Termoelektromos hűtőelemek vizsgálata

Asztalos Bogdán
Hétfői csoport

mérés időpontja: 2017. 09. 25.
jegyzőkönyv leadásának időpontja: 2017. 10. 05.

A mérés célja

A Peltrier-effektus hatására különböző anyagok összetételével készített vezetőn átfolyó áram hatására a vezető egyik oldala lehül. Ezt a jelenséget megfelelő paraméterekkel rendelkező anyagok esetében fel lehet használni közegek hűtésére. Ehhez hasonló, másik jelenség, amikor vezetőben lévő hőmérsékletgradiens hatására elektromos térerősség keletkezik, így a vezető különböző pontjai között feszültség lép fel. Ez a Seebeck-effektus. Mivel a két hatás hatással van egymásra, az ezeket leíró anyagi tulajdonságok nem függetlenek egymástól, így ezeket az összefüggéseket felhasználva, ezeket a jelenségeket vizsgálhatjuk együtt, ezzel információt nyerve a hűtési tulajdonságokról.

A mérés eszközei

- Elektromosan sorbakötött Peltier-elemek
- Az elem sarkain egy-egy jó hővezető réztömb
- Az alsó réztömbön keresztülfoyó hűtővíz
- A felső réztömb hőmérséklétetét tized Celsius-fok pontosságra mérő elektromos hőmérő
- A Peltier-elem sarkai közötti feszültséget mérő voltmérő
- Áramgenerátor
- Folyadékos hőmérő

A mérés menete

A mérés kezdete előtt egy órával a laborvezető megnyitotta az alsó réztömbön átfolyó vízet, ezzel elkezdtük hűteni, így a mérés kezdetére a mérési berendezés felvette azt a hőmérsékletet, ami az áram nélküli állapotnak felel meg. Feljegyeztük a hűtendő tér kezdeti hőmérsékletét ($T(I = 0)$), azt a hőmérsékletet, amikor a Peltier-elem sarkai között nincs feszültség (ez tekinthető a hűtőközeg T_0 hőmérsékletének), valamint a környezet T_k hőmérsékletét.

A kezdeti állapotok megmérése után áramot kapcsoltunk a Peltier-elemre, és az idő függvényében mértük, hogy hogyan áll be egy egyensúlyi hőmérséklet. Azt várjuk, hogy a hőmérséklet kiegyenlítődés exponenciális függvény szerint történik, így a mérésből meghatározható az a karakterisztikus idő, ami után a rendszer mért hőmérséklete már az egyensúlyi hőmérsékletének tekinthető.

Ezután további, kölönböző áramerősségeket is rákapcsoltunk a Peltier-elemre, és a karakterisztikus idő letelte után megmértük az egyensúlyinak tekintett hőmérsékletüket. A célunk, hogy megtaláljuk azt az optimális I_{min} áramerősséget, ami mellett a Peltier-elem a legjobb hűtést biztosítja, így a hőmérséklet T_{min} értéke minimális.

Végül, azt vizsgáljuk, hogy a Peltier-elem sarkain mért, Seebeck-effektusból származó feszültség hogyan függ a hőmérséklettől, és ebből kiszámolhatjuk a Seebeck-együtthatót. A Seebeck-együtthatót és a $T - I$ karakterisztikát ismerve, meghatározható a Peltier-elem többi anyagi jellemzője is, mint az ellenállása, a Peltier-együtthatója, a különböző hővezetési együtthatói és a jósági száma.

Mérési eredmények

A mérés során három főbb jelenséget mértünk meg:

- Az egyensúlyi hőmérséklet beállását az idő függvényében adott áramerősség mellett
- Az egyensúlyi hőmérséklet értékét az áramerősség függvényében
- A Peltier-elem sarkai között lévő feszültségkülönbséget az elem hidegpontjának hőmérsékletének függvényében

Ennek a három mérésnek a eredményeit az 1., a 2. és a 3. táblázatok tartalmazzák a 3. oldalon.

