

Piotr Janas

Zakład Fizyki, Uniwersytet Rolniczy

Do użytku wewnętrznego

Ćwiczenie 37

ZJAWISKA TERMOELEKTRYCZNE

Kraków 2018

ZAKRES WYMAGANYCH WIADOMOŚCI ZE SZKOŁY ŚREDNIEJ:

Ładunki elektryczne. Pole elektryczne. Napięcie, natężenie, opór elektryczny, siła elektromotoryczna. Prawa Ohma i Kirchhoffa. Prąd elektryczny w metalach . Praca prądu - ciepło Joule'a.

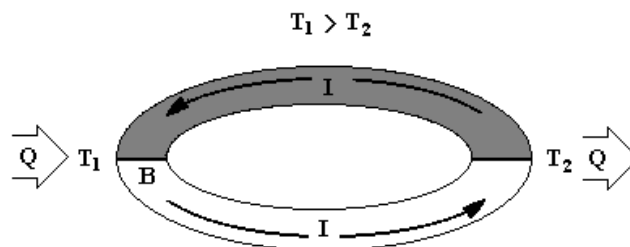
I. CZĘŚĆ TEORETYCZNA

1. Zjawiska termoelektryczne

Zupełnie niezależnie od ciepła Joule'a, przepływ prądu elektrycznego może, w pewnych warunkach, wywołać dodatkowe wydzielanie lub pochłanianie ciepła w przewodniku lub na styku różnych przewodników. Obserwuje się również występowanie procesu odwrotnego - odpowiednio skierowany przepływ ciepła może wywołać w obwodzie złożonym z różnych przewodników przepływ prądu elektrycznego. Powyższe efekty, które świadczą o możliwości występowania w przewodnikach współzależnych procesów transportu ładunku elektrycznego (prąd elektryczny) i transportu energii (ciepło) noszą wspólną nazwę zjawisk termoelektrycznych. Wśród zjawisk tych wyróżnia się: zjawisko Seebecka (wym. Zibeka), zjawisko Peltiera i zjawisko Thomsona (wym. Tomsona).

1.1. Zjawisko Seebecka

W zamkniętym obwodzie elektrycznym zbudowanym z różnych przewodników, których miejsca połączeń (styki) utrzymywane są w różnych temperaturach, powstaje siła termoelektryczna (termoelektromotoryczna) E wywołująca przepływ prądu elektrycznego. Najprostszy obwód, w którym można zaobserwować powstawanie siły termoelektrycznej, stanowi przedstawione na Rys. 1 połączenie dwóch różnych metali. Układ taki nazywany jest ogniwem termoelektrycznym, termoogniwem lub termoparą.



Rys. 1. Zjawisko Seebecka. Skutkiem różnicy temperatur $T_1 > T_2$ spoin połączonych przewodników A i B jest nie tylko ukierunkowany przepływ ciepła Q , ale i przepływ prądu elektrycznego w obwodzie utworzonym przez przewodniki. Kierunek przepływu prądu o natężeniu I uzależniony jest od rodzaju użytych przewodników.

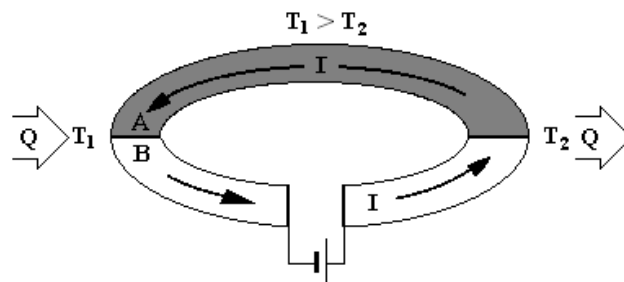
Doświadczenie wskazuje, że w pewnym przedziale temperatur, wartość powstającej w takim układzie siły termoelektrycznej E jest proporcjonalna do różnicy temperatur $T_1 - T_2$ styków metali :

$$E = \alpha (T_1 - T_2)$$

Współczynnik proporcjonalności α nazywany jest różniczkową siłą termoelektryczną, współczynnikiem siły termoelektrycznej lub niekiedy skrótowo stałą termoelektryczną. Wielkość α ma charakter stałej materiałowej zależnej od rodzaju obu materiałów tworzących termoparę, a w szerokim przedziale temperatur również od temperatury. Dla większości metali wartość współczynnika α jest niewielka, osiągając maksymalne wartości rzędu kilkudziesięciu $\mu\text{V}/\text{deg}$ (mikrowolt na stopień). W literaturze podaje się niekiedy wartości α wyrażane w $\text{mV}/100\text{deg}$ (miliwolt na 100 stopni).

