

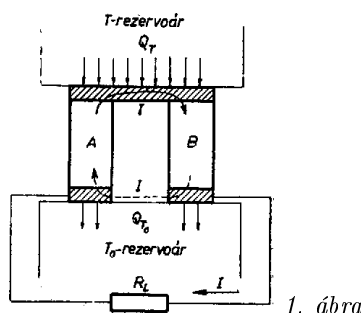
Termoelektromos jelenségek II.

3. Peltier–effektus

Az eddigiekben¹ csak arról volt szó, hogy a hőmérsékletkülönbség hatására a termopárról elektromos energiát nyerhetünk, azonban nem beszéltünk arról, hogy az energiamegmaradás értelmében ezt az energiát valamilyen forrásból fedezni kell. Nyilvánvalóan ez valami módon a T hőmérsékletű hely környékén levő hőenergia rovására történik, de mielőtt rátérnénk annak pontos tisztázására, hogy is megy végbe az energia átalakulás, a könnyebb beszédmód kedvéért vezessünk be egy új fogalmat.

Képzeljünk el egy nagyon nagy hőkapacitású, T hőmérsékletű testet. Ha ezzel érintkezésbe hozunk egy más hőmérsékleten levő kis hőkapacitású testet, akkor az utóbbi test a kiindulási hőmérsékletétől függően lehűl vagy felmelegszik, de az érintkezés után az egész rendszer a lényegében változatlan T hőmérsékleten lesz, hisz az a kis hőmennyiség, amelyet az első test (előjelesen véve) nyer, nem képes észrevehetően megváltoztatni annak hőmérsékletét. (Pl. egy kád vízbe beleteszünk egy kis fémgolyót.) Ezt az esetet idealizálva bevezethetjük a hőtartály (hőrezervoár) fogalmát.

Egy testet akkor nevezünk hőrezervoárnak, ha tetszés szerinti hőmennyiség ki-, ill. bevitele nem változtatja meg a hőmérsékletet. A természetben ilyen nincs, de nagyon sok esetben jó közelítéssel megvalósítható. A fogalom előnye, hogy megkönnyíti az elméleti megfontolásokat, ugyanis ha a környezetet hőrezervoárokból tehetjük össze, akkor minden figyelmünket a vizsgált rendszerre koncentrálhatjuk.



Helyezzük el a termopárt egy T és egy T_0 ($T > T_0$) hőmérsékletű rezervoár közé. Mint azt Peltier már 1834-ben megállapította, nincs ellentmondás az energiamegmaradással, ugyanis a forrasztási helyen az átfolyó elektromos áram hatására

$$Q_T = Q_{AB} = \pi_{AB}(T) \cdot I$$

hő vonódik el másodpercenként a T hőmérsékletű rezervoárból, (Q_T -t *Peltier hőnek* szokás nevezni). Az elvont hő tehát arányos az átfolyó árammal, a π arányossági tényező az ún. relatív Peltier–együttható, amely az anyagi minőségen kívül már függ a hőmérséklettől, mint azt William Thomson (Lord Kelvin) megállapította:

$$\pi_{AB} = S_{AB} \cdot T,$$

ahol T a Kelvin fokokban mért hőmérséklet. Fontos még azt megjegyezni, hogy az indexben levő A és B sorrendje az áram irányával egyezik meg, ezért fordított áramirány esetén $S_{BA} = -S_{AB}$ miatt Q_T előjele is megfordul. Éppen ez az eset valósul meg a T_0 hőmérsékletű végnél, ugyanis itt az áram az A anyagba befelé, ill. a B anyagból kifelé folyik. (Az áram irányának a pozitív töltések haladási irányát tekintjük.) Így a T_0 hőmérsékletű rezervoárból időegység alatt kivett hőmennyiség:

$$Q_{T_0} = Q_{BA} = \pi_{BA} \cdot I = -\pi_{AB} \cdot I = -S_{AB} T_0 I.$$

Vagyis ebből negatív hőmennyiséget vettünk ki, tehát $-Q_{T_0} = S_{AB} \cdot T_0 \cdot I$ hőmennyiséget szállítottunk át ebbe a rezervoárba.

