

11 TERMoeLEKTRIČNI SENZORJI

- 11.1 UVOD
- 11.2 OSNOVNE ZVEZE MED ELEKTRIČNIM IN TOPLOTNIM TOKOM
- 11.3 SEEBECKOV POJAV
- 11.4 PELTIERJEV POJAV
- 11.5 THOMSONOV POJAV

11.1 UVOD

Kot pove že ime te družine, se pri delovanju termoelektričnih senzorjev prepletajo termične in električne veličine. Osnova delovanja so različni termoelektrični pojavi kot npr. Seebeckov, Peltierjev, Thomsonov pojav in drugi. Običajno so tu vključeni še razni drugi temperaturno odvisni pojavi kot npr. Spreminjanje upornosti materialov s temperaturo itd.

Te vrste senzorjev se uporabljajo za meritev temperature in drugih sorodnih veličin.

11.2 OSNOVNE ZVEZE MED ELEKTRIČNIM IN TOPLOTNIM TOKOM

Omenjene zveze so osnova termoelektričnih pojavov. Obravnava za ustrezen opis teh pojavov mora biti v tem primeru precej splošna (fundamentalna), zato je primerno izhodišče Boltzmannova kinetična enačba/Kir, 239/.

11.2.1 SPLOŠNI IZRAZI ZA GOSTOTO ELEKTRIČNEGA IN TOPLOTNEGA TOKA

Zaradi enostavnosti bomo pri naši obravnavi v Boltzmannovi kinetični enačbi zanemarili magnetne pojave ($B = 0$). Po ureditvi dobimo splošne izraze za gostoto električnega in toplotnega toka j , W

$$\vec{j} = q^2 K_{11} \vec{E} - q K_{11} T \vec{\nabla} \frac{F}{T} - q K_{21} \frac{1}{T} \vec{\nabla} T \quad (11.1)$$

$$\vec{W} = q K_{21} \vec{E} - K_{21} T \vec{\nabla} \frac{F}{T} - q K_{31} \frac{1}{T} \vec{\nabla} T \quad (11.2)$$

kjer je $q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{As}$ (elementarni naboj)

T – absolutna temperatura [K]

F – Fermijev nivo (Fermi level)

K_{ij} – kinetični koeficienti, odvisni od materiala

j – gostota električnega toka [A/cm^2]

W – gostota toplotnega toka [W/cm^2] oz. [cal/cm^2]

Pri tem predstavlja simbol nabra $\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ diferencialni operator, ki deluje na nek

skalar in ustvari njegov gradient, npr. $\vec{\nabla} T = \text{grad} T = \left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \right)$, kar se v

enodimenzionalnem (1D) primeru poenostavi v $\vec{\nabla} T = \text{grad} T = \frac{dT}{dx}$.

Komentar en(11.1)(11.2):

1) V splošnem obstajajo trije generatorji oz. “motorji”, ki lahko poženejo električni ali toplotni tok: \vec{E} , $\vec{\nabla} \frac{F}{T}$, $\vec{\nabla} T$!

2) Prvi člen v en(11.1) govori, da električno polje \vec{E} v materialu rodi električni tok in ga torej prepoznamo kot dobro znani Ohmov zakon: $\vec{j} = \sigma \vec{E}$. S primerjavo obeh prispevkov ugotovimo, da je specifična prevodnost σ oz. specifična upornost ρ opisana z izrazom:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} = q^2 K_{11}.$$

11.2.2 SPLOŠNA ENAČBA ZA ELEKTRIČNO POLJE \vec{E}

Če iz en(11.2) izrazimo električno polje \vec{E} in uredimo, ob upoštevanju lastnosti parcialnih odvodov, dobimo splošno enačbo za polje

$$\vec{E} = \frac{1}{q^2 K_{11}} \vec{j} + \frac{1}{q} \vec{\nabla} F + \frac{K_{21} - FK_{11}}{q K_{11} T} \vec{\nabla} T \quad (11.3)$$

Komentar en(11.3):

1) V splošnem obstajajo v nekem materialu trije prispevki (generatorji, motorji) k električnemu polju \vec{E} : zaradi \vec{j} , $\vec{\nabla} F$, $\vec{\nabla} T$!

2) Prvi prispevek k električnemu polju \vec{E} zaradi \vec{j} je že omenjeni Ohmov zakon v obratni smeri. V praksi običajno ta prispevek namesto s poljem označimo z ustreznim napetostnim padcem (voltage drop), pri dani geometriji kar kot $V = RI$.

3) Drugi prispevek k električnemu polju \vec{E} zaradi $\vec{\nabla} F = \text{grad}F$ nastopi zaradi nehomogenosti materiala, kar podaja $\text{grad}F$. Znan primer takega prispevka je vgrajeno polje (built-in field) v nehomogeno dopiranem polprevodniku, npr. v bazi bipolarnega transistorja.

4) Tretji prispevek k električnemu polju \vec{E} zaradi $\vec{\nabla} T = \text{grad}T$ nastopi zaradi nehomogene temperature, kar podaja $\text{grad}T$.

11.2.3 SPLOŠNA ENAČBA ZA GOSTOTO TOPLOTNEGA TOKA \vec{W}

Če izraz za električno polje \vec{E} , en(11.3), vstavimo v en(11.2) in uredimo, dobimo splošno enačbo za gostoto toplotnega toka \vec{W}

$$\vec{W} = \frac{K_{21}}{q K_{11}} \vec{j} - \frac{K_{31}K_{11} - K_{21}^2}{TK_{11}} \vec{\nabla}T \quad (11.4)$$

En(11.4) pišemo običajno v obliki

$$\vec{W} = \pi \vec{j} - \lambda \vec{\nabla}T \quad (11.5)$$

kjer je $\pi = \frac{K_{21}}{q K_{11}}$ - Peltierjev koeficient materiala

$\lambda = \frac{K_{31}K_{11} - K_{21}^2}{TK_{11}}$ - toplotna prevodnost materiala

Komentar:

1) V splošnem obstajata dva generatorja oz. "motorja", ki lahko poženeta toplotni tok: $\vec{j}, \vec{\nabla}T$!