1.2. Zjawisko Peltiera

Podczas przepływu prądu elektrycznego w obwodzie składającym się z różnych przewodników, w miejscach ich styków następuje ukierunkowana wymiana ciepła z otoczeniem. O tym, na którym styku danych materiałów zachodzi wydzielanie, a na którym pochłanianie ciepła, decyduje kierunek przepływającego prądu. Wielkość przekazywanego w zjawisku Peltiera ciepła jest proporcjonalna do wielkości ładunku elektrycznego przepływającego przez styk.

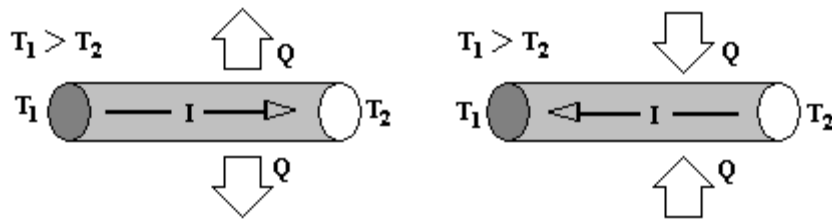


Rys. 2. Zjawisko Peltiera. Wymuszenie przepływu prądu elektrycznego I w obwodzie przewodników A i B powoduje powstanie różnicy temperatur ich styków i ukierunkowany przepływ ciepła Q .

W najprostszym obwodzie składającym się z dwu różnych materiałów (Rys.2), przepływ prądu powoduje powstanie, w wyniku zjawiska Peltiera, różnicy temperatur styków materiałów i przepływ ciepła między nimi. Zjawisko Peltiera stanowi zatem proces odwrotny do opisanego przez Seebecka.

1.3. Zjawisko Thomsona

Przepływ prądu elektrycznego przez przewodnik, wzdłuż którego występuje spadek (gradient) temperatury, powoduje w każdym elemencie przewodnika pochłonięcie lub wydzielanie ciepła (Rys. 3). O tym, czy w danym przewodniku pochłaniana czy wydzielana jest energia cieplna decyduje kierunek przepływu prądu względem kierunku gradientu temperatury.



Rys. 3. Zjawisko Thomsona. Przepływ ciepła Q wywołany przepływem prądu elektrycznego o natężeniu I .

1.4. Współzależność zjawisk termoelektrycznych

Przedstawione powyżej trzy zjawiska termoelektryczne są współzależne i występują zawsze łącznie. Różnica temperatur styków dwóch różnych metali tworzących termooogniwo powoduje powstawanie w obwodzie siły termoelektrycznej Seebecka. Siła ta wymusza przepływ prądu wywołując wydzielanie i pochłanianie ciepła Peltiera. Występująca w każdym z przewodników różnica temperatur powoduje dodatkowy przepływ ciepła wynikający ze zjawiska Thomsona.

2. Mechanizm powstawania zjawisk termoelektrycznych

2.1. Budowa metali - model gazu elektronowego

Metale, jako ciała krystaliczne, stanowią przestrzenny zbiór jonów tworzących, poprzez regularnie powtarzającą się strukturę pewnego rodzaju komórek elementarnych, trójwymiarową sieć krystaliczną. Elektrony z najwyższej (walencyjnej) powłoki atomów metalu nie są już praktycznie powiązane z poszczególnymi atomami tworząc, według klasycznej teorii, tzw. swobodny gaz elektronowy o ujemnym ładunku. Gaz ten oddziaływując ze sztywną, dodatnio naładowaną siecią jonów tworzy specyficzny typ wiązania zwany metalicznym.

W pewnych warunkach elektrony gazu mogą opuszczać wnętrze metalu. Warunkiem koniecznym wystąpienia tego procesu jest dostarczenie elektronom energii przynajmniej równej tzw. pracy wyjścia. Jest to energia charakterystyczna dla danego metalu, potrzebna do pokonania sił przyciągania kulombowskiego pomiędzy elektronem gazu a siecią jonów.

Opisując zachowanie gazu elektronowego, w podobny sposób jak w teorii kinetyczno-molekularnej zachowanie gazu doskonałego, możliwy jest jakościowy, a niekiedy nawet ilościowy, opis wielu zjawisk specyficznych dla metali. Do zjawisk tych zaliczyć można między innymi zjawiska termoelektryczne.