Kiértékelés

1. A kísérlet körülményit befolyásoló adatok mérése

A mérés kezdetekor felírtuk a műszerek által mutatott adatokat. Mikor már jó ideje hűtötte a víz a közeget, vagyis az áram nélküli állapot egyensúlyi hőmérséklete $T(0) = 17,9°C$ volt, ekkor a feszültségmérő -6,57 mV-ot mutatott, ami azt jelenti, hogy ekkor a hűtendő közeg melegebb volt, mint a hűtővíz. Ezt is vártuk, hiszen amíg a Peltier-elem nem hűti a hűtendő részt, addig a környezettel való folyamatos hőcsere miatt kissé el fog térni a hőmérséklete a hűtőközegtől.

Ezután áramot kapcsoltunk a Peltier-elemre, aminek hatására a mért hőmérséklet el kezdett csökkenni, vagyis a hűtött tér hőmérséklete közeledni kezdett a víz hőmérsékletéhez, így a Seebeck-hatás miatt a feszültség is csökkent. Amikor a mért feszültség 0 V volt, akkor volt a két térrész hőmérséklete egyenlő. Ekkor a mért hőmérséklet 17,1°C volt, tehát a hűtővíz T_0 hőmérséklete is tekinthető ennyinek.

Végül, a rendelkezésre álló hőmérővel megmértük a környezet, vagyis a szoba hőmérsékletét, ami $T_k = 25,8°C$. Mind az elektromos, mind a folyadékos hőmérő pontossága 0,1°C volt, így a hőmérsékletmérés hibáját is ennyinek vehetjük.

2. A hőmérsékletegyensúly beállásának vizsgálata

Az áramgenerátorral beállítottuk, hogy a Peltier-elemen folyjon át $I = 2\ A$ erősségű áram, aminek hatására, az elemek el kezdték hűteni a hűtendő részt. Az idő múlásával, feljegyeztük a hidegpont hőmérsékletét. A mért hőmérsékletet az idő függvényében az 1. táblázat tartalmazza. Már a számadatokból is látszik, hogy a hőmérséklet monoton csökken, de hosszú idő után egy adott hőmérsékletértékhez tart. Az adatpontokat az 1. ábra ábrázolja, amiről szintén leolvasható az a trend, hogy a hőmérséklet egy egyensúlyi T_∞ hőmérsékletet vesz fel.

Az egyensúlyi hőmérséklet megállapításához két szempontot vettünk figyelembe. Az egyik, az, hogy az adatokat ábrázolva az idő függvényében látszódott, hogy nagyjából mi az a hőmérséklet, amit még kellően hosszú idő után még elérne, de nem lépne át. A másik szempont abból indul ki, hogy tudjuk, hogy a termodinamikus egyensúly beállása exponenciális törvény szerint történik, azaz a hidegpont hőmérséklete az idő függvényében

$$T(t) = T_\infty + A\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}.$$

t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]
0	17,1	25	11,8	80	2,5	180	-3,5	321	-5,5
5	16,8	30	10,6	100	0,5	210	-4,2	337	-5,6
10	15,7	40	8,5	120	-0,9	240	-4,7	355	-5,7
15	14,4	50	6,6	140	-2,0	270	-5,1	380	-5,8
20	13,1	60	5,0	160	-2,8	300	-5,3	423	-5,9