2) Drugi člen v en(11.4),(11.5) predstavlja običajno toplotno prevajanje in govori, da spreminjajoča se temperatura po materialu oz. gradient temperature $gradT = \vec{\nabla}T$ (= dT/dx za 1D primer) v materialu rodi toplotni tok, kar npr. v 1D primeru opisuje znana zveza: $W = -\lambda dT/dx$.

3) Prvi člen v en(11.4)(11.5)

govori, da tudi električni tok v materialu \vec{j} rodi toplotni tok: $\vec{W} = \pi \vec{j}$. Omenjena zveza med \vec{j} in \vec{W} je osnova za različne termoelektrične pojave, ki se izkoriščajo pri delovanju različnih termoelektričnih senzorjev in naprav, npr. v termoelementih ali za segrevanje/ohlajanje na osnovi električnega toka (Peltierjev hladilnik), več kasneje.

Zaključek

Videli smo, da so termične in električne veličine $\vec{j}, \vec{W}, \vec{\nabla}T, \vec{\nabla}F, \vec{E}$ (oz. $V = \int \vec{E} d\vec{l}$) med seboj povezane ! Sprememba ene veličine povzroči v splošnem spremembo ostalih veličin.

Omenjene zveze so osnova za termoelektrične pojave, kot bomo videli v nadaljevanju.

11.3 SEEBECKOV POJAV

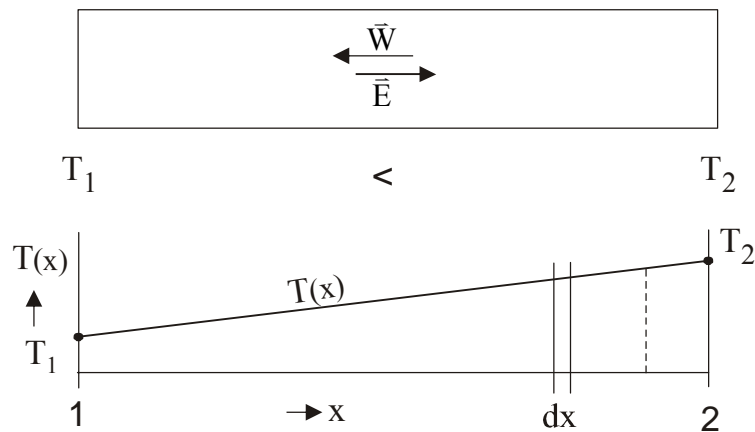
Opis pojava: opazujemo nek vodnik, ki je električno in toplotno prevoden, s spremenljivo temperaturo $T(x)$ (Sl.11.1). Temperatura pa se ne spreminja s časom, gre torej za stacionarni primer. Sistem je v termičnem ravnovesju.

Komentar:

1) V termičnem ravnovesju mora za vodnik veljati: $F = \text{const}$ oz. $\vec{\nabla}F = 0$, zato se enačbe poenostavijo.

2) Vodnik je v zraku (električno izoliran od okolice), zato tu ni premika električnih nabojev oz. električnega toka: $\vec{j} = 0$

3) Po vodniku obstoja spremenljiva temperatura $T(x)$, zato v tem primeru obstoja $\text{grad}T$ po vodniku ($\text{grad}T = \vec{\nabla}T \neq 0$).



Sl.11.1 Razmere v električno in toplotno prevodnem vodniku s spremenljivo temperaturo

Izpeljava Seebeckove napetosti

Poglejmo sedaj osnovne enačbe. Enačba za toplotni tok en(11.5) se v tem primeru poenostavi ($\vec{j} = 0$)

$$\vec{W} = -\lambda \vec{\nabla}T \quad (11.6)$$

Toplotni tok \vec{W} teče vedno z mesta višje temperature (x_2 , na T_2) proti mestu nižje temperature (x_1 , na T_1), kot prikazuje puščica \vec{W} na Sl.11.1.

V skladu s splošno enačbo za električno polje en(11.3) se v tem primeru zaradi spremenljive temperature pojavi v vodniku tudi električno polje – člen z $\bar{\nabla}T$. Zaradi omenjenih predpostavk ($\vec{j} = 0$) se en(11.3) poenostavi

$$\vec{E} = \alpha \bar{\nabla}T \quad (11.7)$$

kjer je $\alpha = \frac{K_{21} - FK_{11}}{q K_{11}T}$ absolutni Seebeckov koeficient materiala, odvisen od temperature.

En(11.7) se v našem 1D primeru(Sl.11.1) še poenostavi

$$E = \alpha \frac{dT}{dx} \quad (11.8)$$

Ker v našem primeru T raste z x, je po en(11.8) polje E pozitivno oz. usmerjeno v smeri pozitivne osi x, puščica E kaže v desno(Sl.11.1).

Zaradi spremenljive temperature po vodniku nastalo električno polje povzroči nastanek električne napetosti po vodniku, v skladu z definicijo polja: $E = -dV/dx$. Na neki majhni dolžini dx vodnika se torej pojavi napetost dV

$$dV = -E dx = -\alpha \frac{dT}{dx} dx = -\alpha dT \quad (11.9)$$

kjer je dT sprememba temperature na dolžini dx .

