KLASSZIKUS FIZIKA LABORATÓRIUM

4. MÉRÉS

Termoelektromos hűtőelemek vizsgálata

Mérést végezte:
Enyingi Vera Atala
ENVSAAT.ELTE

Mérés időpontja:
2011. november 30.
Szerda délelőtti csoport

1. A mérés célja

A mérés célja a termoelektromos hűtőelem tulajdonságainak, illetve működésének megfigyelése. A mérés során termodinamikai változásokat, és azok elektromos rendszerre gyakorolt hatását figyeltük meg. A mérés két fő témája az irreverzibilis (Joule-hő, Fourier-effektus) és a reverzibilis termodinamika (Thomson-, Peltier-, Seebeck-effektus), ám ezek nem függetlenek egymástól.

2. A mérés eszközei

- Félvezető Peltier-elem
- Hőtartály vízhűtéssel
- Áramgenerátor
- Voltméter
- Hőmérő

3. A mérés elmélete

3.1. Joule-hő

Ha egy R ellenállású vezetőn I áram folyik át, akkor a vezetőben egységnyi idő alatt keletkezett hő az áram négyzetével arányos:

$$\frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{t}} = RI^2$$

3.2. Fourier-effektus

Egy inhomogén hőmérsékleteloszlású közegben a testben hőáram indul meg a melegebb részről a hidegebb rész felé. A létrejövő hőáramsűrűség - lineáris közelítésben - arányos a hőmérsékletgradienssel:

$$\vec{j} = \frac{1}{A}\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} == -\lambda \cdot \nabla T$$

ahol λ a hővezetési együttható, A a vezető keresztmetszete.
A mi mérésünk során feltételezzük, hogy a hőmérsékletváltozás lineáris.

$$\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = -\frac{\lambda A}{l}\mathrm{d}T$$

3.3. Seebeck-effektus

Két különböző vezetőből készített áramkör két sarka között, hőmérsékletkülönbség hatására, feszültség jelenik meg (U_{ab}). A magasabb hőmérsékletű pont hőmérsékletét T_m-mel jelölve, az alacsonyabb pont hőmérsékletét T_h-val jelölve származtathatjuk az alábbi mennyiséget, amelyet Seebeck-együtthatónak nevezünk.

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

3.4. Peltier-effektus

Ha két különböző anyagú vezetőből álló körön I áram folyik, akkor az áram irányától függően a vezetők egyik érintkezési pontja lehűl, míg a másik felmelegszik. Az időegység alatt fejlődött vagy elnyelődött hő:

$$\frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{t}} = P_{ab} I$$

ahol a P_{ab} arányossági tényezőt nevezzük Peltier-együtthatónak.

3.5. Thomson-effektus

Inhomogén hőmérsékleteloszlású vezetőben a rajta átfolyó áram hatására hő fejlődik.

$$\frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{t}} = L\tau\frac{\mathrm{T}}{\mathrm{x}}$$

ahol τ a Thomson-együttható. A mérés során ezzel nem foglalkoztunk, mert szobahőmérsékleten elhanyagolható.

3.6. A Kelvin-összefüggés

A fenti együtthatók közti kapcsolatot teremtik meg a Kelvin-összefüggések:

$$P(T) = TS(T)$$

$$S(T) = \int_0^T \frac{\tau(T')}{T'} \mathrm{d}T'$$

3.7. A termoelektromos hűtés

3.7.1. Időfüggés

A mérést egyensúlyi állapotban végezhetjük el, aminek beállási ideje

$$T(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}} + T_\infty$$

ahol$A$ a hőmérséklet változása, τ a beállás karakterisztikus ideje, T_∞ pedig az egyensúlyi hőmérséklet. τ meghatározható az egyensúlyi hőmérséklet ismeretében:

$$\ln(T - T_\infty) = -\frac{t}{\tau} + \ln A$$

3.7.2. A hűtés

A részletes levezetés a ([1]) könyvben található, itt csak a fontos összefüggéseket tárgyalom.
A hidegpontról időegység alatt kiszivattyúzott hő:

$$\frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = P_{\mathrm{ab}} I - \frac{1}{2} R_{\mathrm{ab}} I^2 - \Lambda_{\mathrm{ab}}(T(0) - T)$$

