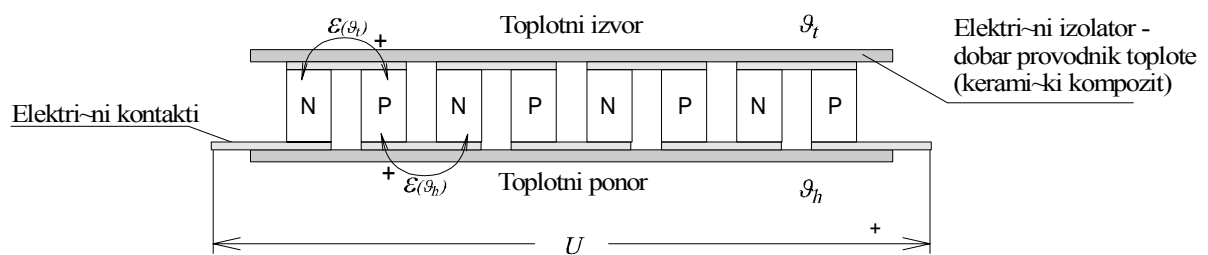


Laboratorijska vežba broj 9

TOPLOTNE PUMPE BAZIRANE NA PRIMENI PELTIJEOVE ELEKTROMOTORNE SILE

Osnovni fizički efekat

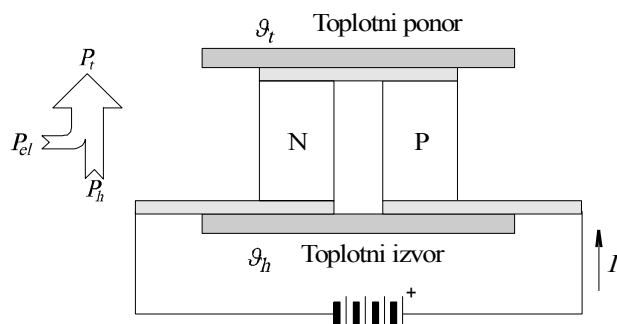
Pojava generisanja elektromotorne sile na spoju dva različita materijala se koristi kao fizička osnova na kojoj se baziraju toplotne pumpe. Ova elektromotorna sila se naziva Peltijeova elektromotorna sila i njena jačina zavisi od vrste materijala i temperature na kojoj se nalazi spoj. Toplotna pumpa se sastoji od niza na red vezanih spojeva dva različita materijala, kao što je pokazano na slici 1.



Slika 1.

Kao materijali se obično koriste poluprovodnici; komercijalno, najčešće se sreće bizmut-telurid - legura bizmuta, telura, selena i antimona. Elektromotorna sila je orijentisana on n ka p materijalu i veća je na spojevima koji se nalaze na strani više temperature. Rezultujuća elektromotorna sila je jednaka razlici elektromotornih sila na jednom pn spoju na višoj temperaturi i na jednom pn spoju na nižoj temperaturi, pomnoženoj sa brojem parova p i n elemenata. Ukoliko bi se između priključnih kontakata vezao električni otpor, kroz njega bi protekla struja, čiji se smer poklapa sa smerom elektromotorne sile na pn spojevima na višoj temperaturi. Zbog proticanja ovakve struje, topla strana bi se hladila, a hladna zagrevala. Snaga hlađenja tople, odnosno zagrevanja hladne strane, bi bila jednaka proizvodu odgovarajuće Peltijeove elektromotorne sile i struje, pomnoženom sa brojem spojeva na toploj, odnosno hladnoj strani. Ukoliko bi se, pak, na priključne kontakte doveo napon veći od rezultujuće elektromotorne sile, kroz spojeve bi proticala struja suprotnog polariteta od one koja se ima pri vezivanju otpornika između kontakata; zbog smerova Peltijeovih elektromotornih sila i struja, došlo bi do hlađenja pn spojeva koji se nalaze na nižoj temperaturi i zagrevanja pn spojeva koji se nalaze na višoj temperaturi. Dakle, u prvom slučaju smer struje (zatvaranje otpornikom) sklop funkcioniše kao električni generator, a u drugom slučaju kao prijemnik električne energije, pri čemu se toplota odvodi sa hladne strane, manjim intenzitetom i predaje, većim intenzitetom, toploj strani.

