

## BADANIE ZJAWISK PRZY PRZEWODZENIU CIEPŁA I PRĄDU ELEKTRYCZNEGO

### 1. OZNACZENIA

$c_w$  - ciepło właściwe wody;

$E$  - energia;

$\Delta E$  - szerokość przerwy energetycznej;

$\varepsilon$  - napięcie kontaktowe na styku dwóch przewodników;

$e$  - napięcie termoelektryczne;

$F$  - pole przekroju;

$I$  - natężenie prądu;

$k$  - liczba gałęzi termoogniwa;

$k_B$  - stała Boltzmanna;

$l$  - wysokość pryzmatu półprzewodnika;

$n$  - koncentracja elektronów;

$\dot{m}$  - masowe natężenie przepływu wody;

$P$  - moc;

$\rho$  - koncentracja dziur;

$\dot{Q}$  - strumień ciepła;

$R$  - oporność elektryczna;

$T$  - temperatura bezwzględna;

$\varepsilon_A, \varepsilon_B, \varepsilon_{AB}$  - współczynniki Seebecka odpowiednio dla przewodnika A, przewodnika B i pary przewodników AB;

$\varepsilon_e$  - energia wzbudzenia;

$\varepsilon_n, \varepsilon_p$  - energia wzbudzenia odpowiednio z poziomu donorowego i akceptorowego;

$\varepsilon_{ch}$  - wydajność obiegu chłodniczego;

$\gamma$  - współczynnik Thomsona;

$\eta$  - sprawność obiegu silnikowego;

$\lambda$  - przewodność cieplna;

$\Pi$  - współczynnik Peltiera;

$\sigma$  - przewodność elektryczna właściwa;

$\rho$  - oporność elektryczna właściwa.

Indeksowanie:

Indeks  $t$  - wartości dla termoogniwa,

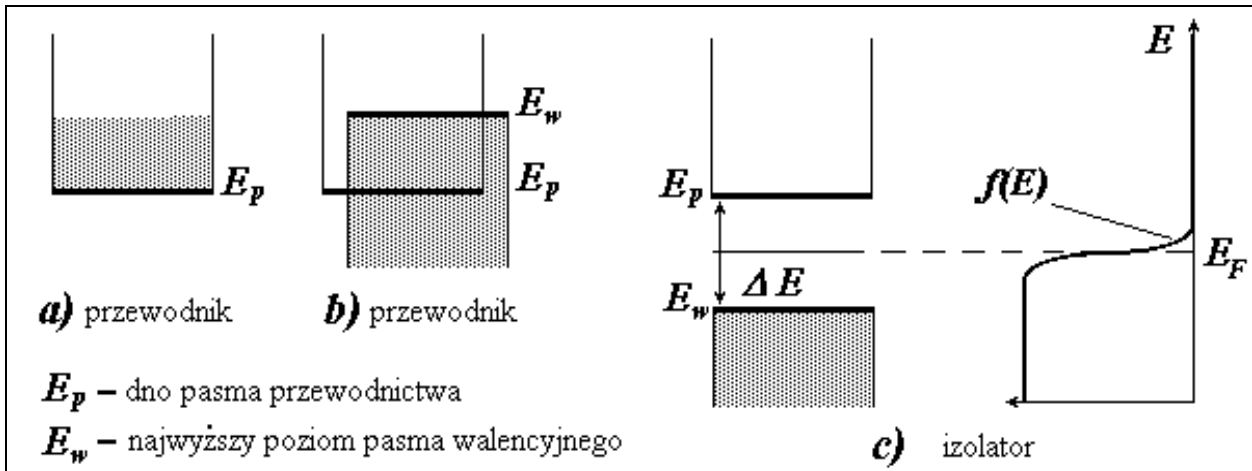
indeks  $g$  - wartości dla grzałki.

## 2. MECHANIZM PRZEWODNICTWA PRĄDU ELEKTRYCZNEGO W CIELE STAŁYM

Ze względu na wartość przewodności elektrycznej  $\sigma$  ciała stałe zwykło się dzielić na:

- **przewodniki** - dla których  $\sigma > 10^6 \quad \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ ;
- **półprzewodniki** -  $10^{-12} < \sigma < 10^6 \quad \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ ;
- **izolatory** - o wartościach  $\sigma < 10^{-12} \quad \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ .

Powyższy podział nie oddaje charakteru zjawisk fizycznych związanych z przewodzeniem prądu elektrycznego. O wiele lepiej do ich wytłumaczenia nadaje się teoria pasmowa ciała stałego, której jedynie zarys zostanie przedstawiony w ramach niniejszego opracowania (czytelnika zainteresowanego szczegółami odsyłamy do literatury przedmiotu [4]). Otóż pojedyncze atomy dają dyskretne poziomy energetyczne. Jeżeli zaczną zbliżać się do siebie, to nastąpi ich rozszczepienie. Zgodnie bowiem z zasadą Pauliego w zespole oddziaływujących cząstek muszą powstać poziomy energetyczne opisywane innymi liczbami kwantowymi. Przy tworzeniu kryształu ciała stałego z wielu atomów rozszczepione poziomy przechodzą, z makroskopowego punktu widzenia, w continuum pasm energetycznych. Dla zjawiska przewodnictwa najbardziej istotne są: pasmo przedostatnie, zwane walencyjnym, oraz ostatnie pasmo przewodnictwa. Jeżeli ostatnie pasmo jest zapełnione elektronami w połowie (rys. 1.a - tak jest w przypadku metalu jednowartościowego), lub też dwa ostatnie pasma częściowo zachodzą na siebie (rys. 1.b - metal dwuwartościowy), to mamy do czynienia z **przewodnikiem**. Jeżeli pasmo walencyjne jest całkowicie zapełnione, a pasmo przewodnictwa puste (ściśle rzecz biorąc przy temperaturze 0K), a pomiędzy nimi występuje przerwa energetyczna  $\Delta E$ , to jest to izolator (rys. 1.c).



O własnościach półprzewodnikowych decyduje możliwość pojawienia się nośników prądu elektrycznego w wyniku wzbudzeń termicznych polegających właśnie na przetrzuceniu elektronu "ponad" przerwą energetyczną. Liczba "swobodnych" nośników w jednostce objętości ciała stałego, czyli tzw. **koncentracja nośników**, zależy od temperatury i z jej wzrostem narasta zgodnie z zależnościami

$$n = C_n e^{-\frac{a_n}{T}} ; \quad p = C_p e^{-\frac{a_p}{T}} \quad (1)$$

gdzie:  $n$  i  $p$  to odpowiednio koncentracja elektronów i dziur (por. z treścią następnego akapitu),

$T$  - temperatura bezwzględna,

$C_n, a_n, C_p, a_p$  - stałe.