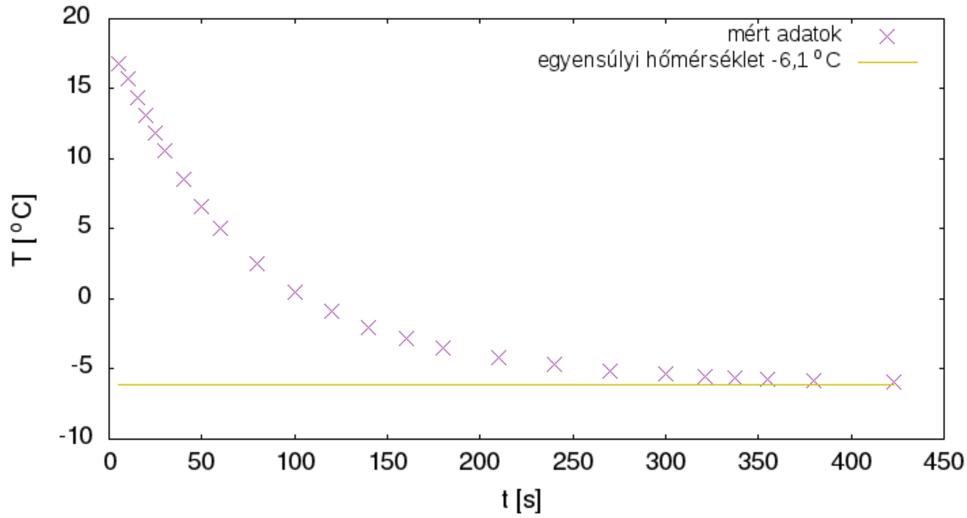
1. táblázat. 2 A erősségű áram mellett, a hidegpont hőmérsékletének időfüggése.

I [A]	T [°C]
1	3,2
2	-6,1
3	-12,1
4	-15,6
4,25	-16,5
4,5	-16,5
4,75	-16,8
5	-16,4
5,5	-16,1
6	-15,0

2. táblázat. A hidegpont egyensúlyi hőmérséklete különböző áramerősségek mellett.

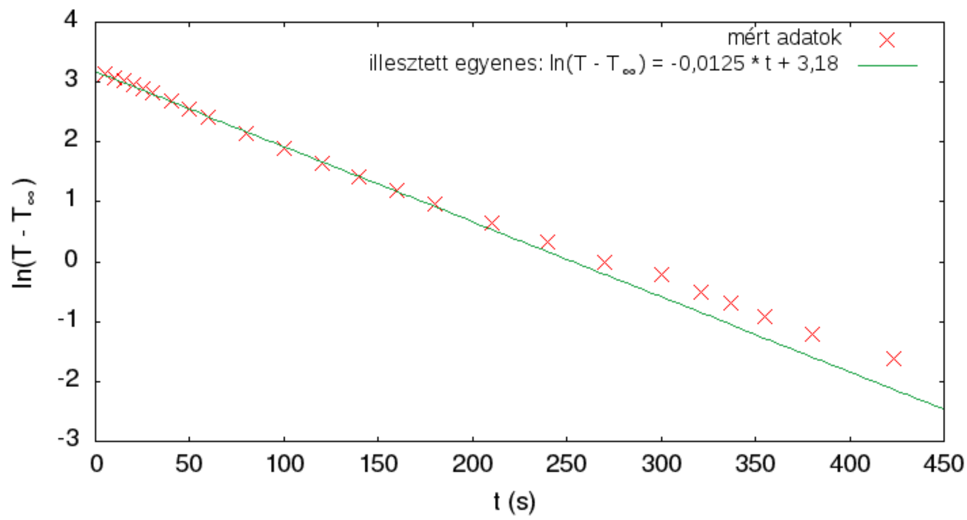
T [°C]	U [mV]	T [°C]	U [mV]	T [°]	U [mV]
-10,5	274	1,2	157	7,8	91
-8,7	257	2,1	149	8,2	86
-7,2	241	2,9	141	8,6	82
-5,8	228	3,6	133	9,0	78
-4,5	215	4,3	125	9,4	73
-3,1	202	5,0	119	9,7	70
-2,1	192	5,6	113	10,0	67
-1,2	185	6,1	107	10,4	63
-0,4	175	6,8	101	10,7	60
0,7	163	7,3	95	11,0	57

3. táblázat. A Peltier-elem sarkain fellépő feszültség a hűtött tér hőmérsékletének függvényében



1. ábra. A Peltier-elem hidegpontjának hőmérséklete az idő függvényében $I = 2\ A$ áram hatására. Hosszú idő után a hőmérséklet felveszi a $T_\infty = -6,1°C$-t.

