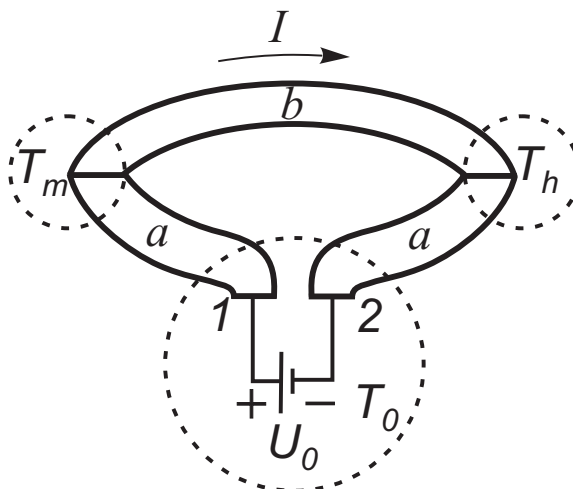


1. fejezet

Termoelektromos hűtőelemek vizsgálata (Böhönyey András, Groma István)

1.1. Bevezetés

A termoelektromos jelenségek vizsgálata betekintést enged a termikus és az elektromos jelenségkör kapcsolatába. A termoelektromos jelenségeknek az elvi jelentőségen túl, gyakorlati haszna is van, hiszen e jelenségek közül többet a gyakorlati életben is széles körben használnak. Ilyen alkalmazások például: a hőmérséklet mérésére használatos termoelemek, vagy a hűtőgépekben alkalmazott Peltier-hűtőelemek.



1.1. ábra. A termoelektromos jelenségek vizsgálatára használt kör

A fellépő jelenségeket az 1.1. ábrán látható modell-körben fogjuk vizsgálni. Az áramkör két különböző, homogén anyagú vezetőből áll, melyek csatlakozási pontjai eltérő hőmérsékletűek. A körre egy U_0 feszültségű telepet kapcsoltunk, az áramkörben I nagyságú áram folyik. Az a és b vezetők teljes ellenállását jelöljük R_{ab} -vel. A szaggatott körök izoterm tartományokat jelölnek.

Egy ilyen körben reverzibilis és irreverzibilis jelenségek egyaránt fellépnek. Az irreverzibilis jelenségek a Joule-hő és a hővezetés. A reverzibilis jelenségek a Seebeck-, a Peltier- és a Thomson-effektus. Mielőtt

ismertetnénk a mérés elvét, a mérés során fellépő jelenségek rövid jellemzését adjuk meg.

1. Joule-hő

Ha egy vezetőkön áram folyik át, akkor a vezetőkben Q hő fejlődik. Egységnyi idő alatt a vezetőkben fejlődött hőmennyiség arányos az I elektromos áram négyzetével, az arányossági tényező a vezető R ellenállása:

$$\frac{dQ}{dt} = RI^2.$$

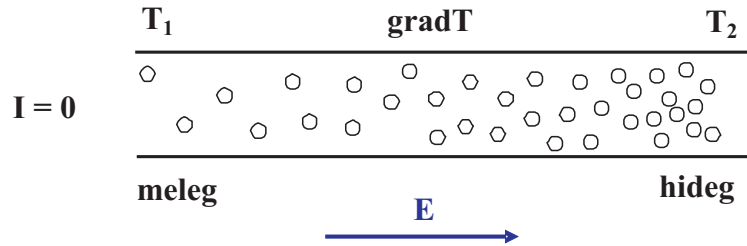
2. Hővezetés

Ha egy test különböző részeinek hőmérséklete egymástól eltérő, a testben hőáram indul meg a melegebb részről a hidegebb felé. A vezető A keresztmetszetén időegység alatt átáramló hőmennyiség arányos a hőmérséklet gradienssel, az arányossági tényező a λ hővezetési együttható:

$$\frac{1}{A} \frac{dQ}{dt} = -\lambda \frac{dT}{dx}.$$

3. Seebeck-effektus

Az Seebeck-effektus azon alapul, hogy egy vezetőkben hőmérséklet-gradiens hatására az elektron-sűrűség inhomogénné válna miatt elektromos tér keletkezik, ahogy ezt az 1.2. ábrán szematikusan ábrázoltuk. A télerősség $\text{grad}T$ -vel arányos; az arányossági tényező az anyagra jellemző S abszolút Seebeck együttható.