Na osnovu ovih efekata, sklop se može koristiti kao generator električne energije i kao toplotna pumpa, za "prebacivanje" toplotne energije sa hladnije na topliju površ. Druga namena je mnogo



rasprostranjenija, zbog toga što toplotna pumpa ima dobre, a generator električne energije loše, karakteristike. Ilustracija principa rada toplotne pumpe data je na slici 2.

Slika 2.

Fizički i matematički model toplotne pumpe

Pored Peltijeovih elektromotornih sila, u opisanom sklopu dolazi do pojave prenosa toplote provođenjem kroz elemente čije se površi nalaze na različitim temperaturama, kao i do pojave generisanja gubitaka usled proticanja struje kroz elemente. Obe ove pojave značajno utiču na osobine sklopa kada on radi kao električni generator ili kao toplotna pumpa.

Označimo sa λ specifičnu toplotnu provodnost, sa ρ specifični električni otpor i sa a Zebekov koeficijent. Ovi parametri su temperaturno zavisni, a njihove vrednosti pri temperaturi od 296 K, za bizmut-telurid pn spojeve iznose $a = 2.0 \times 10^{-4}$ V/K, $\rho = 1.0 \times 10^{-3}$ Ω cm, $\lambda = 1.5 \times 10^{-2}$ W/(cm K); temperaturna zavisnost parametara se može iskazati preko polinomnih formi drugog reda [1]:

$$a = (22224.0 + 930.6 T_{sr} - 0.9905 T_{sr}^2) \times 10^{-9}, \quad (1)$$

$$\rho = (5112.0 + 163.4 T_{sr} + 0.6279 T_{sr}^2) \times 10^{-8}, \quad (2)$$

$$\lambda = (62605.0 - 277.7 T_{sr} + 0.4131 T_{sr}^2) \times 10^{-6}, \quad (3)$$

gde T_{sr} (K) označava srednju vrednost temperature tople i hladne strane pn spojeva.

Usled proticanja struje I kroz elektroprovodnu sredinu specifičnog električnog otpora ρ , poprečnog preseka S i dužine l , javiće se gubici snage

$$P_j = \rho \frac{l}{S} I^2. \quad (4)$$

Dakle, u prostoru p i n elemenata odigravaće se proces generisanja toplote, uz definisane temperature graničnih površi. Ove temperature su bliske, ali ne i jednake temperaturi spoljašnjih površi keramičkih elektroizolacionih pločica (keramika je često korišćeni materijal, ali je moguća primena i drugih materijala, koji imaju dobra elektroizolaciona, toploprovodna i mehanička svojstva).

Temperature p i n spojeva ćemo označiti sa \mathcal{G}_{tp} i \mathcal{G}_{hp} . Ako se primeni odgovarajuća analiza na bazi teorije prenosa toplote provođenjem (videti zadatak 4 iz [2]), dolazi se do sledećih izraza za snage prenosa toplote ka hladnoj strani (P_{ph}) i ka toploj strani (P_{pt}):

$$P_{ph} = \frac{1}{2} 2 N \rho \frac{l}{S} I^2 + \frac{\lambda 2 N S}{L} (\mathcal{G}_{tp} - \mathcal{G}_{hp}) \quad (5)$$

$$P_{pt} = \frac{1}{2} 2 N \rho \frac{l}{S} I^2 - \frac{\lambda 2 N S}{L} (\mathcal{G}_{tp} - \mathcal{G}_{hp}) \quad (6)$$

(parametri ρ i λ se izračunavaju prema srednjoj vrednosti temperatura \mathcal{G}_{tp} i \mathcal{G}_{hp}).