V splošnem se zaradi spremenljive temperature med dvema točkama x_1 , x_2 na vodniku pojavi neka napetost, ki jo dobimo z integracijo en(11.9). Negativno vrednost te napetosti imenujemo Seebeckova napetost V_{Seeb}

$$V_{Seeb} = -\int_{x_1}^{x_2} dV = \int_{T_1}^{T_2} \alpha(T) dT \quad (11.10)$$

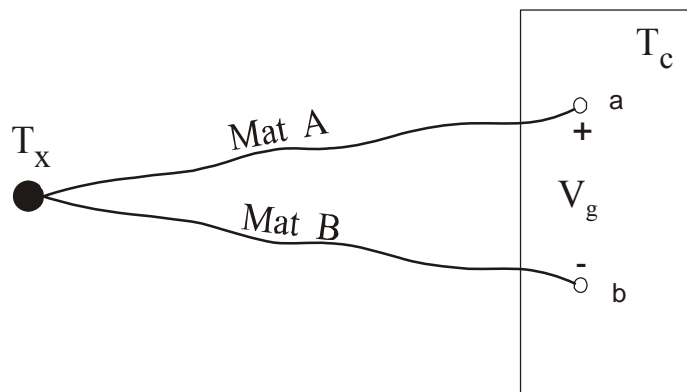
En(11.10) imenujemo Seebeckov pojav: na vodniku se zaradi temperaturne razlike med dvema točkama pojavi električna napetost V_{Seeb} !

Seebeckov pojav je osnova za delovanje različnih senzorjev temperature, npr. termoelementov.

11.3.1 TERMoeLEMENT

Termoelement (tudi termočlen, angl. Thermocouple) je v osnovi senzor temperature. Meritev s termoelementom je najpogostejša industrijska meritev temperature.

Osnovna struktura: dva različna prevodna materiala, A in B, spojena skupaj (Sl.11.2).



Sl.11.2 Termoelement

Komentar:

- 1) Rezultat ni odvisen od izvedbe spoja, ker so materiali v spoju vsi na isti temperaturi in ni nevarnosti napake zaradi Seebeckove napetosti
- 2) Referenčna temperatura T_{ref} poskrbi, da sta spoja a,b termoelementa s podaljški ali merilnimi kablji na isti temperaturi in ne pride do napake zaradi Seebeckove napetosti. Referenčna temperatura T_{ref} je neka poznana, konstantna temperatura. Običajno jo realiziramo z Dewar posodo, v kateri se nahaja mešanica vode in ledu in tedaj velja: $T_{ref} = 0^{\circ}\text{C}$. Možna pa je tudi izvedba, kjer T_{ref} , ki je običajno okrog sobne temperature in meritev ni zahtevna, sproti merimo z nekim referenčnim senzorjem temperature.

Generirana napetost V_g

Generirano napetost V_g , ki je v bistvu Seebeckova napetost, dobimo po KNZ s seštevanjem (integracijo) prispevkov dV . Pri tem upoštevamo oznake na Sl.11.2 in obrnemo meje integracije po vodniku B

$$\begin{aligned}
 V_g &= \int_a^b \alpha(T) dT = \int_{T_0}^{T_x} \alpha_A(T) dT + \int_{T_x}^{T_0} \alpha_B(T) dT \\
 &= \int_{T_0}^{T_x} [\alpha_A(T) - \alpha_B(T)] dT
 \end{aligned}
 \tag{11.11}$$

Poenostavitev: Običajno lahko en(11.11) še poenostavimo, ker pogosto velja, da sta α_A , α_B počasni funkciji temperature. Tedaj lahko za ne prevelike spremembe $T_x - T_0$ smatramo α_A , α_B kot konstante in velja

$$V_g = (\alpha_A - \alpha_B)(T_x - T_0)
 \tag{11.12}$$

Generirana napetost na termoelementu je tedaj odvisna le od obeh materialov (α_A , α_B) ter temperaturne razlike ($T_x - T_0$).

Meritev temperature T_x

Za dani termoelement poznamo njegove lastnosti, predvsem (α_A , α_B), običajno podane v katalogu proizvajalca termoelementa. Z visokoohmskim voltmetrom izmerimo generirano napetost termoelementa V_g in nato z obratom en(11.12) določimo merjeno temperaturo T_x

$$T_x = T_0 + \frac{V_g}{\alpha_A - \alpha_B} \quad (11.13)$$

Opisani pristop je osnova za razne industrijske izvedbe meritev temperature, kot bo opisano v nadaljevanju.

11.3.1.1 Standardni pari termoelementov

V industriji kot praktične izvedbe termoelementov srečamo različne standardne kombinacije materialov A,B z dobrimi lastnostmi(T,t stabilnost itd.).

Oznake standardnih parov so urejene po črkah: tip T, tip J, tip E itd. Vsak standardni termoelement ima svoje prednosti in slabosti. Nekaj najpogostejših parov oz. tipov termoelementov z osnovnimi lastnostmi prinaša Tabela 1.

Omejitve uporabe: Pri izbiri termoelementa za dano aplikacijo je treba paziti tudi na omejitve določenih materialov na razne ambiente(vlaga, oksidacija, redukcija itd.).

Tabela 1 Standardni tipi termoelementov

Tip	Mat A/B	T [°C]	S [mV/°K]
T	Cu/Konst.	-270% +600	40,9
J	Fe/Konst.	-270% +100	51,7
K	Cr/Alumel	-270% +1300	40,6
E	Cr/Konst.	-100% +1000	60,9
S	Pt:Rh(10%)/Pt	0% 1550	6,0
R	13%	0% 1600	6,0

11.3.1.2 Občutljivost termoelementa

Občutljivost (Sensitivity) termoelementa S_T je definirana kot majhna sprememba izhoda termoelementa - generirane napetosti dV_g proti majhni spremembi vhoda - temperature dT_x . Ob upoštevanju en(11.12) je občutljivost termoelementa S_T

$$S_T = \frac{dV_g}{dT_x} = \alpha_A - \alpha_B \quad (11.14)$$

Za veliko občutljivost je torej ugodno, če sta α_A , α_B nasprotnih predznakov, ker se tedaj oba prispevka v en(11.14) seštevata in posledica je visoka občutljivost S_T .

