

**ĆWICZENIE**

37

Badanie zjawiska Seebecka i zastosowanie modułu termoelektrycznego do przetwarzania energii cieplnej na elektryczną

Cel ćwiczenia: Poznanie istoty zjawisk termoelektrycznych, ich opisu, a także:

- wyznaczenie zależności napięcia termoelektrycznego od różnicy temperatur między spojeniami półprzewodnikowego modułu termoelektrycznego,
- wyznaczenie wartości współczynnika Seebecka dla modułu termoelektrycznego,
- wyznaczenie zależności mocy generowanej przez moduł termoelektryczny od różnicy temperatur między jego spojeniami.

Zagadnienia: Zjawiska Seebecka i Peltiera, współczynnik termoelektryczny, budowa i zasada działania półprzewodnikowych modułów termoelektrycznych, sprawność przetwarzania energii cieplnej na elektryczną termoelektrycznych generatorów prądu.

1. Wprowadzenie

Zjawiska termoelektryczne: zjawisko Seebecka i Peltiera, a także Joule'a, odgrywają niezwykle ważną rolę we współczesnej nauce i technice.

Zjawisko Seebecka jest wykorzystywane do pomiaru temperatury i zmian temperatury w wielu urządzeniach pomiarowych np. kalorymetrach (różnicowej analizie termicznej (ang. DTA) i różnicowej kalymetrii skaningowej (ang. DSC)), układach do pomiarów przewodności cieplnej oraz pomiarach energii różnego typu promieniowania. Zjawisko to jest wykorzystywane również do bezpośredniego przetwarzania energii cieplnej na energię elektryczną, np. w najbardziej spektakularnym zastosowaniu: w radio-izotopowym generatorze termoelektrycznym (rys.1), stosowanym do zasilania sond kosmicznych i łazików marsjańskich.



Rys.1. Fotografia z wyprawy Apollo 12 [NASA] w 1969 roku. Astronauta Alan Bean wkłada pojemnik z paliwem w postaci izotopu plutonu do radio-izotopowego generatora termoelektrycznego. W lewym górnym rogu: kapsuła z elementami termoelektrycznymi w zbliżeniu. (fotografia: commons.wikimedia.org).

Zjawisko Peltiera jest zjawiskiem odwrotnym do zjawiska Seebecka. Wykorzystywane jest do budowy pomp ciepła i układów chłodzących stosowanych, np. w chłodnictwie. Kolejne ważne zastosowania obejmują medycynę (kriochirurgia, np. chirurgia gałki ocznej, zamrażanie tkanek, chłodzenie preparatów biologicznych, także w trakcie transportu). Podobnie elektronika nie może obejść się bez zjawiska Peltiera, np. do chłodzenia procesorów, noktowizorów, diod laserowych, a także w wymrażarkach próżniowych i innych miniaturowych urządzeniach wymagających obniżonej temperatury. Zjawisko znajduje też zastosowanie do wytwarzania

zmiennego w czasie pola temperaturowego np. w kalorymetrii peltierowskiej. Nawet w sporcie i rekreacji można spotkać wykorzystanie zjawiska Peltiera, np. chłodzenie sportowych kasków motocyklowych, czy małe lodówki dla podróżników.

Z tych względów zjawiska termoelektryczne należą do kanonu edukacji inżynierskiej.

1.1. Zjawiska termoelektryczne - podstawowe pojęcia i krótka historia

Do zjawisk termoelektrycznych zaliczane są: zjawisko Joule'a, Seebecka, Peltiera i Thomsona. Poniżej przedstawiona jest istota tych zjawisk oraz krótka historia ich odkrycia.

1.1.1 Zjawisko Joule'a

Zjawisko to, nazywane również zjawiskiem Joule'a-Lenza, polega na zamianie energii elektrycznej na ciepło podczas przepływu prądu przez opornik. Ciepło ΔQ_J generowane podczas przepływu prądu elektrycznego o natężeniu I przez opornik R w czasie Δt

$$\Delta Q_J = I^2 R \Delta t. \quad (1.1)$$

Zjawisko zostało odkryte przez angielskiego fizyka Jamesa Prescottta Joule'a w 1840 roku. Dwa lata później niezależnie zjawisko odkrył Heinrich Friedrich Lenz, rosyjski fizyk o niemieckich korzeniach.

