

POLITECHNIKA WROCLAWSKA
WYDZIAŁ MECHANICZNY

INSTRUKCJA LABORATORIUM DO WYKŁADU
SENSORY I SYSTEMY POMIAROWE

Prowadzący wykład: dr inż. Robert Czabanowski
Prowadzący ćwiczenie: mgr inż. Jacek Bomba
Miejsce ćwiczenia: B-1, sala 110
Wersja instrukcji: 1.03.2005_v.1.1
Opracował: Jacek M. Bomba
Instrukcja dostępna na: www.immt.pwr.wroc.pl/~jbomba

SENSORY POLA MAGNETYCZNEGO

Cel ćwiczenia: zapoznanie się z czujnikami i sposobami pomiaru pola magnetycznego, obserwacja i pomiar pętli magnetomechanicznej materiału wykazującego odwrotną magnetostrykcję

Zagadnienia: sensory pola magnetycznego, pole magnetyczne, indukcja magnetyczna, magnetyzacja, zjawisko magnetostrykcji i odwrotnej magnetostrykcji

SKRÓCONY OPIS ĆWICZENIA
ZADANIA DO WYKONANIA

A. Pomiary składowych statycznych

Pomiar zmiany składowej stycznej natężenia zewnętrznego pola magnetycznego H pod wpływem krokowej zmiany zewnętrznego obciążenia czujnika magnetostrykcyjnego.

B. Pomiary składowych dynamicznych

Pomiar zmiany składowej stycznej natężenia zewnętrznego pola magnetycznego $H(t)$ oraz indukcji magnetycznej dB/dt pod wpływem sinusoidalnej zmiany zewnętrznego obciążenia czujnika magnetostrykcyjnego dla kilku wartości amplitudy obciążenia.

C. Opracowanie wyników

Sprawozdanie z przeprowadzonych ćwiczeń powinno zawierać niezbędne dane identyfikujące osoby w grupie ćwiczeniowej oraz datę i godzinę przeprowadzonego ćwiczenia.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów należy opracować wykresy mierzonych sygnałów w funkcji czasu, złożenie sygnału obciążenia i natężenia pola magnetycznego.

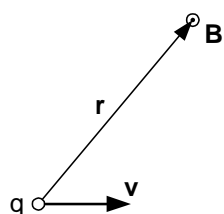
Do sprawozdania należy dołączyć arkusz z tabelami A1 i B1. Pusty arkusz do wypełnienia zostanie dostarczony grupie przez prowadzącego ćwiczenie.

Sprawozdanie należy dostarczyć prowadzącemu ćwiczenia **w ciągu 2 tygodni** od daty wykonania ćwiczenia.

WPROWADZENIE TEORETYCZNE

POLE MAGNETYCZNE

Pole magnetyczne ma charakter kierunkowy i dlatego jest opisywane wielkością wektorową. Za wielkość tą przyjęto \mathbf{B} nazywaną *indukcją magnetyczną* (pomimo że powinno się nazywać ją analogicznie do \mathbf{E} natężeniem). Dla poruszającego się ładunku elektrycznego wektor indukcji magnetycznej wyznaczono doświadczalnie [Saw1998]



Rys. 1. Indukcja magnetyczna poruszającego się ładunku

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q}{r^3} \mathbf{v} \times \mathbf{r} \sim \frac{A}{r^2}, \quad (1)$$

gdzie $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ – przenikalność magnetyczna próżni, q – poruszający się ładunek elektryczny, \mathbf{v} – wektor prędkości poruszającego się ładunku, \mathbf{r} – wektor położenia punktu przestrzeni, w którym wyznaczamy wartość B , względem położenia ładunku q .

Z postaci (1) wynika, że wartość indukcji pola magnetycznego maleje z kwadratem odległości od poruszającego się ładunku (np. w przewodniku, przez który płynie prąd elektryczny).

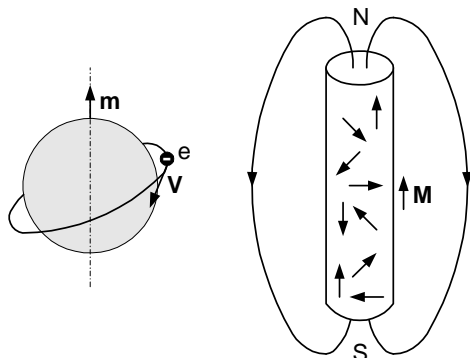
Nazwę *natężenie pola magnetycznego* przypisano wielkości pomocniczej \mathbf{H} (analogicznej do \mathbf{D} charakteryzującej pole elektryczne). Natężenie pola magnetycznego jest związane z indukcją magnetyczną parametrem materiałowym przenikalności magnetycznej μ równaniem

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}, \quad (\text{tylko w próżni lub powietrzu!}) \quad (2a)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad (\text{w dowolnym ośrodku}) \quad (2b)$$

gdzie $\mu = \mu_r \mu_0$, μ_r – przenikalność względna danego ośrodka odniesiona do przenikalności próżni. Ze wzoru (2a) wynika praktyczna zależność dla powietrza: $1 \text{ mT} \approx 795.775 \text{ A/m}$.

Zgodnie z atomową budową materii każdy atom posiada krążące wokół jądra elektrony (poruszające się ładunki elektryczne), które są źródłem pola magnetycznego atomu określanego mianem *momentu magnetycznego* \mathbf{m} [Raw1996]. Wektor momentu magnetycznego jest skierowany prostopadłe do umownej płaszczyzny wirowania elektronów. Atomy budujące materię możemy uważać za małe magnesy, które po zsumowaniu w całej objętości określają wypadkowy wektor indukcji magnetycznej określanej jako *magnetyzacja* \mathbf{M}



Rys. 2. Pole magnetyczne atomów

$$\mathbf{M} = \frac{\sum_i^N \vec{m}_i}{V}. \quad (3)$$

Wypadkowa wartość \mathbf{M} zmienia się pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego. Posługując się wektorem \mathbf{M} możemy zapisać indukcję magnetyczną (2b) w ośrodku materialnym o przenikalności μ różnej od μ_0 w postaci

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M}. \quad (4)$$

Magnetyzacja zależy od natężenia zewnętrznego pola magnetycznego (szczególnie w materiałach ferromagnetycznych, w których często, po usunięciu zewnętrznego pola magnetycznego, pozostaje pewien stan uporządkowania momentów magnetycznych – trwałe namagnesowanie).

EFEKTY KRZYŻOWE POLA MAGNETYCZNEGO

W przyrodzie istnieje szereg zjawisk, które występują jednocześnie (tzw. efektów krzyżowych). Tego typu zjawiska fizyczne związane z polem magnetycznym to między innymi:

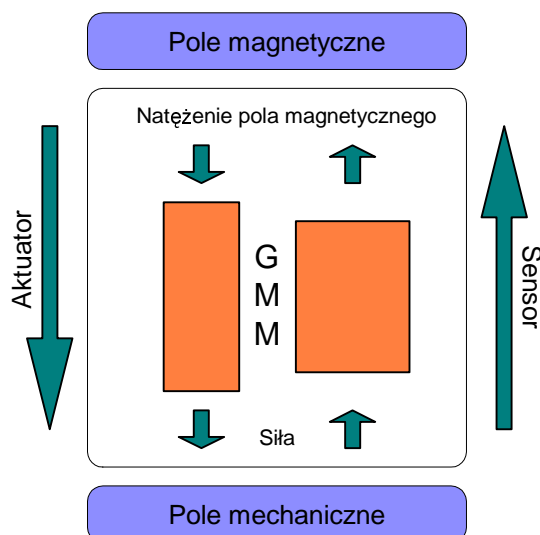
- magneto rezystancja (zmiana rezystancji materiału pod wpływem zmiany zewnętrznego pola magnetycznego)
- magnetostrykcja (zmiana kształtu materiału pod wpływem przyłożonego pola magnetycznego zmieniającego magnetyzację materiału) oraz
- odwrotna magnetostrykcja (zmiana magnetyzacji materiału pod wpływem zmiany naprężeń w materiale)
- magnetokaloryczne (zmiana temperatury materiału pod wpływem przyłożonego pola magnetycznego)

Praktyczne wykorzystanie tego typu efektów pozwala nam np. na budowę magnetorezystorów korzystając ze zjawiska magneto rezystancyjnego, czy otrzymywanie bardzo niskich temperatur dzięki efektowi magnetokalorycznemu.

