

1 Úvod

1.1 Úkol měření

V režimu TEG (thermoelectric generator):

- Změřte závislost termoelektrického napětí na teplotě a vynesete ji do grafu
- Z naměřené závislosti vypočtete Seebeckův koeficient
- Vypočítejte účinnost Peltierova článku v režimu TEG a vypočtenou hodnotu porovnejte s účinností vratně pracujícího tepelného stroje

V režimu TEC (thermoelectric cooler):

- změřte časovou závislost teploty na obou stranách Peltierova článku a vynesete ji do grafu

1.2 Popis měření

Peltierův článek byl umístěn mezi blokem pro vodní chlazení, kterým byla na jedné straně udržována přibližně stálá teplota, a mezi nádobou, jež byla tepelně izolována od okolí. Na obou stranách byla také umístěna teplotní sonda digitálního teploměru, díky níž bylo možné přesně sledovat aktuální teplotu.

V první části měření byla do nádoby na jedné straně článku nalita vroucí voda a v časových intervalech dvě minuty byly měřeny teploty na obou stranách, napětí článku naprázdno a také proud nakrátko.

V druhé části byla do izolované nádoby umístěna voda přibližně o teplotě okolí. Článkem jsme pouštěli konstantní proud o hodnotě čtyři ampéry a v časových intervalech jedna minuta byly odečítány teploty na obou stranách.

1.3 Použité přístroje

Název přístroje	Měřená veličina	Výrobce a typ	Rozsah	Nejmenší dílek	Přesnost
Digitální teploměr	Teploty na obou stranách článku	Greisinger electronic GmbH, GMH 1170	-65,0°C až 199,9°C	0,1°C	±0,05% ±1 digit
Digitální multimetr – jako voltmetr	Napětí na článku	Mastech MY65	20V	1mV	±0,1% ±3 digity
Digitální multimetr – jako ampérmetr	Proud nakrátko (TEG), proud článkem (TEC)	Mastech MY65	10A	1mA	±2% ±10 digitů
Digitální stopky	Čas od začátku experimentů	Casio	-	0,01 s	-
Zdroj proudu	-	Phywe	-	-	-

2 Naměřené hodnoty

2.1 Měření v režimu TEG

V jednotlivých časových intervalech byly naměřeny tyto hodnoty.

Čas od začátku experimentu [min]	Teplota strany s ohřátou vodou [°C]	Teplota chlazené strany [°C]	Napětí naprázdno [V]	Proud nakrátko [A]
0	60,1	25,9	-1,584	-0,45
2	55,4	26,2	-1,332	-0,402
4	51,1	25,9	-1,154	-0,333
6	47,2	25,7	-0,99	-0,3
8	44	25,5	-0,861	-0,254
10	41,6	25,3	-0,752	-0,227
12	39,3	25,2	-0,66	-0,202
14	37,3	25	-0,579	-0,153
16	35,8	24,9	-0,515	-0,143
18	34,4	24,8	-0,455	-0,142

2.2 Měření v režimu TEC

Při konstantním proudu článkem $I=4A$ byly naměřeny tyto hodnoty. Nejnižší dosažená teplota je vyznačena tučně.

Čas od začátku experimentu [min]	Teplota chladné strany [°C]	Teplota horké strany [°C]
0	24,6	23,9
1	20,6	31,4
2	18,9	32,4
3	18,1	32,5
4	17,4	32,5
5	16,7	32,4
6	16,2	32,4
7	15,7	32,6
8	15,1	32,6
9	14,6	32,5
10	14,1	32,6
11	13,8	32,6

3 Zpracování hodnot

3.1 V režimu TEG

3.1.1 Graf závislosti

Při měření v režimu TEG bylo v jednotlivých časech dosaženo při vypočtených rozdílech teplot uvedeného termoelektrického napětí. Při měření byl článek připojen k voltmetru v opačné polaritě, znaménko u napětí bylo tedy oproti naměřeným hodnotám otočeno.

Čas od začátku experimentu [min]	Rozdíl teplot [°C]	Termoelektrické napětí [V]	Nejistota měření termoelektrického napětí [V]
0	34,2	1,584	0.004584
2	29,2	1,332	0.004332
4	25,2	1,154	0.004154
6	21,5	0,99	0.00399
8	18,5	0,861	0.003861
10	16,3	0,752	0.003752
12	14,1	0,66	0.00366
14	12,3	0,579	0.003579
16	10,9	0,515	0.003515
18	9,6	0,455	0.003455

Graf závislosti termoelektrického napětí na teplotě je přiložen. Pro jeho vytvoření byl použit Univerzální nástroj pro kreslení grafů na serveru Herodes, pro aproximaci byla zvolena metoda pomocí polynomu prvního stupně.