Eszerint, a $\ln(T - T_\infty)$ mennyiséget ábrázolva az idő függvényében, egy $-\frac{1}{\tau}$ meredekségű egyenest kell kapjunk. Kipróbálva a környező hőmérsékleteket, a $T_\infty = -6,1°C$ hőmérséklet esetében illeszkednek a mért pontok legjobban egy egyenesre. Mivel a hűtővíz hőmérséklete az időben kis mértékkel változhat, ezért ez befolyásolja az egyensúly beállását. Ez azt jelenti, hogy a hosszútávon mért pontok nem biztos, hogy pontosan ugyanarra az egyenesre illeszkednek, így ez hibát okozhat az egyenes illesztésekor. Hogy ezt elkerüljük, az egyenes keresésekor, és a függvényillesztéskor csak azokat a mért értékeket vettük figyelembe, amik esetén $15\ s < t < 200\ s$. A transzformált mérési pontokat, és a rájuk illesztett egyenest a 2. ábra ábrázolja.

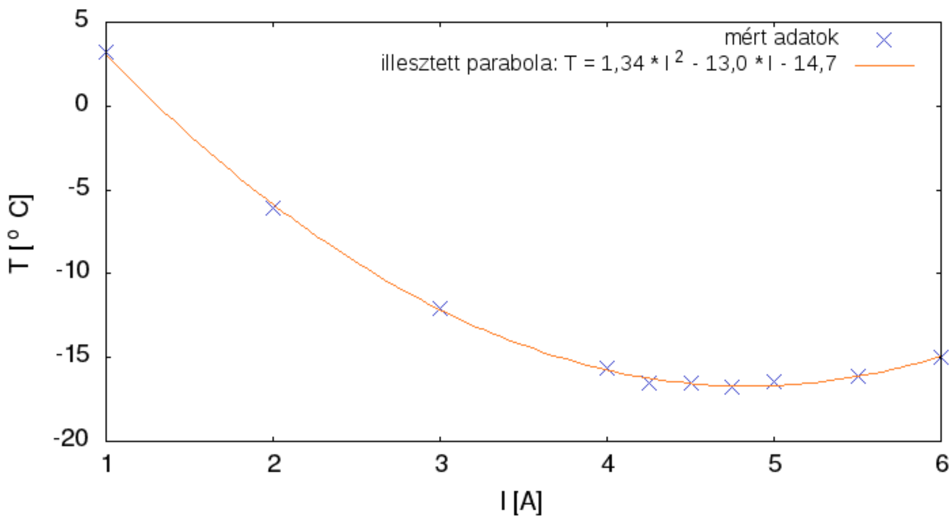


2. ábra. A Peltier-elem hidegpontjának a hőmérsékletének és az egyensúlyi hőmérséklet különbségének logaritmusa az idő függvényében.

A 2. ábrán lévő adatokra illesztett egyenes meredeksége: $m = -0,0125\ \frac{1}{s} \pm 0,0001\ \frac{1}{s}$, vagyis a karakterisztikus idő: $\tau = \frac{1}{a} = 79,7\ s \pm 0,9\ s$ (a karakterisztikus idő relatív hibája megegyezik az egyenes meredekségének relatív hibájával: $\delta\tau = \delta m$. A továbbiakban úgy vesszük, hogy a hőmérsékletegyensúly beálltához 4τ idő kell, vagyis 318 s-ot, azaz kb. öt percet fogunk várni minden esetben, hogy beálljon egy egyensúlyi hőmérséklet.