Ha $T > T_0$, akkor persze $L = Q_T + Q_{T_0} = S_{AB} I (T - T_0) > 0$. Ezek alapján a termoelektromos áramfejlesztést energetikai szempontból a következőképpen írhatjuk le. Ha a termopárra egy terhelést kötünk, akkor a termofeszültség következtében megindul az áram, amelynek hatására a Peltier–effektus miatt a meleg végnél levő rezervoárból időegység alatt Q_T hőmennyiség vonódik ki, ennek a hőmennyiségnek egy része ugyancsak a Peltier–effektus miatt hasznos munkavégzés nélkül a hideg végnél levő rezervoárba vándorol, de a különbség már mint hasznos teljesítmény jelentkezik a terhelésen. Rögtön látható, hogy ezen idealizált termopár hatásfoka:

$$\eta_{\text{generátor}} = \frac{Q}{L_T} = \frac{Q_T + Q_{T_0}}{Q_T} = \frac{T - T_0}{T}.$$

Vegyük észre, hogy ez a mikroszkopikus elektromos áram közbeiktatásával létrejövő hőszállítás teljesen új jelenség. Ezt nem szabad összetéveszteni a közönséges hővezetéssel vagy a Joule–hővel; amely akkor lép fel, ha az áram egy ellenálláson halad át. Ugyanis csak a fogalmak tisztázása érdekében vettünk először olyan idealizált esetet, hogy a

¹ A cikk első részét l. a Középiskolai Matematikai Lapok 1965. januári számában

termopárt alkotó anyagok ellenállása és hővezető-képessége zérus, a későbbiekben persze ezeket is figyelembe kell venni.

Hogy ez a Peltier-effektus következtében fellépő hőszállítás mennyire eltér az utóbbitól, azt jól szemlélteti a Peltier-hő reverzibilis (megfordítható) jellege. Eddig a termopáron csak a termofeszültség által létrehozott áram hatását említettük, de kérdezheti valaki, mi történik, ha a passzív terhelés helyett egy telepet kapcsolunk a termopárra, mégpedig olyat, amely által létrehozott áram iránya ellentétes az E_{AB} termofeszültség által létrehozott áram irányával. Mivel a Peltier-effektus ekkor is fellép, ezért a T hőmérsékletű végnél levő rezervoárból

$$Q_T = \pi_{BA} \cdot I = \pi_{AB} \cdot (-I) = -S_{AB} \cdot T \cdot I$$

hőmennyiség „vonódik el”, vagyis $-S_{AB} \cdot T \cdot I$ hőmennyiség szállítódik a T -rezervoárba. Persze a fordított áramirány a T_0 hőmérsékletű végnél is fordított helyzetet teremt, vagyis most a T_0 rezervoárból $Q_{T_0} = S_{AB} \cdot T_0 \cdot I$ hőmennyiség vonódik el. Vegyük csak jobban szemügyre ezt az érdekes jelenséget, a Peltier-effektus miatt áram hatására az a furcsa helyzet állt elő, hogy a hidegebb T_0 rezervoárból hőt szállíthatunk a melegebb T -rezervoárba, vagyis ha a termopárt nem az idealizált hőrezervoárok közé helyeznénk, akkor a meleg vége tovább melegedne és a hidegebb pedig még tovább hűlne. Nehogy azt higgye valaki, hogy így örökmozgót készíthetünk, ugyanis a hő nem magától vándorolt a hidegebb helyről a melegebbre – amit a termodinamika főtételei tiltanak – hanem nekünk kellett elég tekintélyes elektromos energiát befektetni, hogy ez a furcsa helyzet előálljon. De ha belenyugszunk abba, hogy hűteni is csak energiabefektetés árán lehet, akkor eredményünk roppant hasznossá válik, ugyanis termopárunk nem más, mint az elképzelhető legegyszerűbb hűtőgép. Gondoljuk csak el, nincs benne semmilyen mozgó vagy cseppfolyós alkatrész, mint a közönséges hűtőszekrényekben, csak a két végét kell egy egyenáramforrásra rákapcsolni és megfelelő geometriai elrendezés esetén már kész is a hűtőszekrény.

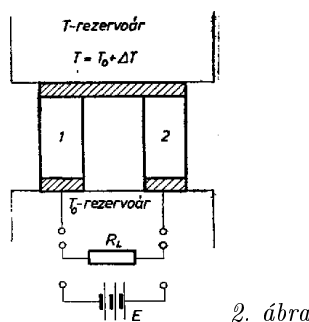
4. Termoelektromos áramforrás

Mielőtt a konkrét gyakorlati alkalmazásokra rátérnénk, lépünk egy lépéssel közelebb a valóságos viszonyokhoz. Vagyis tekintsünk olyan termopárt, amelynek már számottevő ellenállása és hővezető-képessége van.

Legyenek a termoelektromosan aktív 1 és 2 anyagú rudak adatai:

Hosszúság:	l_1	ill.	l_2	(cm)
keresztmetszet:	A_1	”	A_2	(cm ²)
fajlagos hővezető-képesség	k_1	”	k_2	(W/cm · K°)
fajlagos ellenállás:	ϱ_1	”	ϱ_2	(Ω cm)
teljes hővezető-képesség ($K = kA/l$):	K_1	”	K_2	(W/K°)
teljes ellenállás ($R = \varrho l/A$):	R_1	”	R_2	(Ω)
relatív Seebeck-együttható:	S_{12}	(V/K°)		

Egyszerűség kedvéért feltesszük, hogy mindezen adatok függetlenek a hőmérséklettől.