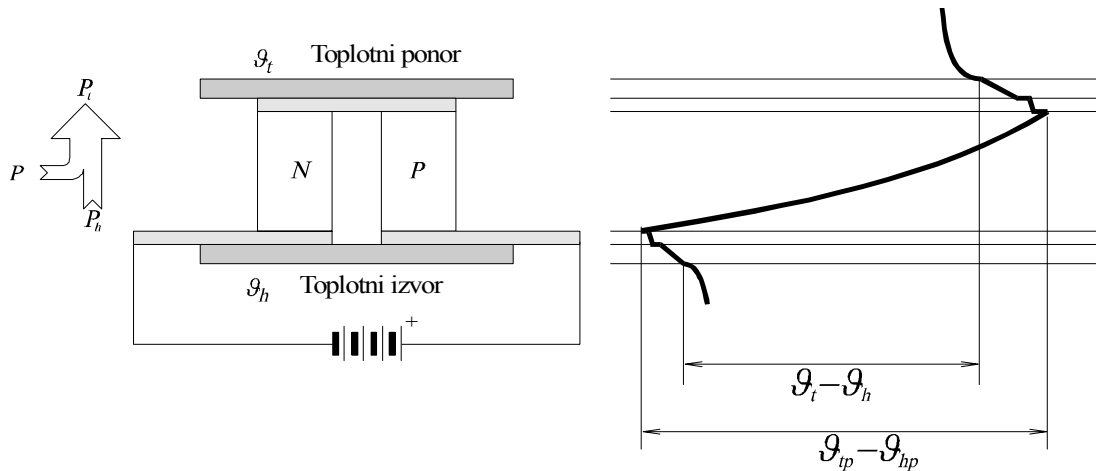
Ako se ovim snagama dodaju snage usled Peltijeovih elektromotornih sila, dobiće se snage ukupne razmene energije sa toplom, odnosno hladnom stranom. U slučaju rada sklopa kao toplotne pumpe, hladna strana će iz okoline preuzimati energiju snagom

$$P_h = 2 N a T_{hp} I - \frac{1}{2} 2 N \rho \frac{l}{S} I^2 - \frac{\lambda 2 N S}{L} (\mathcal{G}_{tp} - \mathcal{G}_{hp}), \quad (7)$$

a tople strane energiju predavati okolini snagom

$$P_t = 2 N a T_{tp} I + \frac{1}{2} 2 N \rho \frac{l}{S} I^2 - \frac{\lambda 2 N S}{L} (\mathcal{G}_{tp} - \mathcal{G}_{hp}). \quad (8)$$

Promena temperature duž termoelektričnog modula za režim toplotne pumpe prikazana je na slici 3.



Slika 3.

Napon na priključnim kontaktima, potreban da bi se ostvario režim toplotne pumpe sa strujom I , dobija se kao vrednost rezultujuće Peltijeove elektromotorne sile (razlike na toplim i na hladnim pn spojevima) uvećane za pad napona na unutrašnjoj omskoj otpornosti p i n elemenata:

$$U = 2 N a (T_{tp} - T_{th}) + 2 N \rho \frac{l}{S} I. \quad (9)$$

Kod praktične primene sklopa, u proračune se ulazi sa vrednostima temperature sa spoljašnje strane elektroizolacionih (keramičkih) pločica, koje se direktno oslanjaju na površi sa kojima sklop razmenjuje energiju. Ove temperature se razlikuju od temperature na samim *pn* spojevima, i to za iznos koji stvara snaga prenosa toplote na toplotnom otporu provođenju toplote kroz keramiku i na kontaktnom toplotnom otporu između spoljašnje površi keramike i površi tela (kontaktni otpor sa unutrašnje strane keramike, prema *pn* spojevima se može smatrati zanemarljivo malim u odnosu na prethodno navedeni). S obzirom na vezu

$$P_t = k_p S_p (\mathcal{G}_{tp} - \mathcal{G}_t), \quad (10)$$

gde je S_p površina keramičke pločice, a k_p zbir odnosa specifične toplotne provodnosti keramičke pločice i njene debljine i kontaktnog toplotnog otpora po jedinici površine, odnosno

$$P_h = k_p S_p (\mathcal{G}_h - \mathcal{G}_{hp}), \quad (11)$$

postupak proračuna se mora izvršiti iterativno, ili se mora rešiti sistem jednačina. Naime, poznate su temperature \mathcal{G}_t i \mathcal{G}_h , za određivanje temperatura \mathcal{G}_{tp} i \mathcal{G}_{hp} potrebno je poznavati snage P_t i P_h , a one se izračunavaju upravo na osnovu temperatura \mathcal{G}_{tp} i \mathcal{G}_{hp} .

