



**ĆWICZENIE  
64**

**WYZNACZANIE NATĘŻENIA SKŁADOWEJ POZIOMEJ  
ZIEMSKIEGO POLA MAGNETYCZNEGO**

**Cel ćwiczenia:** Wyznaczenie natężenia składowej poziomej ziemskiego pola magnetycznego.

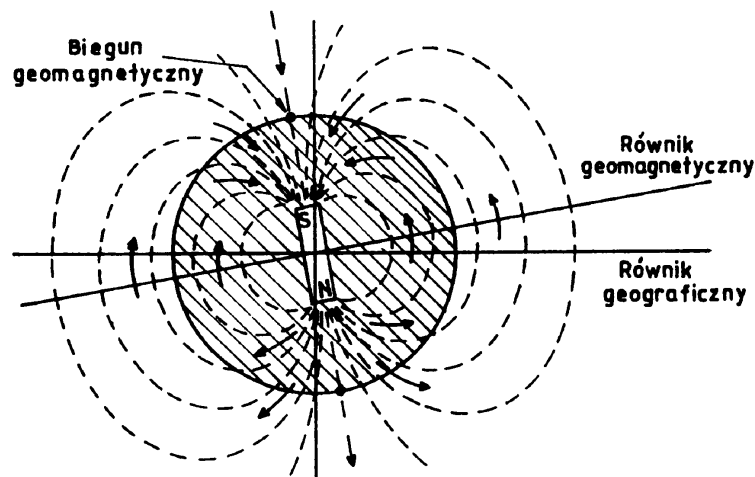
**Zagadnienia:** ziemskie pole magnetyczne, wielkości i jednostki opisujące pola magnetyczne i elektryczne, równania Maxwella, sposoby wytwarzania pola magnetycznego, zastosowania busoli styčných.

**1 Wprowadzenie**

64.1.1. Magnetyzm ziemski

Zjawiska magnetyczne znane były w starożytnych Chinach prawdopodobnie już 26 wieków p.n.e. Legendy głoszą, że w XII wieku p.n.e. posłowi Indii ofiarowano w Chinach figurkę, która obracając się na pionowym drążku wskazywała ręką południe. W II wieku p.n.e. żeglarze chińscy posługiwali się już kompasem. W Europie w XII w.n.e. znano kompas, w którym umieszczona na drewnianym igła magnetyczna pływała po wodzie. W roku 1600 ukazało się pierwsze naukowe dzieło o magnetyzmie — praca angielskiego lekarza Williama Gilberta „*O magnetyzmie i ciałach magnetycznych, a także o wielkim magnesie ziemskim*”.

W istocie ziemskie pole magnetyczne zachowuje się jak pole wielkiego, ale słabego



**Rys. 64.1.** Linie sił pola magnetycznego dipolowego modelu Ziemi.

magnesu sztabkowego. Umieszczona w jądrze Ziemi sztabka (rys. 64.1) jest skręcona o kąt  $11,5^\circ$  w stosunku do osi obrotu naszej planety, a jej środek nieco przesunięty od środka Ziemi.

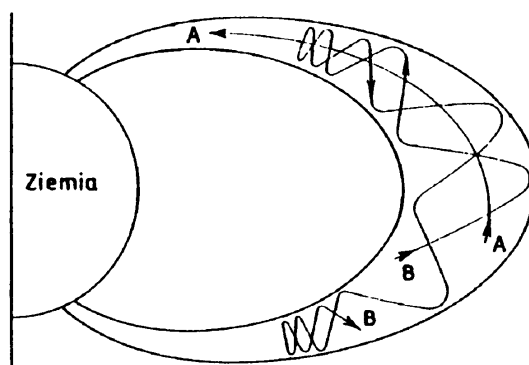
Para biegunów magnetycznych Ziemi stanowi dipol (z gr. *dis* — dwa razy, *polos* — biegun) magnetyczny a ziemskie pole magnetyczne nazwano polem dipolowym.

Bieguny magnetyczne Ziemi nie pokrywają się z biegunami geograficznymi. Wobec tego, że igły magnetycznej używa się jako wskaźnika kierunku (kompas), dla uniknięcia nieporozumień zarówno biegun magnetyczny ziemski leżący na półkuli północnej jak i koniec igły magnetycznej wskazujący kierunek północny nazwano północnymi, pomimo tego, że jak wiemy, przyciągają się bieguny różnoimienne. Istnienie dwóch kierunków północnych tj. geograficznego oraz magnetycznego powoduje, że nawigatorzy używający kompasu muszą stosować, zwłaszcza na dużych dystansach, odpowiednie poprawki do wskazań kompasu.