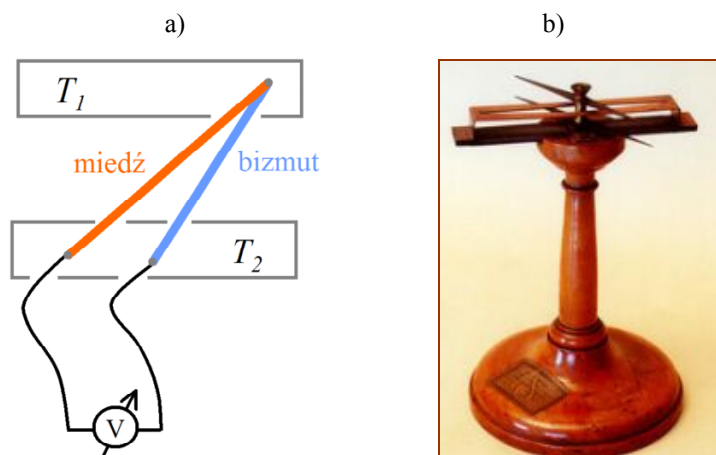
1.1.2 Zjawisko Seebecka

Zjawisko Seebecka polega na generowaniu siły elektromotorycznej między złączami wykonanymi z dwóch różnych materiałów A i B, przewodzących prąd elektryczny (rys. 2a i 3). Materiały te różnią się koncentracją elektronów, a ich koncentracja zależy od temperatury. Elektrony dyfundują z materiału o większej koncentracji do materiału o mniejszej koncentracji. Na złączu ustala się kontaktowa różnica potencjałów. Jeżeli mamy dwa złącza o jednakowej temperaturze to różnice potencjałów znoszą się. Jeżeli temperatury złącz są różne (rys. 2.) to między złączami powstaje wypadkowa różnica potencjałów nazywana siłą termoelektryczną.

Jeżeli te złącza mają różne temperatury, to różnica potencjałów między złączami jest opisana przybliżonym równaniem:

$$\Delta V = (\alpha_A - \alpha_B)(T_1 - T_2). \quad (1.2)$$

gdzie: α_A i α_B to współczynniki Seebecka dla materiałów A i B, tworzących złącza, a T_1 i T_2 temperatury tych złączy.

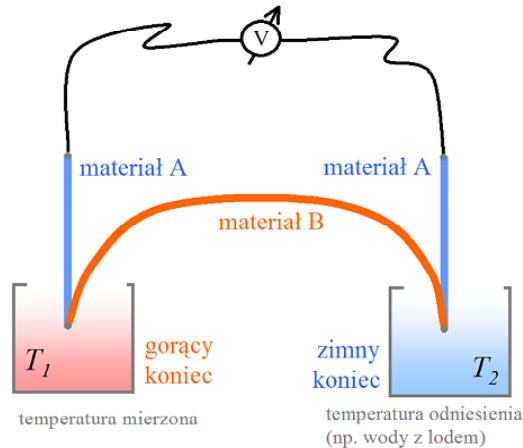


Rys. 2. (a) Ilustracja zjawiska Seebecka, zademonstrowana w 1821 roku - połączenie miedzi i bizmutu. (b) Instrument Seebecka (fotografia: Fu Jen University, Tajwan).

Warto zwrócić uwagę na to, że napięcie termoelektryczne nie zależy od wymiarów geometrycznych materiałów tworzących złącze. Dla metali i ich stopów współczynniki Seebecka są rzędu dziesiątków mikrowoltów na kelwin, a dla materiałów półprzewodnikowych o rząd, a nawet dwa rzędy większe, dlatego współczesne urządzenia termoelektryczne wykorzystują

materiały półprzewodnikowe. Metale są jednak nadal wykorzystywane, np. w termoparach (rys.3), służących do pomiaru temperatury gorącego końca względem zimnego.