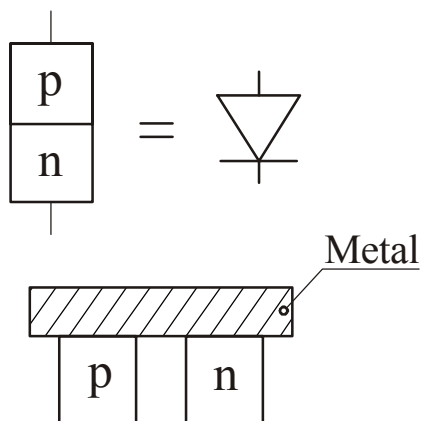
11.3.1.3 Polprevodniški termoelementi

Omenjena lastnost se izkorišča pri polprevodniških silicijevih temperaturnih senzorjih. Izkaže se, da imata P- in N-tip polprevodnika absolutni Seebeckov koeficient materiala α nasprotnega predznaka. Zato je PN spoj dober termoelement z visoko občutljivostjo, tipično v razredu $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$ (za primerjavo: klasični termoelementi, spoji dveh kovin, gl. Tabela I, imajo občutljivost tipično v razredu $50\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$!).

Obstajata dve izvedbi:

- PN spojni termoelement(Sl.11.3a): struktura je tu običajni PN spoj oz. dioda
- struktura P/met/N(Sl.11.3b): struktura je tu sestavljena iz bloka P-tipa, metala in N-tipa. S stališča termoelektričnih efektov gre za ekvivalentno strukturo kot v prejšnjem primeru. Tehnologija je v tem primeru enostavnejša, robustnejša in cenejša, saj ne zahteva čistih mikroelektronskih tehnoloških postopkov za izdelavo PN spoja.

Več o polprevodniških senzorjih temperature bomo zvedeli pri obravnavi silicijevih temperaturnih senzorjev.



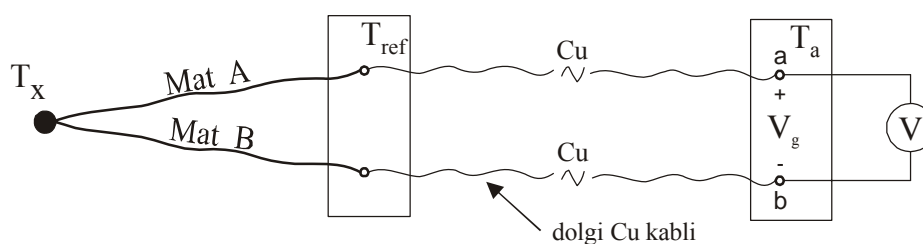
SI.11.3 Polprevodniški termoelementi: a) PN struktura (dioda),
b) P/met/N struktura

11.3.1.4 Izvedbe temperaturnih meritev s termoelementom

Meritev temperature s termoelementom je verjetno najpogostejša meritev temperature. Obstojata veliko različnih izvedb osnovnega principa (SI.11.2). V nadaljevanju si bomo ogledali nekaj primerov.

Meritev temperature s konstantno referenčno temperaturo

Osnovno shemo meritve prikazuje SI.11.4. Materiali za termoelemente so običajno dragi. Zato takoj, ko pridemo iz visokotemperaturnega področja meritve, vpeljemo električne podaljške iz kašnega cenejšega materiala, običajno kar baker (Cu). Pri tem spoji med termoelementom in Cu kablji ne smejo vnašati napake meritve oz. generirati dodatno termično napetost. Kot bomo videli, to dosežemo, če so spoji na točno isti temperaturi.



SI.11.4 Meritev temperature s konstantno referenčno temperaturo T_{ref}

Pogoj za pravilno meritev oz. izničenje s kabli generiranih termičnih napetosti se tedaj glasi: vsi spoji s kabli morajo biti na točno isti temperaturi T_{ref} oz. T_a (Sl.11.4).

Generirano napetost v tem primeru določimo podobno kot pri izpeljavi en(11.11)(11.12), torej obrnemo meje integracije in integrande združimo

$$\begin{aligned} V_g &= \int_a^b \alpha(T) dT = \int_{T_a}^{T_{ref}} \alpha_{Cu} dT + \int_{T_{ref}}^{T_x} \alpha_A dT + \int_{T_x}^{T_{ref}} \alpha_B dT + \int_{T_{ref}}^{T_a} \alpha_{Cu} dT \\ &= \int_{T_a}^{T_{ref}} (\alpha_{Cu} - \alpha_{Cu}) dT + \int_{T_{ref}}^{T_x} (\alpha_A - \alpha_B) dT \end{aligned} \quad (11.15)$$

Prvi člen je enak 0, v tem primeru se torej prispevki spojev termoelement/Cu kabli izničijo oz. ne vnašajo napake meritve. Običajno lahko zanemarimo še odvisnost koeficientov α od temperature: $\alpha(T) = \text{const}$ in se en(11.15) še poenostavi. Generirana napetost termoelementa je torej v tem primeru

$$V_g = (\alpha_A - \alpha_B)(T_x - T_{ref}) \quad (11.16)$$

Izraz za generirano napetost ne vsebuje prispevkov Cu kablov, ki torej ne vplivajo na meritev, kot je bilo zahtevano.