Swobodnie zawieszona igła magnetyczna umieszczona z dala od wszystkich przedmiotów mogących na nią działać magnetycznie — ustawia się zawsze w pewien określony sposób. Igła mająca swobodę poruszania się w płaszczyźnie poziomej ustawia się w kierunku północ-południe. Jeśli igła magnetyczna ma możliwość obracania się w płaszczyźnie pionowej, to na półkuli północnej nachyli się swym biegunem północnym ku dołowi, a na półkuli południowej przeciwnie — jej koniec północny zwraca się ku górze. Takie zachowanie igły magnetycznej dowodzi, że znajduje się ona w niezaburzonej ziemskim polu magnetycznym.

Przyczyna istnienia magnetyzmu ziemskiego nie jest jeszcze przez naukę dokładnie poznana. Istnieją różne hipotezy. Jedna z nich przypisuje wytworzenie pola magnetycznego prądom elektrycznym, które powstają w płynnym jądrze Ziemi. Jest ono zbudowane głównie z żelaza i niklu przez co jest dobrym przewodnikiem elektryczności. W myśl tej hipotezy, dzięki ruchowi wirowemu Ziemi na granicy jądra i skorupy płynie równikowo prąd elektryczny. Podobnie jak w elektromagnesach, taki prąd musi wytwarzać pole magnetyczne

Ziemskie pole magnetyczne nie jest stałe. Możemy rozróżnić dwie składowe tego pola: opisywaną przez model dipolowy, regularną i w przybliżeniu stałą w czasie składową pola pochodzącą od Ziemi (dipolową) oraz zmienną, słabszą od pierwszej składową wywołaną przez zjawiska elektromagnetyczne zachodzące w atmosferze. Zmiany te zachodzą w cyklu dobowym, rocznym oraz długookresowym. Nieznaczne dobowe i roczne zmiany wartości



Rys. 64.2. Trajektorie cząstek naładowanych w polu magnetycznym Ziemi

kierunku i natężenia pola powstają w związku z położeniem Słońca i zmianami natężenia promieniowania kosmicznego. Ponadto zdarzają się gwałtowne zakłócenia w polu magnetycznym Ziemi, czyli tzw. burze magnetyczne.

Z Kosmosu dociera do Ziemi wiatr słoneczny – cząstki elementarne, jądra wodoru, helu oraz niewielkie ilości jąder cięższych pierwiastków. Na skutek przyciągania Słońca i Księżyca powyżej 40000 km nad powierzchnią Ziemi powstają silne wiatry zjonizowanych cząstek o prędkościach rzędu 100m/s. Dzięki polu magnetycznemu naładowane elektrycznie cząstki, na skutek działania siły Lorentza, zostają spuławpkowane - krążą wzdłuż linii sił pola magnetycznego (Rys.64.2) od bieguna do bieguna i nie docierają do powierzchni Ziemi. Ma to kolosalne znaczenie dla stabilności życia biologicznego na Ziemi. Z drugiej strony, będące w ruchu naładowane elektrycznie cząstki są źródłem zmiennego pola magnetycznego. Nakłada się ono na stałe pole dipolowe. W okolicach biegunów magnetycznych linie sił pola zagęszczają się a koncentracja jonów rośnie. Powoduje to zmianę kierunku ruchu jonów oraz występowanie zórz polarnych. Powyżej 80000 km pole magnetyczne jest już bardzo słabe.