A Kelvin-összefüggésekkel ez alapján felírható az alábbi függvény, amit minimalizálnunk kell ahhoz, hogy a legkisebb hőmérséklethez tartozó áramértéket megkapjuk.

$$T(I) = \frac{\frac{R_{\mathrm{ab}}}{2\Lambda_{\mathrm{ab}}} I^2 + T(0)}{\frac{S_{\mathrm{ab}}}{\Lambda_{\mathrm{ab}}} I + 1}$$

$$I_{\min} = \frac{\Lambda_{\mathrm{ab}}}{S_{\mathrm{ab}}} \left(\sqrt{1 + \frac{2S_{\mathrm{ab}}^2 T(0)}{\Lambda_{\mathrm{ab}} R_{\mathrm{ab}}}} - 1 \right)$$

$$[T_{\min} = \frac{R_{\mathrm{ab}} I_{\min}}{S_{\mathrm{ab}}}$$

Ahol $\Lambda = \frac{\lambda A}{l}$.
A csak anyagfüggő paramétereket a hűtőelem jósági tényezőjének nevezzük:

$$z = \frac{S_{\mathrm{ab}}^2}{\Lambda_{\mathrm{ab}} R_{\mathrm{ab}}} = \frac{2(T(0) - T_{\min})}{T_{\min}^2}$$

A fenti összefüggésekből már számolhatjuk a Seebeck- és a Peltier-együtthatót:

$$S_{\mathrm{ab}} = \frac{U_{\min}}{T_0}$$

$$P_{\mathrm{ab}}(T_0) = U_{\min}$$

A függvényünk transzformálásából megkaphatjuk, hogy $\frac{T(I)}{I}$-t a $\frac{T(0) - T(I)}{I^2}$ függvényében ábrázoljuk, akkor egy egyenest kapunk.

$$\frac{T(I)}{I} = \frac{R_{\mathrm{ab}}}{2S_{\mathrm{ab}}} + \frac{\Lambda_{\mathrm{ab}}}{S_{\mathrm{ab}}} \frac{T(0) - T(I)}{I^2}$$

4. Mérési eredmények és kiértékelés

4.1. Az egyensúlyi hőmérséklet

A mérés első lépéseként a korábban megnyitott vízhűtés hatására beállt rendszer hőmérsékletét mérjük meg. Ez lesz az egyensúlyi hőmérsékletünk a későbbi számolások során.

$$T(I = 0) = T(0) = 14,9 \pm 0,1^\circ \text{ C} = 288,05 \pm 0,1 \text{ K}$$

Ezután megkerestem azt a helyzetet, ahol az áram lekapcsolása után a 0 V feszültséget mértem.

$$T_0 = 13,9 \pm 0,1^\circ \text{ C} = 287,05 \pm 0,1 \text{ K}$$

4.2. A hőmérséklet időfüggése

A rendszerre $2,2$ A áramot kapcsoltam, majd az idő függvényében lejegyeztem a hőmérsékletet. A mérés eredményeit a (1). táblázat tartalmazza.

t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)	t (s)	T (°C)
0	14,1	100	0,1	200	-4,5	300	-5,9
10	13,2	110	-0,6	210	-4,7	310	-6,0
20	11,2	120	-1,3	220	-4,9	320	-6,1
30	9,2	130	-1,9	230	-5,1	340	-6,2
40	7,4	140	-2,4	240	-5,3	360	-6,3
50	5,7	150	-2,9	250	-5,4	380	-6,4
60	4,4	160	-3,3	260	-5,5	410	-6,5
70	3,1	170	-3,6	270	-5,6	450	-6,6
80	2,0	180	-3,9	280	-5,7	540	-6,7
90	1,0	190	-4,2	290	-5,8	600	-6,8

1. táblázat. *A hőmérséklet az idő függvényében*

Az időmérés hibája $\Delta T = 0,1$°C, az időmérésé $\Delta t = 0,1$s.
Az adatokra exponenciális görbét illesztettem:

$$T(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}} + T_\infty$$

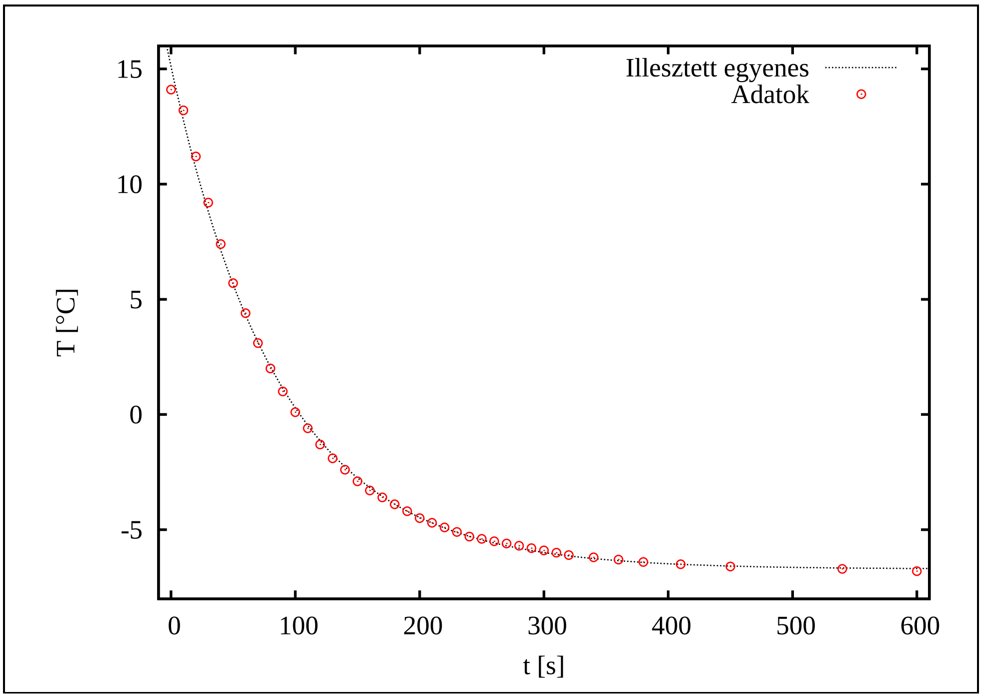
Az illesztett paraméterek:

$$A = 21,82 \pm 0,14 \text{ °C}$$

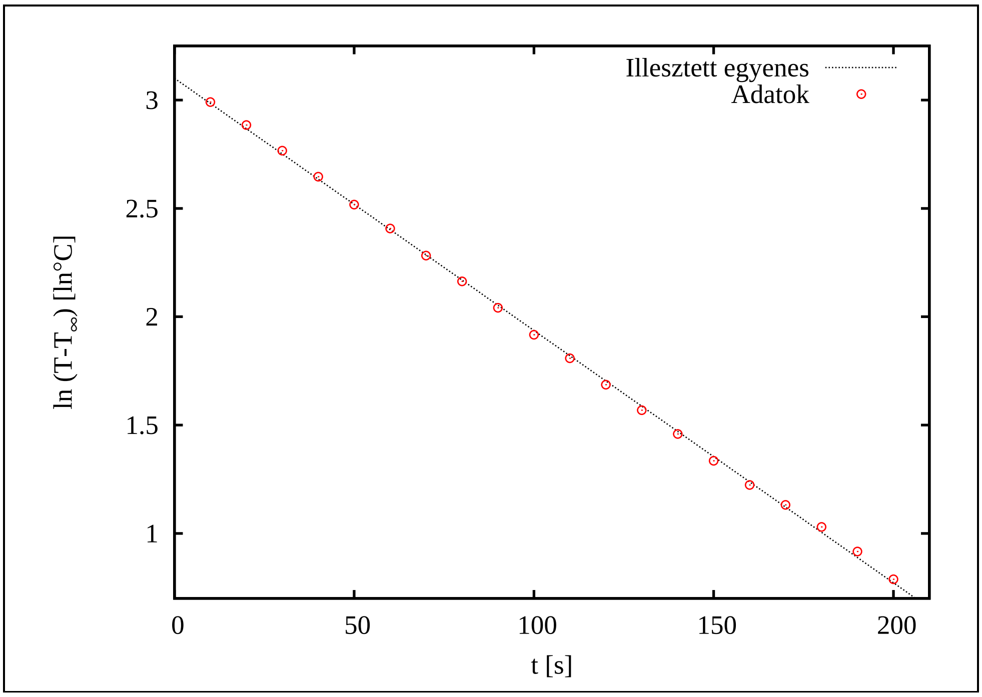
$$\tau = 88 \pm 1,1 \text{ s}$$

$$T_\infty = -6,71 \pm 0,07 \text{ °C}$$

A görbe a (1). ábrán látható.