Zjawisko magnetostrykcji i odwrotnej magnetostrykcji

Historia magnetostrykcji sięga 1842 roku, w którym James Joule zaobserwował zmiany wymiarów w próbce niklu pod wpływem pola magnetycznego. Podobne zjawisko zaobserwowano w kobaltcie, żelazie i stopach tych metali. Magnetostrykcja (efekt Joula), rozumiana jako odkształcenie pod wpływem pola magnetycznego, tych materiałów sięgała 0,005 %. Z powodu tak małych zmian odkształcenia w znanych ówczesnie materiałach zjawisko to nie znalazło większego zastosowania. W materiałach ferromagnetycznych wraz z efektem magnetostrykcji występuje efekt odwrotnej magnetostrykcji (efekt Villariego), który polega na zmianie magnetyzacji materiału pod wpływem zmiany naprężeń wewnętrznych materiału.

Zjawisko magnetostrykcji i efekt do niej odwrotny są co najmniej od 60 lat wykorzystywane do budowy przetworników. Przyjmuje się, że jeśli energia magnetyczna ulega zamianie w mechaniczną (rys. 3), to mamy do czynienia z elementami wykonawczymi. W przypadku odwrotnym – zamiany energii mechanicznej na magnetyczną – mówi się z kolei o czujnikach.



Rys. 3. Schemat transformacji energii w materiałach magnetostrykcyjnych

Materiały o gigantycznej magnetostrykcji (Giant Magnetostrictive Materials – GMM)

W roku 1965 odkryto w Naval Ordnance Lab i Ames Laboratory, że niektóre pierwiastki ziem rzadkich, jak Tb (terb) i Dy (dysproz), w niskich temperaturach charakteryzują się o kilka rzędów większą magnetostrycją λ niż nikiel (Tab. 1) – efekt tzw. gigantycznej magnetostrykcji (stąd skrót GMM). Kilka lat później udało się uzyskać związki tych pierwiastków z żelazem, w których zjawisko magnetostrykcji występuje w temperaturze pokojowej. Szeroką paletę tych materiałów opisywanych ogólnym wzorem chemicznym $Tb_xDy_{1-x}Fe_y$ nazwano „terfenolami”. W roku 1986 firma ETREMA Products Inc. zaczęła produkować komercyjnie najpowszechniej dziś stosowany materiał – Terfenol-D ($Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.9}$).

Tabela 1. Właściwości wybranych materiałów magnetostrykcyjnych [Joshi]

Materiał	ρ [g/cm ³]	E [GPa]	λ_{max} [%]	T _{Curie} [K]
Fe	7.86	210	-0.0014	633
Ni	8.9	210	-0.0050	1043
Permalloy (65%Fe, 45%Ni)	---	---	0.0027	713
SmFe ₂	8.53	---	-0.2340	688
Fe ₃ O ₄	---	---	0.0060	858
DyFe ₂	9.28	---	0.0650	635
TbFe ₂ (Terfenol)	9.06	---	0.2630	703
Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_{1.9} (Terfenol-D)	9.21	29	0.1600 ÷ 0.2400	653
Tb _{0.6} Dy _{0.4} @ 77K	---	---	0.6300	215
TbZn	---	---	0.4500 ÷ 0.5500	180
TbDyZn	---	---	0.5000	250

Terfenol-D jest międzymetalicznym stopem pierwiastków ziem rzadkich, terbu i dysprozu, oraz żelaza. Jest produkowany w postaci zbliżonej do jednolitego kryształu (metodą Bridgman'a i metodą Czochralskiego).

Terfenole pozwalają na uzyskanie, w zależności od postaci w której są produkowane i stosowane, pozornie przeciwstawnych własności magneto-mechanicznych:

- jako materiały lite (pręty, kształtki, folie, cienkie warstwy) wykazują niewielką histerezę magneto-mechaniczną, co powoduje, że wzajemne przekształcanie energii mechanicznej i magnetycznej zachodzi w przetwornikach z wysoką sprawnością;
- w postaci proszków po odpowiednim połączeniu z żywicami, silikonami, gumami itp. i spolaryzowaniu magnetycznym, pozwalają otrzymać materiały o dużych własnościach tłumiących.

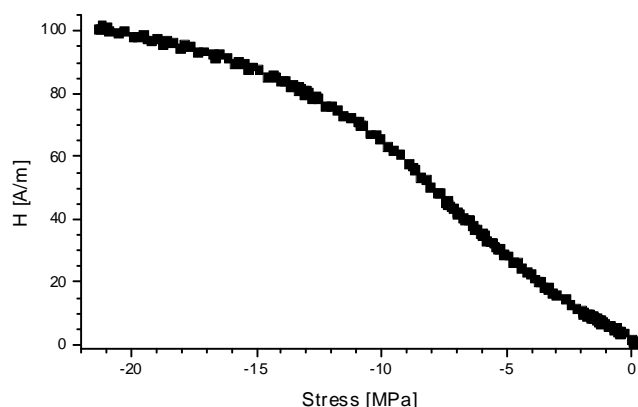
Możliwe stało się zatem uzyskanie materiałów z programowalnymi własnościami mechanicznymi i magnetycznymi, o bardzo szerokim zastosowaniu technicznym.

Stymulowanie własności terfenoli

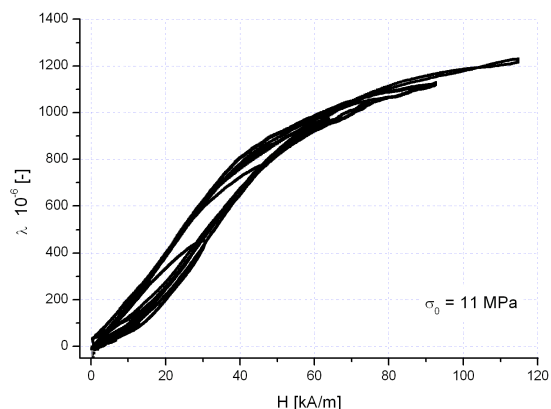
Programowanie własności terfenoli jest możliwe dzięki temu, że podstawowe charakterystyki materiału zależą między innymi od parametrów takich jak tzw. naprężenie wstępne σ_w , natężenie pola podmagnesowującego H_0 oraz widma i czasu trwania obciążenia czynnego.

