POMIAR PODATNOŚCI MAGNETYCZNEJ METODĄ ZMIENNOPRĄDOWĄ

Ćwiczenie w pracowni fizyki ciała stałego

Cel ćwiczenia:

Pomiar podatności magnetycznej i jej zależności od temperatury dla różnych klas materiałów magnetycznych: paramagnetyków, ferromagnetyków, antyferromagnetyków i nadprzewodników. Zapoznanie się z woltomierzem fazoczułym – przyrządem do pomiaru słabych napięć przemiennych i metodyką pomiarów zmiennoprądowych.

Treść:

1. Zestawienie wybranych pojęć, jednostek i wzorów dot. magnetyzmu
2. Metoda zmiennoprądowa pomiaru podatności
3. Lista potrzebnej aparatury
4. Wykonanie ćwiczenia: pomiar podatności wybranych materiałów.

   Dodatek: Cyfrowy woltomierz fazoczuły

Oprac. A. Zięba

1. ZESTAWIENIE WYBRANYCH POJĘĆ, JEDNOSTEK I WZORÓW DOTYCZĄCYCH MAGNETYZMU MATERII

1.1. Magnetyzm materii w fizyce klasycznej

moment magnetyczny ramki z prądem: $\mu = I\,\mathbf{S}$ [Am²]

namagnesowanie $\mathbf{M} = \frac{\mu}{V}$ [A/m]

namagnesowanie właściwe $\mathbf{M} = \frac{\mu}{m} = \frac{\mathbf{M}}{\rho}$ [Am²/kg]

podatność magnetyczna $\chi = \frac{\mathbf{M}}{\mathbf{H}}$ [bezwymiarowa]

podatność magnetyczna właściwa $\chi_g = \frac{\chi}{\rho} = \frac{\mu}{\mathbf{H}m}$ [m³/kg]

*podatność pozorna** $\chi' = \frac{\mu_0 M}{B_0}$, $\chi_g' = \frac{\mu_0 \mu}{B_0 m}$

Oznaczenia: I – natężenie prądu, S – powierzchnia ramki, μ – moment magnetyczny próbki, V, m, ρ – objętość, masa i gęstość próbki, H – natężenie pola magnetycznego [A/m], B_0 – pole przyłożone [T].

1.2. Podatność różnych rodzajów materiałów magnetycznych

a) *diamagnetyk*: $\chi < 0$, niezależna od temperatury

b) *paramagnetyk* (*momenty zlokalizowane*): $\chi = \frac{C}{T}$ (prawo Curie)

stała Curie ** $C = \frac{\mu_0 N \mu_B^2 S(S+1)}{3k_B}$

c) *ferromagnetyk*: $T > T_C$: $\chi = \frac{C}{T - \theta}$, gdzie $\theta = T_C$ (prawo Curie-Weissa)

$T < T_C$: $\chi >> 1$ ***

d) *antyferromagnetyk*: $T > T_C$: $\chi = \frac{C}{T - \theta}$, gdzie $\theta < T_N$

$T < T_N$: χ maleje przy obniżaniu temperatury (rys. 1)

---

* podatność pozorna jest „eksperymentalną" wartością podatności, jaką otrzymujemy gdy zamiast pola H [A/m] dzielimy namagnesowanie przez mierzalne w eksperymencie pole przyłożone B_0 (mierzone w teslach)

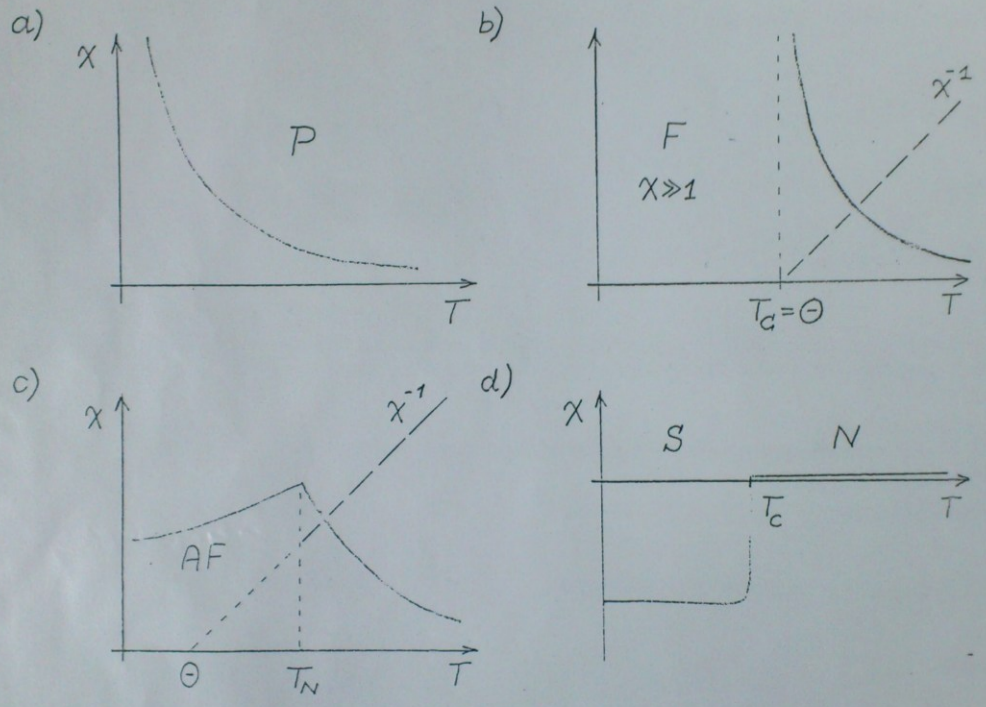
** wypisany wzór wiążący stałą Curie ze spinem S atomu magnetycznego jest słuszny, gdy nie ma momentu orbitalnego

*** słuszne dla „miękkich" ferromagnetyków

e) *ferrimagnetyk*: $T > T_N$ nieliniowa zależność $\theta^{-1}(T)$
$T < T_N$ jak dla ferromagnetyka

f) *nadprzewodnik* $T > T_c$: $\chi \approx 0$
$T < T_c$: $\chi = -1$

Oznaczenia: T – temperatura, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [Vs/(Am)], $k_B = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ [J/K] – stała Boltzmanna, $\mu_B = 9{,}27 \cdot 10^{-27}$ [Am²] - magneton Bohra), N – liczba atomowych momentów magnetycznych na jednostkę objętości.