2. ábra

Legyen $T > T_0$. Ha az R_L terhelést kötjük a körbe, akkor a hőmérséklet-különbség által a termopáron $S_{12} T$ termofeszültség hatására I áram keletkezik. Határozzuk meg az egyensúlyi állapot jellemzőit.

A T hőmérsékletű végen az áram következtében Q_p Peltier-hő abszorbeálódik, a hővezetés következtében Q_k hőmennyiség távozik el, másrészt erre a végre áramlik az egyes ágak ellenállása következtében fellépő Joule-hő fele: $1/2 \cdot Q_j$ (ez egyrészt következik a szemléletes képből, másrészt pedig szigorúan igazolható, de ettől itt most eltekintünk).

Tehát végeredményben a T -rezervoárból kivett hőmennyiség:

$$Q_T = Q_p + Q_k - 1/2 \cdot Q_j.$$

A jobboldalon álló hőmennyiségeket fejezzük ki az ismert paraméterekkel: $Q_p = \pi_{12} \cdot I = S_{12} \cdot I \cdot T$, $Q_j = I^2(R_1 + R_2)$, $Q_k = (K_1 + K_2) \cdot (T - T_0)$. Ebből

$$Q_T = S_{12} \cdot I \cdot T + (K_1 + K_2) \Delta T - 1/2 \cdot I^2(R_1 + R_2).$$

Adott generátor esetén – mint közismert – a maximális teljesítmény akkor vehető ki, ha a generátor belső ellenállása egyenlő a terheléssel, vagyis jelen esetben $R_L = R_1 + R_2$.

Ekkor a kivethető maximális teljesítmény, felhasználva, hogy az áram értéke

$$I = \frac{S_{12}\Delta T}{R_L + R_1 + R_2} = \frac{S_{12}\Delta T}{2(R_1 + R_2)}, \quad P_{\max} = \frac{(S_{12}\Delta T)^2}{4(R_1 + R_2)}.$$

Mivel ezt a teljesítményt a T -rezervoárból kivett hőenergia terhére nyerjük, ezért a hatásfokot célszerű $\eta_{\text{gen}} = \frac{P_{\max}}{Q_T}$ alakban definiálni.

Behelyettesítve η_{gen} kifejezésébe:

$$\eta_{\text{gen}} = \frac{S_{12}^2 \Delta T^2 / 4(R_1 + R_2)}{S_{12}^2 \Delta T \cdot T / 2(R_1 + R_2) - S_{12}^2 \Delta T^2 / 8(R_1 + R_2) + (K_1 + K_2) \Delta T}.$$

Rendezve:

$$\eta_{\text{gen}} = \frac{\Delta T}{2T - 1/2 \cdot \Delta T + 4 \frac{(K_1 + K_2)(R_1 + R_2)}{S_{12}^2}}.$$

Rögzített T és T_0 esetén η_{gen} csak akkor lesz maximális, ha $\frac{(K_1 + K_2)(R_1 + R_2)}{S_{12}^2}$ minimális, vagyis olyan anyagokat célszerű alkalmazni, amelyeknek nagy a Seebeck-együtthatója, kicsi az ellenállása és a hővezető-képessége. Gyakorlatban sajnos általában ezek a tulajdonságok nem járnak együtt, mert kis hővezető-képességhez általában nagy ellenállás tartozik, a nagy Seebeck-együttható pedig ugyancsak nagyobb ellenállásokkal jár együtt.

5. Termoelektromos hűtés

A T_0 hőmérsékletű végnél kapcsoljunk E feszültséget a termopárra. Legyen $T < T_0$. Ha megfelelő a telep polaritása, akkor az eszköz hűtőgépként fog működni.

A T hőmérsékletű (jelen esetben hideg) végre beáramló hőmennyiségek:

a T -rezervoárból kivett Q_T ,

a T_0 rezervoárból a hővezetés által ideszállított Q_k , az egyes ágakban keletkező Joule-hő fele.

($Q_k = (K_1 + K_2)(T_0 - T) = -(K_1 + K_2)\Delta T$, hogy jelölésünk az előzőkkel azonos legyen, továbbra is $\Delta T = T - T_0$.)