Izvedba meritve:

Merjeno temperaturo T_x dobimo z obratom en(11.16)

$$T_x = T_{ref} + \frac{V_g}{\alpha_A - \alpha_B} \quad (11.17)$$

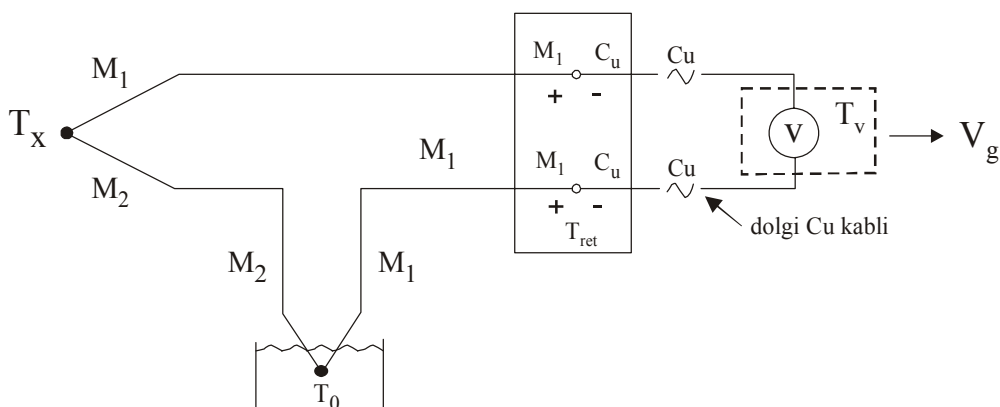
Komentar:

1) Potek meritve: Z visokoohmskim voltmetrom izmerimo generirano napetost V_g , nato iz Tabel za termoelemente odčitamo temperaturno razliko ($T_x - T_{ref}$) ter ob poznanem T_{ref} določimo merjeno temperaturo T_x .

2) Tabele termoelementov: Za vsak tip termoelementa obstajajo pri proizvajalcu natančne tabele med temperaturno razliko ($T_x - T_{ref}$) in generirano napetostjo V_g .

3) Vpliv T_{ref} : Iz en(11.17) vidimo, da referenčna temperatura T_{ref} direktno določa točnost rezultata oz. meritve in mora biti zato natančno določena/merjena. Primerna realizacija referenčne temperature T_{ref} v praksi je Dewar posoda(po domače termos steklenica), napolnjena z vodo in ledom: $T_{ref} = 0^\circ\text{C} = \text{const}$.

Praktična izvedba: Podobna meritev, ki pa je enostavnejša za izvedbo in zahteva manj spojev (3 namesto 4), kar je ugodno v praksi, je prikazana na Sl.11.5.



Sl.11.5 Poenostavljena meritev temperature s konstantno referenčno temperaturo T_{ref}

Določitev generirane napetosti V_g poteka podobno kot prej:

$$\begin{aligned}
 V_g &= \int \alpha(T) dT = \\
 &= \int_{T_v}^{T_{ref}} \alpha_{Cu} dT + \int_{T_{ref}}^{T_x} \alpha_1 dT + \int_{T_x}^{T_0} \alpha_2 dT + \int_{T_0}^{T_{ref}} \alpha_1 dT + \int_{T_{ref}}^{T_v} \alpha_{Cu} dT \quad (11.18) \\
 &= \int_{T_a}^{T_{ref}} (\alpha_{Cu} - \alpha_{Cu}) dT + \int_{T_{ref}}^{T_x} (\alpha_A - \alpha_B) dT
 \end{aligned}$$

Prvi in zadnji člen se uničita. Zanimarimo še temperaturno odvisnost koeficientov: $\alpha(T) = \text{const}$ in dobimo

$$\begin{aligned}
 V_g &= \alpha_1 (T_x - T_{ref}) + \alpha_2 (T_0 - T_x) + \alpha_1 (T_{ref} - T_0) \\
 &= \alpha_1 (T_x - T_0) - \alpha_2 (T_x - T_0) \\
 &= (\alpha_1 - \alpha_2) (T_x - T_0)
 \end{aligned} \quad (11.19)$$

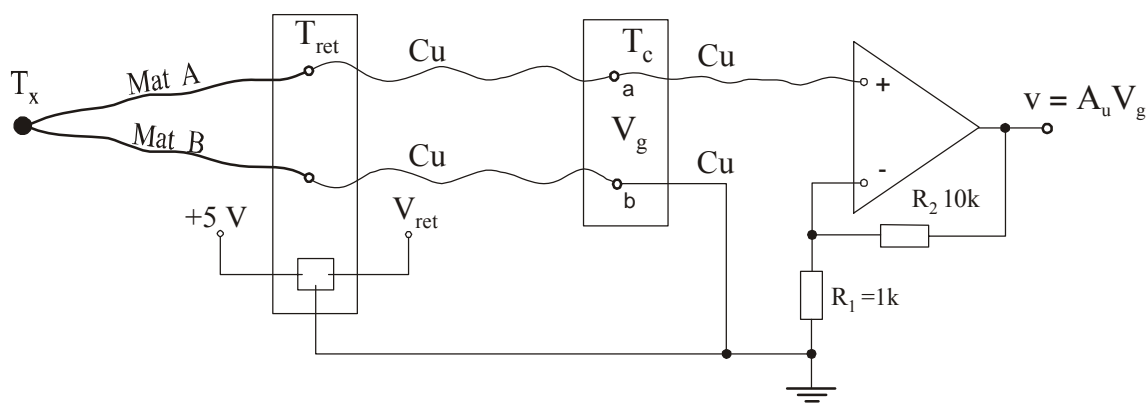
Rezultat je enak kot v prejšnjem primeru, gl. en(11.16). Tudi meritev poteka na enak način, gl. en(11.17). Referenčno temperaturo 0°C , ki je tu označena kot T_0 , realiziramo tudi tu enostavno z Dewar posodo z ledom in vodo.