Na rysunku 4 przedstawiono przykładowy wynik pomiaru efektu odwrotnej magnetostrykcji, przedstawiający zależność pola magnetycznego materiału typu GMM od przyłożonej siły. Badanie tego typu pozwala określić liniowy zakres pracy sensora zbudowanego z materiału magnetostrykcyjnego. Ważną cechą tego typu materiału jest niezaniekanie zewnętrznego pola w czasie, co pozwala na pomiary statyczne i budowę czujnika mierzącego sygnały wolnozmiennie. Rysunek 5 przedstawia pomiar efektu magnetostrykcji. Kształt

przedstawionych krzywych silnie zależy od naprężenia zewnętrznego oraz od przyłożonego stałego pola zewnętrznego.

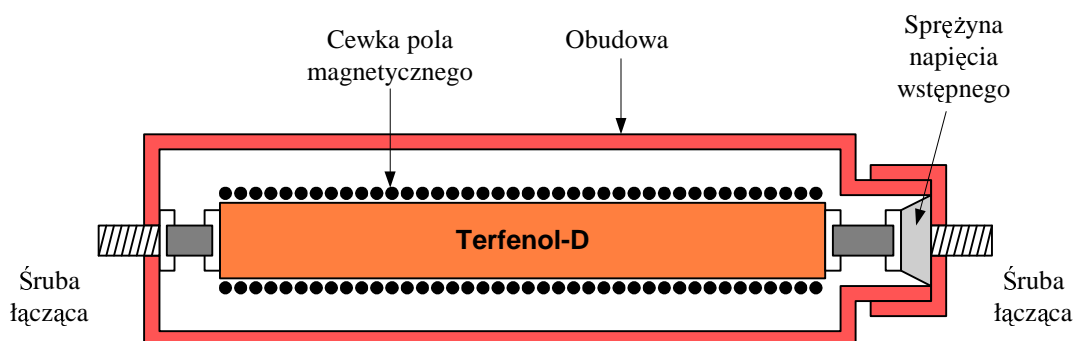


Rys. 4. Zależność pola magnetycznego od przyłożonego naprężenia



Rys. 5. Zależność odkształcenia od natężenia pola magnetycznego dla $\sigma_0 = 11 \text{ MPa}$, $T = 20^\circ\text{C}$

Terfenol-D w postaci pręta stosowany jest w elementach wykonawczych (np. wzbudnikach drgań). Pręt otoczony jest cewką wytwarzającą pole magnetyczne (rys. 6). Dodatkowo, w celu poprawienia charakterystyki pracy, stosuje się sprężyny napinające lub magnesy stałe. Sprężyny napinające wywołują w materiale naprężenie wstępne pozwalając na zachowanie liniowej charakterystyki w większym zakresie odkształceń. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowy schemat budowy elementu wykonawczego firmy MIDE z USA, który pozwala na uzyskanie dużej siły przy niewielkich rozmiarach i krótkim czasie reakcji. W tabeli 2 przedstawiono z kolei przykładowe parametry osiągnięte przez taki element wykonawczy.



Rys. 6. Schemat elementu wykonawczego firmy MIDE z USA [2]

Tabela 2. Przykładowe parametry elementu wykonawczego firmy MIDE [Mide]

Wielkość	Przykładowa wartość
Średnica pręta (Terfenol-D)	8.9 mm
Długość pręta (Terfenol-D)	75.9 mm
Czas odpowiedzi	<0.3 ms/>4 kHz
Skok	0.114 mm
Siła	2.669 kN
Zakres temperatury pracy	-15 ÷ 300 °C
Zajmowana przestrzeń	< (48.1 x 48.1 x 75.9) mm

SENSORY POLA MAGNETYCZNEGO

Czujniki do pomiaru pola magnetycznego możemy podzielić na elementy:

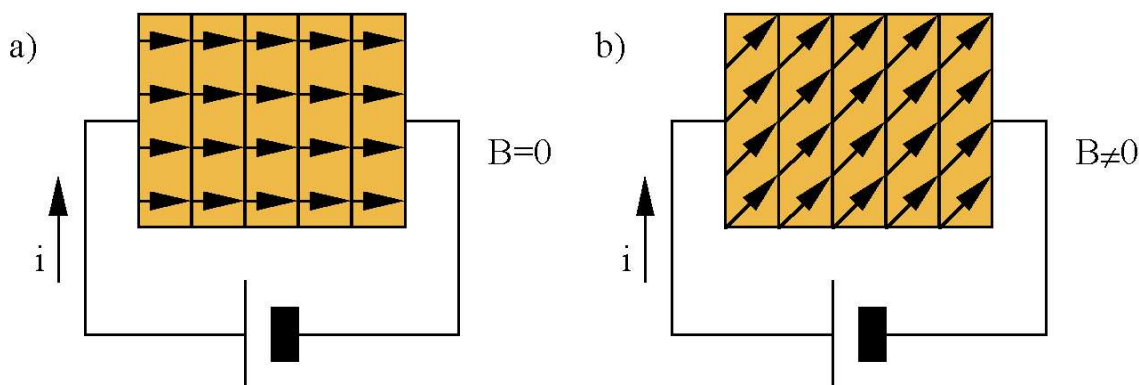
- a). pasywne
 - gaussotrony
 - magnetorezystory
- b). aktywne
 - hallotrony

Poza wymienionymi czujnikami pozwalającymi na pomiary stałego pola magnetycznego, zmienne pole magnetyczne możemy mierzyć za pomocą odpowiednich cewek elektromagnetycznych.

Gaussotron

Istnieją takie materiały jak bizmut (Bi), których rezystancja wzrasta pod wpływem pola magnetycznego. Gdy drut bizmutowy umieści się w polu magnetycznym o indukcji $B = 1$ [T], to jego rezystancja wzrośnie około 1,2 raza. Natomiast z materiałów półprzewodnikowych, np. antymonku indu, można wyprodukować przyrządy zwane gaussotronami, których wartość rezystancji wzrasta od 6 do 18 razy względem wartości nominalnej, jeżeli umieści się je w polu o indukcji 1 T. Zmiany rejestruje się przez pomiar prądu lub przy użyciu mostka pomiarowego i na ich podstawie określa wartość natężenia pola magnetycznego.

Na rysunku 7 wyjaśniono przyczynę zmiany rezystancji antymonku indu w polu magnetycznym. Załóżmy, że w materiale półprzewodnikowym znajdują się przewodzące domieszki. W stanie spoczynku, tzn. bez pola magnetycznego, prąd przepływa zgodnie z kierunkiem strzałek po najkrótszej drodze - wartość rezystancji jest mała. Jeżeli teraz prostopadle do płaszczyzny rysunku skieruje się pole magnetyczne (rys.7.b), to torry prądów płynących w materiale ulegną skróceniu (w polu 1 T o około 80°). W wyniku tego odchylenia wydłuża się droga prądu i rezystancja wzrasta.



Rys. 7. Tory prądu płynącego w gaussotronie

Magnetorezystor

Sensory magnetorezystywne (MR) [Phi1998, Phi2000] wykorzystują zjawisko magnetorezystywne, polegające na zmianie oporności materiału, z którego wykonany jest czujnik, w obecności zewnętrznego pola magnetycznego. Podstawowymi wielkościami używanymi w technice pomiarowej do określenia pola magnetycznego są:

- $1 \text{ kA/m} = 1,25 \text{ mT}$ (militesla, w powietrzu),
- $1 \text{ mT} = 10 \text{ G}$ (gaus).