Rys. 1. Zależność podatności magnetycznej od temperatury dla różnych materiałów magnetycznych a) paramagnetyka, b) ferromagnetyka, c) antyferromagnetyka oraz d) nadprzewodnika. Dla przypadku b) i c) pokazano zależność odwrotności podatności od temperatury powyżej temperatur T_c i T_N.

2. Metoda zmiennoprądowa pomiaru podatności

Próbkę badanego materiału umieszczamy w przemiennym polu magnetycznym

$$B(t) = B_{0,max} \sin\omega t \tag{2.1}$$

wytworzonym przez solenoid L zasilany z generatora napięcia sinusoidalnego. W próbce o objętości V wytwarza się przemienny moment magnetyczny $\mu(t)$, proporcjonalny do podatności magnetycznej próbki,

$$\mu(t) = \mu_{max} \sin\omega t, \qquad \mu_{max} = \chi V B_{0,max} / \mu_0 , \tag{2.2}$$

gdzie stała magnetyczna $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/(Am).

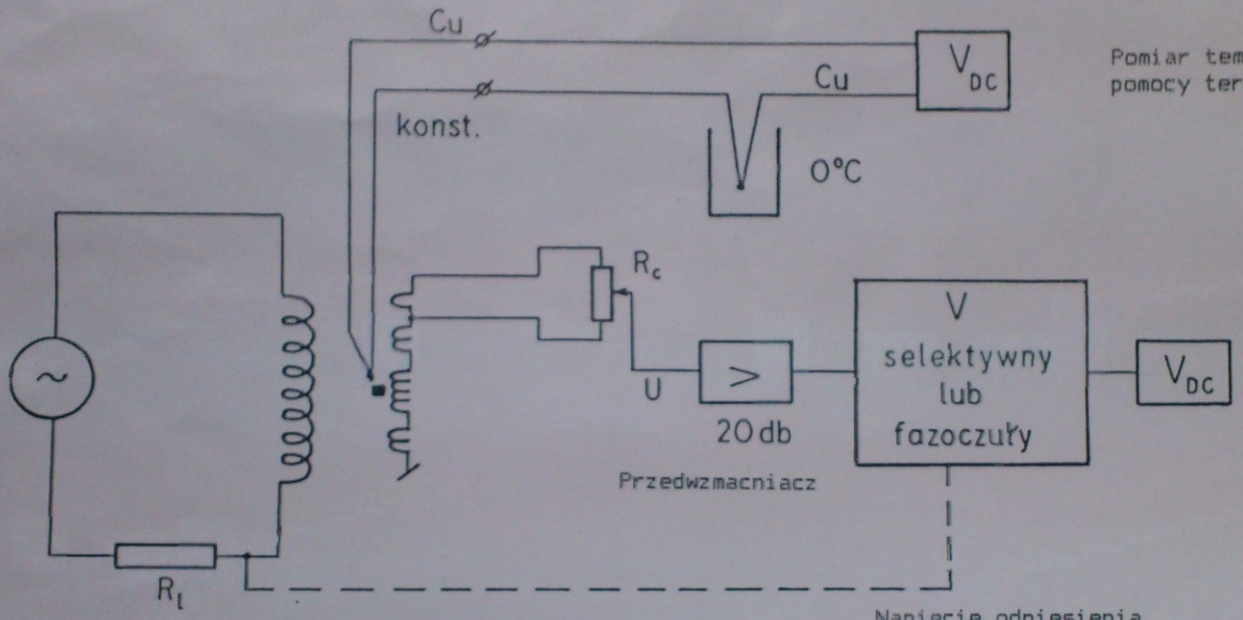
Przemienny moment magnetyczny wytwarza w swoim otoczeniu przemienne pole magnetyczne (o geometrii pola dipola). Pole to przecina zwoje cewki pomiarowej otaczającej próbkę i indukuje w niej napięcie przemienne

$$U(t) = U_{max} \cos\omega t, \qquad U_{max} = const\ \omega\ \mu_{max} = const\ \omega\ \chi\ V B_{0,max} / \mu_0 . \tag{2.3}$$

Z prawa indukcji elektromagnetycznej wynika, że napięcie $U(t)$ jest proporcjonalne także do częstości ω. Napięcie to mierzymy woltomierzem fazoczułym. Czynnik *const* jest stałą cechowania przyrządu, zależną od geometrii cewek detekcyjnych.

W gruncie rzeczy *aparatura mierzy moment magnetyczny próbki*, dokładnie taki, jaki powstanie w niej pod działaniem przyłożonego pola. Dla substancji o małym namagnesowaniu (dia-, para- i antyferromagnetyki) jest on proporcjonalny do ich podatności. Dla substancji o dużej podatności: ferro- i ferrimagnetyków sprawa jest bardziej skomplikowana, ze względu na efekty tzw. pola odmagnesowania.

Schemat aparatury przedstawiony jest na rys. 2. Omówimy bardziej szczegółowo jego elementy:



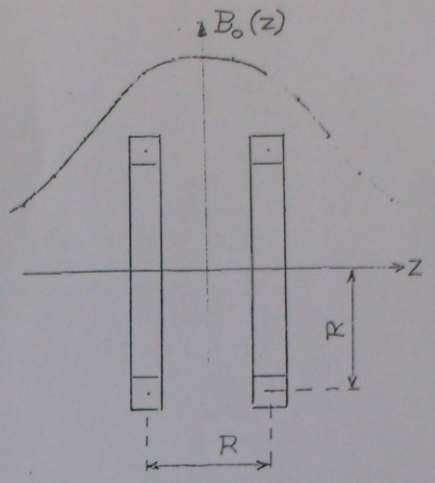
Rys.2. Zestaw do pomiaru podatności.