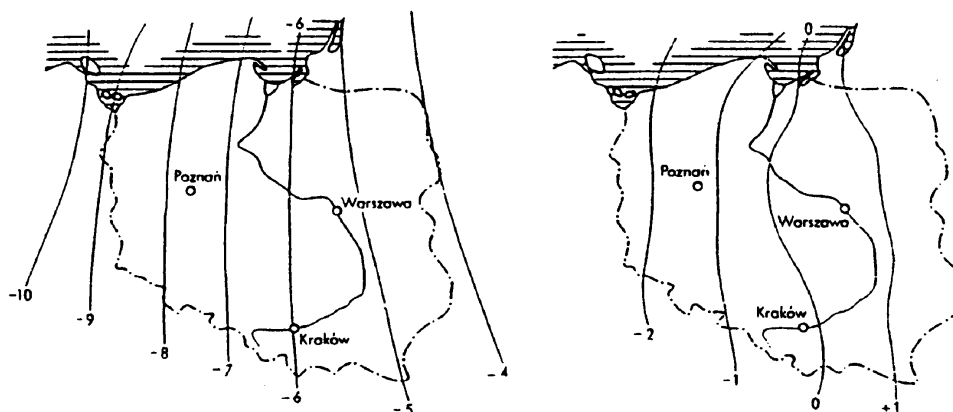
Na określonych obszarach na powierzchni Ziemi, istnieje pewien normalny, średni stan magnetyzmu. Zdarza się jednak, że lokalnie mamy do czynienia ze znacznymi odchyłkami wartości natężenia pola magnetycznego od wartości przewidywanych. Przyczyn takich anomalii magnetycznych należy szukać w budowie geologicznej danego obszaru. Silne zakłócenia związane są z występowaniem niektórych złóż mineralnych, toteż badania magnetyczne stosuje się przy wykrywaniu bogactw mineralnych.

#### 64.1.2. Wielkości opisujące ziemskie pole magnetyczne

Pole magnetyczne jest polem wektorowym. Do opisu takiego pola konieczne jest podanie jego trzech składowych, ich zależności od czasu oraz układu odniesienia. W różnych układach odniesienia wzory opisujące to samo pole magnetyczne są różne

Dla celów geograficznych do opisu ziemskiego pola magnetycznego używamy trzech wielkości: deklinacji, inklinacji oraz natężenia pola

Położenie biegunów magnetycznych nie pokrywa się z położeniem biegunów geograficznych przez co igła magnetyczna kompasu nie wskazuje północy geograficznej.



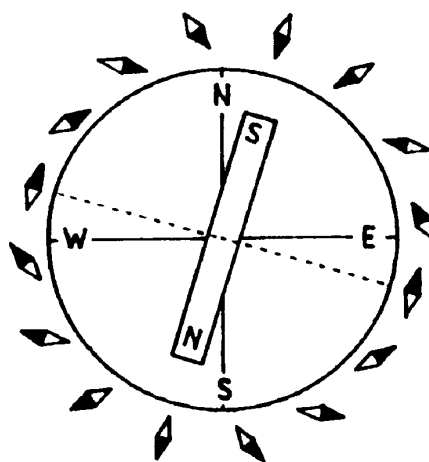
Rys. 64.3. Zmiana deklinacji na terenie Polski w okresie od 1908 do 1948 roku.

Kąt, o jaki igła magnetyczna odchyła się od południka geograficznego, nazywa się *deklinacją* (zboczenie). Odchylenie igły magnetycznej w kierunku wschodnim od południka geograficznego nazywa się deklinacją dodatnią (+), natomiast ku zachodowi deklinacją ujemną (-). Wartość deklinacji w różnych punktach, nawet niezbyt wielkiego obszaru

powierzchni kuli ziemskiej, jest różna. Rysunek 64.3 pokazuje wartość deklinacji na terenie Polski. Widać tu, że deklinacja waha się w granicach około  $6^\circ$  a ponadto zależy od czasu.

Kąt odchylenia igły magnetycznej od poziomu nosi nazwę *inklinacji* magnetycznej. Punkty o inklinacji równej  $0^\circ$  ułożone są w linii opasującej kulę ziemską i stanowią tak zwany równik magnetyczny (Rys.64.3). Inklinacja wzrasta stopniowo ku biegunom magnetycznym, gdzie osiąga  $90^\circ$ . Na biegunach magnetycznych igła busoli ustawia się prostopadłe do powierzchni Ziemi.

W Polsce inklinacja waha się w granicach od  $+64^\circ$  na południu do  $+70^\circ$  na północnym obszarze kraju.



Rys.64.4. Zależność inklinacji magnetycznej od szerokości geograficznej

Trzecim elementem określającym stan magnetyczny jest natężenie pola magnetycznego. Natężenie ziemskiego pola magnetycznego jest bardzo słabe, wynosi bowiem średnio około 15 A/m. ( $\sim 1/2$  gausa).