1. ábra. *Az exponenciális görbe*



2. ábra. *A linearizált görbe*

A linearizált esetben $10 - 200$ °C között vettem figyelembe az adatokat, ekkor az illesztett egyenes egyenlete, és a paraméterek:

$$\ln(T - T_\infty) = -\frac{1}{\tau} + \ln A$$
$$\frac{1}{\tau} = 85,89 \text{ s}$$
$$\ln A = 3,101 \pm 0.007 \ln(°\text{C})$$

A laborban a mérés folyamán ezt a τ megbecsülésére használtuk, ezért a továbbiakban az exponenciális görbe illesztésekor kapott értékekkel számolok tovább.

4.3. A maximális hőmérsékletkülönbség meghatározása

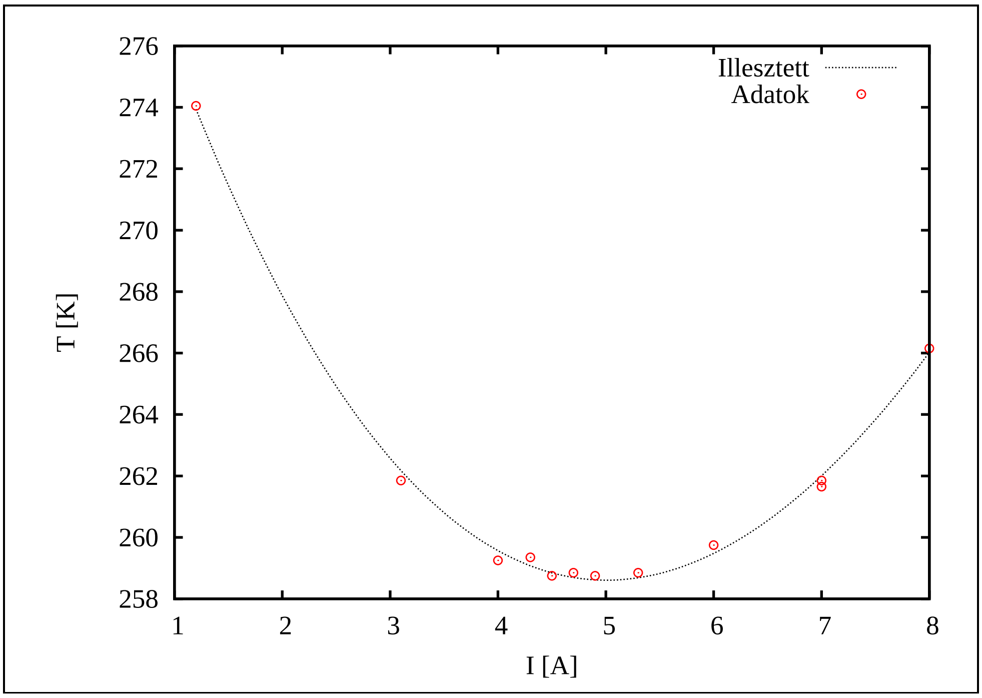
A mért adatokat a (2). táblázat tartalmazza.

I (A)	$T(0)$ (°C)	$T(0)$ (K)	U (V)
1,2	0,9	274,05	1,56
3,1	-11,3	261,85	3,05
4,0	-13,9	259,25	3,72
4,3	-13,8	259,35	3,65
4,5	-14,4	258,75	4,32
4,7	-14,3	258,85	3,92
4,9	-14,4	258,75	4,05
5,3	-14,3	258,85	4,19
6,0	-13,4	259,75	4,83
7,0	-11,3	261,85	5,21
7,0	-11,5	261,65	5,22
7,9	-11,4	261,75	5,14
8,0	-7,0	266,15	5,88