(a) wytwarzanie przemiennego pola magnetycznego

Obwód służący do wytwarzania pola (rys. 2) zawiera połączone szeregowo: generator napięcia sinusoidalnego o częstotliwości od 20 Hz do 20 kHz, solenoid i opornik wzorcowy.

Solenoid wytwarzający pole składa się z dwu cewek o promieniu R umieszczonych w odległości równej również R (rys. 3). Konfiguracja taka zwana cewką Helmholtza zapewnia pole zbliżone do jednorodnego w okolicy geometrycznego środka układu. Dodatkową zaletą jest umożliwienie widoczności cewek do pomiaru podatności.

Opornik wzorcowy $R_w = 1\,\Omega$ spełnia dwie funkcje. Umożliwia pomiar prądu solenoidu przez pomiar spadku napięcia zwykłym multimetrem z zakresem woltomierza ac, bez potrzeby przerywania obwodu. Ponadto dostarcza napięcia odniesienia będącego w fazie z prądem i polem solenoidu.



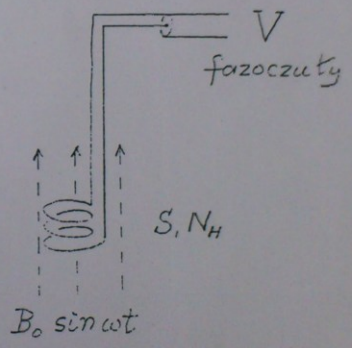
Rys. 3. Geometria cewki Helmholtza (a) oraz rokład pola wzdłuż osi cewki (b).

(b) pomiar pola

Wartość pola przemiennego mierzymy przy pomocy cewki pomiarowej, umieszczonej w miejscu gdzie później znajdzie się mierzona próbka. Cewka pomiarowa złożona jest z N_H zwojów o przekroju S. Zgodnie z prawem indukcji elektromagnetycznej Faradaya w cewce powstaje napięcie,

$$U_H(t) = N_H S B_{0,max} \cos\omega t \qquad (2.4)$$

Mierząc pole woltomierzem fazoczułym przekonamy się naocznie, że sygnał jest przesunięty w fazie względem pola i wytwarzającego je prądu o 90° – bo dla takiego właśnie kąta przesunięcia fazowego nastawionego na przesuwniku fazy woltomierza uzyskuje się maksimum sygnału.



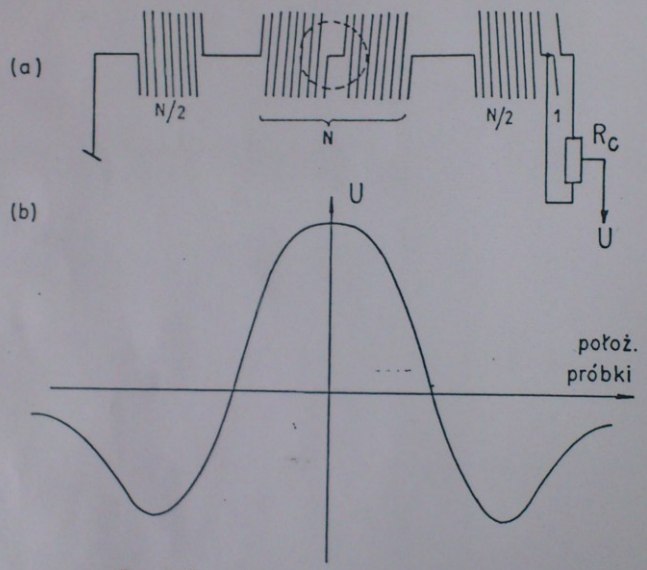
Rys. 4. Zasada pomiaru pola przemiennego

Wartość skuteczną pola obliczamy jako $B_0 = U_H/(N_H S\,\omega)$ na podstawie nastawionej częstości generatora $\omega = 2\pi f$, wartości iloczynu $N_H S$, oraz wskazań woltomierza fazoczułego U_H, który jest wyskalowany w skutecznych wartościach napięcia. (Podobnie jak inne przyrządy zmiennoprądowe, w tym używane w eksperymencie multimetry z zakresami amperomierza i woltomierza ac). Do końca opracowania przyjmujemy konwencję, że wartości pól, prądów i napięć bez wypisanej explicite zależności czasowej (t) i bez indeksu $_{max}$ oznaczają wartości skuteczne. Dla przebiegów sinusoidalnych wartość skuteczna jest $\sqrt{2}$ razy mniejsze od wartości maksymalnej, $B_0 = B_{0,max}/\sqrt{2}$.

Pomiar pola jest pomiarem bezwzględnym, gdyż nie wykorzystujemy żadnego wzorca pola. Aby mieć pojęcie o jego wartości, warto porównać otrzymane B_0 z wartościami pola elektromagnesu (rzędu 1 ÷ 1,5 T) i polem ziemskim (dla Krakowa składowa pozioma 22 μT).

(c) *pomiar podatności*

Konstrukcja cewek do pomiaru podatności winna umożliwić indukowanie napięcia proporcjonalnego do momentu magnetycznego próbki i być jednocześnie nieczuła na pole solenoidu magnesującego próbkę. W tym celu główna cewka pomiarowa licząca N zwojów (w której umieszczona jest próbka) połączona jest szeregowo z dwoma cewkami kompensującymi, po $N/2$ zwojów każda, nawiniętymi w kierunku przeciwnym do cewki głównej. Napięcia indukowane przez jednorodne pole solenoidu w cewce głównej i cewkach bocznych znoszą się do zera. Dla precyzyjnego dokompensowania stosuje się pojedynczy dodatkowy zwój połączony z potencjometrem R w układzie dzielnika napięcia. Przed włożeniem próbki sprowadzamy napięcie do zera przez odpowiednią nastawę potencjometru.



Rys. 5. Geometria cewek do pomiaru podatności(a) oraz zależność sygnału od położenia próbki (b).