Navedeni izrazi predstavljaju osnovu za analize različitih mogućnosti primene sklopova *pn* spojeva; polazeći od dimenzija S i L pojedinih elemenata, kao i broja elemenata u sklopu, moguće je izračunati nivo snage koji se može preneti konkretnim elementom pri poznatim temperaturama, odnos snage hlađenja hladnije strane i snage utrošene električne energije, optimalnu struju itd.

Eksperimentalno određivanje parametara

Zbir toplotnog otpora provođenju toplote kroz elektroizolacioni sloj i kontaktnog toplotnog otpora (karakterisan koeficijentom k_p) se može izračunati na osnovu ogleđa praznog hoda, odnosno merenja napona na priključnim kontaktima (pri nultoj struji kroz njih) pri različitim temperaturama \mathcal{G}_t i \mathcal{G}_h . U ovom ogleđu, snage P_t i P_h su posledica prenosa toplote usled postojanja razlike temperatura. Njihova vrednost je jednaka (uvedimo oznaku P za njihovu zajedničku vrednost; $P=P_t=P_h$); ovom snagom energija se odvodi sa tople strane i predaje hladnoj strani. Dakle, snaga P je jednaka

$$P = \frac{\lambda 2 N S}{L} (\mathcal{G}_t - \mathcal{G}_{hp}). \quad (12)$$

Na osnovu činjenice da se ova snaga na toploj strani prenosi od površi tela ka *pn* spojevima, preko zbirnog toplotnog otpora, može se napisati

$$P = k_p S_p (\mathcal{G}_t - \mathcal{G}_{tp}), \quad (13)$$

a da se hladnoj strani prenosi od pn spojeva ka površi tela, preko zbirnog toplotnog otpora može se napisati (realna je pretpostavka o jednakosti zbirnih toplotnih otpora na površima hladne i tople strane $- 1 / (k_p S_p)$)

$$P = k_p S_p (\vartheta_{hp} - \vartheta_h) \quad (14)$$

Sabiranjem prethodna dva izraza, a zatim uvrštavanjem izraza za snagu P iz (12), dolazi se do

$$2 \frac{\lambda 2 N S}{L} (\vartheta_{tp} - \vartheta_{hp}) = k_p S_p ((\vartheta_t - \vartheta_h) - (\vartheta_{tp} - \vartheta_{hp})), \quad (15)$$

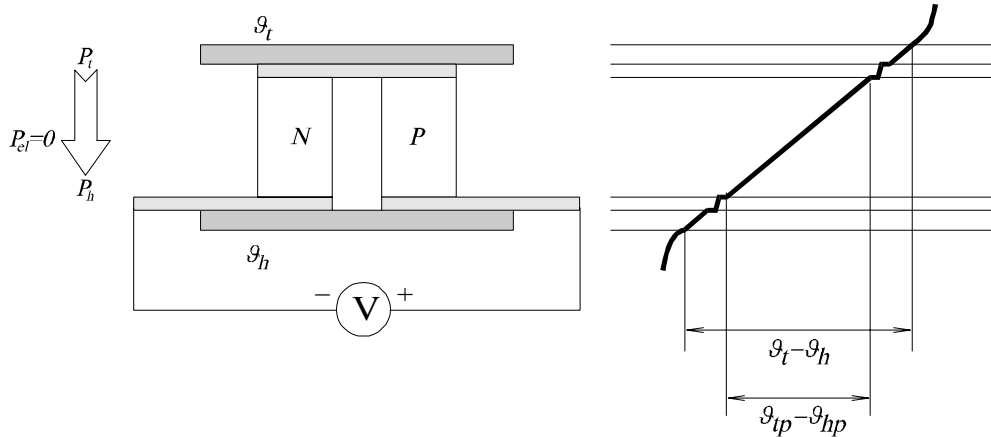
odnosno do

$$\vartheta_{tp} - \vartheta_{hp} = \frac{\vartheta_t - \vartheta_h}{2 \frac{\lambda 2 N S}{L} \frac{1}{k_p S_p} + 1}. \quad (16)$$

Uvrštavanjem izraza za razliku temperatura $(\vartheta_{tp} - \vartheta_{hp})$ u izraz za napon, dobijen iz (9) po zameni $I = 0$, dobija se

$$U = 2 N a \frac{\vartheta_t - \vartheta_h}{2 \frac{\lambda 2 N S}{L} \frac{1}{k_p S_p} + 1}. \quad (17)$$

Promena temperature duz termoelektričnog modula u praznom hodu prikazana je na slici 4.