1.2. ábra. A Seebeck-együttható fizikai jelentése

Számunkra fontos eset amikor két különböző anyagi minőségű vezetőt kapcsolunk össze, úgy, hogy a kapcsolódási pontok különböző hőmérsékleten legyenek: az 1.1. ábrán látható kör esetében az $a-b$ kapcsolódási pont T_m -en és T_h -n van. A körben a P_1 és P_2 pontok között feszültség mérhető ha a két csatlakozási pont hőmérséklete nem egyezik meg, amely az elektromos tér vonalintegráljaként adódik. Az ábra szerint:

$$\begin{aligned} U &= \int_{P_1}^{P_2} \underline{E} d\mathbf{r} = \int_{P_1}^{P_m} S_a \text{grad}T d\mathbf{r} + \int_{P_m}^{P_h} S_b \text{grad}T d\mathbf{r} + \int_{P_h}^{P_2} S_a \text{grad}T d\mathbf{r} = \\ &= S_a(T_m - T_0) + S_b(T_h - T_m) + S_a(T_0 - T_h) = (S_a - S_b)(T_m - T_h) \equiv S_{ab}(T_m - T_h). \end{aligned}$$

Így végül

$$U = S_{ab}(T_m - T_h),$$

ahol bevezettük az S_{ab} a *relatív Seebeck együttható* fogalmát: $S_{ab} = S_a - S_b$. A relatív Seebeck együttható meghatározására az:

$$S_{ab}(T) = \left(\frac{\partial U_{ab}}{\partial T_m} \right)_{T_h = \text{const.}}$$

kifejezés ad mérési utasítást. Fontos megjegyezni, hogy S hőmérsékletfüggő, ez különösen alacsony hőmérsékletek felé haladva szembeötlő, szobahőmérséklet környékén a hőmérsékletfüggés általában igen gyenge.

4. Peltier-effektus

Ha két különböző vezetőből álló körben, mint amilyen az 1.1. ábrán látható áramkör, I áram folyik, akkor, az áram irányától függően, a vezetők egyik csatlakozási pontja lehűl, a másik pedig felmelegszik. A csatlakozási pontokon, időegység alatt termelődött, vagy elnyelődött hő arányos az érintkező felületen átfolyó I áramerősséggel:

$$\frac{dQ}{dt} = P_{ab}I.$$

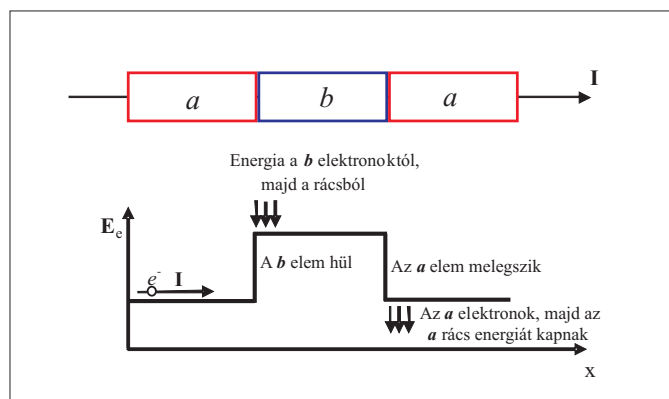
A P_{ab} arányossági tényező a Peltier-együttható.

A Peltier-együttható is definiálható egy anyag esetén, és a vezetőpárra vonatkozó P_{ab} együtthatóra igaz, hogy

$$P_{ab} = P_a - P_b.$$

A Peltier-együttható mértékegysége V .

A Peltier-effektus fizikai tartalmát az 1.3. ábra segítségével érthetjük meg. Az a és b vezetőben különböző az elektronok kémiai potenciálja. Az I áram hatására az $a - b$ határon az alacsonyabb kémiai potenciálú helyről az elektronok a magasabb kémiai potenciálú helyre mennek át. Az energia különbség azzal fedeződik, hogy az elektronok termikus energiát vonnak el a rendszertől. Ezért a határ lehűl. Hasonló folyamat megy végbe fordított előjellel, amikor az áram a $b - a$ határon megy át.



1.3. ábra. A Peltier-hő eredete

5. Thomson-effektus

Inhomogén hőmérsékletelosztású vezetőkben a rajta átfolyó áram hatására hő fejlődik. Az egységnyi idő alatt, a vezetőkben egységnyi hosszban fejlődött hő:

$$\frac{dQ}{dt} = \tau I \frac{dT}{dx},$$

ahol τ a Thomson-együttható. Szobahőmérséklet környékén, az 1.1. ábrán mutatott körben, a többi effektus mellett, a Thomson-effektus hatása elhanyagolható.