Kompensacja wpływu pola zewnętrznego nie jest idealna ze względu na niedoskonałość wykonania cewek. Niezerowe napięcie tła U_{bg} pojawia się przy przełączaniu zakresów woltomierza, zmianie temperatury cewek i wreszcie powoli zmienia się w czasie. Dlatego jako regułę stosujemy pomiar z próbką w środku cewek detekcyjnych (dający napięcie U) oraz towarzyszący pomiar z próbką podniesioną o kilka cm do góry (dający napięcie tła U_{bg}). Różnica obydwu napięć jest właściwym sygnałem proporcjonalnym do podatności próbki. Przy pomiarach wykonywanych w funkcji temperatury napięcie tła należy zmierzyć przed i po wykonaniu pomiaru.

Sygnał od mierzonej próbki jest przesunięty w fazie o 90° w stosunku do fazy pola magnesującego. Dlatego wszystkie pomiary wykonujemy przy nastawie przesuwnika fazowego woltomierza bliskiej 90° – tej samej, jakie została ustalona przy pomiarze pola solenoidu.

(d) wzorcowanie układu do pomiaru podatności

Napięcie skuteczne U indukowane w cewkach pomiarowych można wyrazić wzorem

$$U - U_{bg} = const\ \omega\ \chi\ H\ V = const\ \omega\ \chi_g\ H\ m \tag{2.5}$$

Współczynnik proporcjonalności *const* można obliczyć na podstawie znajomości geometrii cewek detekcyjnych, ale doświadczalne cechowanie przyrządu jest dokładniejsze, gdyż uwzględnia niedoskonałość wykonania cewek.

Cechowanie podatności polega na wykorzystaniu próbki wzorcowej o znanej podatności i masie. Najczęściej wzorcem podatności są tlenki metali ziem rzadkich (Er_2O_3, Dy_2O_3, Gd_2O_3,) będące silnymi paramagnetykami. Pomiar wzorcowy dostarcza wartości iloczynu *const* ω H, który następnie wykorzystujemy do obliczenia podatności substancji badanej. Najprościej jest jednak wykonywać wszystkie pomiary przy tych samych wartościach częstotliwości i amplitudy pola zewnętrznego, wtedy podatności właściwe, masy i sygnały wzorca (indeks w) i wartości mierzonej (indeks x) łączy proporcja:

$$\frac{\chi_{g,x}\ m_x}{\chi_{g,w}\ m_w} = \frac{U_x - U_{bg,x}}{U_w - U_{bg,w}} \tag{2.6}$$

umożliwiająca wzorcowanie podatności niezależne od pomiaru pola, nastaw generatora, etc. – pod warunkiem jednak, że pozostają stałe w czasie pomiaru.

Szczególnym „wzorcem" podatności jest kulka Ni, która przy założeniu że jest magnetycznie „miękka", umożliwia cechowanie podatności z proporcji

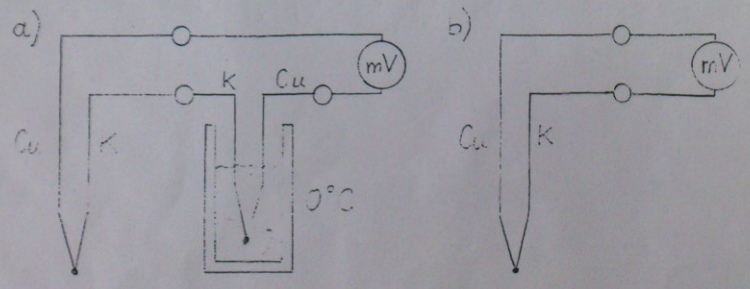
$$\frac{\chi_{g,x}\ m_x}{3\ V_w} = \frac{U_x - U_{bg,x}}{U_w - U_{bg,w}} \tag{2.7}$$

gdzie „magiczna" liczba 3 jest odwrotnością tzw. współczynnika odmagnesowania.

(e) pomiar temperatury próbki

Do pomiaru temperatury próbki służy termopara miedź-konstantan, której złącze styka się z mierzoną próbką. Napięcie termopary mierzy woltomierz cyfrowy.

Rysunek 6 przypomina zasadę pomiaru temperatury przy użyciu termopary. W przypadku rys. 6a (lub na zbiorczym rys 2) złącze odniesienia znajduje się w naczyniu z topniejącym lodem.



Rys.6. Dwa sposoby pomiaru temperatury termoparą.

Zamianę napięcia termopary na temperaturę umożliwia charakterystyka termopary $U(T)$, podawana dla złącza odniesienia właśnie w temperaturze 0° C. Charakterystyka może mieć formę tabeli, wykresu lub przybliżenia wielomianowego (ten ostatni zaimplementowany zwykle w programie koputerowym).

Gdy nie ma osobnego złącza odniesienia (rys. 6b), złącze takie tworzy się na zacisku łączącym konstantan z miedzianym przewodem od woltomierza i pozostaje w temperaturze pokojowej, znanej z dokładnością 1 K. Przed zastosowaniem charakterystyki należy dokonać przeliczenia:

$$U_{poprawione} = U_{zmierzone} + U_{pok}, \tag{2.7}$$

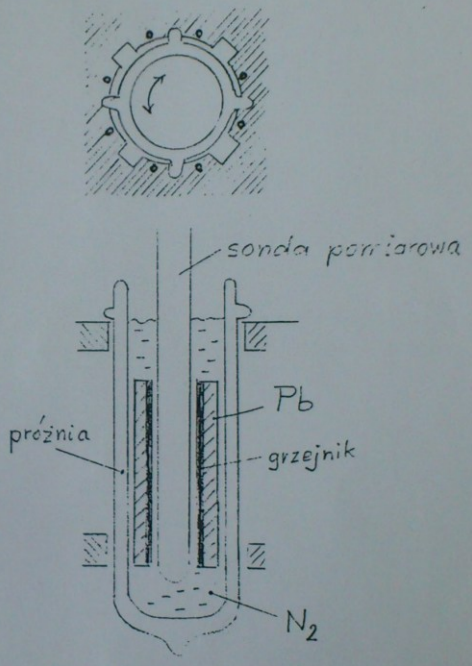
gdzie U_{pok} jest napięcie odczytanym z ch-ki termopary dla temperatury złącza pokojowej.