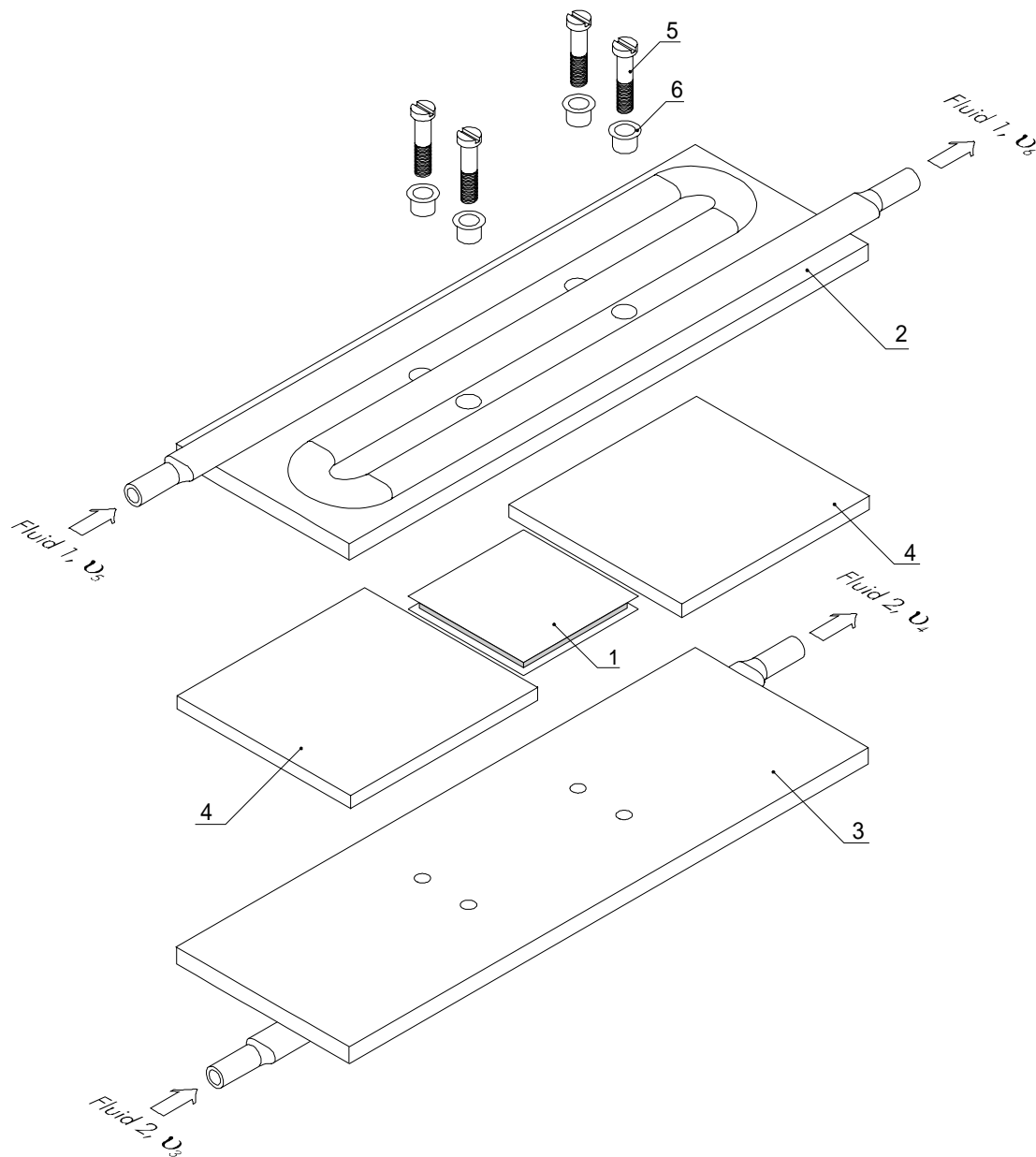


Slika 4.

