JEGYZŐKÖNYV

04. Mérés - Termoelektromos hűtőelemek vizsgálata

Klasszikus Fizika Laboratórium

- Jegyzőkönyvet írta: Rábóczki Bence
- Jegyzőkönyvet író Neptun-azonosítója: NQQDTE

- Jegyzőkönyv leadásának időpontja: 2020. január 09.

A mérés célja

A célunk a termoelektromos hűtőelem működésének megfigyelése. A mérés során termodinamikai változásokat, és az elektromos rendszerre gyakorolt hatásukat vizsgáljuk.

Felhasznált mérőeszközök

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

A mérés elméleti háttere

Joule-hő

R ellenállású vezetőn átfolyó I erősségű áram hatására a vezetőben egységnyi idő alatt keletkező hőre (Q) a következő összefüggés igaz:

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

Fourier-effektus

Egyenletlen hőmérséklet-eloszlású közegben a testben hőáram keletkezik, amely a melegebbtől a hidegebb rész felé halad. A vezetőn időegység alatt átáramló hőmennyiség arányos a hőmérséklet gradienssel:

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

ahol A a vezető keresztmetszete és λ a hővezetési együttható. A mérés során feltesszük, hogy a hőmérséklet-változás lineáris:

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda A \frac{\Delta T}{l}$$

ahol l a vezető hossza.

Seebeck-effektus

Két különböző vezetőből összeállított áramkörben hőmérséklet-különbség hatására feszültség jelenik meg (U_{AB}). Ha a magasabb hőmérsékletű pont T_m és az alacsonyabb T_h-val jelöljük akkor az S_{AB} jelű Seebeck-együtthatót az alábbi módon adhatjuk meg:

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

Peltier-effektus

Ha két különböző vezetőből álló áramkörben I áram folyik, akkor az áram irányától függően a vezetők csatlakozási pontjai közül az egyik lehűl, a másik pedig felmelegszik. A csatlakozási pontokon az időegység alatt termelődött vagy elnyelődött hő arányos az érintkező felületen átfolyó áramerősséggel:

$$\frac{dQ}{dt} = P_{AB} \cdot I$$

ahol P_{AB} a Peltier-együttható.

Thomson-effektus

Inhomogén hőmérsékleteloszlású vezetőben a rajta átfolyó áram hatására hő fejlődik, melyre a következő összefüggés írható fel:

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

ahol τ a Thomson-együttható. Ezt a hatást a mérés során elhanyagolhatjuk.

Kelvin-összefüggések

A Seebeck-, Peltier- és Thomson-effektusok egymástól nem függetlenek. Köztük a kapcsolatot a Kelvin-összefüggések teremtik meg:

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

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

A termoelektromos hűtés

Időfüggés

A mérést egyensúlyi állapotban végezhetjük el. Az egyensúly beállásához szükséges idő:

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

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

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

A hűtés

A hidegpontról időegység alatt kiszivattyúzott hő:

$$\frac{dQ}{dt} = P_{ab}I - \frac{1}{2}R_{ab}I^2 - h_{ab}(T_0 - T)$$

ahol $h_{ab} = \frac{\lambda A}{l}$ és $T_0 = T(0)$. A Kel-vin összefüggések segítségével megkaphatjuk a függvényt, amit minimalizálnunk kell ahhoz, hogy megkapjuk a legkisebb hőmérséklethez tartozó áramértéket.

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

$$I_{min} = \frac{h_{ab}}{S_{ab}} \cdot \left[\sqrt{1 + \frac{2S_{ab}^2 T(0)}{h_{ab}R_{ab}}} - 1\right]$$

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

A csak anyagfüggő paramétereket a Peltier-elem jósági számának nevezzük:

$$z = \frac{2[T(0) - T_{min}]}{T_{min}^2}$$

A Seebeck- és Peltier-együtthatókat pedig az alábbi módon számolhatjuk:

$$S_{ab} = \frac{U_{min}}{T}$$

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

Ha $\frac{T(I)}{I}$-t ábrázoljuk $\frac{T(0)-T(I)}{I^2}$ függvényében akkor egy egyenest kapunk, melynek egyenlete:

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

Mérési adatok és kiértékelés

Az egyensúlyi hőmérséklet

Először is meg kell mérnünk a a vízhűtés hatására beállt egyensúlyi hőmérsékletet.