(e) *regulacja temperatury próbki*

Dla uzyskania temperatury zbliżonej do temperatury ciekłego azotu służy małe szklane naczynie Dewara.. W celu jego założenia (vide Rys. 7) wsuwamy go (powoli !) od dołu w przestrzeń między solenoidem i sondą pomiarową i przekręcamy, by pozostał w górnym położeniu. Zalewnie azotem z wykorzystaniem metalowego lejka.

Po odparowaniu azotu następuje zbyt szybki wzrost temperatury. Dla spowolnienia tempa narastania temperatury wsuwamy na rurkę sondy pomiarowej grzejnik otoczony tuleją z ołowiu. Ołów, materiał o niskiej temperaturze Debye'a działa jako „zbiornik zimna" lepiej niż np. Al (dlaczego ?).

Grzejnik pozwala uzyskać w przybliżeniu liniowe narastanie temperatury poniżej i w okolicy temperatury pokojowej. Zasilany być może prądem stałym do 0,5 A.



Rys. 7. Regulacja temperatury: (a) z wykorzystaniem ciekłego azotu, (b) zakres temperatur pokojowych.

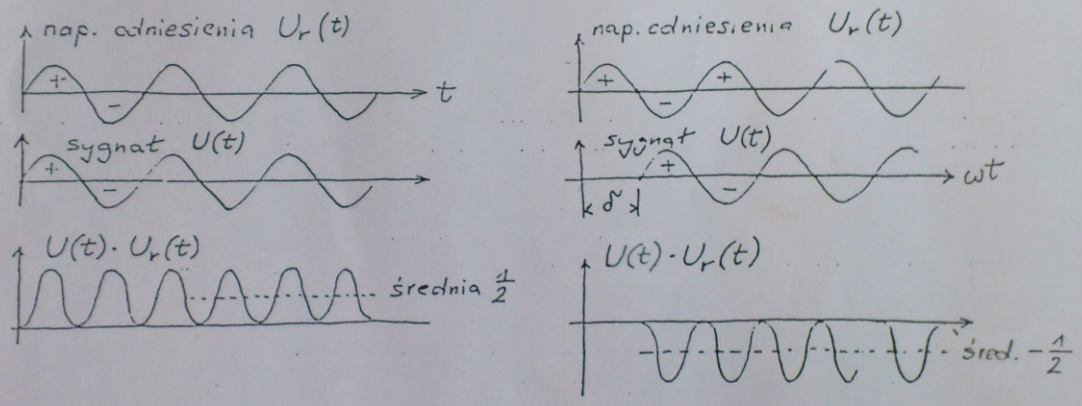
(f) *woltomierz fazoczuły*

Woltomierz fazoczuły (ang. lock-in voltmeter) jest przyrządem do pomiaru słabych napięć przemiennych. Przyrząd posiada dwa wejścia: na wejście główne podajemy mierzony sygnał $U\sin(\omega t + \delta)$, na wejście odniesienia napięcie o tej samej częstotliwości $U_R \sin\omega t$. Napięcie wyjściowe jest wartością średnią (po stałej czasowej τ) z iloczynu napięcia mierzonego i znormalizowanego napięcia odniesienia,

$$U_{wy} = < U\sin(\omega t + \delta)\sin(\omega t - \theta) >_\tau \qquad (2.7)$$

przy czym przyrząd wprowadza dodatkowe, dowolnie nastawiane przesunięcie fazowe θ.

Rysunek 8 jest graficznym przedstawieniem równania (2.7). Zmiana wypadkowego przesunięcia fazowego ($\delta - \theta$) od zera do 180° powoduje zmianę wartości napięcia wyjściowego od maksymalnej wartości dodatniej, przez zero (dla przesunięcia fazowego 90°) do maksymalnej wartości ujemnej. Jeden ze sposobów pomiaru kąta fazowego sygnału polega na regulacji kąta θ aż do uzyskania maksimum sygnału, wtedy $\delta = \theta$*. Fakt, że napięcie wyjścia może być dodatnie lub ujemne w zależności wartości kąta fazowego czyni ten przyrząd podobnym do przyrządu stałoprądowego. Przykładowo, w naszej aparaturze, znak U_{wy} od próbki paramagnetycznej ($\chi > 0$) będzie przeciwny niż dla diamagnetycznej ($\chi < 0$).



Rys. 8. Zasada detekcji fazoczułej: przebiegi czasowe napięć U, $U_R(t)$ i U_{wy} dla: (a) $\delta = 0°$, (b) $\delta = 90°$

Napięcia zakłócające o innej częstotliwości dają wartość średnią U_{wy} równą zeru. Umożliwia to pomiary sygnału wielokrotnie słabszego od napięć zakłócających, w tym od wszędobylskiego „przydźwięku" sieci 50 Hz. Tłumienie sygnałów zakłócających jest tym bardziej skuteczne im większa jest stała czasowa, ale odbywa się to kosztem pogorszenia dynamiki przyrządu. (Zwiększa się czas reakcji na zmianę mierzonego sygnału).

Reasumując, podstawowymi zaletami przyrządu są: *wysoka czułość, mała wrażliwość na zakłócenia i możliwość pomiaru fazy sygnału.* Zalety te sprawiają, że woltomierz fazoczuły stał się „koniem pociągowym" współczesnego laboratorium fizycznego, gdzie jego znaczenie podobne jest do

---

* Sposób dokładniejszy polega na regulacji kąta θ aż do uzyskania zera sygnału, wtedy $\delta = \theta - 90°$. Równanie (2.7) i opisane sposoby pomiaru fazy dotyczą tradycyjnego przyrządu analogowego. Gdy dysponujemy przyrządem cyfrowym sprawa jest prostsza: wyświetlacz przyrządu podaje zarówno amplitudę jak i fazę mierzonego sygnału.

dawnej roli czułego galwanometru. Ważnym krokiem w rozwoju technologicznym przyrządu stało się wprowadzenie (z początkiem lat 90-tych) cyfrowego woltomierza fazoczułego, w miejsce dawnych modeli analogowych.

Woltomierz fazoczuły LOCK-IN NANOVOLTMETER type 232 B

produkcji UNIPAN W-wa, jest najczęściej spotykanym w Polsce* woltomierzem fazoczułym. Rysunek 9 przedstawia płytę czołową przyrządu.