Při vytváření grafu je třeba počítat s nejistotou měření termoelektrického napětí (typ B), kterou pro pro použitý multimetr v daném rozsahu vypočteme jako:

$$u_{bi} = U_{ti} \frac{0,1}{100} + 0,003 \text{ V}$$

kde u_i je nejistota měření a U_{ti} je naměřená hodnota termoelektrického napětí.

3.1.2 Výpočet Seebeckova koeficientu

Pro výpočet uvažujeme dle instrukcí lineární závislost mezi termoelektrickým napětím a rozdílem teplot na článku. Matematicky lze závislost tedy vyjádřit jako

$$U_t = \alpha \Delta T$$

kde U_t je termoelektrické napětí, ΔT je rozdíl teplot a α je hledaný Seebeckův koeficient.

Pomocí skriptu na serveru Herodes, který naměřené hodnoty pomocí metody nejmenších čtverců proloží přímkou, jsme zjistili tuto hodnotu pro Seebeckův koeficient:

$$\alpha = 0.045293383129783 \text{ V} \cdot \text{K}^{-1}$$

Pomocí skriptu jsme také zjistili kombinovanou nejistotu měření:

$$u_c = 0.00016480346081077 \text{ V} \cdot \text{K}^{-1}$$

3.1.3 Účinnost článku

Pro teplotu v čase experimentu $t = 2 \text{ min}$ (řádek vyznačen tučně v tabulce měření) vypočteme účinnost článku a porovnáme ji s maximální účinností vratně pracujícího tepelného stroje. Účinnost článku vypočteme pomocí vzorce:

$$\eta = \frac{P_E}{P_H}$$

kde η je účinnost, P_E je odhad maximálního výkonu dodávaného článkem do zátěže a P_H je tepelný výkon procházející horkou stranou do článku.

Výkon P_E můžeme odhadnout pomocí vztahu:

$$P_E = \frac{1}{4} U_0 I_k$$

kde U_0 je napětí naprázdno a I_k je proud nakrátko ve vybraném čase experimentu.

Tepelný výkon procházející horkou stranou do článku P_H určíme přibližně pomocí teplot horké strany ze dvou měření:

$$P_H \approx \frac{C_{\text{celk}} (T_{H1} - T_{H2})}{t_2 - t_1}$$

kde C_{celk} je celková tepelná kapacita nádoby s vodou na horké straně (pro naši konfiguraci je zadána $C_{\text{celk}} = 1121 \text{ JK}^{-1}$), T_{H1} a T_{H2} jsou teploty ve dvou časech experimentu, t_1 a t_2 jsou odpovídající časy experimentu. Pro náš případ vybereme $t_1 = 0$ a $t_2 = 120 \text{ s}$.

Maximální možnou účinnost vratně pracujícího tepelného stroje vypočítáme pomocí vzorce:

$$\eta_s = \frac{T_H - T_S}{T_H}$$

kde η_s je účinnost, T_H je teplota na horké straně článku a T_S je teplota na studené straně.

Zkusme ještě odhadnout nejistotu měření. U tepelné kapacity C_{celk} bohužel nemůžeme určit její nejistotu, byla nám zadána bez ní. Pro časy budeme počítat odchylku mnohem vyšší – při měření nebylo možné odečíst a zapsat hodnoty obou teploměrů najednou. Stanovíme tedy nejistotu typu B měření času $u_{bt} = 2 \text{ s}$. U ostatních měřených veličin určíme nejistotu typu B dle zadané přesnosti měřícího přístroje.

Pro výpočet celkové nejistoty měření použijeme vzorec:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial \eta}{\partial x_i} \right)^2 u_b^2(x_i)}$$

kde x_i značí jednotlivé veličiny, na kterých je účinnost η závislá a u_b značí kombinovanou nejistotu typu B příslušné veličiny.

Vypočteme tedy jednotlivé parciální derivace:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \eta}{\partial U_0} &= \frac{I_k(t_2 - t_1)}{4C_{celk}(T_{H1} - T_{H2})} & \frac{\partial \eta}{\partial I_k} &= \frac{U_0(t_2 - t_1)}{4C_{celk}(T_{H1} - T_{H2})} \\ \frac{\partial \eta}{\partial t_1} &= \frac{-I_k U_0}{4C_{celk}(T_{H1} - T_{H2})} & \frac{\partial \eta}{\partial t_2} &= \frac{I_k U_0}{4C_{celk}(T_{H1} - T_{H2})} \\ \frac{\partial \eta}{\partial T_{H1}} &= \frac{I_k U_0(t_1 - t_2)}{4C_{celk}(T_{H1}^2 - 2T_{H1}T_{H2} + T_{H2}^2)} & \frac{\partial \eta}{\partial T_{H2}} &= \frac{I_k U_0(t_2 - t_1)}{4C_{celk}(T_{H1}^2 - 2T_{H1}T_{H2} + T_{H2}^2)}\end{aligned}$$