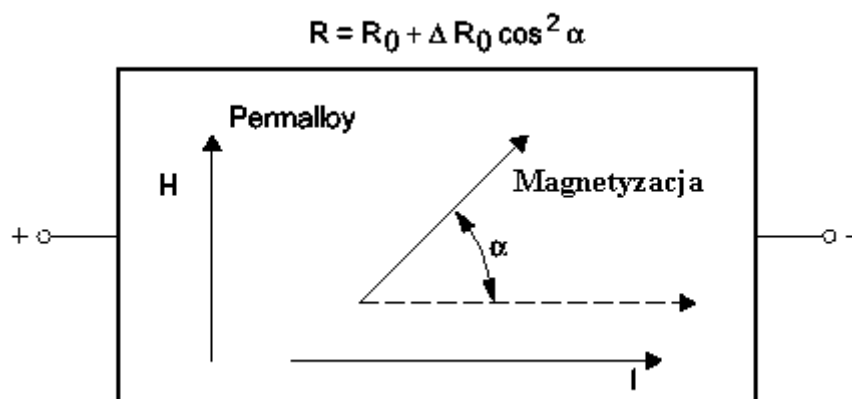
Zależność stosowana do przeliczania wielkości zmierzonego napięcia V_0 na wartość natężenia pola H dla magnetorezystora wyraża się wzorem:

$$\frac{V_0}{V} = S \cdot H, \quad (5)$$

gdzie V_0 [mV] - napięcie wyjścia,
 V [mV] - napięcie zasilające magnetorezystor,
 H [kA/m] - natężenie pola magnetycznego,

$$S \left[\begin{array}{l} \frac{mV}{V} \\ \frac{kA}{m} \end{array} \right] - \text{czułość magnetorezystora.}$$

Podstawy zasady działania sensorów MR przedstawiono na rysunku 8.

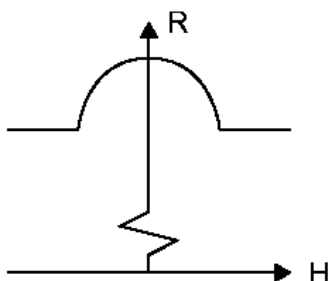


Rys. 8. Efekt magnetorezystancyjny w permalloy'u [Phi1998]

Rysunek 8 przedstawia taśmę ferromagnetycznego materiału, nazywanego permalloy (20% Fe, 80% Ni) [Phi1998], stosowanego na czujniki MR. Jeśli materiał nie jest poddany działaniu zewnętrznego pola magnetycznego, permalloy ma wewnętrzny wektor magnetyzacji równoległy do kierunku przepływu prądu (pokazany jako przepływ wzdłuż permalloy'u od strony lewej do prawej). Jeżeli przyłożone zostanie zewnętrzne pole magnetyczne H , równoległe do płaszczyzny permalloy'u i prostopadłe do kierunku przepływu prądu, to wewnętrzny wektor magnetyzacji będzie zmieniał się w zależności od kąta α . Rezultatem będzie zmiana rezystancji materiału R w zależności od kąta obrotu α zgodnie z regułą:

$$R = R_0 + \Delta R_0 \cos^2 \alpha, \quad (6)$$

gdzie R_0 i ΔR_0 są parametrami materiału. W czujnikach firmy Phillips o najlepszych parametrach używa się Ni19Fe81, co zapewnia dużą rezystancję R_0 i małą magnetostrykcję. Wielkość ΔR_0 materiału szacuje się w granicach 3% R_0 .



Rys. 9. Zależność rezystancji permalloy'u od pola magnetycznego [Phi1998]

Równanie (6) jest równaniem kwadratowym, dlatego zależność rezystancji R od natężenia pola magnetycznego H jest nieliniowa, a w dodatku dla każdej wartości rezystancji R nie możemy przypisać konkretnej wartości natężenia pola magnetycznego H (rys. 9).

W tej prostej postaci efekt magnetorezystancyjny może być wykorzystany do pomiarów kąta i niektórych prędkości kątowych, gdzie nie jest wymagana linearyzacja charakterystyki sensora.

Jak już wspomniano w sensorach wykorzystujących zjawisko magnetorezystywne rezystancja zmienia się pod wpływem pola magnetycznego w zależności od α (wzór 6). Można wykazać, że:

$$\sin \alpha = \frac{H^2}{H_0^2} \quad \text{dla } H \leq H_0, \quad (7)$$

$$\sin \alpha = 1 \quad \text{dla } H > H_0, \quad (8)$$

gdzie H_0 może być uważane za stałą materiałową zależącą od tzw. pola demagnetyzacji i anizotropowego.

Podstawiając równania (7) i (8) do (6) otrzymamy równania:

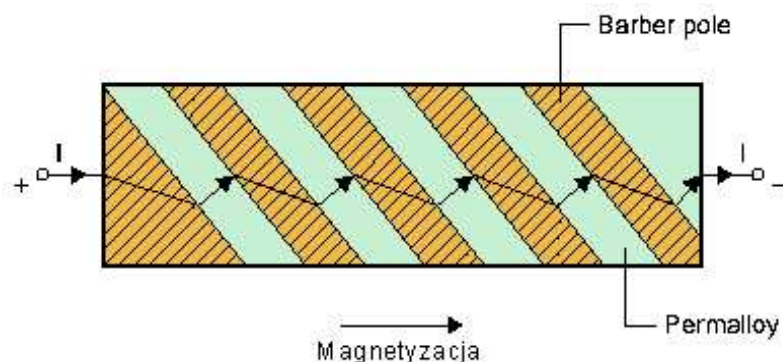
$$R = R_0 + \Delta R_0 \left(1 + \frac{H^2}{H_0^2} \right) \quad \text{dla } H \leq H_0, \quad (9)$$

$$R = R_0 \quad \text{dla } H > H_0, \quad (10)$$

które pokazują nieliniową naturę efektu magnetorezystancyjnego.

Linearyzacja

Efekt magnetorezystancyjny może zostać zlinearyzowany poprzez odpowiednie ułożenie pasków aluminium (ang. Barber poles) na powierzchni paska permalloy'u pod kątem 45° do krawędzi paska (rys. 10). Ponieważ aluminium ma znacznie wyższą przewodność niż permalloy, zadaniem „biegunów Barber'a” (ang. Barber pole) jest obrócenie kierunku przepływu prądu o 45° (przepływ prądu przyjmuje kształt „zębów piły” – ang. „saw-tooth”), co efektywnie zmienia kąt magnetyzacji w równaniu (6) z α na $\alpha - 45^\circ$.



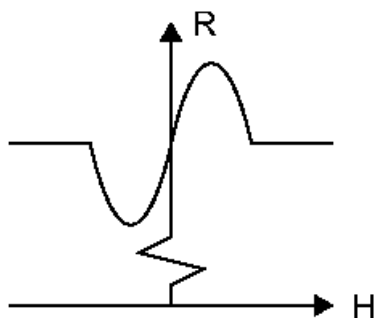
Rys. 10. Linearyzacja efektu magnetorezystancyjnego [Phi1998]

Zastosowanie w linearyzacji magnetorezystora ma także mostek Wheatstone'a. W jednej parze diagonalnie przeciwnych elementów „Barber poles” są skierowane pod kątem $+45^\circ$ do osi paska, podczas gdy następną parę jest pod kątem -45° . W ten sposób w jednej parze elementów rezystancja rośnie w zależności od zewnętrznego pola, a drugiej obniża się. W rezultacie niezrównoważenie mostka jest liniową funkcją amplitudy zewnętrznego pola magnetycznego w płaszczyźnie paska permalloyu prostopadle do jego osi (rys. 11).