Napięcie odniesienia doprowadzamy do gniazda REFERENCE. W zależności od jego wielkości przełącznikiem klawiszowym wybieramy zakres 0.03 ÷ 3 V lub 3 ÷ 300 V.

Napięcie mierzone można włączyć bezpośrednio na wejście SIGNAL, ale najlepiej podać sygnał na przedwzmacniacz. Mieści się w osobnym pudełku, zasilanym z gniazda.

Aktualnie stosowany przedwzmacniacz 233-5 wzmacnia napięcie 10 razy (czyli o 20 dB). Przy jego stosowaniu prawdziwe wartości zakresów pomiarowych są 10-krotnie mniejsze niż podane na przełączniku zakresów.

Przełącznik zakresów mierzonego napięcia posiada 10 położeń od 3 mV do 0,03 μV.

Zestaw filtrów dolno- i górnoprzepustowych służy do dodatkowego tłumienia zakłóceń. Należy wcisnąć klawisze „high" oraz „low" odpowiadające najbliższej częstotliwości wyższej i niższej od wybranej częstotliwości roboczej.

Przesunięcie fazowe (PHASE SHIFT) nastawiane jest pokrętłem regulacji ciągłej (CONTINUOUS) i przez zmieniający biegunowość sygnału układ przycisków 0° i 180°.

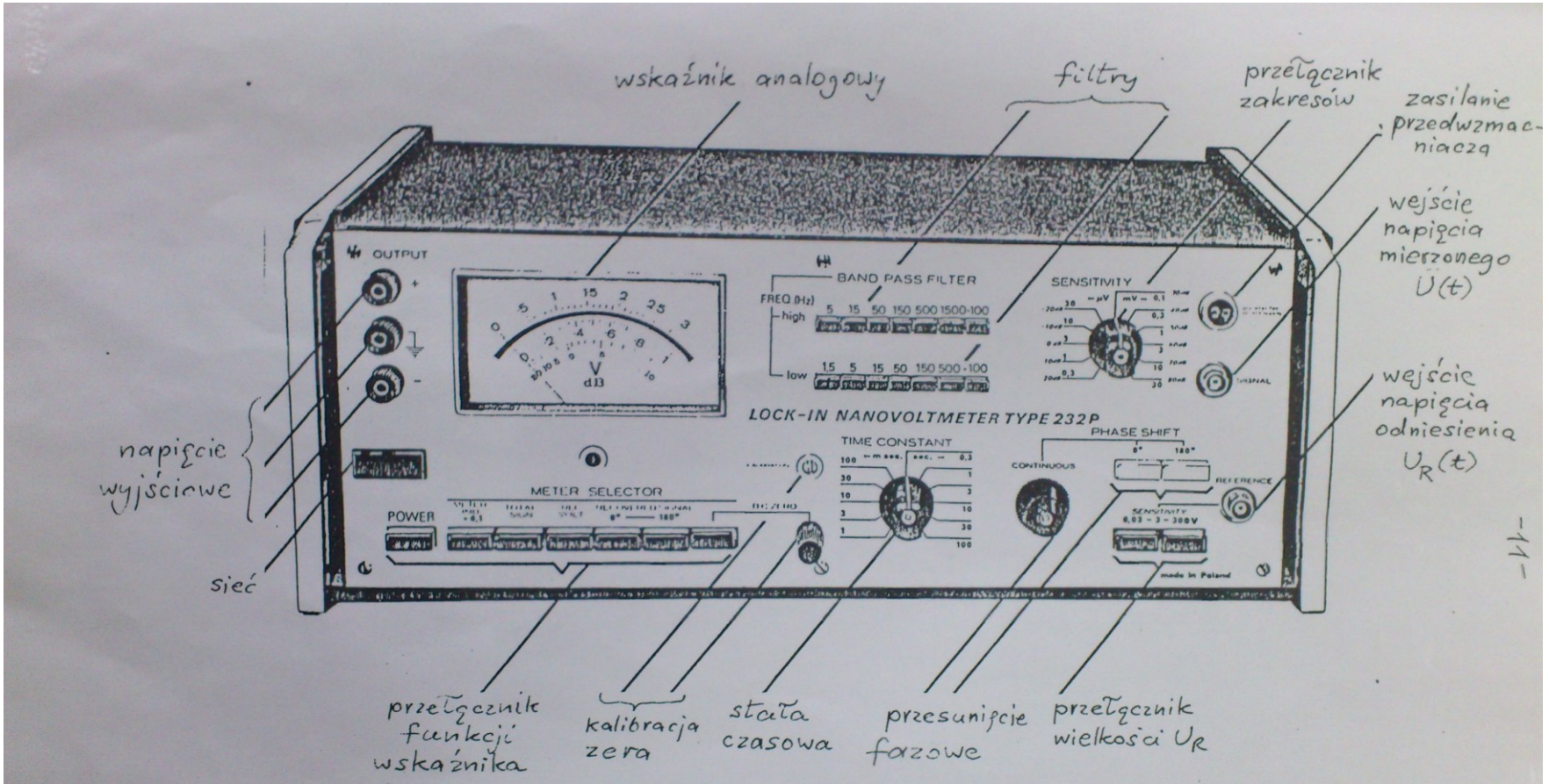
Napięcie wyjściowe (OUTPUT) można wygodnie odczytać przyłączając cyfrowy woltomierz stałoprądowy (dc) między zaciski + oraz –. Każdemu pełnemu zakresowi odpowiada napięcie 10 V.

Uwaga: oznacza to, że przy wykorzystaniu przedwzmacniacza 233-5 prawdziwe napięcie jest iloczynem cyfrowej wartości napięcia wyjściowego i nastawy przełącznika zakresów i czynnika $\frac{1}{100}$.