Meritev temperature s spremenljivo referenčno temperaturo

Osnovno shemo meritve prikazuje Sl.11.6. V tem primeru referenčna temperatura T_{ref} ni stabilizirana oz. se lahko spreminja, v področju okrog sobnih(nizkih) temperatur.

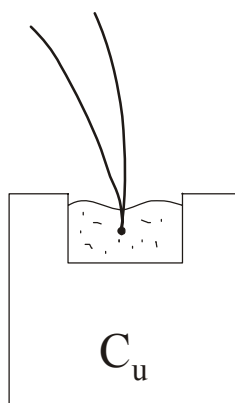
Zato referenčno temperaturo T_{ref} tu stalno merimo z dodatnim natančnim referenčnim nizkotemperaturnim temperaturnim senzorjem. Meritev ni zahtevna oz. draga, ker gre za področje okrog sobnih temperatur.

Rezultat te meritve, T_{ref} oz. pripadajočo V_{ref} stalno odštevamo od generirane napetosti in tako dobimo pravi merilni rezultat.



Sl.11.6 Meritev temperature s spremenljivo referenčno temperaturo

V praksi je primerna za izvedbo spojev na isti temperaturi enostavna rešitev npr. z bakrenim(Cu) blokom, ki ima luknjo. V luknjo, ki je napolnjena s termično prevodno mastjo, vtaknemo kable s spoji(Sl.11.7).

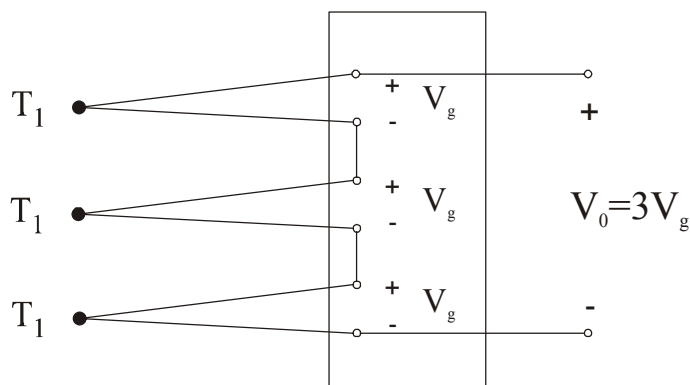


Sl.11.7 Izvedba spojev na isti temperaturi z bakrenim(Cu) blokom

11.3.2 TERMOBATERIJA

Uvod: Termobaterija (angl. Thermopile) je v bistvu temperaturni senzor s povečano občutljivostjo, kar dosežemo z zaporedno vezavo več termoelementov.

Struktura: zaporedna vezava več termoelementov (Sl.11.8), za vezavo 3 termoelementov)



Sl.11.8 Struktura termobaterije s 3 termo členi

Delovanje: generirane napetosti posameznih termoelementov V_g se seštevajo, izhodna(out) napetost termobaterije V_o je torej

$$V_o = \sum_{i=1}^N V_{gi} = N V_g \quad (11.20)$$

kjer je N število vseh termoelementov.

Občutljivost termobaterije S_{TN} : za termobaterijo z N členi je občutljivost

$$S_{TN} = \frac{dV_o}{dT} = N \frac{dV_g}{dT} = N S_{T1} \quad (11.21)$$

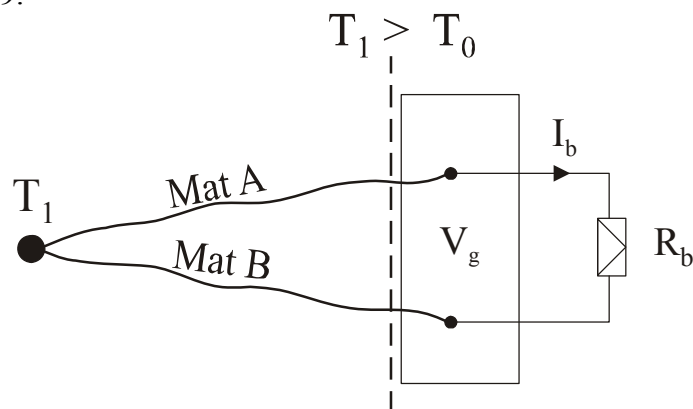
kjer je S_{T1} občutljivost posameznega (enega) termoelementa.

Komentar: termobaterija z N členi ima torej N -krat višjo občutljivost od posameznega termoelementa !

11.3.3 TERMOELEKTRIČNI GENERATORJI

Isti princip kot pri termobateriji se lahko uporabi tudi za pridobivanje električne energije.

Delovanje: na izhod termoelementa z generirano napetostjo V_g priključimo breme R_b , kot prikazuje Sl.11.9.



Sl.11.9 Termoelektrični generator

Tok skozi breme I_b je po Ohmovem zakonu enak $I_b = V_g / R_b$. Uporabimo še izraz za generirano napetost V_g , en(11.12) in dobimo generirano električno moč na bremenu P_b

$$P_b = I_b V_b = V_g^2 R_b = \frac{(\alpha_A - \alpha_B)^2 (T_1 - T_0)^2}{R_b} \quad (11.22)$$

Komentar: termoelektrični generator je pretvornik toplotne energije v električno ! Električna energija se tu tvori zaradi toplotne razlike $\Delta T = T_1 - T_0$. Če ni toplotne razlike ($\Delta T = 0$), ni generacije električne moči oz energije.

Termoelektrični generatorji so enostavni in zanesljivi elementi, saj ni gibajočih se delov, z relativno majhno težo. Tipičen izkoristek vložene energije je v razredu 10%.