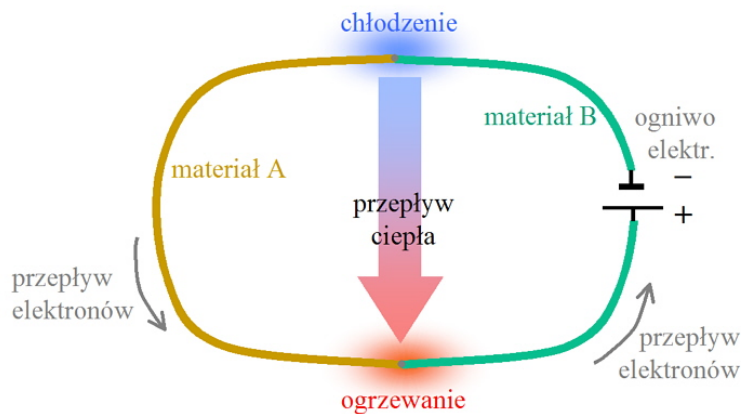
Za odkrywcę opisywanego zjawiska termoelektrycznego uznaje się niemieckiego uczonego Thomasa Johana Seebecka, który w 1821 roku stwierdził, że igła magnetyczna umieszczona między połączonymi na obu końcach płytkami wykonanymi z miedzi i bizmutu ulega wychyleniu, jeżeli jedno ze złączy zostanie ogrzane (rys. 2b.). Poprawnej interpretacji tego zjawiska dokonał twórca elektromagnetyzmu, duński fizyk Hans Christian Ørsted, który wprowadził pojęcie „zjawisko termoelektryczne”.



Rys. 3. Ilustracja zasady działania termopary.

1.1.3. Zjawisko Peltiera

Zjawisko Peltiera polega na wydzielaniu lub pochłanianiu ciepła przez złącze różnych metali lub półprzewodników podczas przepływu przez to złącze prądu elektrycznego (rys.4). Jeżeli elektrony przechodząc przez złącze zmniejszają swoją energię następuje wydzielanie ciepła, a gdy zwiększają, pochłaniają ciepło powodując chłodzenie złącza.



Rys. 4. Ilustracja zjawiska Peltiera.

Za odkrywcę tego zjawiska uznaje się francuskiego zegarmistrza, fizyka i meteorologa Jeana Charlesa Athanase’a Peltiera, który w 1834 roku stwierdził, że temperatura złącza wykonanego z różnych metali zmienia się, gdy przez złącze przepływa prąd elektryczny. W 1838 roku Heinrich Friderich Lenz wykazał, że w zależności od kierunku przepływu prądu można zamrozić lub stopić kroplę wody umieszczoną na złączu, a efekt cieplny zależy od natężenia prądu przepływającego przez to złącze.

Ciepło ΔQ wydzielane lub pochłaniane przez złącze w czasie Δt podczas przepływu ładunku elektrycznego q można opisać za pomocą równania:

$$\Delta Q = \Pi q = \Pi I \Delta t \quad \text{lub} \quad \frac{dQ}{dt} = \Pi I \quad (1.3)$$

gdzie Π oznacza współczynnik Peltiera zależny od właściwości materiałów tworzących złącze, a I natężenie prądu płynącego przez to złącze. Ze wzoru (1.3) wynika, że efekt cieplny nie zależy od wymiarów geometrycznych złącza i jest proporcjonalny do natężenia prądu.

Poprawnej i pełnej interpretacji zjawisk termoelektrycznych na gruncie rozważań termodynamicznych dokonał wybitny fizyk irlandzki William Thomson (Lord Kelvin) w 1856 roku. Thomson wykazał związek między współczynnikiem Seebecka i Peltiera oraz odkrył nowe zjawisko termoelektryczne polegające na wydzielaniu lub pochłanianiu ciepła podczas przepływu prądu elektrycznego przez przewodnik, w którym występuje gradient temperatury, nazywane zjawiskiem Thomsona.