3. Legnagyobb hűtés esetének vizsgálata

A mérésnek ebben részében a célunk az, hogy meghatározzuk, mekkora áramerősséget kell a Peltier-elemen átfolyatni, hogy a lehető legjobban lehűtse a hűtendő közeget. Erre a legegyszerűbb megoldás az, hogy különböző áramerősségek mellett megmérjük az egyensúlyi hőmérsékletet, és megnézzük, hogy ez hol a legkisebb. Ezt meg is tettük, 1 és 6 A között 1 A-es különbségekkel folyattunk áramot, vártunk kb. öt percet, míg beállt a termikus egyensúly, majd a hőmérőről leolvastuk a hidegpont hőmérsékletét. A legkisebb hőmérsékletű állapot körül sűrűbben is végeztünk méréseket, hogy a minimumhely meghatározása pontosabb legyen. A mért értékeket a 2. táblázat tartalmazza. Ebből kiolvasható, hogy a mérési pontok közül a legalacsonyabb hőmérsékletű az $I = 4,75\ A$-nél van, tehát e körül lesz valahol a minimális hőmérséklethez szükséges áram.



3. ábra. A Peltier-elem hidegpontjának egyensúlyi hőmérséklete a rajta átfolyó áram függvényében. A minimumhely közelében a hőmérséklet-áram függést egy másodfokú polinommal közelítettük.

A mért adatpárokat grafikonon ábrázoltuk a 3. ábrán. Azt tudjuk, és a mérési pontokat ábrázolva, látszik is, hogy a mért $T - I$ karakterisztikának valahol I = 4,75 A körül minimuma van, az ehhez közeli tartományban próbáljuk meg egy másodfokú polinommal közelíteni a hőmérséklet és az áram kapcsolatát, és annak a minimumhelyét meghatározni. A 3 A-nél nagyobb áram esetében mért mérési pontokra ráillesztetttünk egy másodfokú polinomot, ez is látszik a 3. ábráról. A polinom egyenlete $T = aI^2 + bI + c$, ahol az illesztés alapján $a = 1,335\ \frac{K}{A^2} \pm 0,076\ \frac{K}{A^2}$, $b = -12,95\ \frac{K}{A} \pm 0,69\ \frac{K}{A}$ és $c = 287,9\ K \pm 1,5\ K$. (A °C és K közötti átváltás csak a c paraméter értékén változtat, egy konstans eltolással.)

A másodfokú görbe minimumhelye (és annak hibája) deriválással meghatározható:

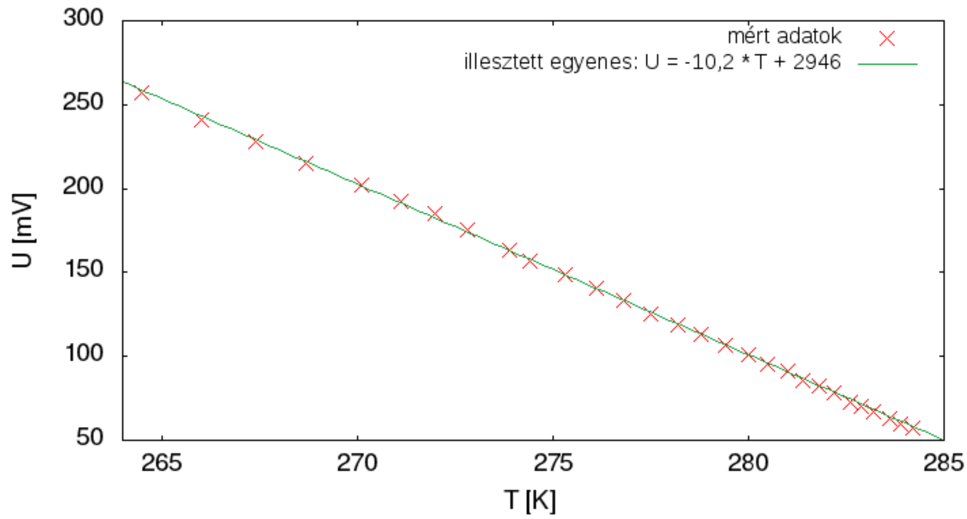
$$T_{min} = c - \frac{b^2}{4a} \quad \Delta T_{min} = \Delta c + \frac{b^2}{4a}(2\delta b + \delta a) \qquad I_{min} = \frac{b}{2a} \quad \delta I = \delta b + \delta a$$

Ezek alapján, a minimális hőmérséklet $T_{min} = 256,5\ K \pm 6,7\ K$, az ehhez szükséges áram pedig $I_{min} = 4,85\ A \pm 0,54\ A$. A következő részben ezekkel az adatokkal fogunk számolni.