2.2. Powstawanie siły termoelektrycznej (zjawisko Seebecka)

Analiza własności gazu elektronowego wskazuje na istnienie dwóch współlistotnych przyczyn powstawania siły termoelektrycznej. Pierwsza z nich wiąże się z powstawaniem na

styku dwu różnych przewodników napięcia stykowego zwanego napięciem kontaktowym, druga zaś związana jest z tzw. objętościową składową siły termoelektrycznej.

2.2.1. Napięcie kontaktowe

Mechanizm powstawania napięcia kontaktowego jest następujący. Zetknięcie dwóch różnych przewodników wywołuje dyfuzję elektronów poprzez złącze. Różnica w wartościach prac wyjścia powoduje, że wypadkowy prąd dyfuzji przepływa z materiału o małej wartości pracy wyjścia do materiału o dużej pracy wyjścia. W efekcie pierwszy materiał zyskuje nadmiarowy ładunek dodatni, a drugi ujemny. W stanie równowagi termodynamicznej wywołane takim rozkładem ładunku pole elektryczne ogranicza do zera wypadkową dyfuzję, a powstała pomiędzy przewodnikami różnica potencjałów zwana jest napięciem kontaktowym. Zależność pracy wyjścia elektronu od temperatury przewodnika powoduje, że również napięcie kontaktowe jest od niej uzależnione.

Pomimo, że napięcie kontaktowe dla różnych metali lub półprzewodników osiągać może znaczne nieraz wartości (rzędu kilku wolt), jego bezpośredni pomiar przy pomocy woltomierza nie jest możliwy. Zamknięcie obwodu elektrycznego zbudowanego z dwu różnych przewodników, jest bowiem równoznaczne z utworzeniem w obwodzie dwu styków, na których pojawia się identyczne co do wartości, ale przeciwnie skierowane napięcie kontaktowe. Efekt przepływu prądu w zamkniętym obwodzie termopary, świadczący o powstaniu niezerowej siły termoelektrycznej, daje dopiero zróżnicowanie napięć kontaktowych wywołane różnicą temperatur obu styków przewodników.

2.2.2. Objętościowa składowa siły termoelektrycznej

Powodem powstawania objętościowej składowej siły termoelektrycznej jest zróżnicowanie wartości średniej energii kinetycznej elektronów gazu dla różnych przewodników jak również różna zależność tej energii od temperatury dla różnych przewodników.

Jeżeli wzdłuż przewodnika występuje różnica temperatur to elektrony swobodne w części przewodnika o wyższej temperaturze mają wyższą energię kinetyczną niż elektrony w części chłodniejszej. Różnice w średniej energii kinetycznej są dla gazu elektronowego równoznaczne z różnicami jego ciśnienia, wywołując przepływ elektronów z obszaru o wyższym ciśnieniu (energii) do obszaru o ciśnieniu niższym. W obrębie przewodnika naruszona zostaje równowaga ładunków. Obszar o wyższej temperaturze zyskuje ładunek dodatni zaś obszar o niższej temperaturze ładunek ujemny. Przepływ elektronów zostaje wstrzymany poprzez powstającą pomiędzy rozdzielonymi ładunkami różnicę potencjałów.

Podobnie jak napięcie kontaktowe tak powstała różnica potencjałów może dawać trwały wkład do wielkości siły termoelektrycznej obwodu.

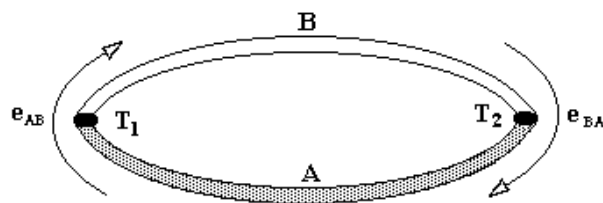
2.3. Przekaz ciepła wywołany przepływem prądu (zjawiska Peltiera i Thomsona)

Napięcie kontaktowe powstające na styku dwu różnych przewodników powoduje, że elektrony przepływające przez ten styk muszą gwałtownie zmieniać swą energię kinetyczną. Jeżeli istniejąca na złączu różnica potencjałów przyspiesza poruszające się elektrony ich energia rośnie. Dążąc do osiągnięcia stanu równowagi termodynamicznej z siecią krystaliczną elektrony przekazują sieci część swej energii w procesie zderzeń z jonami. Powoduje to makroskopowo obserwowany w zjawisku Peltiera efekt wydzielania energii cieplnej na tym styku przewodników. Gdy napięcie kontaktowe hamuje elektrony przemieszczające się przez styk, muszą one pobrać energię od sieci krystalicznej powodując jej ochłodzenie.