Związek między współczynnikiem Seebecka i współczynnikiem Peltiera opisywany jest zależnością:

$$\Pi = \alpha T. \quad (1.4)$$

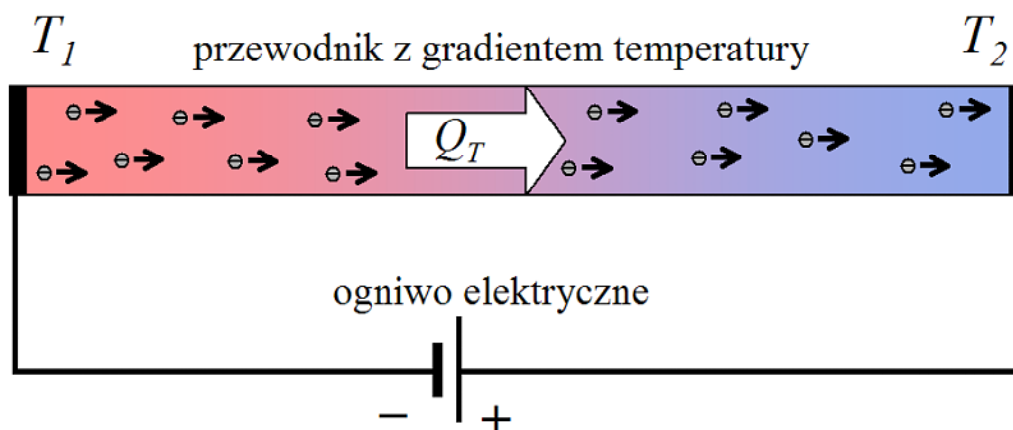
1.1.4. Zjawisko Thomsona

Zjawisko Thomsona zostało opisane w 1851 roku. Polega ono na generowaniu lub pochłanianiu ciepła Q_T podczas przepływu prądu przez przewodnik, w którym występuje gradient temperatury dT/dx .

$$\frac{dQ_T}{dT} = \tau_T I \frac{dT}{dx} \quad (1.5)$$

gdzie τ_T oznacza współczynnik Thomsona. Współczynnik ten związany ze współczynnikiem Seebecka zależnością:

$$\tau_T = T \frac{d\alpha}{dT} \quad (1.6)$$

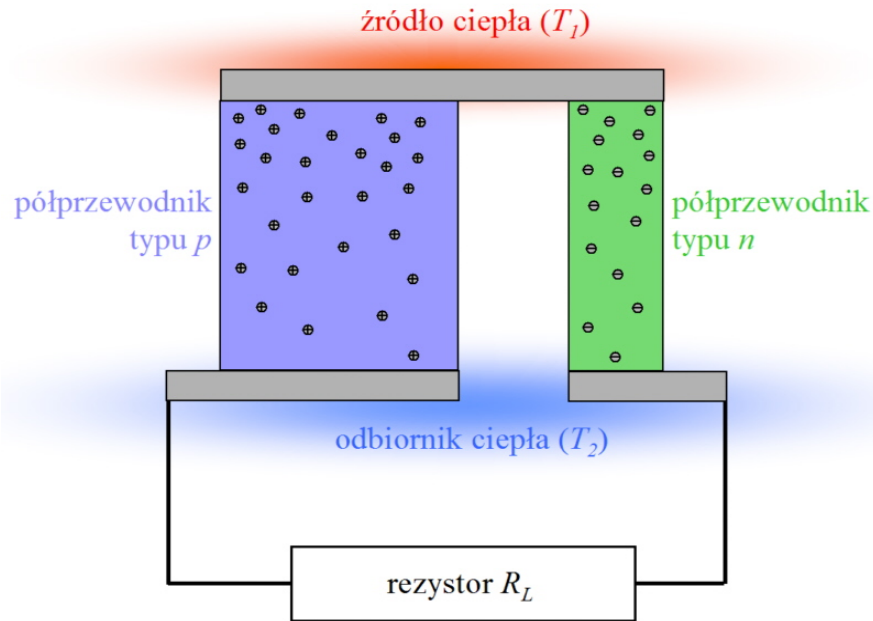


Rys. 5. Ilustracja zjawiska Thomsona.

2. Generator termoelektryczny

Zjawisko Seebecka można wykorzystać do generowania prądu, a więc bezpośredniego przetwarzania energii cieplnej na energię elektryczną.