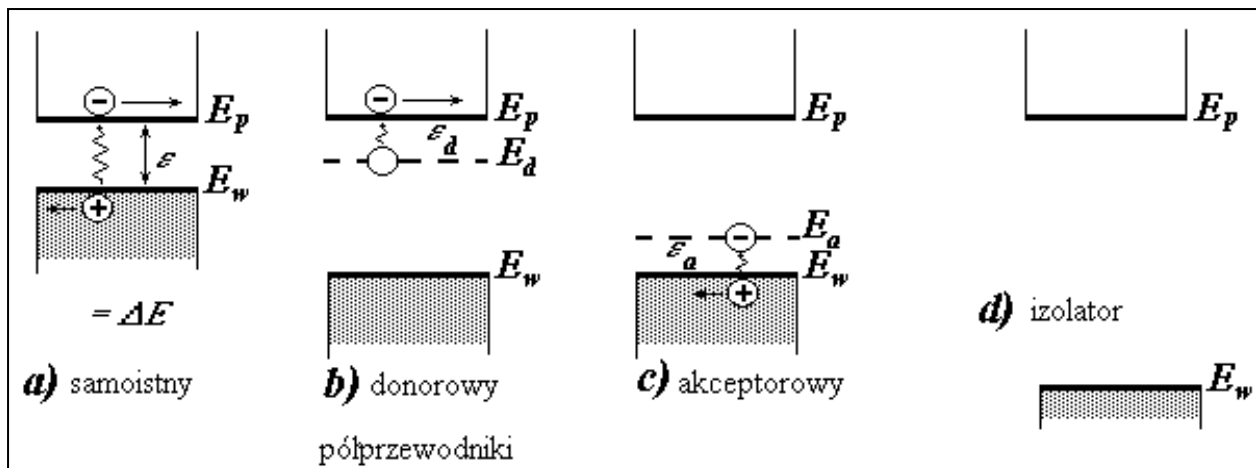
Przewodność elektryczną półprzewodnika, zależącą bezpośrednio od ilości nośników prądu, da się przedstawić wzorem

$$\sigma = C e^{-\frac{\varepsilon}{kT}} \quad (2)$$

gdzie:  $C$  - stała,  
 $\varepsilon$  - energia wzbudzenia,  
 $k_B$  - stała Boltzmanna.

Przewodność elektryczna półprzewodnika rośnie ze wzrostem temperatury, w przeciwieństwie do malejącej przewodności metalu.

Nieprzypadkowo w powyższej zależności pojawiła się energia wzbudzenia  $\varepsilon$  zamiast  $\Delta E$ . Otóż tylko w **półprzewodnikach samoistnych** (rys. 2.a) elektrony w paśmie przewodnictwa pochodzą z pasma walencyjnego i  $\varepsilon = \Delta E$ . Natomiast w pozostałych, zwanych **półprzewodnikami niesamoistnymi**, w przerwie energetycznej pojawiają się dodatkowe poziomy energetyczne, związane z domieszkami donorowymi (rys. 2.b) lub akceptorowymi (rys. 2.c). W przypadku poziomu donorowego  $\varepsilon = \varepsilon_n$ , nośnikami prądu są elektrony przetrzuczone do pasma przewodnictwa, a półprzewodnik jest **półprzewodnikiem typu n**. Poziom akceptorowy "wychytuje" elektrony z pasma walencyjnego i nośnikami są pozostające po nich w paśmie walencyjnym dziury. Półprzewodnik nazywamy **półprzewodnikiem typu p**, a  $\varepsilon = \varepsilon_p$ . W obu przypadkach wielkość  $\varepsilon$  odpowiada odległości poziomu domieszki od granicy najbliższego pasma.



Rys. 2 Mechanizm przewodnictwa w półprzewodnikach

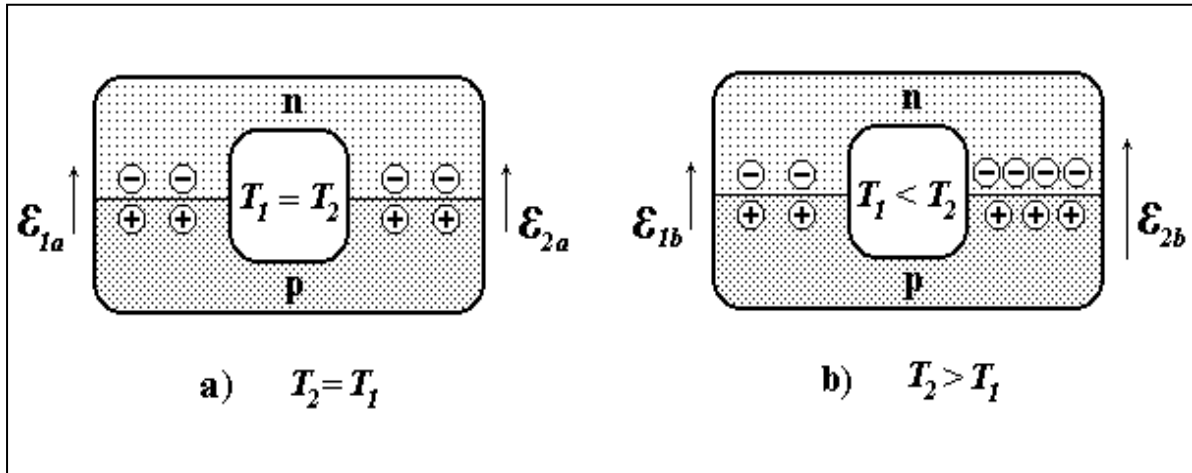
### 3 ZJAWISKA TERMOELEKTRYCZNE

Zjawiska termoelektryczne występują w przewodnikach i półprzewodnikach. Pomimo tego jednak, że geneza fizyczna jest w obu przypadkach ta sama, to w celu ich dokładniejszego przedstawienia skupimy się wyłącznie na półprzewodnikach. Po pierwsze dlatego, że uogólnienie wymagałoby zbyt dużego zagłębienia się w teorię ciała stałego, a po drugie ze względu na to, że przedmiotem doświadczenia będzie ogniwo termoelektryczne półprzewodnikowe.

Do zjawisk termoelektrycznych, zalicza się zjawiska: **Seebecka** (1829), **Peltiera** (1834) i **Thomsona** (przewidziane na drodze teoretycznej w 1856 roku). Nie jest zjawiskiem termoelektrycznym zjawisko związane z wydzielaniem się ciepła Joule'a przy przepływie prądu elektrycznego i w niniejszym opracowaniu będzie traktowane jako efekt uboczny.

Zjawisko **Seebecka** można zaobserwować w obwodzie złożonym z dwóch różnych półprzewodników. Dla przykładu rozważmy półprzewodniki: typu **n** i typu **p** (rys. 3). Na stykach półprzewodników wytwarza się kontaktowa różnica potencjałów, zależna od temperatury. Gdy złącza są

w jednakowej temperaturze, to napięcia kontaktowe w obwodzie się znoszą, ze względu na te same wartości bezwzględne i przeciwne zwroty wektorów:  $\varepsilon_{1a} = \varepsilon_{2a}$  (= 4 w umownych jednostkach z rys. 3).