A termoelektromos jelenségek kapcsolata

A Seebeck-, Peltier- és Thomson jelenségek nem függetlenek egymástól. Termodinamikai megfontolásból következik, hogy az abszolút együtthatók között összefüggések állnak fenn:

$$P(T) = TS(T), \quad S(T) = \int_0^T \frac{\tau(T')}{T'} dT',$$

ahol T az abszolút hőmérséklet. Ezek az ún. Kelvin-összefüggések. Az összefüggések fizikai alapja az, hogy pl. egy termoelemet összekapcsolva egy Peltier elemmel nem sérthetjük meg a termodinamika II. főtételeit. A Kelvin-összefüggések adnak lehetőséget arra, hogy az abszolút Seebeck-együtthatót, ebből pedig az abszolút Peltier-együtthatót meghatározzassuk.

A termoelektromos jelenségekről részleteket és a Kelvin-összefüggés levezetését megtaláljuk [1]-ben.

1.2. A mérési összeállítás és a mérés elve

A tényleges mérési összeállításban az 1.1. ábrán szereplő a és b anyag nagy Peltier-együtthatójú n és p típusú félvezető. Ilyen anyagokból készítik a gyakorlatban is jól bevált félvezető hűtőelemeket. A félvezető rudak között a fémes kapcsolatot jó elektromos és jó hővezető tulajdonságokkal rendelkező, vörösrézről készült, híd szolgáltatja. Ezt mutatja az 1.4. ábra, ahol a mérés elvi összeállítási rajza látható.

A hűtőelem alul állandó hőmérsékletű hőtartályhoz csatlakozik, amelyet vízzel hűtött vörösréz tömb valósít meg. A hűtőelem jó hőkontaktussal, de elektromosan szigetelve csatlakozik a hőtartályhoz. A Peltier-elemet egy fordított U-alakú bakelit-elemmel szorítjuk rá a réztömbre. A szorítóelem csak kis felületen érintkezik a hűtött oldalhoz, hogy kis hőhidat képezzen a hidegpont és a hőtartály között. A hőkontaktust a réztömb és a Peltier-elem között hővezető paszta is segíti.

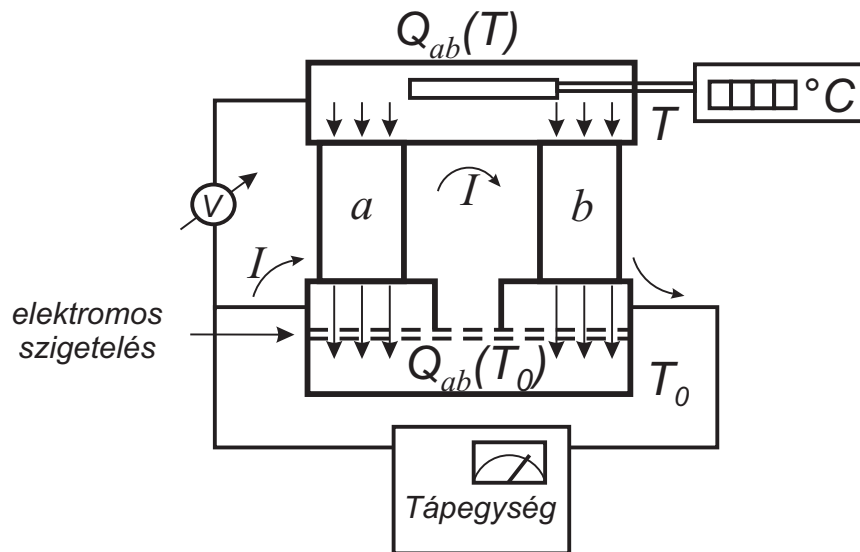
A hűtendő tér szintén egy vörösréz tömb. Mindkét tömb hőmérsékletét egy LM35 típusú félvezető hőmérsékletmérő IC-vel mérjük. Ennek működése a félvezető ellenállásának hőmérsékletfüggésén alapszik és a hőmérséklettel arányos feszültséget szolgáltat. Az néhány 0.01°C pontos mérést tesz lehetővé.

Az áramot egy precíziós áramgenerátorral tudjuk változtatni. Irányát úgy választjuk meg, hogy a Peltier-elem a felső réztömbtől vonjon el hőt.