Rozpatrujemy pojedynczą termoparę. Zakładamy, że różnica temperatur między źródłem i odbiornikiem ciepła wynosi ΔT , ciepło przepływa tylko przez gałęzie termopary, a rezystancja termopary jest równa R . Do termopary podłączony jest opór obciążenia R_L . Schemat rozpatrywanego układu przedstawiony jest na rys.6.



Rys.6. Schemat termoelektrycznego generatora prądu.

Siła termoelektryczna termopary

$$E = \alpha \Delta T . \quad (2.1)$$

Natężenie prądu płynącego w rozpatrywanym obwodzie:

$$I = \frac{E}{R + R_L} = \frac{\alpha \Delta T}{R + R_L} . \quad (2.2)$$

Moc wydzielona na oporze obciążenia

$$w = I^2 R_L = \left(\frac{\alpha \Delta T}{R + R_L} \right)^2 R_L . \quad (2.3)$$

Część ciepła pobierana ze źródła zostaje zużyta na zrównoważenie ciepła Peltiera $\alpha T_1 I$ związanego z przepływającym w obwodzie prądem. Dodatkowo występuje strumień ciepła $K \Delta T$ związany z przewodzeniem ciepła przez ramiona termopary. K oznacza sumaryczny współczynnik przewodzenia ciepła przez ramiona termopary. Całkowity strumień ciepła pobierany ze źródła:

$$q_1 = \alpha T_1 I + K \Delta T \quad (2.4)$$

Sprawność przetwarzania energii cieplnej na elektryczną jest równa stosunkowi mocy wydzielonej na rezystancji obciążenia do mocy pobieranej ze źródła prądu:

$$\eta = \frac{w}{q_1} = \frac{\left(\frac{\alpha \Delta T}{R + R_L} \right)^2 R_L}{\alpha T_1 I + K \Delta T} \quad (2.5)$$

Moc użyteczna osiąga maksimum gdy opór obciążenia jest równy oporowi źródła prądu

$$R = R_L \quad (2.6)$$

Maksymalna wartość mocy użytecznej:

$$w_{\max} = \frac{(\alpha \Delta T)^2}{4R} \quad (2.7)$$

Sprawność generatora termoelektrycznego można wyrazić, korzystając ze współczynnika efektywności materiału termopar („figure of merit”):

$$Z = \frac{\alpha^2}{KR}, \quad (2.8)$$

gdzie: α , K i R oznaczają odpowiednio: współczynnik termoelektryczny, przewodność cieplną i rezystancję modułu termoelektrycznego.

Przekształcając równanie (2.5) możemy uzyskać następujące wyrażenie na sprawność generatora termoelektrycznego:

$$\eta = \frac{w}{q} = \frac{\Delta T}{T_1} \frac{[(1 + ZT_m)^{1/2} - 1]}{\left[(1 + ZT_m)^{1/2} + \frac{T_1}{T_2} \right]} = \eta_{Car} \frac{(1 + ZT_m)^{1/2} - 1}{(1 + ZT_m)^{1/2} + \frac{T_1}{T_2}}, \quad (2.9)$$

gdzie: T_m oznacza średnią temperaturę pracy modułu termoelektrycznego.

Dla dużych wartości ZT_m sprawność generatora zmierza do sprawności silnika termodynamicznego pracującego zgodnie z cyklem Carnota

$$\eta_{Car} = \frac{w}{q} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{\Delta T}{T_1}. \quad (2.10)$$

Wielkością charakteryzującą materiał termopary pod względem jego przydatności do budowy chłodziarek i generatorów termoelektrycznych jest współczynnik efektywności Z , definiowany jako:

$$Z = \frac{\alpha^2}{k\rho} = \frac{\alpha^2 \sigma}{k}, \quad (2.11)$$

gdzie k oznacza współczynnik przewodności cieplnej, ρ oporność właściwą, a σ przewodnictwo właściwe materiału, z którego jest wykonana termopara. Z równań (2.5) i (2.9) wynika, że dobre materiały przeznaczone do budowy modułów termoelektrycznych powinny charakteryzować się wysokimi wartościami współczynnika Seebecka, małą przewodnością elektryczną i cieplną.

