaływania pola magnetycznego (oddziaływania siły Lorentza). W wyniku tego oddziaływania na jednym brzegu elementu gromadzą się ładunki dodatnie, na drugim ujemne. Powstała różnica potencjału jest mierzona przez pole magnetyczne, gdyż:

$$(13) \quad E_H = -R_H [\mathbf{J} \times \mathbf{B}]$$

gdzie R_H jest współczynnikiem Halla ($R_H = 1/ne$, n – koncentracja elektronów, e – ładunek elektronu).

Jako materiał należy więc wykorzystywać związki charakteryzujące się dużą wartością R_H – dużą ruchliwością nośników energii. Hallotrony najczęściej wytwarza się z odpowiednio domieszkowanych InSb, InGaAs, Si, GaAs. Czułość hallotronu jest rzędu $0.1 \div 1 \text{ V/T}$ co powoduje, że największe zastosowanie znajdują one w obszarze pól silnych, powyżej 1 mT. Rozdzielczość ograniczona jest szumami i temperaturowym pełzaniem zera – pomiar pól mniejszych niż $10 \mu\text{T}$ wymaga już stosowania dość wyrafinowanych metod pomiarowych.

Istotną zaletą hallotronów jest łatwość ich integracji z innymi elementami elektronicznymi w jednym obwodzie scalonym. Dlatego obecnie coraz częściej spotyka się hallotrony zintegrowane ze wzmacniaczem, układami korekcji czy koncentratorami strumienia.

Czujniki magnetoptyczne

W czujnikach magnetoptycznych wykorzystuje się zjawisko Faradaya (skręcenie płaszczyzny polaryzacji światła przechodzącego przez materiał w wyniku oddziaływania pola magnetycznego) lub zjawisko Kerra (zmiana kąta odbicia światła). Szczególnie zjawisko Kerra znalazło szerokie zastosowanie w badaniu materiałów magnetycznych ponieważ jest to w praktyce jedyna metoda nieinwazyjnego badania rozkładu indukcji (namagnesowania).

Pewne nadzieje wiązano z wykorzystaniem światłowodów w elementach magnetoelastycznych. Pomiarowi podlega zmiana drogi światła w światłowodzie

umieszczonym w płaszczu z materiału magnetoelastycznego. Ponieważ metodami interferometrycznymi można mierzyć długość drogi światła z olbrzymią rozdzielczością czujnik taki umożliwił pomiar indukcji w zakresie zbliżonym do najczulszych metod SQUIDowych. Stworzyło to możliwość detekcji bardzo słabych pól bez konieczności stosowania kriostatów. Nic więc dziwnego, że głównym zainteresowanym takimi czujnikami jest przemysł militarny – do wykrywania łodzi podwodnych.

Podsumowanie

W przedstawionym wyżej przeglądzie przedstawiono niemal wszystkie najczęściej aktualnie używane czujniki pola magnetycznego. Zasadniczą nowością ostatnich lat są czujniki z grupy „giant” – GMR, MTJ i GMI. Rzeczywiście czujniki te odniosły spektakularny sukces naukowy i komercyjny, ale to za sprawą wykorzystania ich jako głowice dyskowych pamięci magnetycznych i elementy pamięci magnetycznych typu MRAM. W zastosowaniach pomiarowych czujniki te w zasadzie są mało konkurencyjne w stosunku do czujników typu AMR, transduktorowych czy hallotronów. Ale trzeba odnotować, że koncern Siemens zrezygnował ostatnio z produkcji magnetorezystorów półprzewodnikowych zastępując je czujnikami GMR. Dzięki bardzo dużej zmianie rezystancji czujniki te mogą pracować jako czujniki kąta lub prędkości obrotowej bez konieczności stosowania wzmacniacza (sygnał wyjściowy rzędu kilkuset mV). Można się spodziewać, że czujniki GMI będą poważnym konkurentem czujników transduktorowych dzięki porównywalnej czułości i prostszej konstrukcji (możliwa masowa produkcja).

Wyraźnie dostrzegalnym kierunkiem rozwoju czujników pola magnetycznego jest ich miniaturyzacja i integrowanie z elektroniką. Na rynku pojawiły się na przykład czujniki transduktorowe w postaci układu hybrydowego zawierającego obok elementu czujnika (wykonanego w technice cienkowarstwowej) także układ generatora i detektora fazoczułego. Podobnie hallotrony występują już dość często w postaci zintegrowanej np. z układami wzmacniacza czy układami korekcji.

W zasadzie ustalili się pewien stały obszar zastosowań różnych czujników. Do pomiarów pól bardzo małych (nT i mniej) coraz powszechniej stosuje się metody nadprzewodnikowe. Magnetometry SQUIDowe stają się coraz tańsze i ich używanie wchodzi do powszechnej praktyki (nowością na przykład są zastosowania tych czujników w defektoskopii). Pola małe (od nT do μT) to obszar zastosowań czujników transduktorowych i metod rezonansowych. Pola średnie (setki μT) to zastosowanie czujników magnetorezystancyjnych AMR. I wreszcie pola duże (powyżej 1 mT) to zastosowanie hallotronów (i ewentualnie czujników GMR).

LITERATURA

- [1] Ripka P. (ed) – Magnetic sensors and magnetometers, Artech House, 2001
- [2] Boll R, Overshott K.J. (ed) - Magnetic sensors, VCH Publ, 1989
- [3] Tumański S. – Thin film magnetoresistive sensors, IOP Publ., 2001
- [4] Tumański S. – Analiza możliwości zastosowania magnetometrów indukcyjnych do pomiaru indukcji słabych pól magnetycznych, Przegl. Elektr., N.4 (1986), 137-141
- [5] Tumański S. – Właściwości transduktorowych mierników słabych pól magnetycznych, Rozpr. Elektr., 32 (1986), 813-834
- [6] Popovic R.S., Flanagan J.A., Besse P.A. – The future of magnetic sensors, Sensors and Actuators, A56 (1996), 39-55

Autor: prof. dr hab. inż. Sławomir Tumański, Politechnika Warszawska, Instytut Elektrotechniki Teoretycznej i Systemów Informatycznych-Pomiarowych, E-mail: tusla@iem.pw.edu.pl