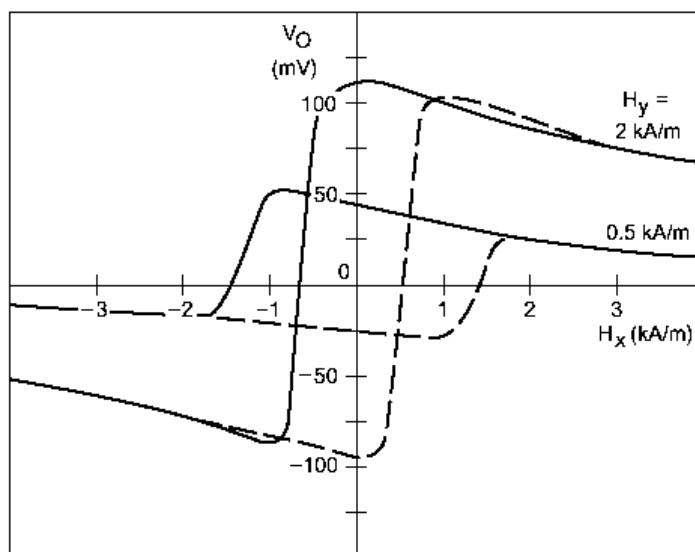
Dla sensorów wykorzystujących „Barber poles” zorientowanych pod kątem $+45^\circ$ do osi paska charakterystykę opisuje następujące równanie:

$$R = R_0 + \frac{\Delta R_0}{2} + \Delta R_0 \left(\frac{H}{H_0} \right) \sqrt{1 - \frac{H^2}{H_0^2}} \quad (11)$$

Równanie jest liniowe dla $H/H_0 = 0$ co pokazano na rysunku 12.



Rys. 11. Zależność rezystancji permalloy'u od zewnętrznego pola magnetycznego po linearyzacji [Phi1998]



Rys. 12. Zależność wartości V_0 na wyjściu magnetorezystora od zewnętrznego pola H_x dla kilku wartości pola poprzecznego H_y [Phi1998]

Podobnie dla sensorów wykorzystujących „Barber poles” zorientowanych pod kątem -45° możemy napisać równanie:

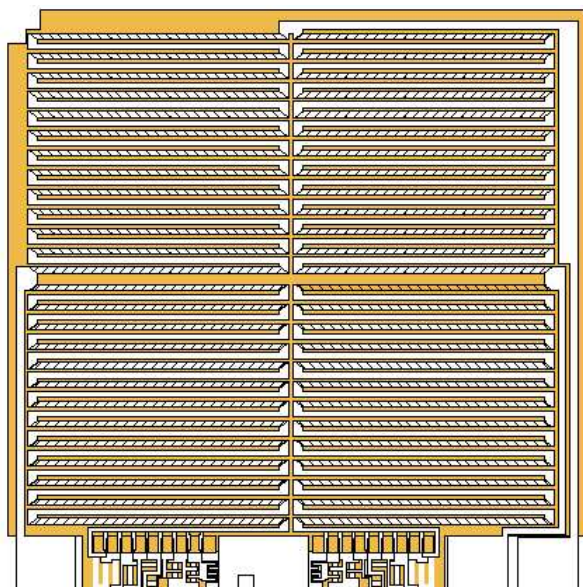
$$R = R_0 + \frac{\Delta R_0}{2} - \Delta R_0 \left(\frac{H}{H_0} \right) \sqrt{1 - \frac{H^2}{H_0^2}} \quad (12)$$

Jest to lustrzane odbicie charakterystyki z rysunku 12. Wykorzystywanie mostka Wheatstone'a powoduje, że każde jego niezrównoważenie jest liniową funkcją amplitudy zewnętrznego pola magnetycznego.

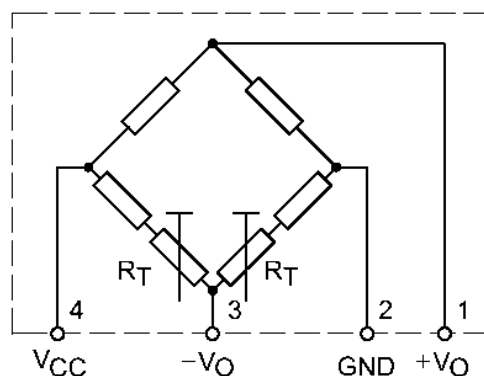
W serii sensorów KMZ firmy Philips stosuje się cztery paski permalloy'u ułożone w wężykowaty wzór w kształcie meandra na strukturze krzemu (rys. 13). Są one połączone w konfiguracji mostka Wheatstone'a. Mostek ten ma wiele zalet, jak np.:

- redukcja dryftu temperaturowego,
- podwojenie sygnału wyjściowego,
- sensor może być strojony w fabryce.

Na rysunku 14 przedstawiono konfigurację mostka stosowanego w magnetorezystorach z dwoma rezystorami R_T , które są dołączane w ostatnim procesie produkcji w celu zestrojenia czujnika tak, aby miał jak najmniejszy offset (przesunięcie) sygnału wyjściowego (bliski zeru). Na rysunku V_{cc} oznacza napięcie zasilające najczęściej 5V, GND masę zasilania, a $+V_0$ i $-V_0$ wyjścia z układu.



Rys. 13. Struktura płytki magnetorezystorów KMZ10 [Phi1998]



Rys. 14. Konfiguracja mostka z równoważeniem tzw. offset'u (przesunięcia) do wartości zero rezystorami R_T [Phi1998]

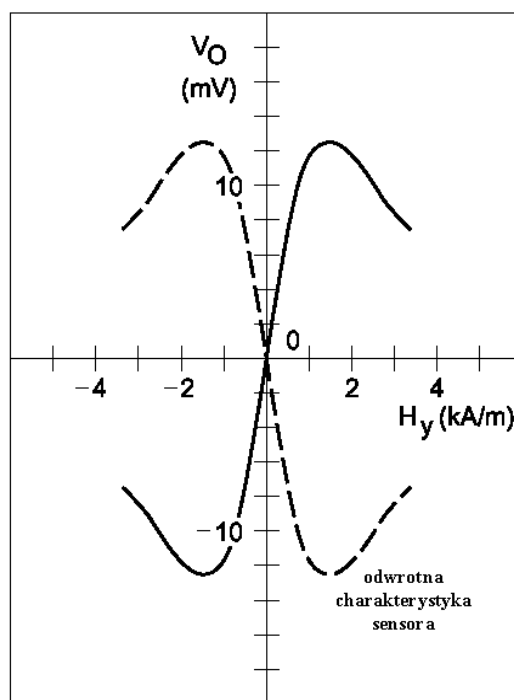
Bazując na opisanych założeniach, Phillips wytwarza rodzinę prostych magnetorezystancyjnych sensorów. Główne parametry rodziny magnetorezystorów typu KMZ przedstawia tabela 3.