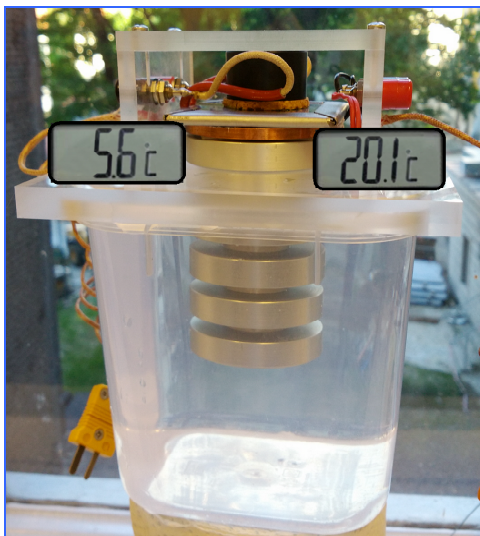
Ponieważ parametr Z ma wymiar $1/K$, do opisu sprawności generatorów termoelektrycznych i modułów Peltiera stosuje się bezwymiarowy parametr ZT , w którym T oznacza średnią temperaturę pracy układu termoelektrycznego.

Najczęściej stosowane półprzewodnikowe materiały termoelektryczne mają ZT około 1 – 1,5. Sprawność generatorów termoelektrycznych, w porównaniu ze sprawnością silników cieplnych o spalaniu wewnętrznym, jest niewielka. Niemniej jednak, ze względu na liczne zalety (brak części ruchomych, cicha, bezawaryjna i bezobsługowa praca) generatory termoelektryczne są stosowane do zasilania odbiorników małej mocy tam, gdzie występuje stabilny w czasie gradient temperatury (np. wykorzystanie ciepła odpadowego w silnikach spalinowych, które w przeciwnym wypadku jest tracone).

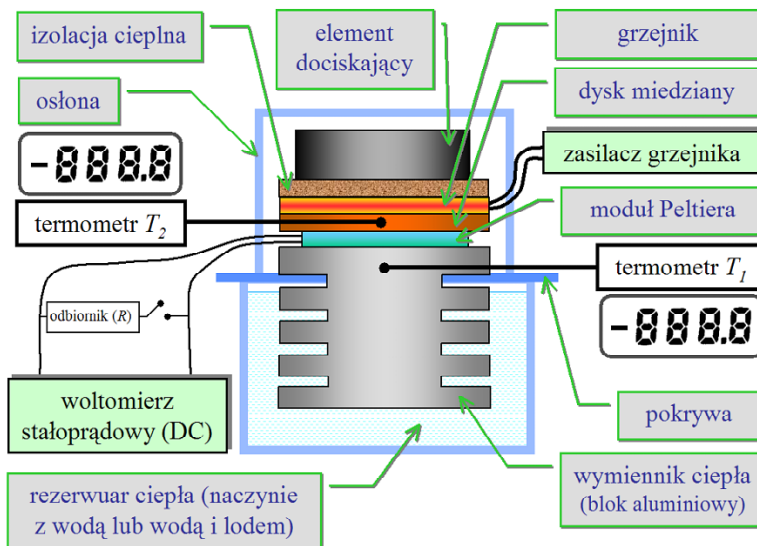
3. Zasada pomiaru i układ pomiarowy

Zasadniczą częścią układu pomiarowego jest półprzewodnikowy moduł termoelektryczny połączony z woltomierzem (multimetrem). Moduł termoelektryczny jest umieszczony na aluminiowym wymienniku ciepła częściowo zanurzonym w naczyniu z wodą lub mieszaniną wody z lodem, spełniającym rolę zasobnika (rezerwuaru) ciepła. Na module jest umieszczona płytka miedziana oraz grzejnik zasilany ze źródła prądu stałego z wbudowanymi miernikami natężenia prądu i napięcia. Grzejnik służy do wytworzenia różnicy temperatur pomiędzy górną i dolną stroną modułu termoelektrycznego. W górnej części aluminiowego wymiennika ciepła oraz w płycie miedzianej znajdują się otwory, w których umieszczone są czujniki temperatury połączone z termometrami elektronicznymi. W celu polepszenia kontaktu cieplnego powierzchnie styku poszczególnych elementów pokryte są pastą termoprzewodzącą.