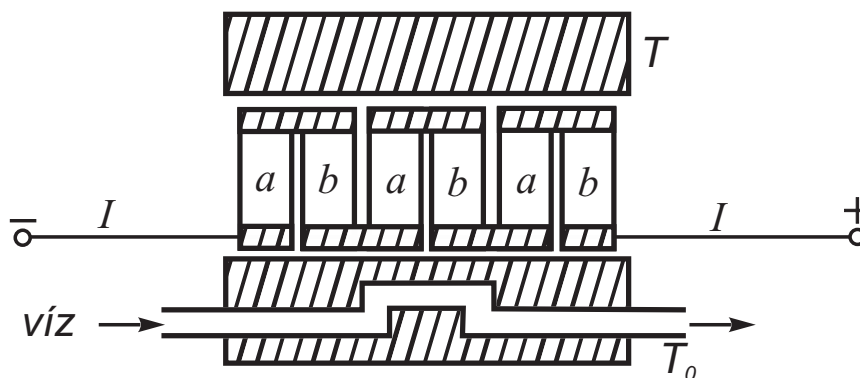
A mérés megvalósításakor több hűtőelemet (10-40) elektromosan sorba kötöttünk, ahogy azt az 1.5. ábra mutatja. Hűtés szempontjából a hűtőelemek párhuzamosan működnek, ezzel nagyobb hűtőteljesítmény érhető el.

Mivel a Peltier-elemünket jelentősen, hozzávetőlegesen -20°C -ra is lehűtjük, így a levegő páratartalma kicsapódna a hidegpontra. Ezt megakadályozandó egy búrát helyeztünk a készülékre, mely mellékesen mechanikai védelmet is nyújt. A búra alól nem szükséges a levegőt kiszívattyúzni, elegendő, hogy a terem levegőjétől elzárjuk a rendszert. Így csak a búra alatt lévő igen kis tárfogatú levegő párája tud kifagyni a készülékre, ami már nem zavarja a mérést.

Ezzel a mérési összeállítással a hűtőelem termodinamikai jellemzőit mérjük meg.



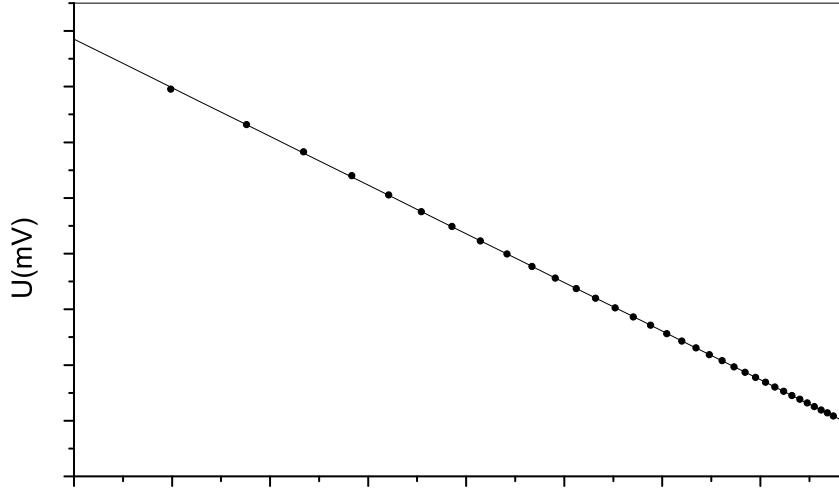
1.4. ábra. A mérés elvi összeállítása



1.5. ábra. A hűtőelemek kapcsolása

1.2.1. A Seebeck-együttható mérése

Az S_{ab} Seebeck-együtthatót nagy pontossággal meghatározhatjuk, ha hőmérsékletkülönbséget hozunk létre a Peltier-elem két oldalán, és megmérjük az elem sarkain jelentkező potenciálkülönbséget úgy, hogy közben az elemen nem folyik áram. Megállapodás szerint, a feszültségmérő műszert úgy kell a Peltier-elem sarkaira kötni, hogy a műszer pozitív pólusa a hűtött oldalra legyen kötve. Az így kapott mérési eredmények alapján a Seebeck-együttható előjelét is helyesen kapjuk meg. Több hőmérsékleten megismételve a mérést, az így kapott potenciálkülönbség-hőmérséklet grafikon meredeksége szolgáltatja a Seebeck-együttható értékét, ahogyan azt a 1.6. ábra mutatja.



1.6. ábra. A Peltier-elemen mért potenciálkülönbség hőmérsékletfüggése

1.2.2. A hűtés időfüggésének vizsgálata

A különböző áramerősségek esetén kialakuló egyensúlyi hőmérsékletek meghatározásához szükségünk van arra, hogy tudjuk, a rendszer mennyi idő múlva tekinthető egyensúlyban lévőnek. Ehhez egy adott áramerősségnél (2-3 A) határozzuk meg a hűtés időfüggését. A hűtött térrész exponenciálisan éri el az egyensúlyi állapotát:

$$T(t) = Ae^{-\beta t} + T_{\infty}, \quad (1.1)$$

ahol T_{∞} a kialakuló egyensúlyi hőmérsékletet, A a hőmérsékletváltozást jelöli, β a beállítás karakterisztikus idejének reciproka. Az exponenciális függvény illesztését a mérőprogrammal el tudjuk végezni (lásd alább).