$$T(0) = 20.8 \pm 0.1 \text{ °C} = 293.95 \pm 0.1 \text{ K}$$

És azt a helyet ahol $U = 0$ V feszültséget lehet mérni az áram lekapcsolása után:

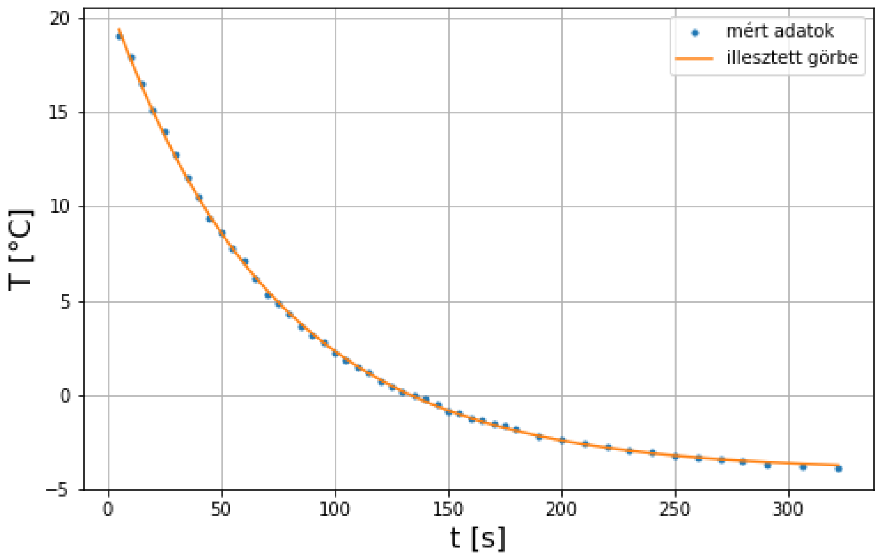
$$T_0 = 20.4 \pm 0.1 \text{ °C} = 293.55 \pm 0.1 \text{ K}$$

A hőmérséklet időfüggése

Az elektronikus úton kapott adatokat az alábbi táblázat tartalmazza:

t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]	t [s]	T [°C]
5	19	65	6.2	125	0.5	200	-2.3
10	17.9	70	5.4	130	0.2	210	-2.5
15	16.5	75	4.9	135	0.0	220	-2.7
20	15.1	80	4.3	140	-0.2	230	-2.9
25	14.0	85	3.7	145	-0.5	240	-3.0
30	12.8	90	3.2	150	-0.8	250	-3.2
35	11.5	95	2.8	160	-1.2	260	-3.3
40	10.5	100	2.3	165	-1.3	270	-3.4
45	9.4	105	1.9	170	-1.5	280	-3.5
50	8.6	110	1.5	175	-1.6	291	-3.6
55	7.8	115	1.2	180	-1.8	306	-3.7
60	7.1	120	0.8	190	-2.1	322	-3.8

Az adatokra exponenciális görbét illesztettem:



Az egyenes egyenlete:

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

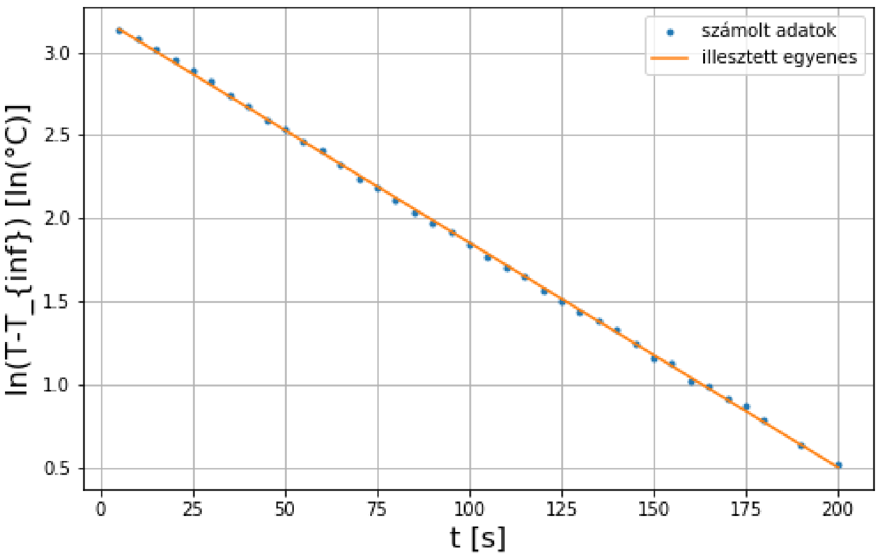
ahol az illesztésből kapott paraméterek:

$$A = 25.006 \pm 0.059 \text{ °C}$$

$$\tau = 72.995 \pm 0.435 \text{ s}$$

$$T_\infty = -3.987 \pm 0.039 \text{ °C}$$

A görbét $t = [5, 200]$ intervallumon linearizáltam. Az így kapott eredményekre egyenest illesztettem:



Az egyenes egyenlete:

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

Az illesztésből kapott paraméterek:

$$-\frac{1}{\tau} = -0.01353 \pm 0.00004 \text{ 1/s}$$

$$\ln A = 3.2079 \pm 0.0048 \ln(°\mathrm{C})$$

És végül a karakterisztikus idő:

$$\tau = 73.91 \text{ s}$$

A két különböző módszerrel kapott τ közel áll egymáshoz, az eltérést a számolási pontatlanságok okozzák.

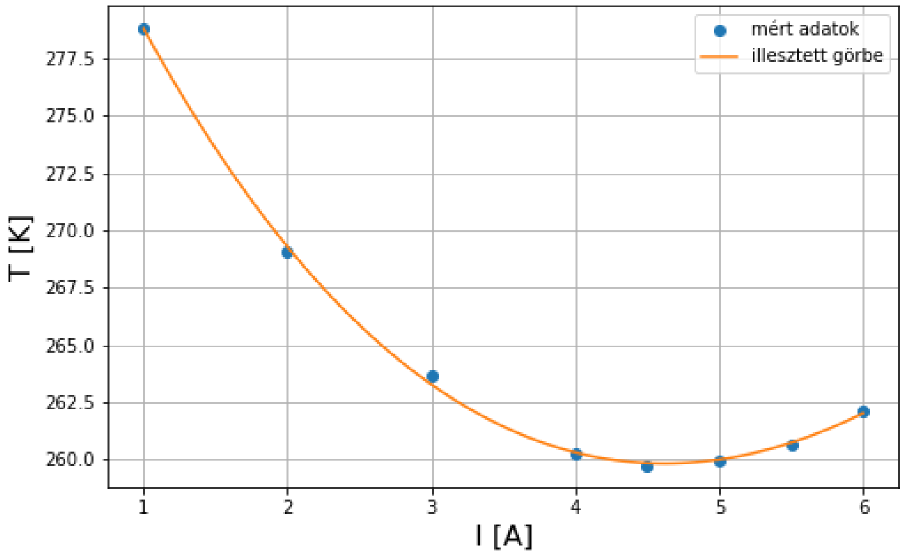
A maximális hőmérséklet-különbség meghatározása

A kapott adatokat az alábbi táblázatban foglaltam össze:

I [A]	T [°C]	T [K]
1.0	5.7	278.85
2.0	-4.1	269.05
3.0	-9.5	263.65
4.0	-12.9	260.25
4.5	-13.4	259.75
5.0	-13.2	259.95
5.5	-12.5	260.65
6.0	-11	262.15

Az adatokra parabola illeszthető, melynek az egyenlete a következő:

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



Az illesztett görbe paraméterei:

$$\alpha = 1.525 \pm 0.042 \ \frac{\Omega \mathrm{K}}{\mathrm{W}}$$

$$\beta = 292.41 \pm 0.45 \ \mathrm{K}$$

$$\gamma = 0.05425 \pm 0.0011 \ \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{K}}$$

Belőlök már kiszámolható I_{min} és T_{min} (ahol a hőmérséklet-különbség a maximális) az alábbi összefüggésekkel:

$$I_{min} = \frac{1}{\gamma}\left[\sqrt{1+\frac{\beta\gamma^2}{\alpha}} - 1\right] = 4.6217 \pm 0.2242 \text{ A}$$