Na zakończenie należy wspomnieć o paleomagnetyzmie. Minerale zawierające żelazo, kobalt lub nikiel czyli ferromagnetyki (np. lawy Wezuwiusza) układają się w czasie sedymentacji (osiadania) zgodnie z kierunkiem linii sił pola magnetycznego. Takie „zapisy” magnetyczne posiadają skały pochodzące z różnych okresów geologicznych. Utrwalone w nich kierunki pól magnetycznych istniejących w czasie tworzenia się danych skał, pozwalają na określenie położenia biegunów geomagnetycznych w przeszłości Ziemi. Stwierdzono, że położenie biegunów magnetycznych w różnych okresach geologicznych zmieniało się bardzo znacznie i np. w prekambrye północny biegun magnetyczny znajdował się w środkowej części Pacyfiku. Badania paleomagnetyzmu nie są zakończone. Wiele jeszcze związanych z nimi zagadnień pozostaje do wyjaśnienia.

Na stronie [www.ngdc.noaa.gov/geomag/magfield.shtml](http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/magfield.shtml) można skorzystać z kalkulatora pól magnetycznych. Dla danego miejsca (współrzędne geograficzne i wysokość nad poziomem morza) oraz konkretnej daty dostajemy wszystkie możliwe parametry pola łącznie z ich rocznymi zmianami. Z tego źródła dla pracowni LPF pod koniec sierpnia 2014 roku składowa pozioma pola magnetycznego wynosiła 15,385 A/m.

### 64.1.2. Opis pola magnetycznego

Zjawiska magnetyczne i elektryczne opisane są za pomocą równań Maxwella. Równania te umożliwiają określenie na podstawie rozkładu ładunków i prądów właściwości wytworzonych przez nie pól elektrycznego i magnetycznego.

Pierwsze równanie Maxwella ma postać

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{\partial \Phi_m}{\partial t} \quad (64.1)$$

i jest uogólnieniem prawa indukcji elektromagnetycznej Faradaya. Z równania tego wynika, że zmiana strumienia magnetycznego  $\Phi_m$  indukuje wirowe pole magnetyczne o natężeniu  $E$ .

Drugie równanie Maxwella (64.2) mówi, że cyrkulacja wektora natężenia pola magnetycznego  $H$  po dowolnym konturze  $L$  równa się sumie algebraicznej prądów makroskopowych  $I_m$  oraz prądów przesunięcia  $I_p$  płynących przez powierzchnię rozpiętą na

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_m + I_p \quad (64.2)$$

tym konturze.

Trzecie równanie Maxwella (64.3) jest uogólnionym prawem Ostrgradskiego-Gausa.

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = q \quad (64.3)$$

Równanie to mówi, że strumień indukcji elektrycznej  $D$  pola przez dowolną zamkniętą powierzchnię  $S$  jest proporcjonalny do ładunku  $q$  zamkniętego wewnątrz tej powierzchni.

Czwarte równanie Maxwella (64.4) jest magnetycznym analogiem równania (64.3)

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (64.4)$$

mówi ono, że strumień magnetyczny przez zamkniętą powierzchnię  $S$  jest zerowy. Pole magnetyczne jest bezźródłowe.

Do równań tych należy dodać równania opisujące własności elektryczne i magnetyczne ośrodka, który opisują:

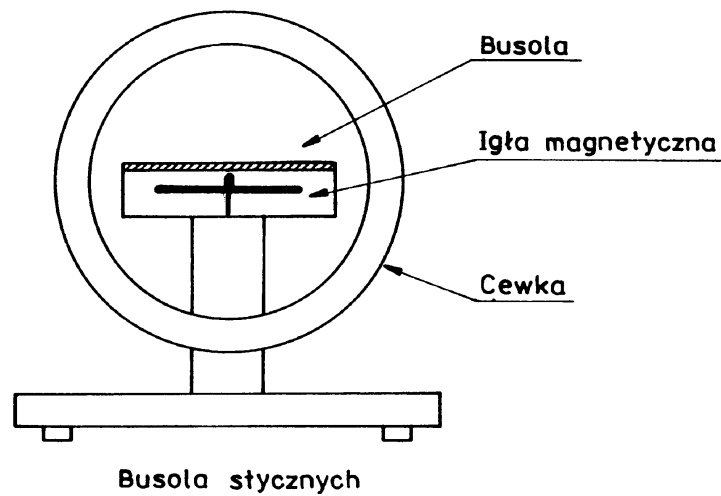
$$D = \epsilon \epsilon_0 E \quad B = \mu \mu_0 H \quad j = \gamma E \quad (64.5)$$

To z konieczności krótkie przypomnienie równań Maxwella powinno skłonić czytelnika do ich dokładnego przestudiowania.