Tabela 3. Magnetorezystory KMZ firmy Philips [Phi1998, Phi2000]

Typ sensora	Obudowa	Zakres pola [kA/m]	V_{cc} [V]	Czułość $\left[\frac{mV/V}{kA/m} \right]$	R_{mostka} [k Ω]	Efekt linearyzacji MR	Przykłady zastosowań
KMZ10A	SOT195	-0.5 ÷ +0.5	≤ 9	16.0	1.2	Tak	kompas, nawigacja, detekcja metali, kontrola ruchu ulicznego
KMZ10A1	SOT195	-0.05 ÷ +0.05	≤ 9	22.0	1.3	Tak	
KMZ10B	SOT195	-2.0 ÷ +2.0	≤ 12	4.0	2.1	Tak	pomiary prądu, kątowne i liniowe położenie, detekcja znaczników odniesienia, prędkość kół
KMZ10B1	SO8	-2.0 ÷ +2.0	≤ 12	4.0	2.1	Tak	
KMZ10C	SOT195	-7.5 ÷ +7.5	≤ 10	1.5	1.4	Tak	
KMZ41	SO8	H = 100	≤ 12	2.8	2.5	Nie	pomiary kątowne
KMZ50	SO8	-0.2 ÷ +0.2	≤ 8	16.0	2.0	Tak	kompas, nawigacja, detekcja metali, kontrola ruchu ulicznego
KMZ51	SO8	-0.2 ÷ +0.2	≤ 8	16.0	2.0	Tak	
KMZ52	SO16	-0.2 ÷ +0.2	≤ 8	16.0	2.0	Tak	

Zmiana orientacji pomiaru (flipping)

Wewnętrzna magnetyzacja paska sensora ma dwie stabilne pozycje. Dlatego w przypadku zaistnienia warunków, w których sensor zostanie poddany bardzo silnemu polu magnetycznemu, przekraczającemu zakres pomiarowy czujnika, skierowanemu przeciwnie do wektora wewnętrznej magnetyzacji, wektor magnetyzacji może przejść (przeskoczyć) z jednego kierunku na drugi i pasek zostanie namagnetyzowany w przeciwnym kierunku (np. z „+x” na „-x” na rysunku 15). Zgodnie z rysunkiem 15 wspomniany efekt może prowadzić do drastycznych zmian w charakterystyce sensora.

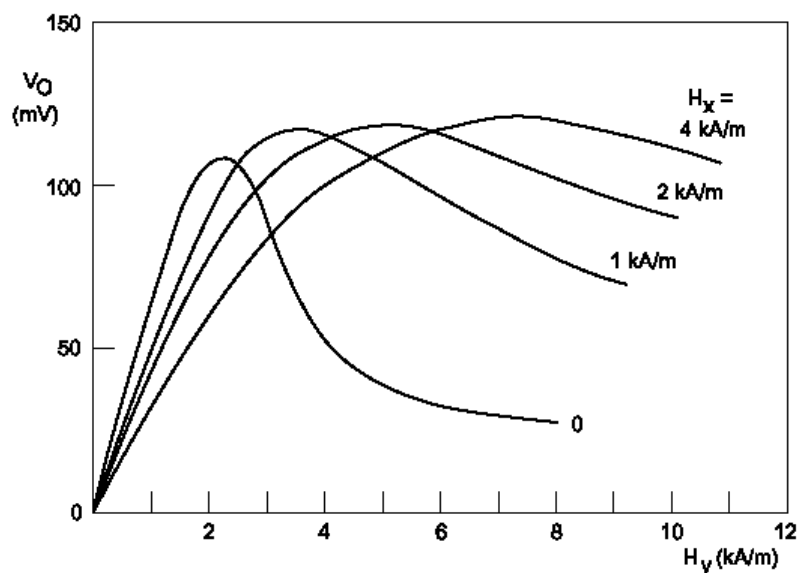


Rys. 15. Charakterystyka sensora [Phi1998]

Wielkość pola potrzebna do „przeskoku” magnetyzacji sensora, i jednocześnie zmiany charakterystyki, zależy od amplitudy poprzecznego pola „ H_y ”. Oznacza to, że im większe jest pole „ H_y ”, tym mniejsze jest pole „ $-H_x$ ”. Wzrost pola „ H_y ” zbliża rotacyjny wskaźnik pola magnetycznego α do 90° , i dlatego łatwiej może nastąpić przeskok w najbliższą pozycję w kierunku „-x”.

Na rysunku 12 przedstawiono krzywą dla $H_y = 0,5$ kA/m, która pokazuje, że dla tak małego pola poprzecznego charakterystyka sensora jest stabilna dla wszystkich dodatnich wartości H_x i do przeskoku jest potrzebne przeciwne pole o wartości około 1 kA/m. Przy wartości $H_y = 2$ kA/m sensor będzie „przeskakiwał” nawet dla bardzo małych wartości pola H_x (ok. 0,5 kA/m). Przeskok magnetyzacji nie następuje bezzwłocznie, ponieważ nie wszystkie paski permalloy’u przeskakują przy tej samej wartości. Rysunek 12 pokazuje także, że w sensorach występuje zjawisko histerezy.

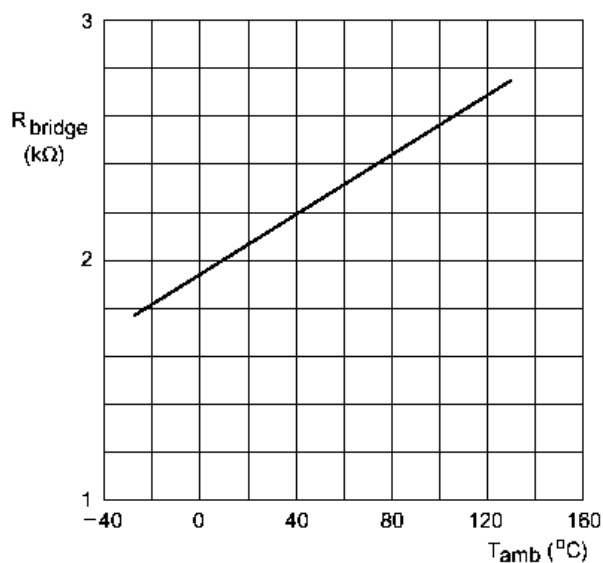
Przedstawiony rysunek 12 oraz rysunek 16 pokazują, że czułość sensorów obniża się wraz ze wzrostem pola H_x .



Rys. 16. Zależność wartości V_0 na wyjściu magnetorezystora od poprzecznego pola H_y dla kilku wartości zewnętrznego pola H_x [Phi1998]

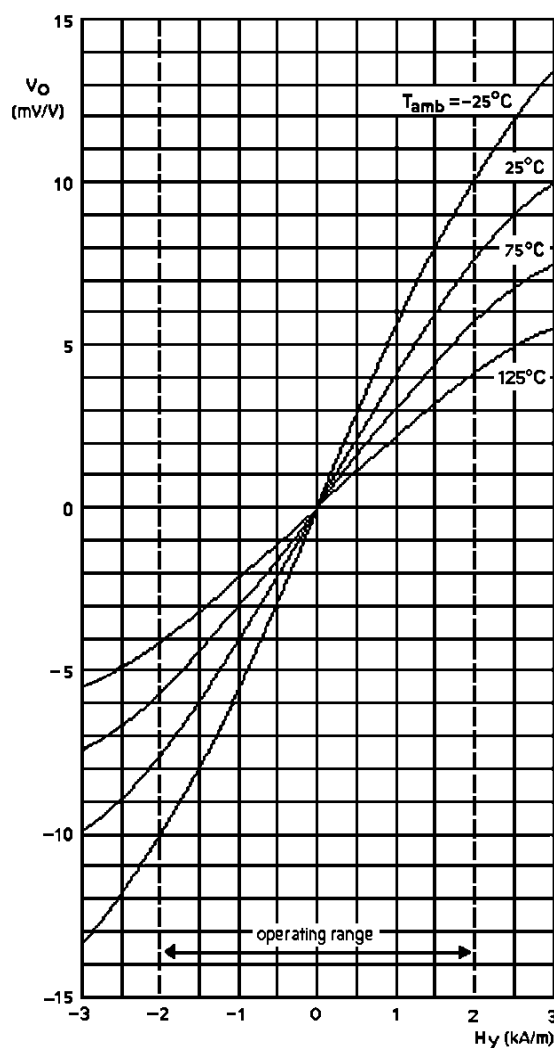
Wpływ temperatury na zachowanie magnetorezystora

Na rysunku 17 przedstawiono zmianę rezystancji mostka w magnetorezystorze. Rezystancja rośnie liniowo wraz z temperaturą. Zmiany te powinny się uwzględnić budując układy pomiarowe.