Po dosazení nejistota měření vychází: $u_c = 0,000139013$

Ještě zbývá výpočet nejistoty pro účinnost η_s , kterou získáme podobným způsobem. Parciální derivace vycházejí:

$$\frac{\partial \eta_s}{\partial T_H} = \frac{T_s}{T_H^2} \quad \frac{\partial \eta_s}{\partial T_s} = \frac{-1}{T_H}$$

Po dosazení nejistota měření vychází: $u_c = 0,002314334$

Percentuální vyjádření poměru mezi účinností článku a maximální účinností tepelného stroje získáme pomocí vzorce:

$$p = \frac{\eta}{\eta_s} \cdot 100$$

kde p je poměr v procentech.

Nejistotu určení tohoto poměru zjistíme opět pomocí uvedeného vzorce. Parciální derivace budou:

$$\frac{\partial p}{\partial \eta} = \frac{1}{\eta_s} \cdot 100 \quad \frac{\partial p}{\partial \eta_s} = \frac{-\eta}{\eta_s^2} \cdot 100$$

Po dosazení nejistota měření vychází: $u_c = 0,156614376\%$

Tímto postupem jsme zjistili však spíše dolní hranici nejistoty, jelikož jsme se již při stanovování vzorce pro výpočet účinnosti Peltierova článku dopustili jistých nepřesností.

3.2 V režimu TEC

Graf vývoje teplot při měření článku v režimu TEC je přiložen. Oba průběhy byly proloženy přímkou, která zanedbávala teploty v prvních dvou časech měření. Pro jednotlivé hodnoty vycházejí nejistoty uvedené v následující tabulce. Nejnižší dosažená teplota je vyznačena tučně.

Čas od začátku experimentu [min]	Teplota chladné strany [°C]	Nejistota měření teploty chladné strany [°C]	Teplota horké strany [°C]	Nejistota měření teploty horké strany [°C]
0	24,6	0.1123	23,9	0.11195
1	20,6	0.1103	31,4	0.1157
2	18,9	0.10945	32,4	0.1162

Čas od začátku experimentu [min]	Teplota chladné strany [°C]	Nejistota měření teploty chladné strany [°C]	Teplota horké strany [°C]	Nejistota měření teploty horké strany [°C]
3	18,1	0.10905	32,5	0.11625
4	17,4	0.1087	32,5	0.11625
5	16,7	0.10835	32,4	0.1162
6	16,2	0.1081	32,4	0.1162
7	15,7	0.10785	32,6	0.1163
8	15,1	0.10755	32,6	0.1163
9	14,6	0.1073	32,5	0.11625
10	14,1	0.10705	32,6	0.1163
11	13,8	0.1069	32,6	0.1163

4 Závěr

Hodnoty změřené v režimu TEG jsou znázorněny v přiloženém grafu. Proložením přímkou jsme zjistili Seebeckův koeficient:

$$\alpha = 45,29 \pm 0,16 \text{ mV} \cdot \text{K}^{-1}$$

Co se týče účinnosti článku v tomto režimu, byla pro vybrané měření (odpovídající času $t=2 \text{ min}$) stanovena jako:

$$\eta = 0,00304 \pm 0,00013$$

To odpovídá pouze $3,43 \pm 0,15\%$ z maximální účinnosti vratně pracujícího tepelného stroje. Peltierův článek se tedy ukazuje jako velmi neúčinný zdroj elektrické energie. To je zejména způsobeno jeho vysokou tepelnou vodivostí.

V režimu TEC se nám podařilo dosáhnout minimální teploty $13,80 \pm 0,10^\circ\text{C}$. Průběh celého experimentu je vyneseno v grafu. Oba průběhy byly proloženy přímkou, která zanedbává teploty v prvních dvou časech měření. Je vidět, že teplota na horké straně článku se brzo ustálila na poměrně nízké teplotě, což se u použitého poměrně masivního vodního chlazení dalo očekávat. Na chladnější straně klesala teplota lineárně. Při dodávaném výkonu by se však dal očekávat mnohem strmější pokles, což opět vypovídá o špatné účinnosti Peltierova článku.

5 Použitá literatura

- <http://herodes.feld.cvut.cz/mereni/downloads/navody/peltier.pdf>
- <http://herodes.feld.cvut.cz/mereni/downloads/navody/zpracdat.pdf>