1.3. A termoelektromos hűtés elmélete

Vizsgáljuk az 1.4. ábrán látható áramkört. Legyenek a és b nagy Peltier-együtthatójú anyagok. Ilyenek például az n és p típusú félvezetők. A rézősszekötőn nem alakul ki hőmérsékletgradiens, s így a számításokban azt nem kell figyelembe venni. Tegyük fel, hogy az áramirányt úgy választottuk meg, hogy a felső összekötő hídról a Peltier-effektus hőt von el. A vezető kör elektromos ellenállása:

$$R_{ab} = R_a + R_b,$$

és hőátadásra jellemző állandó:

$$h_{ab} = h_a + h_b.$$

Az árambevezetés környékét tekintsük T_0 hőmérsékletű hőtartálynak, míg a felső hűtött áthidalt pont hőmérsékletét jelöljük T -vel. Valamilyen Δt idő alatt a T hőmérsékletű áthidalás a leadott $\Delta Q_P =$

$P_{ab}I\Delta t$ Peltier-hőn kívül felveszi az a - b vezetékparban keletkezett $\Delta Q_J = R_{ab}I^2\Delta t$ Joule-hőnek jó közelítéssel felét (a másik fele a hőnek a hűtött oldal veszi fel), a T_o hőmérsékletű hőtartályból hővezetés útján átváramló $\Delta Q_V = h_{ab}(T_o - T)\Delta t$ hőt, valamint a környezetből a rendszerbe áramló $\Delta q = h(T_k - T)\Delta t$ hőt, ahol h a környezett és a hűtött tömb közötti hőátadási tényező és T_k a külső hőmérséklet. Tehát a hűtött pontról időegységenként kiszivattyúzott hő:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{dQ_P}{dt} - \frac{1}{2} \frac{dQ_J}{dt} - \frac{dQ_V}{dt} - \frac{dq}{dt} = P_{ab}I - \frac{1}{2}R_{ab}I^2 - h_{ab}(T_o - T) - h(T_k - T).$$

Keressük adott áram mellett a fenti egyenlet stacionárius megoldását, amikor az időegységenként kivett hőmennyiség zérus, azaz $dQ/dt = 0$.

$$0 = TS_{ab}I - \frac{R_{ab}}{2}I^2 - h_{ab}(T_o - T) - h(T_k - T) = (S_{ab}I + h_{ab} + h)T - \frac{R_{ab}}{2}I^2 - h_{ab}T(0) - hT_k,$$

ahonnan az egyensúlyi hőmérséklet:

$$T(I) = \frac{\frac{R_{ab}}{2}I^2 + h_{ab}T_0 + hT_k}{S_{ab}I + h_{ab} + h}, \quad (1.2)$$

amely az az egyensúlyi hőmérséklet ami az áram bekapcsolása után rövid idő múlva (5-7 perc) kialakul. Nulla áram esetén ez:

$$T(0) = \frac{h_{ab}T_0 + hT_k}{h_{ab} + h}. \quad (1.3)$$

A tapasztalat szerint $T(0)$ alig tér el T_0 tól, ami azt mutatja, hogy h elhanyagolható h_{ab} mellett, valamint $hT_k \ll h_{ab}T_0$. Ez nyilván azért teljesül mivel h_{ab} fém-fém hőátadást, míg h levegő-fém hőátadást jelent. Ennek következtében a további megfontolásoknál h -t elhagyjuk, így

$$T(I) = \frac{\frac{R_{ab}}{2}I^2 + T_0}{\frac{S_{ab}}{h_{ab}}I + 1}. \quad (1.4)$$

A (1.4) képletnek megfelelő $T(I)$ függvény paramétereit egyszerű matematikai műveletekkel megadhatjuk. A minimális hőmérséklethez tartozó áram értékét a $dT/dI=0$ feltételből kapjuk meg:

$$I_{\min} = \frac{h_{ab}}{S_{ab}} \left(\sqrt{1 + \frac{2S_{ab}^2 T_0}{h_{ab} R_{ab}}} - 1 \right).$$