W zupełnie podobny sposób, analizując zmiany energii kinetycznej elektronów przewodnictwa w zależności od zmian temperatury przewodnika, można opisać przyczyny powstawania zjawiska Thomsona.

3. Obwody termoelektryczne

W obwodach termoelektrycznych, zbudowanych z wielu przewodników, obliczanie wypadkowego udziału różnie skierowanych składowych sił termoelektrycznych stanowi pewną trudność. Dla ułatwienia analizy, działanie wszystkich składowych przenosi się umownie do spoin obwodu. Zgodnie z tą umową na dowolnym styku dwóch przewodników A i B, utrzymywanych w temperaturze T , powstaje siła termoelektryczna $\varepsilon_{ab} = \alpha_{ab}T$; gdzie α_{ab} oznacza różniczkową siłę termoelektryczną dla przewodników A i B.

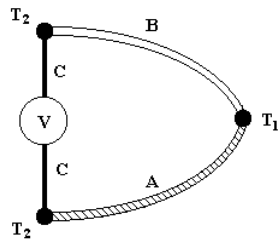


Rys. 4. Zamknięty obwód termoelektryczny przewodników A i B

Przykładowo, w przedstawionym na Rys. 4 najprostszym obwodzie zbudowanym z dwóch różnych przewodników, których styki mają różne temperatury T_1 i T_2 , całkowita siła termoelektryczna $E_{ab} = \varepsilon_{ab} + \varepsilon_{ba} = \alpha_{ab}T_1 + \alpha_{ba}T_2 = \alpha_{ab}(T_1 - T_2)$ ponieważ $\alpha_{ba} = -\alpha_{ab}$.

W obwodzie termoelektrycznym zbudowanym z trzech przewodników A, B i C, w którym przewodnik C utrzymywany jest w stałej temperaturze T_2 różnej od temperatury T_1 styku AB, całkowita siła elektromotoryczna $E_{abc} = E_{ab}$. Oznacza to, że utrzymywany w stałej temperaturze przewodnik C nie wprowadza żadnego wkładu do siły termoelektrycznej

obwodu (Rys. 5). Fakt ten ma podstawowe znaczenie w pomiarach sił termoelektrycznych umożliwiając włączenie w badany obwód przyrządu pomiarowego bez wpływu na wartość wyznaczonej siły.



$$E_{abc} = \alpha_{ab} (T_1 - T_2)$$

Rys. 5. Trzeci metal w obwodzie termoelektrycznym.

Znajomość dla przewodników A i B różniczkowych sił termoelektrycznych określonych względem dowolnego przewodnika C wystarcza do wyznaczenia wartości siły termoelektrycznej występującej między przewodnikami A i B: $\alpha_{ab} = \alpha_{ac} - \alpha_{bc}$. Dzięki tej własności możliwy jest pomiar i tablicowanie stałych termoelektrycznych α w stosunku do arbitralnie wybranego przewodnika odniesienia. Przykładowe wartości stałej α wyznaczone względem platyny dla kilku wybranych metali przedstawia Tab. 1.

Tab. 1. Różniczkowe siły termoelektryczne wybranych metali wyznaczone w przedziale temperatur 0 - 100°C względem platyny.

metal	α (mV/100K)	metal	α (mV/100K)
konstantan	-3.51	iryd	+0.65
nikiel	-1.48	rod	+0.70
kobalt	-1.33	srebro	+0.74
alumel	-1.29	cynk	+0.76
pallad	-0.57	miedź	+0.76
platyna	0.0	złoto	+0.78
aluminium	+0.42	żelazo	+1.89
ołów	+0.44	nikielchrom	+2.20

Przedstawione w Tab. 1 dane umożliwiają obliczenie wartości różniczkowej siły termoelektrycznej dla dowolnie wybranego układu przewodników. Przykładowo, stała α dla termopary żelazo-nikiel wyniesie $1.89 - (-1.48) = 3.37$ mV/100K.