Iz izraza (13) i (14) se vidi da je zbir temperatura $(\vartheta_t + \vartheta_h)$ jednak zbiru temperatura $(\vartheta_{tp} + \vartheta_{hp})$, odnosno da su jednaki i njihovi poluzbirovi; poluzbir $(\vartheta_{tp} + \vartheta_{hp})/2$ predstavlja srednju temperaturu pn elemenata, odnosno temperaturu prema kojoj se određuje vrednost njihovih parametara a i λ . Dakle, parametri se mogu odrediti na osnovu srednje vrednosti temperatura ϑ_t i ϑ_h . Ako se za neku "tačku" praznog hoda izmere vrednosti ϑ_t i ϑ_h , kao i vrednost napona U , iz jednakosti (17) se može odrediti vrednost koeficijenta k_p .

Eksperimentalna oprema

Pločice sa pn elementima se ispituju pomoću aparature koja je prikazana na slici 5, koja predstavlja dva razmenjivača toplote kod kojih se energija predaje/oduzima vodi. Toplotnom izolacijom je sprečen prenos toplote na druge načine, tako da se merenjem protoka vode i razlike njenih temperatura na ulazu i izlazu na noseću bakarnu pločicu, koja naleže na keramičke elektroizolacione pločice sklopa sa pn spojevima, može izračunati snaga prenosa toplote od vode ka pn spojevima, odnosno od pn spojeva ka vodi.



Slika 5.

1. termoelektrični modul; 2. izmenjivač toplote za toplu vodu; 3. izmenjivač toplote za hladnu vodu;
4. izolacija; 5. zavrtnji; 6. izolacioni umetci

Odgovarajućom vodovodnom instalacijom je moguće podesiti različite temperature vode kroz jedan i drugi razmenjivač toplote - kroz hladnu stranu, propuštana je voda direktno iz vodovoda, a kroz toplu je propuštana voda iz protočnog bojlera, čija se temperatura može podešavati.

Zadatak vežbe

U ogledu praznog hoda se pomoću višekanalnog instrumenta mere temperature izmenjivača neposredno iznad centralne tačke pločice sa termospojevima. Kroz gornji izmenjivač se propušta voda iz bojlera, a kroz donji voda iz vodovoda. Na kanal 1 instrumenta je priključen termopar kojim se meri temperatura gornjeg izmenjivača, a na kanal 2 donjeg. Meri se Peltijeova elektromotorna sila na krajevima pločice sa termoparovima. Na osnovu dobijenih rezultata treba proceniti koeficijent k_p na osnovu relacije (17). Odrediti temperature \mathcal{G}_{tp} i \mathcal{G}_{th} . Modul je dimenzija 60 x 48 mm, ima $N=126$ termoparova i odnos preseka i dužine elementa je $S/L=1,5$ mm.

Kroz izmenjivač za toplu vodu se propusti voda direktno iz vodovoda sa većim protokom, a u drugom izmenjivaču se obustavi protok. Kroz modul se propušta struja $I=4A$. Prati se promena temperature na izmenjivaču bez protoka. Ponoviti eksperiment za obrnuti smer struje. Opisati procese koji se događaju.

U režimu toplotne pumpe se meri temperatura u 6 tačaka – temperature razmenjivača neposredno iznad površina pločice (kanali 1 i 2), temperature fluida na ulazu i izlazu iz izmenjivača za hladnu vodu (kanali 3 i 4) i temperature fluida na ulazu i izlazu iz izmenjivača za toplu vodu (kanali 5 i 6). Podesiti protoke tako da se postigne primetan porast, odnosno sniženje temperature fluida. Napisati jednačinu osnovnog energetskog bilansa u kome figurišu snage hlađenja, zagrevanja i uložena električna snaga.

Literatura

[1] Melcor: "Device Performance Formulae", sajt <http://www.melcor.com/formula.htm>

[2] Z. Radaković, M. Jovanović: "Zbirka zadataka iz Elektrotermije sa priručnikom za laboratorijske vežbe", Elektrotehnički fakultet, drugo izdanje, Beograd 1996.