Ezekkel tart egyensúlyt az áram következtében abszorbeálódott Peltier hő:

$$Q_p = Q_T + Q_k + 1/2 \cdot Q_j.$$

Ebből

$$Q_T = Q_p - 1/2 \cdot Q_j - Q_k = S_{12}IT - 1/2 \cdot I^2(R_1 + R_2) + (K_1 + K_2)\Delta T.$$

Ha jól megnézzük, láthatjuk, hogy ez az egyenlet alakilag teljesen azonos a termoelektromos áramforrás esetén kapott egyenlettel. Most azonban a minél erősebb hűtés elérése érdekében Q_T , a T -rezervoárból kivett hőmennyiség az érdekes.

Adott I áram esetén a termopárral maximálisan olyan hőmérsékletkülönbség tartható fenn, amelyre $Q_T = 0$. Ekkor

$$(T_0 - T)_{\max} = |T - T_0|_{\max} = \Delta T_{\max} = \left| \frac{1/2 \cdot I^2(R_1 + R_2) - S_{12}IT}{K_1 + K_2} \right|.$$

A hűtés hatásfokának a következő kifejezést tekinthetjük:

$$\eta_{\text{hűtés}} = \frac{\text{\textit{T-rezervoárból kivett hőmennyiség}}}{\text{\textit{betáplált elektromos teljesítmény}}}.$$

A betáplált elektromos teljesítmény két dologra fordítódik: egyrészt az $I^2(R_1 + R_2)$ Joule-hő fejlesztésére, másrészt arra, hogy a hőmérsékletkülönbség miatt fellépő $S_{12}I(T_0 - T)$ Seebeck-feszültség ellenében I áramot hajtson át. Tehát:

$$\eta_{\text{hűtés}} = \frac{S_{12}IT - 1/2 \cdot I^2(R_1 + R_2) + (K_1 + K_2)\Delta T}{S_{12}I(T_0 - T) + I^2(R_1 + R_2)}.$$

6. Gyakorlati alkalmazások.

A termoelemek legelterjedtebb felhasználási területe a hőmérsékletmérés. Előnyük, hogy rendkívül kis hőkapacitásúak, így nem hamisítják meg a mért értékeket, másrészt pedig precíz feszültségmérés esetén egészen parányi kis hőmérséklet-különbségeket is ki lehet velük mutatni.

Van azonban ennél sokkal izgalmasabb alkalmazásuk is.

Napjaink egyik fő kérdése az atomenergia elektromos árammá való átalakítása. A szokásos atomerőművekben ez két lépésben történik, a maghasadás során felszabaduló energiát előbb a vízgőz hőenergiájává alakítják és ezzel hajtják az áramfejlesztő generátorokat. De a termoelektromos áramforrás segítségével éppen az egyik legkritikusabb szakaszt, a rádióaktív vízgőzzel végzett munkát takaríthatjuk meg, mert ennek segítségével a reaktorban keletkező hőenergiát közvetlenül alakíthatjuk át villamos energiává. A nukleáris termoelektromos generátor egyik nagy előnye a roppant egyszerű és ezért megbízható mechanikai szerkezet, hisz nincs benne egyetlen mozgó alkatrész sem.

Ez teszi lehetővé azt is, hogy mesterséges holdakon ilyen áramforrást használjanak. Ilyen áramforrással volt felszerelve például az Amerikában néhány évvel ezelőtt felbocsátott **SNAP–III.** mesterséges hold, az áramforrás teljesítménye néhány watt volt.

A Szovjetunióban pedig már termopárokból olyan áramgenerátort készítettek, amely kilowatt nagyságrendű teljesítményt szolgáltat. Az ilyen generátorok elterjedésének korlátot szab persze az, hogy jelenleg a megfelelő anyagok előállítása nagyon költséges, és a hatásfok sem jobb a konvencionális eszközöknél.

Hasonló nagy lehetőségeket rejt magában a Peltier–effektuson alapuló termoelektromos hűtés is. Ilyen elven működő hűtőszekrények már ténylegesen üzemelnek, pl. a **TU–104**-es repülőgép felszerelése ilyen tekintetben is úttörő volt.

Mivel az áramirány megfordítása a hőszállítás irányát is megfordítja, ezért elképzelhető az, hogy az ilyen „hűtőszekrényt” kályhaként használják. Képzeljük el ugyanis a következő légkondicionáló berendezést. Pl. az ablak alatt helyezzük el a termopárokat úgy, hogy az egyik végük a szobában, a másik pedig az utcán legyen, ekkor nyáron olyan irányú áramot vezetünk át a termopáron, hogy bentről kifelé, télen pedig olyat, hogy kintről befelé történjen a hőszállítás. Persze ennek csak akkor van értelme, ha megfelelő hatásfokot sikerül elérni, de ismerve a félvezetők terén végzett kutatások rohanó tempóját, optimizmussal tekinthetünk a jövőbe.

Vesztergombi György