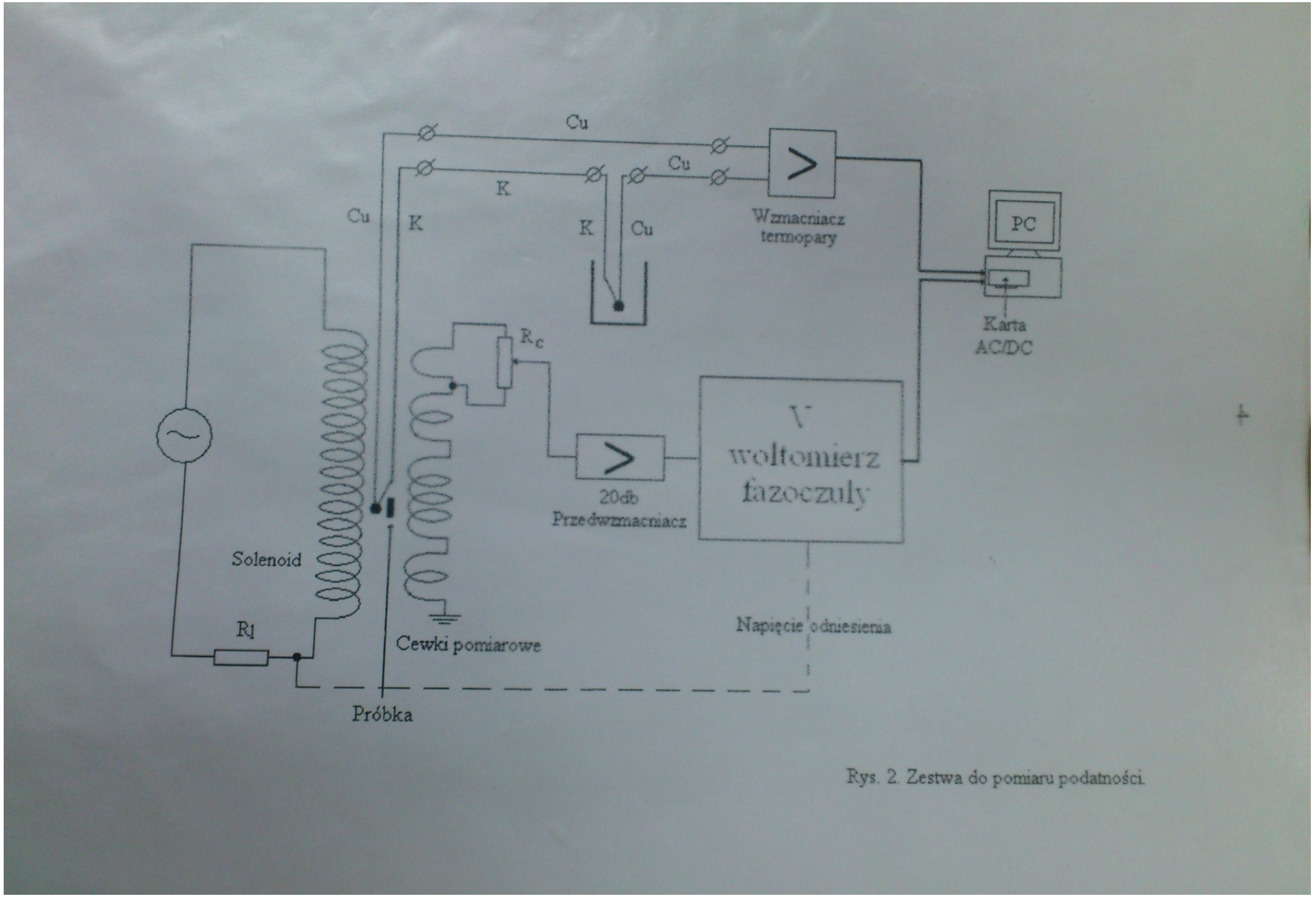
Wskaźnik analogowy na płycie czołowej przyrządu pokazywać może 6 różnych wielkości wybieranych znajdujących się poniżej przełącznikiem. Najczęściej używa się 2 przycisków:
REF.VOLT – sprawdzenie, czy woltomierz otrzymuje napięcie odniesienia,
PHASE SHIFT – pokazujący kąt przesunięcia fazowego na skali kątowej wskaźnika,
RECOV. SIGNAL – napięcie mierzone. Jeżeli wskazówka wychyla się w lewo, należy zmienić biegunowość sygnału przełącznikiem 0° / 180°.

---

* Analogowy przyrząd opracowany w latach 70-tych przez UNIPAN (firmę działającą pod nadzorem PAN). Był natenczas najlepszym woltomierzem fazoczułym środkowo-wschodniej Europy.



Rys. 9. Woltomierz fazoczuły LOCK-IN NANOVOLTMETER type 232B.



Rys. 2. Zestwa do pomiaru podatności.

4. WYKONANIE ĆWICZENIA

Zakres możliwych eksperymentów jest szeroki i zajmuje w całości podwójne zajęcia, do zajęć pojedynczych trzeba dokonać wyboru.

4.1. Uruchomienie aparatury i pomiar pola magnesującego.

a) włączamy do sieci przed wszystkim woltomierz fazoczuły, by miał czas (15 min) na ustabilizowanie własnej temperatury pracy. Może być niepodłączony do układu.
b) obejrzyj sondę do pomiaru pola. Przy pomocy suwmiarki zmierz średnicę zwoju, potrzebną do obliczenia przekroju S i liczbę zwojów N (vide wzór 2.4)
c) zestawić lub sprawdzić układ pomiarowy z tym, że zamiast próbki wstawiamy do wnętrza aparatury sondę do pomiaru pola, a jej wyjście podajemy na przedwzmacniacz (rys.10)
d) uruchomienie obwodu zasilania cewki wytwarzającej pole ac.
Ustalić warunki pracy generatora: częstotliwość od 110 do 390 Hz (unikając wielokrotności 50 Hz), prąd czerpiemy z wyjścia mocy 6V/5A, nastawiając napięcie rzędu 3-6 V. Nastawy generatora zapisujemy i nie zmieniamy do końca pomiarów. Opornik 1 Ω umożliwia kontrolę płynącego przez solenoid prądu poprzez pomiar spadku napięcia woltomierzem ac.
e)

Uwaga: zapis wskazania przyrządu obejmuje zawsze wskazania woltomierza dc na wyjściu + zapis zakresu pomiarowego. Pełny zakres odpowiada napięciu dc równemu 10 V.