Rys. 3. Ilustracja zjawiska Seebecka. a) potencjały kontaktowe złącza 1 i złącza 2 wzajemnie się kompensują. b) wzrost koncentracji nośników w obu półprzewodnikach w obszarze złącza podgrzanego powoduje zmianę potencjału kontaktowego i powstanie wypadkowego napięcia termoelektrycznego.

Gdy jednak jedno ze złączy zostanie podgrzane, to w wyniku przejścia dodatkowej ilości elektronów do pasma przewodnictwa w półprzewodniku typu **n**, oraz generacji dziur w półprzewodniku typu **p**, zmieni się potencjał kontaktowy. Ponieważ  $\varepsilon_{1b} \neq \varepsilon_{2b}$  ( $\varepsilon_{1b} = 7$ ,  $\varepsilon_{2b} = 4$ ) w obwodzie wygenerowane zostanie wypadkowe pole elektryczne, powodujące przepływ prądu elektrycznego gdy obwód będzie zamknięty, lub powstanie napięcia zwanego termoelektrycznym w miejscu jego przerwania. Napięcie to, dla niewielkiej różnicy temperatur daje się wyrazić za pomocą wzoru

$$e_{AB} = \varepsilon_{AB} (T_2 - T_1) \quad (3)$$

gdzie  $\varepsilon_{AB}$  jest współczynnikiem siły elektromotorycznej (SEM)

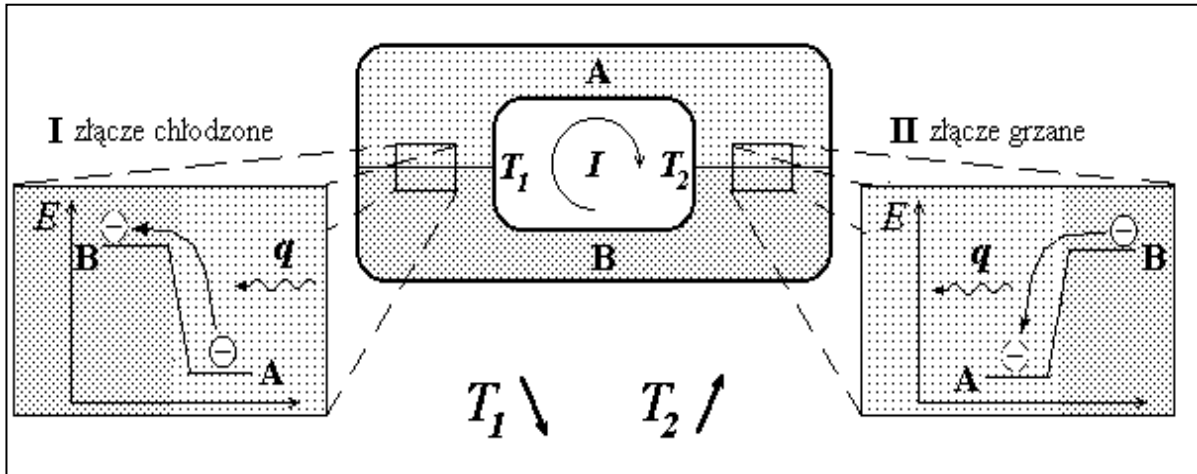
Zjawisko Seebecka jest zjawiskiem odwracalnym. Otóż przy przepływie prądu elektrycznego przez złącze dwóch różnych półprzewodników (przewodników) następuje wydzielanie lub pochłanianie w jego obszarze ciepła. Zjawisko to nosi nazwę właśnie efektu **Peltiera**, a to czy ciepło jest wydzielane, czy pochłaniane, zależy od kierunku przepływu prądu.

W celu przedstawienia istoty fizycznej zjawiska Peltiera rozważmy obwód złożony z dwóch różnych półprzewodników *A* i *B* (rys.4). Wyjaśnienie efektu niezbyt precyzyjne ale za to obrazowe jest następujące: złącza w chwili początkowej mają jednakową temperaturę. W ich obszarach występują kontaktowe różnice potencjałów. Jeżeli przez obwód zacznie płynąć prąd, to nośniki prądu w obszarze jednego złącza będą przyspieszane w polu potencjału kontaktowego, a w obszarze drugiego spowalniane. Przyspieszanie będzie się odbywać kosztem energii cieplnej pobieranej z obszaru złącza I, którego temperatura zacznie się obniżać. W złączu II nośniki oddadzą część energii i jego temperatura wzrośnie. Przy zmianie kierunku przepływu prądu złącza zamieniają się rolami. Strumień ciepła pochłaniany lub wydzielany w każdym z nich, zwany strumieniem ciepła Peltiera, jest proporcjonalny do natężenia prądu elektrycznego

$$\dot{Q}_P(T) = \Pi_{AB}(T) I = (\Pi_B - \Pi_A) I \quad (4)$$

gdzie *I* - natężenie prądu elektrycznego,

$\Pi_{AB}$  - współczynnik Peltiera, dla którego słuszna jest zależność (5)



Rys. 4 Zjawisko Peltiera. W obszarze złącza I pobierane ciepło  $q$  jest zużywane na wzrost energii nośnika (jego przyspieszenie w polu potencjału kontaktowego); w obszarze złącza II przejściu nośnika z wyższego na niższy poziom energetyczny towarzyszy wydzielanie ciepła.

$$\Pi_{AB}(T) = -\Pi_{BA}(T) \quad (5)$$

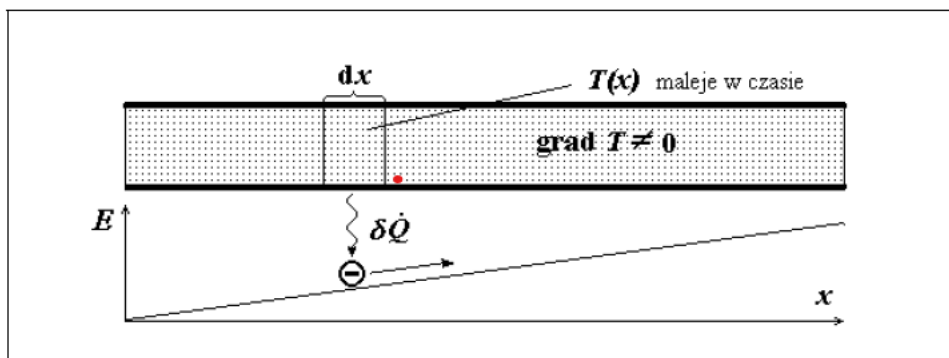
Współczynnik Peltiera  $\Pi_{AB}$  zależy od temperatury.