4. Praktyczne wykorzystanie zjawisk termoelektrycznych

4.1. Układy pomiaru temperatury

Dzięki niemal liniowej zależności siły termoelektrycznej od różnicy temperatury styków, termopary stosowane są powszechnie w układach pomiaru temperatury. Jeden ze styków termopary stanowi czujnik pomiarowy, natomiast drugi utrzymywany jest w stałej temperaturze odniesienia. W wyniku zamiany wielkości termodynamicznej (temperatura) na wielkość elektryczną (napięcie) wynik pomiaru może być łatwo zaprezentowany, przetworzony lub zarejestrowany. W precyzyjnych pomiarach temperatury stosuje się elektroniczne układy korygujące nieliniowość charakterystyk termopar. Wykorzystując do budowy termopar odpowiednie materiały można przy ich pomocy prowadzić dokładne pomiary w niezwykle szerokim przedziale temperatur, od niemal 0K do ok. 2000K.

Najczęściej stosowane typy termopar, z podaniem standardowego oznaczenia i przybliżonej wartości górnego zakresu pomiarowego, przedstawiono w Tab. 2.

Tab. 2

Typ termoelementu	Symbol	Zakres pomiarowy (°C) (górną granicą)
platynarod - platyna	S	1200
nikiel - chromonikiel	K	1000
żelazo - konstantan	J	700
miedź - konstantan	T	400

4.2. Ogniwa termoelektryczne

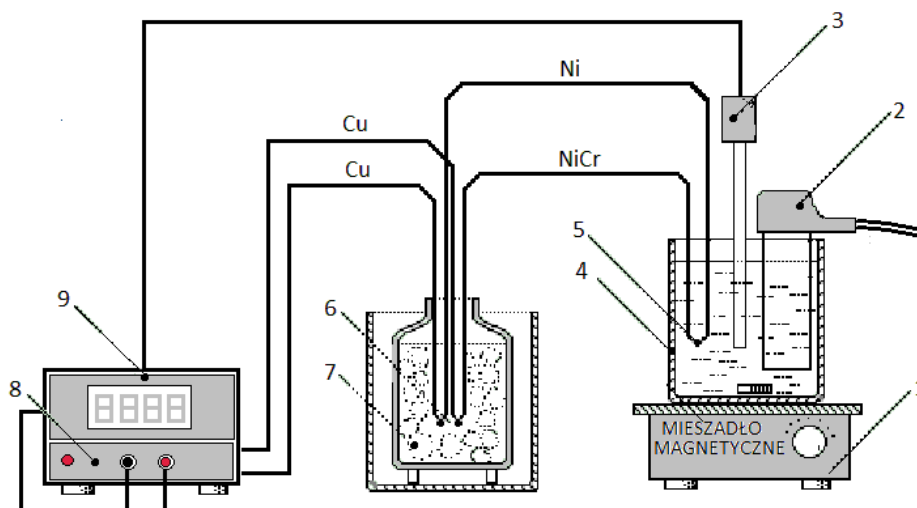
Dla półprzewodnikowych materiałów będących związkami bizmutu i telluru współczynniki termoelektryczne osiągają wartości przekraczające co najmniej o rząd wielkości współczynniki termoelektryczne metali. Wykorzystując tego typu materiały buduje się ogniwa (układy wielu szeregowo połączonych termoelementów) o wysokiej sprawności. Ogniwa te można wykorzystywać jako generatory prądu (wytwarzanie energii elektrycznej kosztem wymuszonego przekazu ciepła) lub elementy chłodnicze (przekaz ciepła wymuszony przepływem prądu). Ogniwa termoelektryczne znajdują coraz szersze zastosowanie w urządzeniach chłodniczych, klimatyzacyjnych, termostatach a nawet komputerach.

II CEL ĆWICZENIA

Celem ćwiczenia jest pomiar charakterystyki temperaturowej termopary Ni-NiCr oraz wyznaczenie wartości stałej termoelektrycznej dla tej termopary.

III WYKONANIE ĆWICZENIA

Schemat obwodu pomiarowego ilustruje poniższy rysunek:



Rys. 1. Schemat obwodu pomiarowego: 1 - mieszadło magnetyczne, 2 - grzałka, 3 - sonda termometru cyfrowego, 4 - naczynie z wodą, 5 - końcówka pomiarowa termopary, 6 - końcówka odniesienia termopary, 7 - naczynie kalorymetryczne z lodem, 8 - wzmacniacz napięciowy, 9 - dwukanałowy moduł pomiarowy.