b) Uruchomienie voltomierza fazoczułego obejmuje nastawy:
nastawienie częstotliwości filtrów dolno- i górnoprzepustowych, stosownie do wybranej częstotliwości pracy (vide rys. 9).
c) jako początkowe nastawy woltomierza zastosować: REFERENCE SENSITIVITY 0,03 – 3 V, stałą czasową 0,3 lub 1 s.
d) sprawdzić działanie przesuwnika fazy, znaleźć wartość fazy θ, dla której napięcie wyjściowe jest maksymalne, zapisać i nie zmieniać do końca pomiaru
f) właściwy pomiar napięcia to odczyt z wskaźnika cyfrowego na wyjściu woltomierza, nie zapominając o zanotowaniu zakresu, na którym pracował woltomierz fazoczuły gdyż:

Prawdziwe napięcie = zakres × (odczyt wskaźnika cyfrowego w „gołych" cyfrach)/1000

Opracowanie: obliczyć wartość pola magnesującego B_0. Dla prawidłowego pomiaru ferromagnetyków i nadprzewodnika winno być wyraźnie większe od pola Ziemi (w Krakowie składowa pozioma 21 μT).

4.2. Pomiar podatności w temperaturze pokojowej

a) odstawić sondę do pomiaru pola, podłączyć wyjście cewek mierzących podatność na wejście przedwzmacniacza woltomierza.
b) wstawić próbkę Ni (która daje najsilniejszy sygnał). Przesuwając próbkę w górę i w dół (przy użyciu mosiężnego pokrętła) ustawić maksimum sygnału (vide rys. 5). Nawet dla tej silnej próbki notować osobno sygnał U z próbką i sygnał „tła" U_{bg}, zmierzony po wysunięciu próbki na zewnątrz cewek.
c) powtórzyć pomiar dla silnego paramagnetyka (Gd_2O_3 lub Er_2O_3), dobierając tak zakres, by wskazania woltomierza były optymalne (jak największe bez przekroczenia skali analogowej). Pomiar ten posłuży do cechowania podatności

d) wykonać pomiar dla innych próbek o znacznej podatności (inne paramagnetyki, próbka Dy który w temperaturze pokojowej jest w fazie paramagnetycznej, magnetyt)

Opracowanie:

1. Z pomiaru dla wzorcowego paramagnetyka obliczyć stałą cechowania *const*.
2. Wykorzystując pomiar dla ww. wzorca obliczyć podatności właściwe innych zmierzonych próbek i porównać z wartościami tabelarycznymi.
3. Na kulki Ni zmierzona podatność jest ograniczona przez tzw. zjawisko odmagnesowania. Na podstawie pomiarów pola ac, sygnału kulki Ni, i znając jego masę oraz gęstość można obliczyć bezwymiarową podatność objętościową. (Jej teoretyczną wartością, ograniczoną przez pole odmagnesowania, jest liczba 3, teoria – vide np. Feynmann.

4.3. Pomiar podatności w funkcji temperatury z wykorzystaniem ciekłego azotu.

Pomiary z wykorzystaniem ciekłego azotu opierają się o naturalny wzrost temperatury po wyparowaniu azotu, ale w układzie winien się znajdować niepodłączony grzejnik z ołowiem jako balastem cieplnym.

(a) Pomiary najwygodniej rozpocząć od paramagnetyka. Uruchomić układ do pomiaru temperatury (rys. 6).
(b) Ochłodzić sondę przez wlewanie ciekłego azotu. Obserwować jakościowo zmianę sygnału wynikającą z prawa Curie.
(c) Ilościowy pomiar wykonać można, gdy temperatura się ustali (w pobliżu 90 K), zarówno U jak i U_{bg}. Ten drugi po prostu po wyjęciu próbki – układ pomiarowy jest teraz gotowy do pomiaru zależności $\chi(T)$ dla nadprzewodnika, czy innej próbki.
(d) Włożyć nadprzewodnik. Zaobserwować gwałtowny wzrost amplitudy sygnału i zmianę fazy sygnału na przeciwny (dlaczego ?) po przejściu próbki w stan nadprzewodzący. Pomiar ilościowy polega na pomiarze sygnału w funkcji samoczynnie rosnącej temperatury próbki. (Uwaga: nie wlewać za dużo azotu, by nie czekać na jego odparowanie).
(e) Inną próbką, którą warto mierzyć to Dy (przejście antyferromagnetyk – paramagnetyk, T_N = 179 K.

Opracowanie:

Paramagnetyk: dysponujemy tylko dwoma punktami doświadczalnymi, niemniej, zakładając słuszność prawa Curie wyznaczyć można z prostej $1/\chi = f(T)$ przechodzącej przez te dwa punkty:
a) „doświadczalną" wartość temperatury zera bezwzględnego,
b) wartość stałej Curie, a z niej – wartość wypadkowego spinu S atomu magnetycznego

Nadprzewodnik wysokotemperaturowy: z wykresu $\chi(T)$ wyznaczyć T_c oraz podać wartość podatności (objętościowej) przy najniższej otrzymanej temperaturze. Co teoria nadprzewodnictwa mówi na temat χ?

Antyferromagnetyk Dy: wykonać wykres $\chi^{-1}(T)$ – z niego wartość temperatury paramagnetycznej θ, stałej C i spinu S.

4.4. Pomiar przemiany ferro-para w Gd.

Pomiar nie wymaga użycia azotu, ponieważ dla gadolinu wartość $T_C = 17$ °C.
Dla uzyskania temperatury początkowej około kilku 0°C pusty układ z rys. 7 należy zalać zimną wodą z topniejącego lodu. Przepływ prądu o natężeniu rzędu 0,5 A powoduje powolny, linowy w czasie wzrost temperatury. Po zakończeniu pomiaru (w temperaturze ok. 40°C) nie zapomnijmy o zmierzeniu napięcia bez próbki U_{bg}

Opracowanie: opiera się na wykorzystaniu prawa Curie-Weissa. Z wykresu $\chi^{-1}(T)$ odczytać można wartość temperatury Curie.i efektywnego spinu atomóe Gd.