### 64.2. Zasada pomiaru i układ pomiarowy

Busola stycznych (Rys.64.5) składa się z kompasu umieszczonego poziomo wewnątrz cewki (solenoidu). Pozioma oś symetrii cewki przechodzi przez punkt zawieszenia igły magnetycznej.

Igła ta ustawia się zawsze w kierunku działającego na nią pola magnetycznego. Solenoid służy do modyfikacji tego pola. Jeśli w cewce nie płynie prąd (Rys.64.6.a) igła magnetyczna ustawia się w kierunku północ – południe tj. wzdłuż wektora  $H_z$ . Przepływ prądu  $I_c$  w solenoidzie powoduje powstanie dodatkowego pola magnetycznego o natężeniu  $H_b$ . Z prawa Biota-Savarta

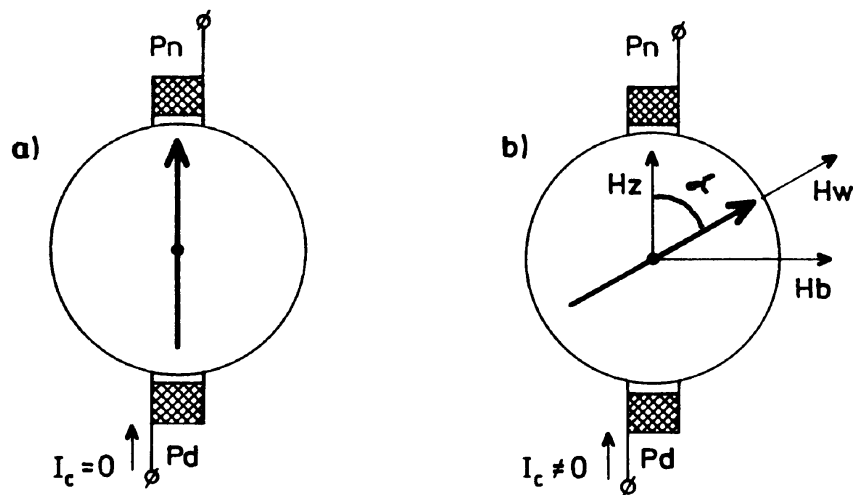


**Rys.64.5.** Budowa busoli stycznych

wynika, że w środku cewki posiadającej  $n$  zwojów i średnicę  $r$  natężenie to wynosi

$$H_b = \frac{I_c \cdot n}{2r} \quad (64.6)$$

Teraz igła magnetyczna ustawia się wzdłuż linii sił pola wypadkowego  $H_w$ .



Rys. 64.6. Rozkład pól magnetycznych – ziemskiego  $H_z$  i solenoidu  $H_b$ .

Z rys. 64.6.b) wynika, że natężenie  $H_z$  ziemskiego pola magnetycznego wynosi

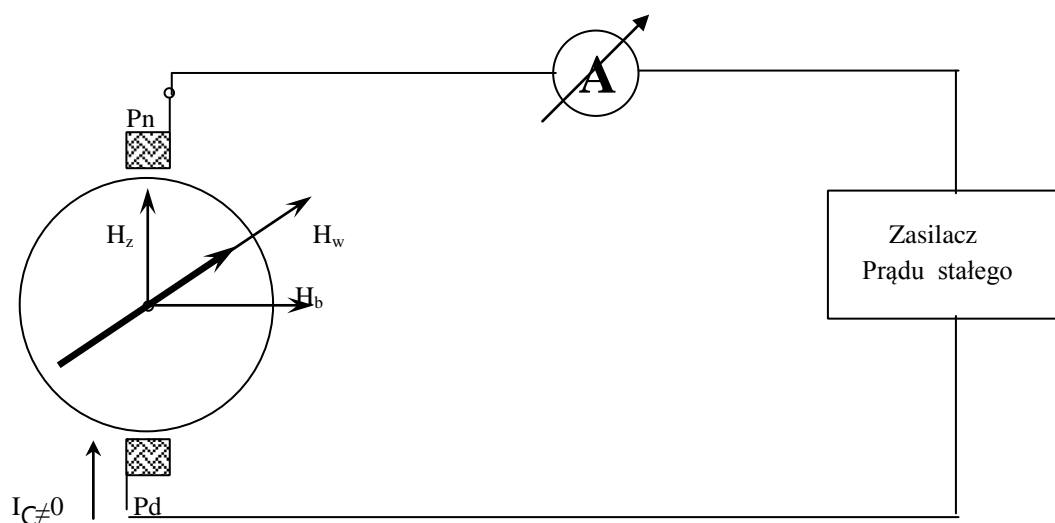
$$H_z = H_b \cdot \operatorname{ctg} \phi \quad (64.7)$$