Fotografię oraz schemat układu pomiarowego przedstawiają rysunki 7.a i 7.b.



Rys. 7.a. Układ do badania modułu termoelektrycznego: generacji prądu i wyznaczania współczynnika Seebecka.



Rys. 7.b. Schemat układu do badania generacji prądu i wyznaczania współczynnika Seebecka.

4. Zadania do wykonania

4.1. Wyznaczanie zależności napięcia termoelektrycznego od różnicy temperatur między spojeniami modułu.

Napełnić naczynie stanowiące rezerwuuar zimną wodą z kranu i umieścić aluminiowy wymiennik ciepła w tym naczyniu.

Połączyć zasilacz prądu stałego z grzejnikiem, a do wyjść modułu termoelektrycznego podłączyć woltomierz. Zmieniając natężenie prądu przepływającego przez grzejnik w przedziale od 0 do 2,1 A co 0,3 A wyznaczyć zależność napięcia termoelektrycznego od różnicy temperatur między spojeniami modułu termoelektrycznego. Po każdej zmianie natężenia prądu odczekać około 4 min. na ustalenie się temperatur. Temperatury bloku miedzianego i aluminiowego wskazują termometry elektroniczne, a napięcie termoelektryczne mierzone jest za pomocą woltomierza.

Opracowanie wyników

Narysować wykres zależności napięcia termoelektrycznego od różnicy temperatur między spojeniami modułu termoelektrycznego. Na podstawie aproksymacji liniowej uzyskanej zależności wyznaczyć wartość efektywnego współczynnika Seebecka dla badanego modułu termoelektrycznego (nachylenie tej zależności).

4.2 Wyznaczanie zależności mocy elektrycznej generowanej przez moduł termoelektryczny od różnicy temperatur między jego spojeniami.

Za pomocą miernika uniwersalnego zmierzyć wartość rezystancji opornika, zanotować dane niezbędne do obliczenia wyznaczenia niepewności pomiaru tej rezystancji.

Korzystając z układu pomiarowego opisanego w punkcie 4.1 wprowadzić następujące zmiany: podłączyć na wyjściu modułu termoelektrycznego opornik, a równolegle do opornika woltomierz.

Wyznaczyć zależność spadku napięcia na oporniku od różnicy temperatur między spojeniami modułu termoelektrycznego.

Opracowanie wyników

Na podstawie uzyskanych wyników narysować wykres zależności mocy generowanej przez moduł termoelektryczny od różnicy temperatur między zimnym i gorącym spojeniem tego modułu. Moc wydzielaną na oporniku obliczyć ze wzoru

$$w = \frac{U^2}{R_L}, \text{ gdzie } U \text{ oznacza spadek napięcia na rezystancji obciążenia } R_L.$$

Na wykresie w trzech punktach (na początku, na środku i na końcu wykresu) nanieść niepewności pomiarów. Uzyskany wykres porównać z zależnością opisaną równaniem (2.3).

5. Pytania:

1. Wyjaśnić i opisać wzorami zjawiska Seebecka i Peltiera.
2. Napisać związek między współczynnikiem Seebecka i Peltiera.
3. Narysować schemat i wyjaśnić budowę i zasadę działania półprzewodnikowego modułu termoelektrycznego.
4. Wyjaśnić zasadę wyznaczania współczynnika Seebecka oraz mocy generowanej przez moduł termoelektryczny.
5. Jakie właściwości materiałów, z których wykonany jest moduł termoelektryczny, mają decydujący wpływ na sprawność przetwarzania energii cieplnej na elektryczną?

Literatura uzupełniająca (nie jest obowiązkowa):

[1] Y. Kraftmakher, Simple experiments with a thermoelectric module, European Journal of Physics, 26, 959-967 (2005).
<http://dx.doi.org/10.1088/0143-0807/26/6/003>

[2] R. Poprawski, J. Misiewicz, Ćwiczenia Laboratoryjne z Fizyki, część II, Mechanika i Termodynamika, rozdział W2, str. 115 – 122, Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej 1997.

opracowanie: Ryszard Poprawski, Beata Radojewska i Wojciech Poprawski