4. A Seebeck-együttható meghatározása

Ha egy vezető különböző pontjai különböző hőmérsékleten vannak, akkor közte feszültségkülönbség alakul ki. A két anyag relatív S_{ab} Seebeck-együtthatója definíció szerint $S_{ab}(T) = \left(\frac{\partial U_{ab}}{\partial T_{ab}}\right)_T$. Mivel a hűtőközeg hőmérsékletét állandónak tételezzük fel, a hőmérsékletfüggést pedig elhanyagoljuk, ezért a Peltier-elem sarkai között mért feszültség és a hidegpont hőmérséklete között lineáris kapcsolatot várunk, ahol az arányossági tényező lesz a Seebeck-együttható.

Ahhoz, hogy ezt meghatározzuk, lehűtöttük a hűtendő közeget, majd az áramot kikapcsolva, párhuzamosan figyeltük a melegedő rendszer hőmérsékletét, és a Peltier-elem sarkai között fellépő feszültségkülönbséget. A mért adatokat a 3. táblázat tartalmazza, az adatokat pedig a 4. ábrán ábrázoltuk. Jól látszik, hogy valóban fennáll a lineáris kapcsolat, vagyis a Seebeck-együttható hőmérsékletfüggése a vizsgált tartományban elhanyagolható. A Seebeck együttható értéke a meredekség abszolútértéke, így mivel $m = -10,16\ \frac{mV}{K} \pm 0,03\ \frac{mV}{K}$ ezért $S_{ab} = 10,16\ \frac{mV}{K} \pm 0,03\ \frac{mV}{K}$.



4. ábra. A Peltier elem sarkain mérhető feszültség a hidegpont hőmérsékletének függvényében

5. A hűtőelem paramétereinek meghatározása 1.

Most, hogy a Seebeck-együtthatót megmértük, T_{min}-t és I_{min}-t pedig kiszámoltuk az illesztett parabola minimumhelyéből, kiszámolhatjuk a Peltier-elem többi, a hűtés szempontjából fontos tulajdonságát.

A hűtés szempontjából igen fontos a Peltier-elem z jósági száma, amely definíció szerint $z = \frac{S_{ab}^2}{h_{ab}R_{ab}}$, ahol h_{ab} a vezető hővezetési együtthatója, R_{ab} pedig az ellenállása (hiszen annál jobban tud hűteni a Peltier-elem, minél nagyobb a Seebeck-együtthatója és minél jobb elektromos vezetők, de rossz hővezetők). Mivel a fellépő különböző effektusok nem függetlenek, az anyagi paraméterek is összefüggenek, így ki lehet fejezni z-t pusztán már megmért mennyiségekkel, így értéke is kiszámolható:

$$z = \frac{2\left(T\left(0\right) - T_{min}\right)}{T_{min}^2} \qquad \text{és} \qquad \delta z = \frac{\Delta T\left(0\right) + \Delta T_{min}}{T\left(0\right) - T_{min}} + 2\delta T_{min}$$

Amiből $z = (1,05 \pm 0,26) \cdot 10^{-3}\ \frac{1}{K}$ következik. Szintén kifejezhető már ismert mennyiségekkel a vezető ellenállása is:

$$R_{ab} = \frac{T_{min} S_{ab}}{I_{min}} \qquad \text{és} \qquad \delta R_{ab} = \delta T_{min} + \delta S_{ab} + \delta I_{min}$$

Ebből: $R_{ab} = 0,537\ \Omega \pm 0,075\ \Omega$. Ezek visszahelyettesíthetők a jósági szám definíciójába, amiből pedig kifejezhető a hővezetési együttható:

$$h_{ab} = \frac{S_{ab}^2}{z R_{ab}} \qquad \text{és} \qquad \delta h_{ab} = 2\delta S_{ab} + \delta z + \delta R_{ab}$$