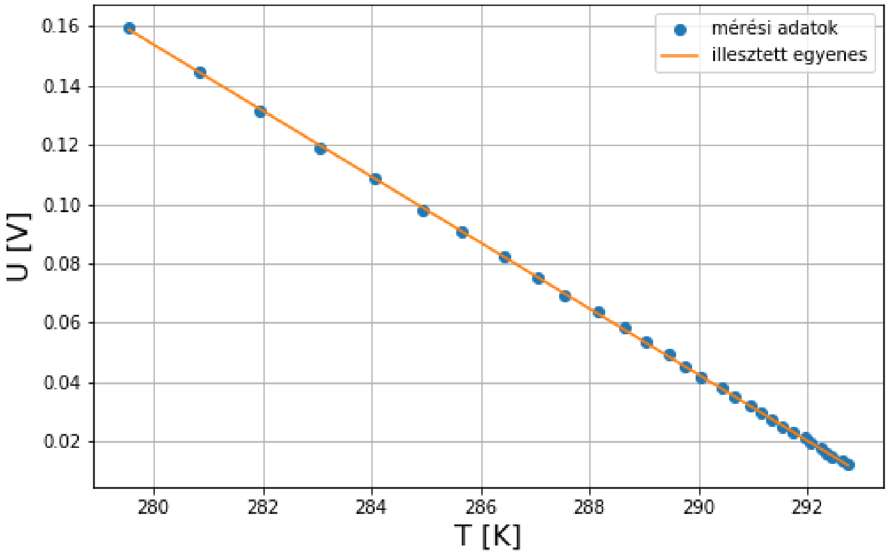
$$T_{min} = \frac{\alpha I_{min}^2 + \beta}{\gamma I_{min} + 1} = 259.8362 \pm 0.6457 \text{ K}$$

A Seebeck-együttható közvetlen mérése

A Seebeck-együtthatót nagy pontossággal meghatározhatjuk, ha hőmérsékletkülönbséget hozunk létre a Peltier-elem két oldalán és megmérjük az oldalak közti potenciálkülönbséget úgy, hogy közben a testen nem folyik át áram. Ha ezt többször megismételjük különböző hőmérsékletekkel akkor az adatokra egyenest illeszthetünk amelynek a meredeksége egyenlő lesz a Seebeck-együtthatóval. Az adattáblázat:

T [°C]	U [mV]	T [°C]	U [mV]	T [°C]	U [mV]
6.4	159.91	15.9	53.41	18.9	19.33
7.7	144.41	16.3	49.19	19.1	17.70
8.8	131.73	16.6	45.18	19.2	16.25
9.9	119.08	16.9	41.51	19.3	14.87
10.9	108.52	17.3	38.16	19.5	13.57
11.8	98.23	17.5	35.18	19.6	12.33
12.5	90.99	17.8	32.22	-	
13.3	82.49	18.0	29.57	-	
13.9	75.16	18.2	27.49	-	
14.4	69.53	18.4	25.01	-	
15.0	63.58	18.6	22.95	-	
15.5	58.18	18.8	21.07	-	

Az illesztett egyenes (illesztés előtt a mértékegységeket átváltottam):



És ebből a Seebeck-együttható:

$$S_{ab} = 0.01113 \pm 0.00002 \ \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{K}}$$

Az áramkör további jellemzői

Az ellenállás:

$$R_{ab} = \frac{T_{min} S_{ab}}{I_{min}} = 0.6257 \pm 0.0330 \ \Omega$$

A minimumfeszültség és a Peltier-együttható:

$$P_{ab}(T_0) = U_{min} = S_{ab} \cdot T_0 = 3.2672 \pm 0.2189$$

A hűtőelem jósági tényezője:

$$z = \frac{2 \cdot (T(0) - T_{min})}{T_{min}^2} = 0.0010106 \pm 0.0000522 \ \frac{1}{\mathrm{K}}$$

A hővezetési együttható:

$$h_{ab} = \frac{S_{ab}^2}{z R_{ab}} = 0.1959 \pm 0.02115 \ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{K}}$$

Hibaszámítás

Az illesztett paraméterek hibáját az illesztőprogram adta meg, erre a célra Pythont használtam. Az olyan összefüggésekben amelyek a változóknak csak szorzatát és/vagy hányadosát tartalmazták a forrásként megjelölt könyv 1.2.10-es pontjában kifejtett hibaszámítási módszert alkalmaztam. A többi mennyiség esetén szisztematikus hibát számoltam.

Diszkusszó

A mérést sajnos a járványhelyzet iatt nem volt lehetőségem szamélyesen elvégezni, de igyekeztem a kapott adatokat a legjobb tudásom szerint feldolgozni ehhez a jegyzőkönyvhöz. A hibák nagyságai, és az adatokra szépen illeszkedő görbék alapján a mérést sikeresnek mondanám.

Felhasznált irodalom

- Böhönyey - Havancsák - Huhn: Mérések a klasszikus fizika laboratóriumban, szerkesztette: Havancsák Károly, ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 2003.