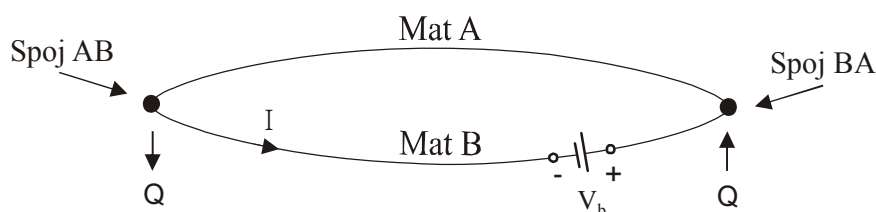
Uporaba: Zaradi omenjenih lastnosti se termoelektrični generatorji uporabljajo v specialnih aplikacijah, kjer so omenjene lastnosti pomembne, npr. v vesoljskih plovilih. V tem primeru povišano temperaturo lahko preskrbi npr. soncu izpostavljena stran, medtem ko je hladna stran obrnjena stran od sonca.

V vesoljski sondi Voyager v okviru misije na Mars je bila podobno izvedena ti. jedrska baterija. V tem primeru je povišano temperaturo vzdrževal blok radioizotopnega materiala, ki se je segreval zaradi jedrskih reakcij v materialu.

11.4 PELTIERJEV POJAV

Opis pojava

če teče električni tok skozi spoj dveh prevodnih materialov A in B (Sl.11.10), se na spoju toplotna energija oz. toplota Q sprošča ali absorbira, odvisno od smeri toka glede na električno polje oz. napetost v spoju.



Sl.11.10 Peltierjev pojav

Na Sl.11.10 se spoj AB ohlaja(hladilnik), spoj BA pa greje(grelnik). Pojav je reverzibilen: če smer toka obrnemo, se vlogi zamenjata.

Izpeljava enačb

Izhodišče je osnovna zveza med gostoto toplotnega toka \vec{W} in gostoto električnega toka \vec{j} , en(11.5)

$$\vec{W} = \pi \vec{j} - \lambda \vec{\nabla} T \quad (11.23)$$

kjer je $\pi = \frac{K_{21}}{q K_{11}}$ - Peltierjev koeficient materiala. Pri tem so koeficienti K_{21} , K_{11}

kinetični koeficienti, odvisni od materiala, ki smo jih že srečali pri osnovnih enačbah na začetku poglavja.

Zaradi enostavnosti vzemimo primer konstantne temperature ($T = \text{const}$) v celotnem področju vodnikov. V tem primeru je $\text{grad}T$ enak 0 in se en(11.23) poenostavi

$$\vec{W} = \pi \vec{j} \quad (11.24)$$

En(11.24) podaja zvezo med gostoto toplotnega in električnega toka. V praksi nas običajno bolj zanima zveza med oddano ali prejeto toploto $Q[\text{cal}, \text{Ws}]$ in tokom vodnika $i[\text{A}]$. Običajno zadostuje tu za opis razmer 1D primer, kar omogoči preprostejši opis s skalarji.

Gostoto toplotnega toka iz spoja AB lahko tedaj zapišemo v obliki

$$W = \frac{1}{A_{\text{topl}}} \frac{dQ}{dt} = \pi_{AB} j = \pi_{AB} \frac{i}{A_{\text{el}}} \quad (11.25)$$

kjer je π_{AB} Peltierjev koeficient spoja AB, določen z razliko Peltierjevih koeficientov obeh materialov A in B. V primeru idealnih kontaktov (Fermijev nivo konstanten), kar je običajno dopusten približek, velja enostavna zveza med Peltierjevimi koeficienti π in Seebeckovimi koeficienti α : $\pi = \alpha T$. Tedaj lahko pišemo.

$$\pi_{AB} = \pi_A - \pi_B = (\alpha_A - \alpha_B) T \quad (11.26)$$

Pri tem je v en(11.25) A_{topl} topla površina, skozi katero teče toplotni tok oz. ki oddaja toploto ter A_{el} površina, skozi katero teče električni tok oz. presek vodnika.

Pogosto pri izvedbah v praksi velja, da sta obe površini, A_{topl} in A_{el} , približno enaki: $A_{\text{topl}} = A_{\text{el}}$ in se en(11.25) poenostavi.

Toplota dQ , prečrpana zaradi toka i v času dt , je torej

$$dQ = \pi_{AB} i dt \quad (11.27)$$

Zaradi enostavnosti sedaj vzemimo, da je električni tok konstanten: $i = \text{const} = I$, kar je v praksi največkrat res. Toploto, prečrpano v času t , dobimo z integracijo en(11.27) od 0 do t

$$Q = \pi_{AB} I t \quad (11.28)$$

Komentar

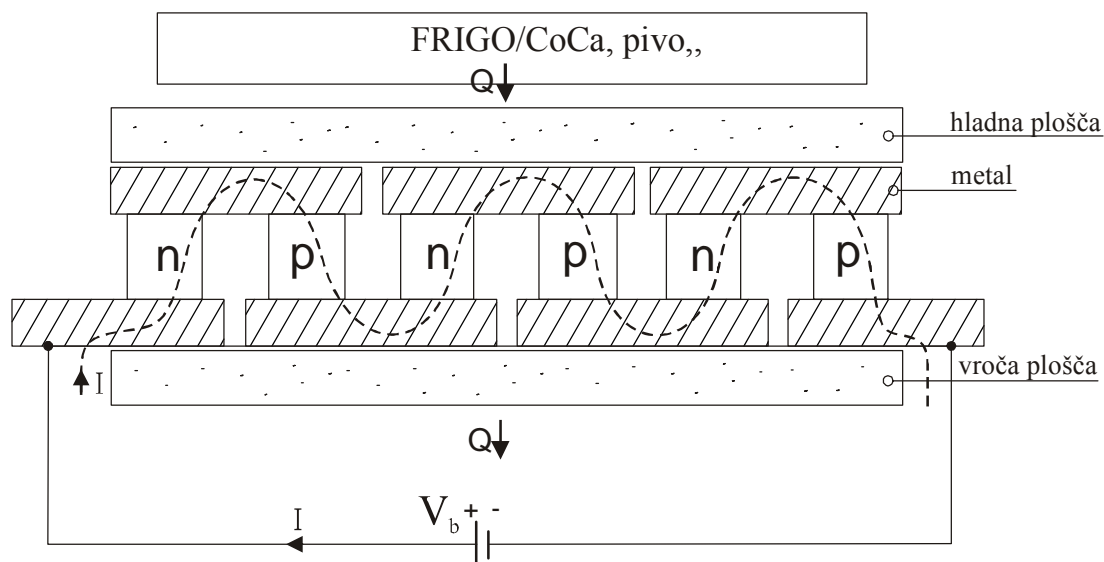
1) Toplota Q je na spoju prejeta ali oddana toplota v Peltierjevi zanki na Sl.11.10, pri toku I , v času t !