Pomiędzy współczynnikami Seebecka i Peltiera istnieją następujące współzależności [1]:

$$\varepsilon_{AB} = \frac{\Pi_{AB}}{T} ; \varepsilon_A = \frac{\Pi_A}{T} ; \varepsilon_B = \frac{\Pi_B}{T} \quad (6)$$

gdzie:  $\varepsilon_A, \varepsilon_B$  są współczynnikami Seebecka dla przewodników odpowiednio A i B,  
 $\Pi_A, \Pi_B$  współczynnikami Peltiera dla tychże przewodników (por. [1]).

Zjawisko **Thomsona**, w przeciwieństwie do dwóch poprzednio omówionych, nie jest związane z potencjałem kontaktowym. Zaobserwować je można w jednym półprzewodniku (przewodniku), wzdłuż którego występuje gradient temperatury (rys.5). Gradient ten, poprzez spowodowanie różnic koncentracji nośników zgodnie z zależnością (1), wpływa na utworzenie się wewnętrznego pola elektrycznego. Przy przepływie prądu wzdłuż takiego półprzewodnika, w zależności od kierunku przepływu prądu, w jego objętości będzie pochłaniane lub wydzielane ciepło – zaznaczmy jeszcze raz, że



Rys. 5. Ilustracja zjawiska Thompsona. W danym przypadku przyspieszenie nośnika w polu potencjału wytworzonym poprzez uwarunkowany termicznie gradient koncentracji odbywa się kosztem pobieranego objętościowo ciepła. Po zmianie kierunku przepływu prądu ciepło będzie wydzielane

jest to ciepło różne od ciepła Joule'a. Pochłanianie ciepła to wynik dostarczania nośnikom energii na pokonanie wewnętrznego pola elektrycznego, przeciwnie niż przy jego wydzielaniu. Strumień ciepła przypisany fragmentowi półprzewodnika o długości  $dx$  da się wyrazić zależnością

$$\partial \dot{Q} = \gamma(T) I \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \quad (7)$$

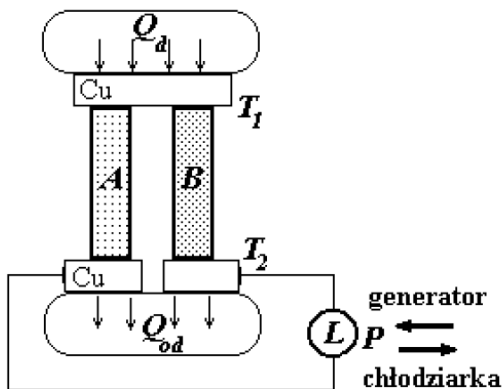
gdzie:  $\gamma$  jest współczynnikiem Thomsona.

#### 4. ZASADA DZIAŁANIA GENERATORA I CHŁODZIARKI TERMoeLEKTRYCZNEJ

Zjawiska termoelektryczne w półprzewodnikach mogą być wykorzystywane do:

- generacji prądu elektrycznego przy dostarczaniu ciepła (zjawisko Seebecka). Urządzenie pracuje wówczas w obiegu "silnikowym" (zamiana ciepła na pracę) i nazywane jest **generatorem termoelektrycznym**;
- chłodzenia przestrzeni wokół złącza przy dostarczaniu pracy prądu elektrycznego (zjawisko Peltiera). Urządzenie pracuje wówczas w obiegu chłodniczym i nazywane jest **chłodziarką termoelektryczną**.

Do wyprowadzenia podstawowych zależności na strumieniu ciepła wykorzystany zostanie przykład generatora termoelektrycznego, którego schemat przedstawia rysunek 6. Generator utworzony jest z dwóch różnych półprzewodników, mających kształt pryzmatów prostokątnych o polach przekroju  $F_A$  i  $F_B$ . W obszarze złącza "gorącego" - źródła - o temperaturze  $T_1$  przewodniki połączone są przewodnikiem o pomijalnej rezystancji, np. przekładką miedzianą. W obszarze złącza "zimnego" - upustu - o temperaturze  $T_2$  - obwód zamknięty jest poprzez obciążenie zewnętrzne  $L$ . Powierzchnie boczne półprzewodników są izolowane cieplnie. Do złącza "gorącego" dopływa strumień ciepła  $\dot{Q}_d$  tak, że temperatura  $T_1$  nie ulega zmianie w czasie. Równocześnie od złącza dolnego odprowadzane jest ciepło  $\dot{Q}_{od}$ , także przy zachowaniu stałej w czasie jego temperatury  $T_2$ , oraz energia elektryczna o mocy  $P$ .



Rys. 6. Schemat ogniwa termoelektrycznego

W układzie, oprócz termoelektrycznych zjawisk "odwracalnych", omówionych wyżej, występują dwa zjawiska nieodwracalne:

- przewodzenie strumienia ciepła  $Q_\lambda$  od źródła do upustu, opisywane zależnością Fouriera

$$\dot{Q}_\lambda = \lambda_z (T_1 - T_2) \quad (8)$$

gdzie  $\lambda_z$  jest zastępczą przewodnością cieplną obu pryzmatów półprzewodnikowych;

- wydzielanie się strumienia ciepła Joule'a (Joule'a-Lenza)

$$\dot{Q}_J = I^2 (R_A + R_B) \quad (9)$$

gdzie  $R_A$  i  $R_B$  są opornościami przewodnika odpowiednio A i B.

W celu obliczenia mocy  $P$  silnika cieplnego jakim jest generator [5]

$$P = \dot{Q}_d - |\dot{Q}_{od}| \quad (10)$$

oraz jego sprawności

$$\eta = \frac{P}{\dot{Q}_d} = 1 - \frac{|\dot{Q}_{od}|}{\dot{Q}_d} \quad (11)$$

należy sporządzić bilanse strumieni ciepła dostarczanego do układu przy temperaturze  $T_1$ , oraz strumieni ciepła odprowadzanego przy temperaturze  $T_2$ , przy czym

$$T_1 > T_2 - \text{generator} \quad (12)$$

Przed przystąpieniem do bilansowania można przyjąć, że względu na małe wartości współczynników Thomsona, że strumień ciepła Thomsona po połowie dzieli się między złącze górne i dolne. Oznacza to, że w zależności od znaku jeżeli  $\dot{Q}_T/2$  dopływa do złącza górnego, to taki sam strumień ciepła musi odpłynąć od złącza dolnego. Innymi słowy objętościowemu efektowi Thomsona powodującemu powstanie strumienia ciepła

$$\dot{Q}_T = I \int_{T_1}^{T_2} (\gamma_B - \gamma_A) dT \quad (13)$$

zostaje nadany charakter powierzchniowy (por. [1]).