Kiszámolva, azt kapjuk, hogy $h_{ab} = 0,183\ \frac{W}{K} \pm 0,072\ \frac{W}{K}$, majd ebből a hidegpont és a környezet közötti h_k hőátadási együttható:

$$h_k = h_{ab} \frac{T\left(0\right) - T_0}{T_k - T\left(0\right)} \qquad \text{és} \qquad \delta h_k = \delta h_{ab} + \frac{\Delta T\left(0\right) + \Delta T_0}{T\left(0\right) - T_0} + \frac{\Delta T_k + \Delta T\left(0\right)}{T_k - T\left(0\right)}$$

Behelyettesítve az adatokat $h_k = 0,018\ \frac{W}{K} \pm 0,012\ \frac{W}{K}$. Továbbá, a Peltier-együttható megkapható a Seebeck-együtthatóból a Kelvin-összefüggés alapján:

$$P\left(T\right) = T S_{ab} \qquad \text{és} \qquad \delta P = \delta T + \delta S_{ab}$$

így meghatározhatjuk a hűtőközeg hőmérsékletén és a minimális hőmérsékleten is: $P\left(T_0\right) = 2,949\ V \pm 0,010\ V$ valamint $P\left(T_{min}\right) = 2,606\ V \pm 0,076\ V$

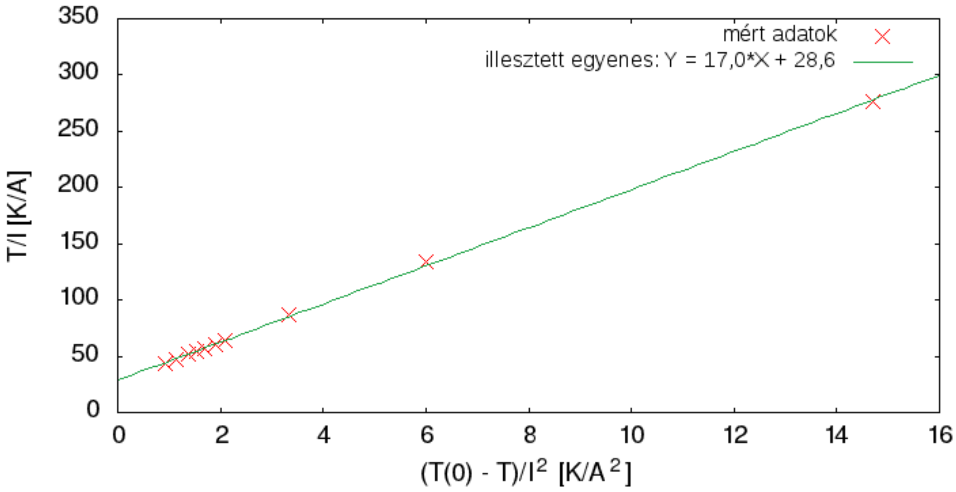
A kapott értékek nagyságrendileg mind abba a tartományba esnek, amibe vártuk, de a relatív hibájuk nagyon nagy, ezért a továbbiakban egy másik módon is kiszámoljuk őket.

6. A hűtőelem paramétereinek meghatározása 2.

Az előző módszerrel kiszámolt fizikai mennyiségeknek nagyon nagy relatív hibájuk volt. Ennek egyik legfőbb oka, az volt, hogy a hűtés $T - I$ karakterisztikája a minimumhely közelében elég lapos, ezért nehéz pontosan megállapítani, hogy hol van a minimumhelye, így a parabolaillesztés elég bizonytalan. Hogy ezt kiküszöböljük, próbálkozzunk a $T - I$ karakterisztika elemzésének egy másik módszerével! Elméleti úton belátható, hogy a hidegpont T egyensúlyi hőmérséklete és a Peltier-elemen folyó I áram nagysága között teljesülnie kell az alábbi összefüggésnek:

$$\frac{T}{I} = \frac{R_{ab}}{2S_{ab}} + \frac{h_{ab}}{S_{ab}} \frac{T\left(0\right) - T}{I^2}$$

ez alapján, ha $\frac{T}{I}$-t ábrázoljuk $\frac{T(0)-T}{I^2}$ függvényében, akkor egy olyan egyenest kapunk, aminek meredeksége $\frac{h_{ab}}{S_{ab}}$, tengelymetszete pedig $\frac{R_{ab}}{2S_{ab}}$. A transzformált adatokat az 5. ábrán