co po skorzystaniu z wzoru (64.6) można zapisać jako

$$H_z = \frac{I_c \cdot n}{2r} \operatorname{ctg} \phi \quad (64.8)$$

Widać, że znając parametry cewki i mierząc kąt odchylenia  $\phi$  igły magnetycznej w zależności od płynącego w cewce prądu  $I_c$  można określić natężenie składowej poziomej ziemskiego pola magnetycznego.

Przedmioty zawierające żelazo, chrom i nikiel spoczywając w zewnętrznym polu magnetycznym same stają się magnesami. Wyniki pomiarów  $H_z$  mogą być znacznie zafałszowane nawet przez niewinnie wyglądającą, błyszczącą nakrętkę od pióra. Z tego



**Rys.64.7.** Układ pomiarowy.

powodu należy zwrócić uwagę, że przy przepływie tego samego prądu w obu kierunkach ten sam co do bezwzględnej wartości kąt wychylenia igły magnetycznej to raczej przypadek. Jeśli kąty wychylenia nie są równe to znak, że busola znajduje się w dodatkowym lokalnym polu magnetycznym, które można zidentyfikować i rachunkowo wyeliminować.

Rysunek 64.7 przedstawia układ stosowany w doświadczeniu. Składa się on z regulowanego zasilacza prądu stałego, amperomierza oraz busoli stykowych. Wszystkie elementy są połączone szeregowo. Zmiana napięcia zasilania powoduje zmianę płynącego w solenoidzie prądu. To powoduje zmianę natężenia pola a co za tym idzie kąta wychylenia igły magnetycznej.

### 64.3. Przebieg pomiarów:

1. Przesuwając busolę po stole sprawdzić czy nie ma na nim anomalii magnetycznych - wybrać miejsce ustawienia busoli dla przeprowadzenia właściwych pomiarów.
2. Połączyć układ pomiarowy według schematu z rys. 64.7.
3. Obrócić busolę tak by igła magnetyczna „leżała” w płaszczyźnie cewki.

4. Zmieniając napięcie zasilające wyznaczyć zależność  $\phi = f(I_c)$ .
5. Zmienić kierunek prądu i powtórzyć pomiary dla odchyleń w drugą stronę.
6. Sprawdzić przy pomocy komputera przebieg obu zależności – duże rozbieżności wyników świadczą o obecności pasożytniczych pól magnetycznych.
7. Jeśli zachodzi taka potrzeba zmierzyć powtórnie wadliwe punkty lub powtórzyć cały pomiar.

#### 64.3. Opracowanie wyników

W efekcie wykonania ćwiczenia należy podać wartość natężenia ziemskiego pola magnetycznego i jej niepewność.

Używając komputera wykreślić zależność  $\text{tg}\phi = f(I_z)$  osobno dla obu kierunków prądu. Następnie dla prostoliniowych części wykresów policzyć współczynniki regresji liniowej i ich niepewności. Korzystając ze wzoru 64.8 wyliczyć  $H_z$ . Niepewności  $\Delta H_z$  oszacować na podstawie błędów współczynników dopasowania.

#### Literatura:

Sz.Szczeniowski, Fizyka doświadczalna, t. III, PWN (1972)

G.Gamow, Materia, Ziemia i niebo, PWN (1963)

E. M.Purcell, Elektryczność i magnetyzm, PWN (1971)

#### 4 Pytania:

1. Podać ogólną charakterystykę ziemskiego pola magnetycznego. Jakie wielkości opisują to pole?
2. Podać określenie pola magnetycznego, scharakteryzować wielkości opisujące to pole (natężenie pola magnetycznego, indukcja magnetyczna) i podać ich jednostki. Przedstawić sposoby otrzymywania pola magnetycznego.
3. Przytoczyć prawo Biota – Savarte'a. W jakich przypadkach stosujemy to prawo?
4. Zapisać i zinterpretować wzór na natężenie pola magnetycznego w środku cewki kołowej.
5. Opisać budowę i zasadę działania busoli stycznych.
6. Przedstawić metodę wyznaczania składowej poziomej natężenia pola magnetycznego za pomocą busoli stycznych.

**Opracował:** dr A. Kolarz