Ostatecznie zatem do umownego zbiornika "górnego" dopływa strumień ciepła zewnętrznego  $\dot{Q}_d$  oraz połowa wytwarzanego w przewodnikach ciepła Joule'a  $\dot{Q}_J$ . Ciepło to musi być odprowadzane, gdyż tego wymaga przyjęte założenie o stałości temperatury  $T_1$  zbiornika (przy, oczywiście, skończonej jego pojemności cieplnej). Straty strumieni ciepła ze zbiornika to odprowadzane strumienie: ciepła Peltiera  $\dot{Q}_{P1}$ , ciepła przewodzonego  $\dot{Q}_\lambda$  i połowa ciepła Thomsona  $\frac{\dot{Q}_T}{2}$ . Zatem bilans zapisać można w postaci

$$\dot{Q}_d + \frac{\dot{Q}_J}{2} = \dot{Q}_{P1} + \dot{Q}_\lambda + \frac{\dot{Q}_T}{2} \quad (14)$$

lub jako wyrażenie strumienia ciepła zewnętrznego

$$\begin{aligned} \dot{Q}_d &= \dot{Q}_{P1} + \dot{Q}_\lambda - \frac{\dot{Q}_J}{2} + \frac{\dot{Q}_T}{2} = \\ &= \Pi_{AB}(T_1) I + \lambda_z (T_1 - T_2) - \frac{I^2 R}{2} + \frac{I}{2} \int_{T_2}^{T_1} (\gamma_B - \gamma_A) dT \end{aligned} \quad (15)$$

Podobna analiza prowadzi do uzyskania następującego wyrażenia na strumień ciepła odprowadzanego od układu

$$\begin{aligned} |\dot{Q}_{od}| &= -\dot{Q}_{P2} + \dot{Q}_\lambda + \frac{\dot{Q}_J}{2} - \frac{\dot{Q}_T}{2} = \\ &= \Pi_{AB}(T_2) I + \lambda_z (T_1 - T_2) + \frac{I^2 R}{2} - \frac{I}{2} \int_{T_2}^{T_1} (\gamma_B - \gamma_A) dT \end{aligned} \quad (16)$$

Zatem moc generatora termoelektrycznego można przedstawić zależnością

$$\begin{aligned} P &= \dot{Q}_d - |\dot{Q}_{od}| = \\ &= I \left[ \Pi_{AB}(T_1) - \Pi_{AB}(T_2) + \int_{T_2}^{T_1} (\gamma_B - \gamma_A) dT - IR \right] \end{aligned} \quad (17)$$

Natomiast sprawność

$$\begin{aligned} \eta &= 1 - \frac{|\dot{Q}_{od}|}{\dot{Q}_d} = \frac{P}{\dot{Q}_d} = \\ &= \frac{I \left[ \Pi_{AB}(T_1) - \Pi_{AB}(T_2) + \int_{T_2}^{T_1} (\gamma_B - \gamma_A) dT - IR \right]}{\Pi_{AB}(T_1) I + \lambda_z (T_1 - T_2) - \frac{I^2 R}{2} + \frac{I}{2} \int_{T_2}^{T_1} (\gamma_B - \gamma_A) dT} \end{aligned} \quad (18)$$

Generatory termoelektryczne półprzewodnikowe w praktyce osiągają sprawności rzędu kilkunastu procent. Stosowane są jedynie w przypadkach, gdy korzyści z ich wykorzystania przeważają nad względami związanymi ze stosunkowo niską sprawnością, lub gdy nie ma innego opłacalnego sposobu zamiany ciepła w pracę. Najczęściej używa się ich do konwersji energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną, zarówno w warunkach ziemskich jak i w przestrzeni kosmicznej. W celu uzyskania stosunkowo dużych mocy pojedyncze termoogniwa łączone są w baterie termoelektryczne.

Rozważany powyżej układ termoelektryczny po zamianie znaku pracy zewnętrznej z generatora staje się chłodziarką termoelektryczną. Zmiana znaku pracy zewnętrznej wiąże się ze zmianą znaku mocy  $P$  i oznacza, że praca prądu elektrycznego zamiast być odbieraną, jest do układu dostarczana. W takim przypadku

$$T_1 < T_2 - \text{chłodziarka} \quad (19)$$

Z formalnego punktu widzenia operacja taka nie powoduje żadnych zmian w sporządzonych bilansach ciepła. **Wyrażenia na strumieniu ciepła zewnętrznego  $\dot{Q}_d$  dostarczanego do układu, tym razem przy temperaturze niższej  $T_1$ , i  $\dot{Q}_{od}$  odbieranego od układu przy temperaturze wyższej  $T_2$  wyglądają identycznie jak dla generatora, tzn. są opisane zależnościami (15) i (16). To samo dotyczy również i mocy urządzenia - moc termochłodziarki daje się przedstawić za pomocą wzoru (17).** Pomimo formalnego podobieństwa wyrażenia (14) ÷ (17) opisują przypadek fizyczny istotnie różny od poprzedniego. Przede wszystkim ze względu na warunek (19) strumienie ciepła przewodzonego  $\dot{Q}_\lambda$  i ciepła Thomsona  $\dot{Q}_T$  (por. 8 i 13) zmieniają swoje znaki. Ponadto strumień ciepła zewnętrznego dostarczanego do układu  $\dot{Q}_d$  jest co do wartości bezwzględnej mniejszy od strumienia ciepła odprowadzanego od układu  $\dot{Q}_{od}$ . Ulega zmianie również znak mocy  $P$ .

**Wydajność obiegu chłodniczego** jest zdefiniowana jako [5]

$$\varepsilon_{ch} = \frac{\dot{Q}_d}{|P|} = \frac{\dot{Q}_d}{|\dot{Q}_{od}| - \dot{Q}_d} \quad (20)$$

co prowadzi do zależności

$$\varepsilon_{ch} = \frac{\Pi_{AB}(T_1) I + \lambda_z (T_1 - T_2) - \frac{I^2 R}{2} + \frac{I}{2} \int_{T_2}^{T_1} (\gamma_B - \gamma_A) dT}{I \left[ \Pi_{AB}(T_1) - \Pi_{AB}(T_2) + \int_{T_2}^{T_1} (\gamma_B - \gamma_A) dT - IR \right]} \quad (21)$$

Chłodziarki termoelektryczne, podobnie jak generatory, nie charakteryzują się zbyt dużą wydajnością energetyczną. Do ich wad można także zaliczyć nieproporcjonalny wzrost mocy i gabarytów przy uzyskiwaniu większych różnic temperatury chłodzenia. W związku z powyższym ich zastosowania zostały ograniczone do dziedzin specjalnych, gdzie korzyści wynikające ze stosunkowo małych gabarytów, niezawodności, operatywności, prostoty konstrukcji (bez elementów mechanicznych) i wyjątkowej wygody użytkowania, przeważają nad wymienionymi wcześniej niedogodnościami. Z reguły są to konstrukcje o stosunkowo niewielkiej mocy, takie jak na przykład chłodziarki niskotemperaturowych detektorów podczerwieni w kamerach termowizyjnych bądź głowicach rakiet samonaprowadzających, chłodziarki próbek w urządzeniach pomiarowych itp. Znane są też i większe półprzewodnikowe chłodziarki zasilane z akumulatorów, wykorzystywane przy transporcie medycznych preparatów biologicznych - głównie krwi.