5. ábra. A hidegpont T hőmérséklete és a Peltier-elemen folyó I áramerősség kapcsolata linearizálva

ábrázoltuk, ahol az illesztett egyenes meredeksége: $m = 16,95\ A \pm 0,12\ A$, tengelymetszete pedig $b = 28,60\ \frac{K}{A} \pm 0,65\ \frac{K}{A}$. Ezekből:

$$R_{ab} = 2S_{ab}b \quad \delta R_{ab} = \delta S_{ab} + \delta b \qquad \text{valamint} \qquad h_{ab} = S_{ab}m \quad \delta h_{ab} = \delta S_{ab} + \delta m$$

vagyis $R_{ab} = 0,581\ \Omega \pm 0,015\ \omega$ és $h_{ab} = 0,1722\ \frac{W}{K} \pm 0,0018\ \frac{W}{K}$.

Ezek ismeretében kiszámolható a többi paraméter is a korábbi összefüggések használatával:

$$I_{min} = 4,49\ A \pm 0,16\ A \qquad T_{min} = 257\ K \pm 16\ K \qquad h_k = 0,0174\ \frac{W}{K} \pm 0,0049\ \frac{W}{K}$$

Látható tehát, hogy a hőmérsékleten kívül az összes mennyiség relatív hibája jelentősen csökkent, az értékeik pedig az előzőekből kiszámolt értékekkel hibahatáron belül megegyeznek. Ezek miatt, a továbbiakban ezekkel az értékekkel fogunk számolni.

7. Teljesítményegyenleg a legnagyobb hűtési állapotban

Termikus egyensúlyban a vezető által kapott és leadott teljesítmény megegyezik, így az alábbi egyenletnek kell teljesülnie:

$$\frac{\mathrm{d}Q_P}{\mathrm{d}t} - \frac{1}{2}\frac{\mathrm{d}Q_J}{\mathrm{d}t} - \frac{\mathrm{d}Q_V}{\mathrm{d}t} - \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} = 0$$

ahol Q_P a Peltier-hő, ami hűti a rendszert, Q_J a Joule-hő, ami fűti a rendszert, Q_V az a hő, ami benne áramlik, q pedig az a hő, amit a környezetből felvesz. Egyenként kiszámolva a tagokat a legnagyobb hűtés állapotában:

$$\frac{\mathrm{d}Q_P}{\mathrm{d}t} = I_{min} S_{ab} T_{min} = 11,7\ W \pm 1,2\ W$$
$$\frac{1}{2}\frac{\mathrm{d}Q_J}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{2} I_{min}^2 R_{ab} = 5,87\ W \pm 0,56\ W$$
$$\frac{\mathrm{d}Q_V}{\mathrm{d}t} = h_{ab}\left(T_0 - T_{min}\right) = 5,7\ W \pm 2,9\ W$$
$$\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} = h_k\left(T_k - T_{min}\right) = 0,73\ W \pm 0,50\ W$$

Ezek összege $-0,6\ W \pm 5,16\ W$, tehát az összeg valóban 0 közeli (a hiba ugyan nagy, de csak azért mert összeadásnál az abszolút hibákkal kell számolni, és miközben az értékek kiegyenlítődnek, a hiba nem csökken). Az is látszik, hogy a környezetből való hőfelvétel sokkal kisebb, mint a többi, ahogy azt vártuk, továbbá, hogy a Joule-hő tag és a hővezetési tag nagyon közel vannak egymáshoz, mérési hibán belül meg is egyeznek.