Az így kapott értéket (1.4)-ba helyettesítve megkapjuk a minimális hőmérséklet értékét:

$$T_{\min} = \frac{R_{ab}I_{\min}}{S_{ab}}. \quad (1.5)$$

Mivel S_{ab} -t a közvetlen mérésből ismerjük, így innen R_{ab} megadható:

$$R_{ab} = \frac{S_{ab}T_{\min}}{I_{\min}}. \quad (1.6)$$

Látható, hogy $I_{\min}$ és $T_{\min}$ kifejezésében egy anyagi állandókból álló paraméter lényeges szerepet játszik, így ezt külön is érdemes definiálni:

$$z = \frac{S_{ab}^2}{h_{ab}R_{ab}}. \quad (1.7)$$

A z mennyiséget a Peltier-elem *jósági számának* nevezik. Ennek értékét beírva T_{min} és I_{min} kifejezésébe azt kapjuk, hogy

$$I_{min} = \frac{h_{ab}}{S_{ab}} \left(\sqrt{1 + 2zT_0} - 1 \right) \text{ és } T_{min} = \frac{1}{z} \left(\sqrt{1 + 2zT_0} - 1 \right). \quad (1.8)$$

A T_{min} -re kapott kifejezésből a legnagyobb hőmérsékletkülönbségre azt kapjuk, hogy

$$T_0 - T_{min} = \frac{z}{2} T_{min}^2, \quad (1.9)$$

amelynek segítségével T_0 és T_{min} mért értékéből z meghatározható:

$$z = \frac{2(T_0 - T_{min})}{T_{min}^2}. \quad (1.10)$$

Itt fontos észrevenni, hogy z egy $1/K$ dimenziójú mennyiség, tehát a hőmérsékletek mindenütt abszolút hőmérsékleteknek. (Az abszolút hőmérséklet a korábban említett $P_{ab} = S_{ab}T$ Kelvin reláció következtében jelenik meg.)

A z , S_{ab} és R_{ab} ismeretében h_{ab} is megadható. Ugyanis (1.7)-ből:

$$h_{ab} = \frac{S_{ab}^2}{zR_{ab}}. \quad (1.11)$$

A Peltier-együtthatót legpontosabban a Kelvin-reláció felhasználásával kapjuk meg:

$$P_{ab}(T) = S_{ab}T. \quad (1.12)$$

1.3.1. A berendezés paramétereinek meghatározása

A mai modern Peltier elemek olyan jó hatásfokúak, hogy a minimum hőmérséklet a laborban használt eszköz esetén nem érhető el. Ugyanakkor Az elméletből levezetett $T(I)$ (1.4) függvényt átrendezve belátható, hogy

$$\frac{T}{I} = \frac{R_{ab}}{2S_{ab}} + \frac{h_{ab}}{S_{ab}} \frac{T_0 - T}{I^2}. \quad (1.13)$$

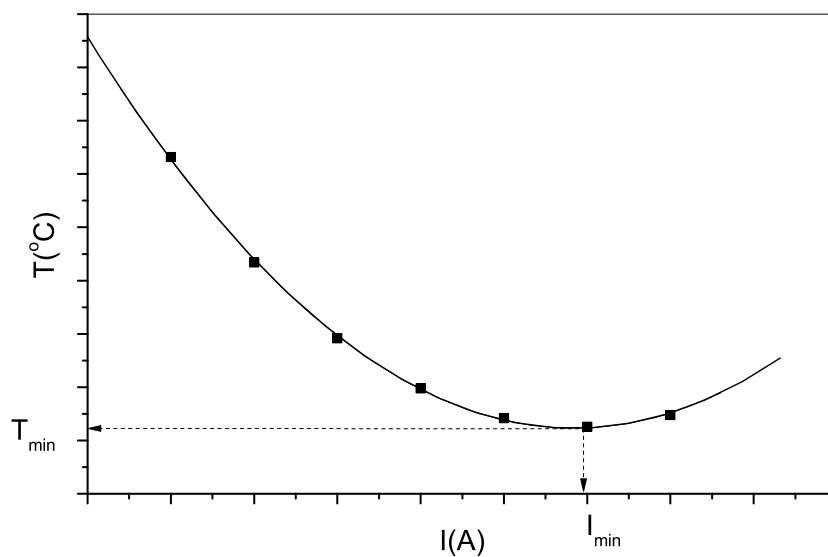
Látható, hogy ha az $x = \frac{T_0 - T}{I^2}$ függvényében ábrázoljuk az $y = \frac{T}{I}$ -t, akkor egyenest kapunk. Figyeljünk: a T/I dimenziója K/A ! Az egyenes meredeksége h_{ab}/S_{ab} , tengelymetszete pedig $R_{ab}/2S_{ab}$. Tehát a megfelelő pontpárookra egy egyenest illesztve a berendezés paramétereit meghatározhatók.