Półprzewodnikowe elementy chłodzące często układane są w tzw. 'termostosy', w których, obrazowo mówiąc, okładka od której trzeba odprowadzać ciepło jednego termoelementu, chłodzona jest drugim, z reguły o większych wymiarach. W konstrukcjach takich możliwe jest uzyskanie różnic temperatury około 180 K [2].

## 5. WARUNKI OPTYMALNE PRACY TERMOOGNIWA W OBIEGU CHŁODNICZYM

Wyprowadzone w poprzednim punkcie zależności dotyczą przypadku ogólnego i uwzględniają wszystkie trzy zjawiska termoelektryczne. W rzeczywistości, ze względu na stosunkowo niewielkie



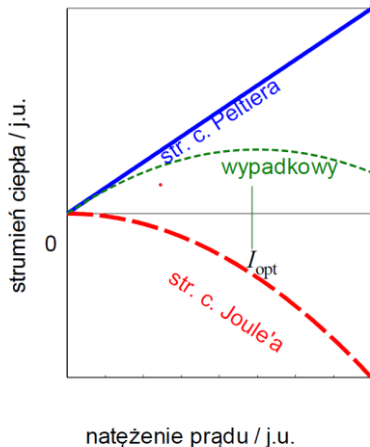
różnice temperatury, można przyjąć założenie o stałości takich właściwości materiałów jak oporności właściwe  $\rho_A, \rho_B$ , przewodności cieplne  $\lambda_A, \lambda_B$  i współczynniki Thomsona  $\gamma_A, \gamma_B$ . Jednak najbardziej istotną konsekwencją przyjęcia założenia o niewielkich różnicach temperatury, dodatkowo w zestawieniu ze stosunkowo niewielkimi wartościami współczynnika  $\gamma(T)$ , jest możliwość pominięcia w rozważaniach ciepła Thompsona

$$|(T_1 - T_2)| \ll T_2 \rightarrow \int_{T_2}^{T_1} (\gamma_B - \gamma_A) dT \approx 0 \quad (22)$$

Prowadzi to do znacznego uproszczenia wyrażeń na strumienie ciepła z pkt. 14. W szczególności dla strumienia odprowadzanego od przestrzeni chłodzonej, czyli doprowadzanego do układu chłodziarki otrzymuje się

$$\begin{aligned} \dot{Q}_d &= \dot{Q}_{P1} + \dot{Q}_\lambda - \frac{\dot{Q}_J}{2} = \\ &= \Pi_{AB}(T_2) I + \lambda_z (T_1 - T_2) - \frac{I^2 R}{2} \end{aligned} \quad (23)$$

W powyższym wyrażeniu występują dwa człony zależące od natężenia prądu  $I$  zasilającego termoogniwo: jeden opisujący strumień ciepła Peltiera  $\dot{Q}_{P1}$  i drugi odpowiadający strumieniowi ciepła Joule'a  $\frac{\dot{Q}_J}{2}$ . Wydzielanie się ciepła przy przepływie prądu jest efektem niekorzystnym - ciepło to powoduje relatywny przyrost temperatury zarówno złącza grzanego jak i chłodzonego. Ze wzrostem prądu  $I$  strumień ciepła Peltiera narasta liniowo, natomiast strumień ciepła Joule'a-Lenza parabolicznie, co ilustruje rysunek 7. Przy przekroczeniu krytycznej wartości natężenia prądu  $I_{kr}$  efekty chłodzenia są całkowicie niwelowane, a temperatura złącza  $T_1$  rośnie zamiast maleć. Istnieją jednak warunki optymalne pracy termochłodziarki, odpowiadające ekstremum krzywej .



Rys. 7. Warunki optymalne pracy ogniwa

Łatwo sprawdzić, że zróżniczkowanie (23) względem prądu  $I$  i przyrównanie wyniku do zera

$$\frac{d\dot{Q}_d}{dI} = \frac{d\left(\dot{Q}_{P1} - \frac{\dot{Q}_J}{2}\right)}{dI} = \Pi_{AB}(T_1) - RI \quad (24)$$

prowadzi do następującego wyrażenia na optymalne natężenie prądu zasilającego urządzenie

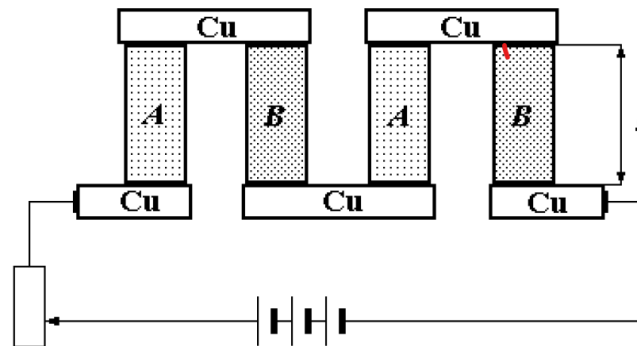
$$I_{opt} = \frac{\Pi_{AB}}{R} \quad (25)$$

Przy tym natężeniu prądu efekty chłodzenia będą największe. Podkreślić jednak należy, iż osiągnięcie maksymalnej różnicy temperatury pomiędzy złączem "zimnym" i "gorącym" nie wiąże się z uzyskaniem maksymalnej wydajności termochłodziarki.

## 6. OPIS STANOWISKA LABORATORYJNEGO

W ćwiczeniu laboratoryjnym wykorzystano element półprzewodnikowy typowy dla chłodziarek termoelektrycznych. Termoogniwo, pokazane na rysunku 8, jest wykonane z półprzewodników w postaci stopów związków:

- element A - 30%  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  + 70%  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  z domieszką Pb;
- element B - 80%  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  + 20%  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$  z domieszką  $\text{Hg}_2\text{Cl}_2$ .



Rys. 8. Sposób wykonania pojedynczej gałęzi termoogniwa. Pryzmaty półprzewodników A i B połączone są blaszkami miedzianymi. Złącza jednoimienne przylegają do jednej i tej samej okładki: AB do górnej, BA do dolnej

Widok typowego wykonania termoogniwa Peltiera pokazano na rysunku 9. Widoczne są pojedyncze blaszki miedziane łączące pryzmaty półprzewodnika (rys. 9a). Na rysunku 9b widać pojedyncze pryzmaty półprzewodnika.



a)



b)

Rys. 9 Widok typowego wykonania termoogniwa Peltiera

Stanowisko laboratoryjne do badania efektu Peltiera, wykorzystywane w ćwiczeniu, pokazano na rysunku 10. Pulpit sterowniczy stanowiska i widok odsłoniętego stosu pomiarowego pokazano na rysunku 11.