Rys. 17. Zależność rezystancji mostka sensora KMZ10B od temperatury otoczenia [Phi1998]

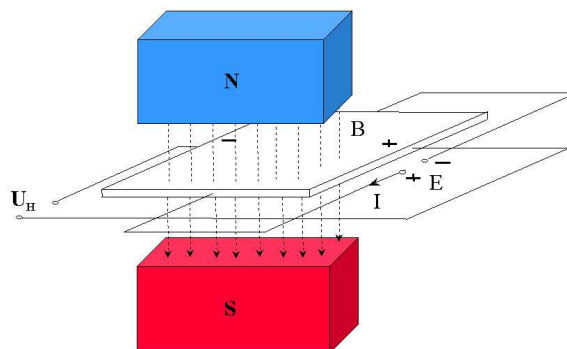
Dodatkowo, oprócz zmiany rezystancji, wraz z temperaturą zmienia się czułość (rys. 18). Ze wzrostem temperatury maleje czułość sensora. Przyczyna tego jest związana prawdopodobnie ze strukturą pasma energetycznego paska permalloy'u.



Rys. 18. Zależność wartości V_0 na wyjściu magnetorezystora KMZ10B od poprzecznego pola H_y dla kilku temperatur otoczenia [Phi1998]

Sonda Hall'a

Generator Halla jest elementem o oporności zależnej od pola magnetycznego, ale o charakterze czynnym. Jeżeli umieści się go w polu magnetycznym i przepuści przez niego prąd, to powstanie siła elektromotoryczna.



Rys. 19. Zasada działania sondy Halla (generatora Halla)

Jeżeli przez hallotron przedstawiony na rysunku 19 umieszczony w polu magnetycznym o indukcji B płynie prąd I , to pomiędzy pozostałymi bokami płytki hallotronowej wytworzy się napięcie elektryczne, tzw. napięcie Halla U_H . W metalach napięcie to jest nieznaczne,

natomiast znacznie wyższe w materiałach półprzewodnikowych. W krzemie, arseniku indu (InAs) i antymonku indu (InSb) powstająca siła elektromotoryczna jest tak duża, że z boków płytki oznaczonych "+" i "-" można pobierać prąd. Stąd właśnie pochodzi nazwa generator Halla.

Napięcie Halla jest tym wyższe, im większy jest współczynnik Halla R_H materiału, im większe natężenie prądu I oraz indukcja magnetyczna B . Ponadto napięcie Halla jest tym wyższe, im cieńsza jest płytka półprzewodnika. Jeżeli jej grubość oznaczy się jako " d ", to obowiązuje zależność:

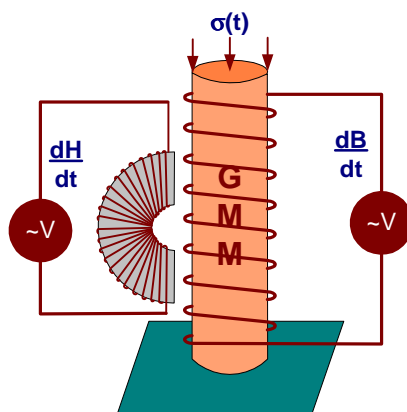
$$U_H = R_H/d I B, \quad (13)$$

gdzie: U_H [mV] - napięcie Halla, R_H [$\text{cm}^3\text{A}^{-1}\text{s}^{-1}$] - współczynnik Halla, d [mm] - grubość półprzewodnika, I [mA] - natężenie prądu, B [T] - indukcja magnetyczna.

Stosunek R_H/d jest wartością stałą dla danego typu hallotronu co oznacza, że jeśli wartość prądu I przepływającego przez hallotron nie zmienia się, to charakterystyka $U_H(B)$ jest liniowa.

Cewki elektromagnetyczne do pomiaru zmiennego pola magnetycznego

Korzystając ze zjawiska indukcji elektromagnetycznej, które mówi że zmienny strumień magnetyczny (występujący między innymi przy zmiennym polu magnetycznym) indukuje siłę elektromotoryczną, możemy w prosty sposób mierzyć zmienne pola magnetyczne. Typowe układy pomiarowe zostały przedstawione na rysunku 20.



Rys. 20. Cewki elektromagnetyczne do pomiaru zmiennego pola magnetycznego

Napięcie na jednej z cewek $U_B = dB/dt$ odpowiada zmiennej wartości indukcji magnetycznej w materiale, natomiast $U_H = dH/dt$ zmiennemu natężeniu pola magnetycznego. Sygnały te po scałkowaniu dadzą nam wartości $B(t)$ i $H(t)$.

Literatura:

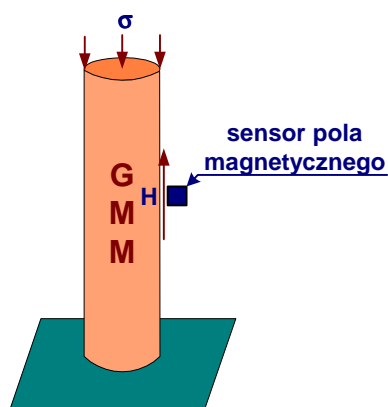
- [Joshi] - Ch.H.Joshi, E. S. Bobrov – *Compact, efficient deformable mirrors for spaceborne telescopes.*; Energen Inc., Bedford, Massachusetts
- [Mide] - MIDE, <http://www.mide.com>
- [Phi1998] - PHILIPS: *General. Magnetic field sensors. File under Discrete Semiconductors, SC17.*; 12 czerwca 1998
- [Phi2000] - PHILIPS: *General Magnetoresistive sensors for magnetic field measurement*; 6 września 2000
- [Raw1996] - H.Rawa, *Podstawy elektromagnetyzmu*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1996
- [Saw1998] - I.W.Sawieliew, *Wykłady z fizyki, tom 2, Elektryczność i magnetyzm. Fale. Optyka., wyd. III, PWN, Warszawa, 1998*

ZADANIA DO WYKONANIA

A. Pomiary statycznych wartości pola magnetycznego

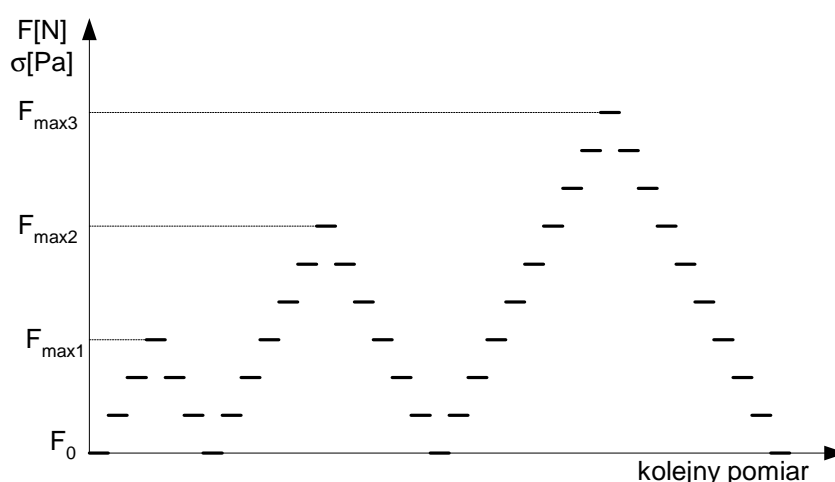
Pomiar zmiany składowej stycznej natężenia zewnętrznego pola magnetycznego H pod wpływem krokowej zmiany zewnętrznego obciążenia czujnika magnetostrykcyjnego.