1.4. A mérőprogram használata

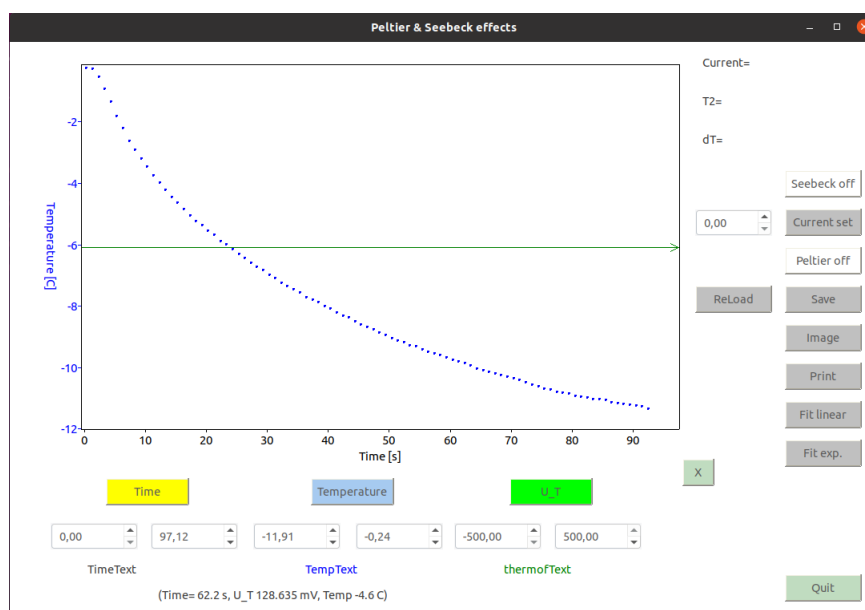
A mérés vezérlését, az adatgyűjtést és a kiértékelést egy mérőprogram végzi. Amely a *peltier* utasítással indítható el akár egy terminálból akár az asztalon levő ikonnal. Ezután első lépésként ki kell választani azt a könyvtárat ahova a mérési eredményeket elmentjük. Ha még nincs az ön neve alatt létrehozott könyvtár Neptun kódjával hozza létre és válassza ki azt „munkakönyvtárként”.

Ezután az 1.8 ábrán látható kép jelenik meg.

A program folyamatosan megadja a Peltier áramot, a hűtemdő Cu tömb hőmérsékletét (T_2) valamint a Peltier elem két fele között dT hőmérsékletet.



1.7. ábra. A Peltier-elem egyensúlyi hőmérséklete az áramerősség függvényében (cserélendő!!)



1.8. ábra. A mérőprogram

1.4.1. Peltier mérés

Peltier mérés esetén a grafikonon megjelenik a dT hőmérséklet az idő függvényében. A mérés elindítása előtt „Current set” gomb melletti dobozba adjuk meg a használni kívánt áram értékét. Fontos megjegyezni, hogy az áram csak a mérés elindításakor, a „Peltier on” gomb benyomásával indul el. A mérés a gomb ismételt benyomásával állítható le. Mérés közben a kijelzett idő és dT tartomány a grafikon alatt található boxokba írt adatokkal tetszőlegesen beállítható. Ez úgy történik, hogy a megfelelő boxba beírja a kívánt értéket majd leüti az „Enter” gombot. Azonban lehetőség van az érték beállítására az egérrel is a „fel”, „le” nyilakra kattintva. Ekkor az egér gombjának felengedésével állítódik be tényleges érték.

A mérés megállítása után a mért adatok a „Save” gombbal elmenthetők. Ez később a „Reload” gombbal visszaolvasható. Azonban ez csak akkor engedélyezett ha nincs mérés folyamatban.

A grafikonon látható ábra „jpg” formátumban tetszőleges pillanatban elmenthető a program indításakor megadott directoryba. A file neve a pillanatnyi dátumból és időpontból állítódik elő.

A mérés befejezése után a fentiekben ismertetett exponenciális függvény a „Fit exp” gomb benyomásával indítható el. Ehhez első lépésként ki kell választani az illesztési tartományt. A gomb lenyomása után megjelenik két függőleges vonal. Vigyük az egeret valamelyik vonal tetszőleges pontjára. Ezután a bal egérgombot lenyomva tartva az egérrel mozgatni tudjuk a vonalat. A kíván pozíciók beállítása után a gomb benyomásával elindul az illesztés. A kapott paraméterek az ábrán kiíródnak. Ezt célszerű az „Image” gombbal elmenteni.

1.4.2. Seebeck együttható mérése

A Peltier méréssel hozzunk létre egy nagyobb dT hőmérséklet különbséget. A Peltier mérés leállítása után nyomjuk meg a „Seebeck on” gombot. Ekkor ahogy a felső tömb melegedni kezd megmérhetjük a termofeszültséget a különbségi hőmérséklet függvényében. Az ábrán megjelenik az $U(t)$ ill. a $dT(t)$ görbe. Az „X” gomb lenyomásával átválthatunk az $U(dT)$ görbére. Újbóli lenyomással visszakapjuk az idő függvényében a két mennyiséget. A mérés a gomb újbóli benyomásával állítható le.