2. táblázat. *Az egyensúlyi hőmérséklet az áramerősség függvényében*

Az áramerősségmérés hibája $\Delta I = 0.2$ A, a hőmérsékleté $\Delta T = 0.1$ °C és a feszültségé $\Delta U = 0.01$ V.
Az adatoknak az alábbi parabolára kell illeszkedniük:

$$T(I) = \frac{\alpha I^2 + \beta}{\gamma I + 1}$$



3. ábra. *Az egyensúlyi hőmérséklet az áramerősség függvényében*

Az illeszte görbe paraméterei:

$$\alpha = 1,11 \pm 0.02\ \frac{\Omega \mathrm{K}}{\mathrm{W}}$$

$$\beta = 286.51 \pm 0.5\ \mathrm{K}$$

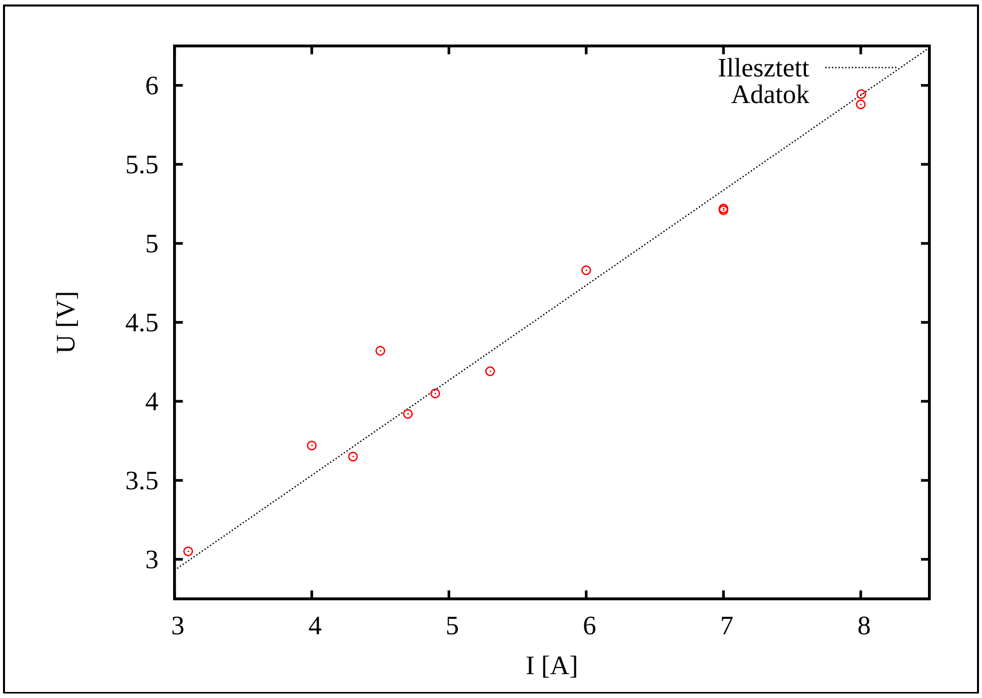
$$\gamma = 0.0431 \pm 0,0009\ \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{W}}$$

Innen kiszámolható I_{min} és az ehhez tartozó T_{min}.

$$I_{\mathrm{min}} = \frac{1}{\gamma}\left(\sqrt{1+\frac{\beta\gamma^2}{\alpha}} - 1\right) = 5,007 \pm 0,11\ \mathrm{A}$$

$$T_{\mathrm{min}} = \frac{\alpha I_{\mathrm{min}}^2 + \beta}{\gamma I_{\mathrm{min}} + 1} = 258,6 \pm 2,1\ \mathrm{K}$$

Az áram függvényében a feszültség ábrázolásakor egyenest kell illesztenünk. Az egyenest az origóba tolva, I_{min} helyettesítésével kapjuk U_{min}-t.



4. ábra. *Az áramerősség-feszültsé egyenes*

Az illesztett egyenes:

$$U(I) = AI + B$$

A paraméterek:

$$A = 0,55 \pm 0.04 \ \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}}$$

$$B = 1.44 \pm 0.2 \ \mathrm{V}$$

A számolt $U_{min} = 4,18 \pm 0.15$ V. A Seebeck-együttható:

$$S_{\mathrm{ab}} = \frac{U_{\mathrm{min}}}{T_0} = 0.0146 \pm 0.0001 \ \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{K}}$$

A T_0 Peltier-együtthatója:

$$P_{\mathrm{ab}}(T_0) = U_{\mathrm{min}} = 4,18 \pm 0.15 \ \mathrm{V}$$

A hűtőelem jósági tényezője:

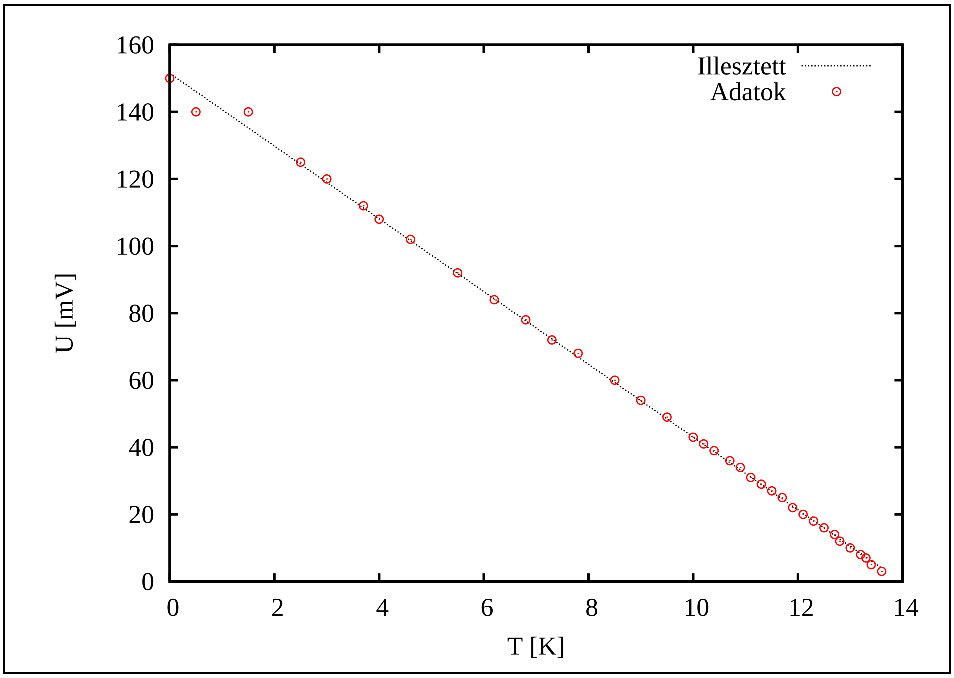
$$z = \frac{2(T(0) - T_{\mathrm{min}})}{T_{\mathrm{min}}^2} = 8,51 \cdot 10^{-4} \pm 4 \cdot 10^{-6} \ \frac{1}{\mathrm{K}}$$

4.4. A Seebeck-együttható közvetlen mérése

Az elméleti részben tárgyaltak értelmében az U_p Peltier-elemen eső feszültséget a hőmérséklet függvényben mérve, a mért pontok egy egyenesre illeszkednek, melynek meredekségének az abszolút értéke Seebeck-együttható. A rendszerre állandó áramot kapcsoltam az egyensúly beálltáig, majd kikapcsoltam, és rögzítettem az adatokat.

$T(0)$ (°C)	U (mV)	$T(0)$ (°C)	U (mV)	$T(0)$ (°C)	U (mV)
0,0	150	7,8	68	11,7	25
0,5	140	8,5	60	11,9	22
1,5	140	9,0	54	12,1	20
2,5	125	9,5	49	12,3	18
3,0	120	10,0	43	12,5	16
3,7	112	10,2	41	12,7	14
4,0	108	10,4	39	12,8	12
4,6	102	10,7	36	13,0	10
5,5	92	10,9	34	13,2	8
6,2	84	11,1	31	13,3	7
6,8	78	11,3	29	13,4	5
7,3	72	11,5	27	13,6	3

3. táblázat. *A Seebeck-együttható közvetlen mérése*



5. ábra. *A Seebeck-együttható mérésének grafikonja*

A Seebeck-együttható értéke:

$$S_{\text{ab}} = 0.01085 \pm 0.00006 \ \frac{\text{V}}{\text{K}}$$

4.5. Az áramkör jellemzői

A fenti adatokból számolhatóak az áramkör egyéb jellemzői, az ellenállás és a hővezetési együttható:

$$R_{\text{ab}} = \frac{T_{\text{min}} S_{\text{ab}}}{I_{\text{min}}} = 0.56\ \Omega \pm 11\ \text{m}\Omega$$

$$\Lambda_{\text{ab}} = \frac{S_{\text{ab}}^2}{z R_{\text{ab}}} = 0.247\ \frac{\text{W}}{\text{K}} \pm 7,9\ \frac{\text{mW}}{\text{K}}$$

Hivatkozások

[1] Böhönyey - Havancsák - Huhn: Mérések a klasszikus fizika laboratóriumban, Szerkesztette: Havancsák Károly, ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 2003.