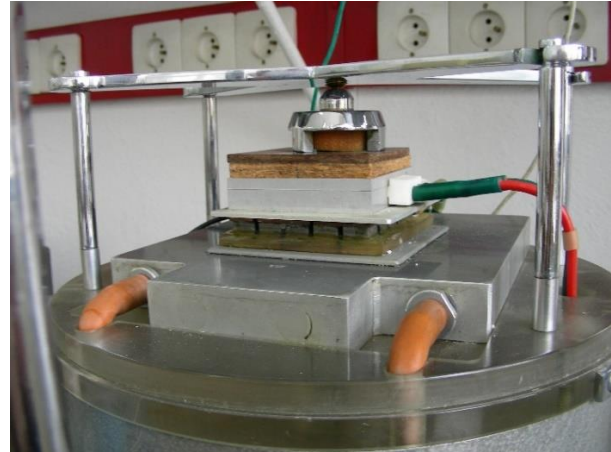
Schemat blokowy stanowiska laboratoryjnego pokazano na rysunku 12.



Rys. 10 Widok ogólny stanowiska laboratoryjnego

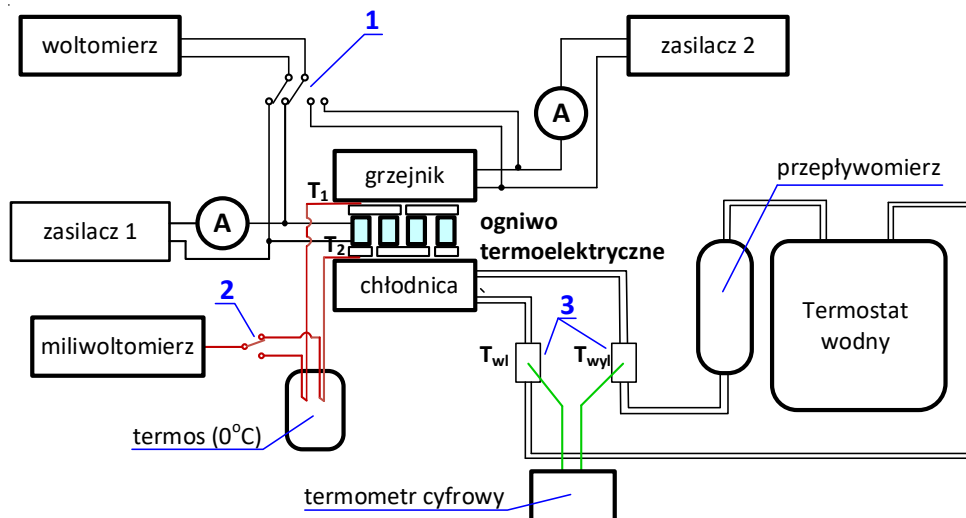


a)



b)

Rys. 11 Elementy stanowiska laboratoryjnego: a) pulpit sterujący, b) odstąpiony stos pomiarowy



Rys. 12 Schemat układu laboratoryjnego do badań chłodzarki termoelektrycznej

Termoogniwo jest zasilane prądem stałym z zasilacza (zasilacz 1) prądu stałego z zakresem wartości prądu 0 do 30A. Włączony w obwód szeregowo amperomierz i równolegle woltomierz cyfrowy pozwalają na jednoczesny pomiar natężenia  $I_t$  i napięcia  $U_t$  prądu zasilającego element półprzewodnikowy. Uzyskane w wyniku pomiaru wartości pozwalają na wyznaczenie mocy termoogniwa:  $P_t = U_t \cdot I_t$ .

Do "zimnych", górnych w układzie z *rysunku 12*, styków termoogniwa przylega grzejnik elektryczny (grzałka). Zasilany jest on prądem stałym z zasilacza stabilizowanego. Natężenie  $I_g$  i napięcie  $U_g$  prądu grzałki mierzone są odpowiednio oddzielnym amperomierzem oraz tym samym co w przypadku termoogniwa woltomierzem cyfrowym. Przetęczeń przy pomiarach napięcia dokonuje się za pomocą przetwornika **1** umieszczonego na pulpicie sterowniczym (*rysunek 11 i 12*).

"Gorące", dolne styki termoogniwa chłodzone są poprzez chłodnicę wodną. Na wlocie i wylocie cieczy chłodzącej podawanej z termostatu umieszczone są termopary (oznaczone **3** na rys. 11 i 12) połączone z termometrem cyfrowym, umożliwiające pomiar temperatur odpowiednio  $T_{wl}$  i  $T_{wyl}$ . Do pomiaru natężenia przepływu wody chłodzącej służy przepływomierz, wstawiony pomiędzy termostat wodny i chłodnicę. Boczne powierzchnie termoogniwa są izolowane osłonami styropianowymi.

Do pomiaru temperatury  $T_1$  górnej okładki ("gorących" styków) oraz temperatury  $T_2$  dolnej okładki ("zimnych" styków) termoogniwa wykorzystano termoelementy Cu-Konstantan. Spoiny odniesienia są umieszczone w termosie z wodą destylowaną i lodem. Napięcia termoelektryczne mierzone są za pomocą jednego miliwoltomierza - przetwornik znajduje się na pulpicie sterowniczym (*rys. 11 i 12* - przetwornik **2**). Uwaga: Wartości temperatury  $T_1$  i  $T_2$  obliczyć na podstawie charakterystyki termopary Cu-Konstantan (dla przypadku termostatowania spoin odniesienia w temperaturze  $0^\circ\text{C}$ ) przedstawionej w tabeli 1.

Tabela 1

Temperatura [ $^\circ\text{C}$ ]	0	10	20	30	40	50
Napięcie termoelektryczne [mV]	0,00	0,40	0,80	1,21	1,63	2,05

## 7. PRZEBIEG ĆWICZENIA

**Cel:** określenie parametrów termoogniwa półprzewodnikowego pracującego w obiegu chłodniczym w stanie ustalonym.

### Przebieg pomiarów:

1. Zmierzyć temperaturę wody na dopływie do chłodnicy. Przy pomocy pokrętki przepływomierza dobrać odpowiednie, w granicach od 4 do 8 l/h, natężenie przepływu.
2. Włączyć zasilanie grzejnika zadając na zasilaczu 2 wartość napięcia prądu podaną przez prowadzącego.
3. Włączyć zasilanie termoogniwa. Zmieniać natężenie prądu do chwili gdy temperatura  $T_1$  zimnego styku nie spadnie do założonej wartości. Jeżeli mierzone temperatury nie zmieniają się w czasie przez ponad 5 minut, to można przyjąć, że termoogniwo znajduje się w stanie ustalonym.
4. Dokonać odczytów wskazań przyrządów pomiarowych wpisując wyniki do tabeli (wzór - *tablica 2*).