Fontos megjegyezni, hogy ha valamelyik mérés aktív akkor természetesen a másik nem indítható el. Az aktív mérést mindig először le kell állítani és természetesen elmenteni. Az elmentett mérés a „Reload” gombbal visszahívható.

A mérés befejezése után a „Fit linear” gombbal tudunk egy egyenest illeszteni a mért $U(dT)$ görbére. Ehhez először az exponenciális illesztéshez hasonlóan a két függőleges vonal mozgatásával válasszuk ki az illesztési tartományt. Az illesztett görbe meredekségéből megkaphatjuk a Seebeck együttható értékét.

1.5. A mérés menete

1. Előkészítés.

A hűtővizet a laborvezető nyitja meg. Kapcsoljuk be az adatgyűjtő elektronikát és indítsuk el a mérőprogramot.

2. A hűlés időállandójának mérése.

Különböző áramerősség mellett mérjük meg a hűtőelemre jellemző $T(t)$ függvényt. Az exponenciális illesztéssel határozzuk meg a $\tau = 1/\beta$ karakterisztikus idő és T_∞ értékét.

3. Mérjük meg a T_∞ egyensúlyi hőmérsékletét, mint az áramerősség függvényét.

Az áramerősséget 0.5 amperenként növeljük maximálisan 3A-ig. Legalább négyszeres τ időt hagyjunk az egyensúly beállítására.

4. *Mérjük meg a Seebeck-együtthatót.*

Hűtsük le hozzávetőlegesen *15 fokkal* a Peltier-elemet egy „Peltier” mérés elindításával. A Peltier mérés kikapcsolása után mérjük meg termofeszültséget a dT függvényében. Egyenes illesztésével határozzuk meg a Seebeck-együttható értékét.

5. *Kikapcsolás.*

A mérés végeztével kapcsoljuk ki a műszereket. A hűtővizet a laborvezető zárja el.

1.6. Feladatok

1. Határozzuk meg a vízhűtött réztömb T_0 hőmérsékletét, és a felső áthidalás $T(I = 0)$ egyensúlyi hőmérsékletét, amikor a Peltier-elemen nem folyik áram. Adjuk meg a mért értékek hibáját is. A gyakorlat során többször ellenőrizzük, hogyan változik az idővel a víz hőmérséklete.
2. Egy adott áramerősségnél határozzuk meg a rendszer beállításának τ karakterisztikus idejét. A karakterisztikus idő hibáját a meredekség hibájából számoljuk ki.
3. Határozzuk meg és ábrázoljuk a hűtött tér egyensúlyi hőmérsékletét, mint az áramerősség függvényét. A kapott grafikonból határozzuk meg I_{min} és T_{min} értékét.
4. Mérjük meg az S_{ab} Seebeck-együtthatót.
5. Adjuk meg, természetesen hibákkal együtt, a hűtőelem paramétereit: a z jósági számot, az S_{ab} Seebeck-együtthatót, az R_{ab} ellenállást, a h_{ab} hővezetést, a h_k hőátadási együtthatót és P_{ab} Peltier-együtthatót T_0 -on és T_{min} -en.
6. Igazoljuk az egyensúlyi $T(I)$ függvény (1.4) alakját a (1.13) transzformációs egyenessel! A h_{ab} -t és R_{ab} -t adjuk meg a transzformált egyenes meredekségéből és tengelymetszetéből is, S_{ab} -t felhasználva. Hasonlítsuk össze a hibákat a két módszer esetén.
7. Határozzuk meg a teljesítményegyenleg összes tagját a legnagyobb hűtés állapotában. Vizsgáljuk meg az egyes tagok egymáshoz viszonyított arányát. Milyen a vezetési- és a Joule-tag aránya? Mekkora a dq/dt a többi taghoz képest? Becsüljük meg a h_k/h_{ab} arányt!

1.6.1. Elméleti feladatok

1. Milyen lenne az egyensúlyi $T(I)$ függvény Joule-hő nélkül?

1.7. Irodalom

1. Tichy Géza, Kojnok József, Hőtan, 9. fejezet: Irreverzibilis termodinamika, Typotex kiadó, 2001.

A mérésen az utóbbi időben jelentős fejlesztést végeztünk, ezért elképzelhető, hogy rendellenességet tapasztal. Kérjük ezt jelezze a laborvezetőnek, hogy javítani tudjuk.