2) Za drugi spoj BA velja: $\pi_{BA} = \pi_B - \pi_A = -\pi_{AB}$!

Toplotni tok se torej tu obrne, teče v spoj in imamo obraten pojav - segrevanje!

3) Opisano segrevanje spoja nima nobene povezave z običajnim Jouleovim segrevanjem materiala, skozi katerega teče tok (ohmske izgube). Dokaz: Jouleova toplota je kvadratično odvisna od toka ($P_{\text{segr}} = I^2 R$), medtem ko je pri Peltierjevem pojavu odvisnost od toka linearna, gl. en(11.28).

4) Na osnovi en(11.28) delujejo razne naprave, npr. Peltierjevi hladilniki.



Sl.11.11 Peltierjev hladilnik

Pogosta praktična izvedba Peltierjevega hladilnika je na osnovi polprevodnikov: P in N bloke polprevodnika zložimo skupaj (Sl.11.11).

Postopek zlaganja blokov P in N tipa je tehnološko precej enostavnejši in cenejši, kot če bi to izmenično polprevodniško strukturo izvedli z dopiranjem polprevodnika. S stališča Peltierjevega pojava pa ni nobene razlike, obe delujeta enako učinkovito.

Glavna prednost omenjene polprevodniške strukture je v različnih predznakih Seebeckovih koeficientov za P in N tip polprevodnika: $\alpha_P = -\alpha_N$. Zato se po en(11.26) oba prispevka seštevata in rezultat je velik Peltierjev koeficient π_{AB} in s tem učinkovit hladilnik.

Peltierjev hladilnik je enostaven in robusten element brez gibljivih delov in zato precej zanesljiv. S tem pristopom je možno izdelati tudi relativno majhne hladilne naprave (miniaturni hladilniki). Glede izkoristka črpanj toplote oz. hlajenja zaostaja za klasičnimi kompresorskimi hladilniki, ki pa so zaradi svoje bolj komplicirane zgradbe (gibljivi deli itd.) manj zanesljivi in večji.

Aplikacije: Za razna posebna hlajenja kot npr. hlajenje senzorjev, elementov, vezij, računalnikov itd. zaradi boljše lastnosti pri nižjih temperaturah (nižji šum, hitrejše delovanje, manjša poraba moči, boljše odvajanje toplote itd.).

Peltierjev termostat (stabilizator temperature) izkorišča reverzibilnost Peltierjevega pojava: če tok I obrnemo, se obrne smer črpanja toplote Q . Konstantno temperaturo lahko torej vzdržujemo s sistemom na Sl.11.11 enostavno s tem, da v skladu z odčitkom na kontrolnem senzorju temperature obračamo smer toka: $\pm I$ in s tem spreminjamo na nekem spoju ohlajanje v segrevanje in obratno!

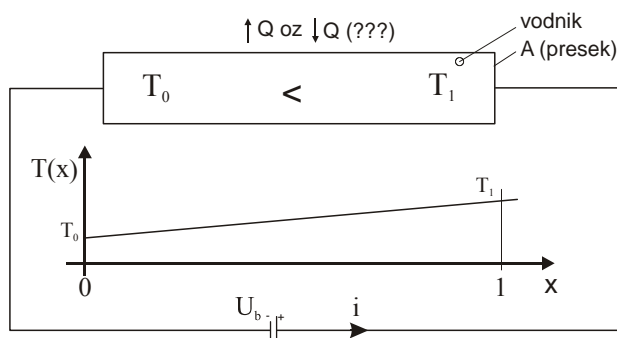
11.5 THOMSONOV POJAV

Uvod

Thomsonov pojav je soroden Peltierjevemu pojavu. Osnovna razlika s Peltierjevim pojavom je, da se temperatura v tem primeru spreminja s krajem: $T = T(x)$ oz. obstoja $\text{grad}T$.

Opis pojava

Če teče električni tok i skozi vodnik (Sl.11.12), ki ima spremenljivo temperaturo $T(x)$, pride v vodniku do odvajanja ali do absorpcije toplote Q , odvisno od smeri toka.



Sl.11.12 Thomsonov pojav

Izkaže se, da iz osnovnih enačb sledi naslednji diferencialni izraz za prejeto oz. oddano toploto dQ , v majhnem volumnu dV in majhnem času dt

$$dQ = -\tau_{Th} (\vec{\nabla}T \cdot \vec{j}) dt dV \quad (11.29)$$

kjer je τ_{Th} Thomsonov koeficient. Po Onsagerju velja med koeficienti zveza:

$$\tau_{Th} = T \frac{d\alpha}{dT} \quad (11.30)$$

Pri tem negativni predznak (-) v en(11.29) pomeni, da se toplota dQ odvaja iz vodnika oz. vodnik se hladi. Obratno, pozitivni predznak (+) v en(11.29) pomeni, da se toplota dQ dovaja v vodnik oz. vodnik se greje.