Tabela 2

Lp	$T_{wl}$	$T_{wyl}$	m	$U_g$	$I_g$	$U_t$	$I_t$	$T_1$		$T_2$	
	K	K	g/s	V	A	V	A	mV	K	mV	K

5. Zwiększyć moc grzejnika zmieniając napięcie prądu zasilającego.
6. Zwiększyć tak natężenie prądu płynącego przez termoogniwo, aby temperatura zimnego styku przyjęła poprzednią (z pkt. 3 procedury) wartość, przy tej samej co poprzednio temperaturze styku gorącego.
7. Po ustaleniu się warunków wymiany ciepła dokonać odczytów wskazań przyrządów pomiarowych zapisać w tabeli.
8. Powtórzyć czynności jak w punktach 5 ÷ 7 dwu - trzykrotnie.

### Opracowanie wyników:

Uwaga: wszelkie obliczenia są przeprowadzane przy założeniu zerowania się strumienia ciepła Thomsona, tak jak w pkt. 5.

1. **Obliczyć** strumień ciepła Peltiera złącza "zimnego" dla każdego przypadku pomiarowego wykorzystując zależność (15), która po uwzględnieniu założenia (22) daje:

$$\dot{Q}_{P1} = \dot{Q}_d - \dot{Q}_\lambda + \frac{\dot{Q}_J}{2} \quad (26)$$

Przy wyznaczaniu strumienia ciepła Joule'a (por. 9) ze wzoru

$$\dot{Q}_J = I_t^2 (R_A + R_B) = I_t^2 R_t \quad (27)$$

przyjąć takie same wartości oporności elektrycznej dla obu gałęzi termoogniwa  $R_A = R_B$ . W rezultacie doprowadzi to do uzyskania następującej zależności na sumaryczną rezystancję układu termoelektrycznego

$$R_t = 2k \frac{\rho l}{F} \quad (28)$$

gdzie:  $\rho = 1.21 \cdot 10^{-5} \Omega m$  - oporność właściwa półprzewodnikowego materiału termoogniwa;  
 $l = 7 \text{ mm}$  - długość gałęzi termoogniwa (wysokość prostopadłościennego pryzmatu półprzewodnika);  
 $F = 0.0001 \text{ m}^2$  - pole przekroju poprzecznego gałęzi termoogniwa;  
 $k = 12$  - liczba gałęzi termoogniwa.

Strumień przewodzonego ciepła określić na podstawie zależności

$$\dot{Q}_d = P_g = U_g I_g \quad (30)$$

2. **Na podstawie** wyników pomiarów obliczyć dla każdego przypadku strumień ciepła zewnętrznego odprowadzanego od układu. Do obliczeń wykorzystać zależność

$$|\dot{Q}_{od}| = \dot{m} c_w (t_{wyl} - t_{wl}) \quad (31)$$

w której  $\dot{m}$  to masowe natężenie przepływu wody chłodzącej,  
 $c_w$  - ciepło właściwe wody,  
 $T_{wyl}$  i  $T_{wl}$  - temperatury wody odpowiednio na wylocie i wlocie do chłodnicy.

3. **Obliczyć** dla każdego przypadku moc termoogniwa

$$P_t = U_t I_t \quad (32)$$

Następnie określić wartości eksperymentalne wydajności termochłodziarki  $\varepsilon_{chl,eksper}$  na podstawie wzoru (20) i obliczonych wartości strumieni ciepła zewnętrznego  $\dot{Q}_d$  i  $|\dot{Q}_{od}|$  z punktów 1 i 2, oraz mocy  $P_t$ .

- 4. Współczynniki Peltiera** w zakresie temperatury pokojowej są słabo zmiennymi funkcjami temperatury. Przy niewielkich różnicach temperatury pomiędzy złączami "zimnym" i "gorącym", w stanie ustalonym, można przyjąć, że

$$\dot{Q}_{P2} = -\dot{Q}_{P1} \quad (33)$$

Uwzględniając powyższe założenie wraz z założeniem (22), obliczyć z zależności (16) przybliżoną teoretyczną wartość strumienia ciepła zewnętrznego  $|\dot{Q}_{od}|_{teor}$  odprowadzanego od układu. Następnie, wykorzystując otrzymane wartości oraz wartości  $\dot{Q}_d$  i  $P_t$  z punktów 1 oraz 3, wyznaczyć na podstawie wzoru (20) przybliżona teoretyczno-eksperymentalne wartości wydajności termochłodziarki  $\varepsilon_{ch,teor}$ . Porównać otrzymane wyniki z wynikami obliczeń z pkt. 3.

- 5. Sporządzić** wykres zależności  $\dot{Q}_{P1} = f(I)$  przy  $T_1 = \text{const}$ . Na podstawie linearyzacji otrzymanej charakterystyki określić wartość współczynnika Peltiera  $\Pi_{AB}(T_1)$  (wzór 4).
- 6. Wyznaczyć** optymalny prąd zasilania termochłodziarki (wzór 25) i obliczyć moc w warunkach optymalnych z zależności

$$P_{opt} = I_{t,opt}^2 R \quad (34)$$

- 7. Ocenic** otrzymane wyniki obliczeń.

## 8. PRZYKŁADOWE PYTANIA KONTROLNE

1. Omówić mechanizm przewodnictwa prądu elektrycznego w półprzewodnikach.
2. Wyjaśnić istotę zjawiska Seebecka.
3. Wyjaśnić istotę zjawiska Peltiera.
4. Omówić obieg silnikowy na podstawie wykresu we współrzędnych  $T$ -s.
5. Omówić obieg chłodniczy na podstawie wykresu we współrzędnych  $T$ -s.
6. Podać przykłady zastosowań termoogniw półprzewodnikowych.
7. Omówić działanie chłodziarki termoelektrycznej.
8. Co to są warunki optymalne pracy termochłodziarki i z czym się wiążą?
9. Podać sposób doświadczalnego wyznaczenia współczynnika Peltiera  $\Pi_{AB}$ .

## LITERATURA

- [1] Warren H. Giedt *Thermophysics*. Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1971.
- [2] Mirosław Grudzień *Eksperymentalno-numeryczna granicznych parametrów detektorów podczerwieni z CgHgTe z uwzględnieniem absorpcji promieniowania i chłodzenia termoelektrycznego*. Rozprawa doktorska WAT, Warszawa, 1979.
- [3] Ludwik Michalski, Krystyna Eckersdorf *Pomiary temperatury*. WNT, Warszawa, 1986.
- [4] Peter Wilkes *Fizyka ciała stałego dla metaloznawców*. PWN, Warszawa, 1979.
- [5] Stefan Wiśniewski *Termodynamika techniczna*. WNT, Warszawa, 1987.