Celem wykonywanego zadania jest zapoznanie się ze sposobem pomiaru składowej stycznej wektora natężenia pola magnetycznego H w próbce walcowej z materiału wykazującego zjawisko odwrotnej magnetostrykcji. Materiał ten poddany quasistatycznym zmianom obciążenia zewnętrznego w postaci siły wykazuje zmianę wektora magnetyzacji M czego następstwem jest zmiana składowej stycznej natężenia pola magnetycznego H . Zjawisko to charakteryzuje się pewną nieliniowością, której obserwacja jest jednym z celów ćwiczenia. Schemat pomiarowy został przedstawiony na rysunku A1.



Rys. A1. Schemat pomiarowy do pomiaru składowej stycznej natężenia pola magnetycznego próbki walcowej typu GMM

Obciążenie próbki siłą powinno następować krokowo do pewnej wartości. Następnie należy próbkę odciążać do zadanej wartości początkowej F_0 . Cykl taki należy powtórzyć kilkakrotnie za każdym razem zwiększając maksimum osiąganą wartość obciążenia przed przystąpieniem do odciążania próbki (rys. A2). Pomiary należy wykonać dla zadanej stałej wartości natężenia pola magnetycznego H_0 . (Wprowadzenie F_0 i H_0 wprowadza warunki początkowe wpływające na mierzone wartości – kształt uzyskiwanych krzywych).



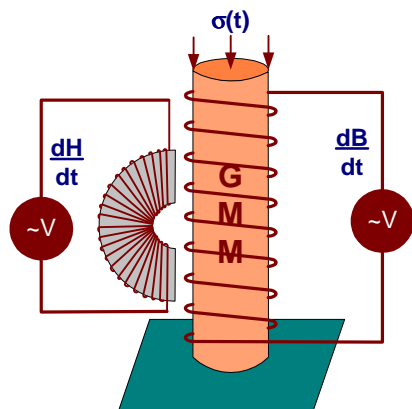
Rys. A2. Cykliczne obciążenie quasistatyczne próbki siłą

Pomiar wartości składowej stycznej natężenia pola magnetycznego H będzie realizowany za pomocą czujnika pola magnetycznego (sondy Halla lub magnetorezystora) przyłożonego do powierzchni próbki. Należy odczytać wartości pola dla odpowiadających im wartości obciążenia. Wyniki należy odnotować w tabeli A1 i dołączyć do sprawozdania.

B. Pomiary dynamicznych wartości pola magnetycznego

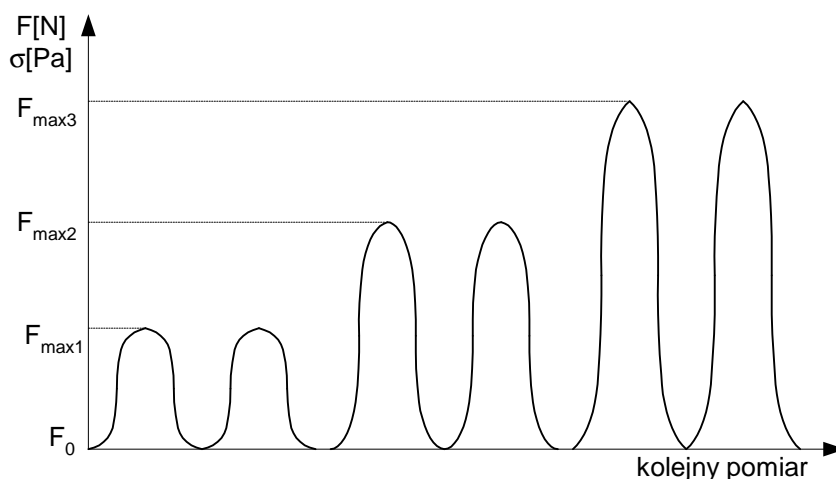
Pomiar zmiany składowej stycznej natężenia zewnętrznego pola magnetycznego $H(t)$ oraz indukcji magnetycznej dB/dt pod wpływem sinusoidalnej zmiany zewnętrznego obciążenia czujnika magnetostrykcyjnego dla kilku wartości amplitudy obciążenia.

Celem wykonywanego zadania jest zapoznanie się ze sposobem pomiaru dynamicznych zmian składowej stycznej wektora natężenia pola magnetycznego $H(t)$ (identycznie jak w części A) oraz indukcji magnetycznej dB/dt w próbce walcowej z materiału wykazującego zjawisko odwrotnej magnetostrykcji. Materiał ten poddany cyklicznym zmianom obciążenia zewnętrznego w postaci siły wykazuje zmianę wektora magnetyzacji M czego następstwem jest zmiana składowej stycznej natężenia pola magnetycznego $H(t)$ oraz indukcji magnetycznej $B(t)$. Zjawisko to charakteryzuje się dużą nieliniowością, której wynikiem jest powstawanie pętli histerezy. Schemat pomiarowy został przedstawiony na rysunku B1.



Rys. B1. Schemat pomiarowy do pomiarów dynamicznych natężenia oraz indukcji pola magnetycznego próbki walcowej typu GMM

Próbka będzie poddana sinusoidalnemu obciążeniu ściskającemu o rosnącej amplitudzie przy ustalonej wartości stałego obciążenia F_0 oraz stałej wartości natężenia pola magnetycznego H_0 . Należy zarejestrować przebiegi czasowe sygnału $F(t)$, $H(t)$, $dB(t)/dt$ dla wskazanych wartości amplitudy obciążenia (rys. B2).



Rys. B2. Cykliczne obciążenie dynamiczne próbki siłą

Pomiar wartości składowej stycznej natężenia pola magnetycznego $H(t)$ będzie realizowany w identyczny sposób jak w części A. Wartość dB/dt zostanie zarejestrowana przez cewkę pomiarową nawiniętą na próbkę. Przebiegi czasowe mierzonych sygnałów zostaną zarejestrowane za pomocą karty pomiarowej i udostępnione w celu przygotowania sprawozdania. Wartości amplitudy obciążenia oraz natężenia pola magnetycznego należy odnotować w tabeli B1 i dołączyć do sprawozdania.

C. Opracowanie wyników

Sprawozdanie z przeprowadzonych ćwiczeń powinno zawierać niezbędne dane identyfikujące osoby w grupie ćwiczeniowej oraz datę i godzinę przeprowadzonego ćwiczenia.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów należy opracować następujące wykresy:

Część A

- Natężenia pola magnetycznego H w funkcji naprężenia σ - $H = f(\sigma)$

Część B

- Mierzonych sygnałów w funkcji czasu – $\sigma(t)$, $H(t)$, dB/dt , $B(t)$
- Złożenie sygnału obciążenia i natężenia pola magnetycznego oraz indukcji magnetycznej – $H(t) = f(\sigma(t))$, $B(t) = f(\sigma(t))$.

Do sprawozdania należy dołączyć arkusz z tabelami A1 i B1. Pusty arkusz do wypełnienia zostanie dostarczony grupie przez prowadzącego ćwiczenie.

Sprawozdanie należy dostarczyć prowadzącemu ćwiczenia **w ciągu 2 tygodni** od daty wykonania ćwiczenia.