1. Napełnić naczynie kalorymetryczne mieszaniną wody destylowanej z lodem zanurzając w niej na głębokości ok. 2 cm końcówkę odniesienia termopary.
2. Do naczynia z grzałką nalać ok. 500 ml wody tak, aby zakryła ona całkowicie grzałkę. Zanurzyć na głębokość 2 cm w wodzie sondę termometru cyfrowego i końcówkę pomiarową termopary.
3. Uzyskać zgodę prowadzącego zajęcia na włączenie listwy zasilania i uruchomienie komputera. (Przycisk Włącz przytrzymać wciśnięty ok. 2s !)
4. Włączyć mieszadło magnetyczne ustalając prędkość obrotową w pozycji 5 (500 obr/min).
5. Uruchomić program DOSBox. Oczekać kilka minut do ustabilizowania się napięcia termopary (U), a następnie włączyć grzałkę do sieci. Program przedstawi na wykresie badaną zależność $U(T)$, a dane doświadczalne dla zakresu temperatur 25-60 °C zostaną zapisane w pliku liczbowym „cw37.txt” znajdującym się na dysku NOWY(D) w katalogu DOSBox-0.74.
6. Po zasygnalizowanym przez program zakończeniu zapisu danych wyłączyć grzałkę.
7. Zakończyć pracę programu dwukrotnym naciśnięciem klawisza ESC. Przejście do systemu Windows po wpisaniu komendy exit.

IV OPRACOWANIE WYNIKÓW

1. Uruchomić arkusz kalkulacyjny Excel. Wprowadzić dane pomiarowe zawarte w pliku cw37.txt. zapisane na dysku NOWY (D) w katalogu DOSBox-0.74. (Algorytm wpisu danych: Dane → Dane zewnętrzne → Z tekstu → (z katalogu: D:\DOSBox-

0.74\CW37.TXT) → Stała szerokość → Dalej → Dalej → Zakończ → Istniejący arkusz → OK).

2. Dane w pliku zapisane są w postaci dwu kolumn A i B, w pierwszej temperatura T (w ° C) **przemnożona przez 10**, w drugiej SEM termopary E(w mV) **przemnożona przez 330** (wzmocnienie wzmacniacza). Utworzyć dwie kolejne kolumny danych potrzebne do uzyskania wykresu zależności E(T) – kolumnę temperatury T (kolumna A podzielona przez 10) i kolumnę siły elektromotorycznej termopary E (kolumna B podzielona przez 330).

Przykład formuły wpisanej w komórkę C1: =A1/10

3. Zaznaczyć nowe kolumny danych T i E i utworzyć wykres E(T) (Wstaw → Wykres... → XY (Punktowy). Opisać osie wykresu podając symbol wielkości mierzonej i jednostkę.

4. Ustalić analityczną postać uzyskanej liniowej zależności (Wykres → Dodaj linię trendu... → Typ: → Liniowy → Opcje: → Wyświetl równanie na wykresie → Wyświetl wartość R-kwadrat na wykresie).

5. Zanotować wartość i jednostkę stałej termoelektrycznej termopary α równej liczbowo współczynnikowi kierunkowemu uzyskanego równania liniowego.

V. DYSKUSJA BŁĘDÓW

Możliwość oszacowania wielkości błędu wyznaczenia wartości różniczkowej siły termoelektrycznej termopary daje jedynie numeryczna metoda najmniejszych kwadratów podając sposób obliczenia błędu średniego kwadratowego S_{α} . W przypadku opracowania graficznego dyskusja błędów nie jest wymagana.

VI. LITERATURA

1. Mała Encyklopedia Metrologii, WNT, W-wa 1989
2. Encyklopedia Fizyki, PWN, W-wa 1973
3. Chwaleba A., Poniński M., Siedlecki A., Metrologia elektryczna, WNT, W-wa 1994
4. Wróblewki A.K., Zakrzewski J.A., Wstęp do Fizyki, PWN, W-wa 1991
5. Szczeniowski Sz., Fizyka doświadczalna, Część III, PWN, W-wa 1972
6. Anger V.A., Ebert H., Technika eksperymentu fizycznego, PWN, W-wa 1964
7. Łapiński M., Pomiary elektryczne i elektroniczne wielkości nieelektrycznych, WNT, W-wa 1974
8. Pelc T., Borczyński J., Odprowadzanie ciepła z przyrządów półprzewodnikowych, WKiŁ, W-wa 1986
9. Michalski L., Eckersdorf K., Pomiary temperatury, WNT, W-wa 1986